**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Eficiência do uso da água e resposta termal da cultura da soja
submetida a diferentes níveis de reposição hídrica**

Ailson Maciel de Almeida

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2022**

Ailson Maciel de Almeida
Engenheiro Agrônomo

**Eficiência do uso da água e resposta termal da cultura da soja submetida
a diferentes níveis de reposição hídrica**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Almeida, Ailson Maciel de

Eficiência do uso da água e resposta termal da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica / Ailson Maciel de Almeida - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

74 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Biometria 2. Déficit hídrico 3. *Glycine max* 4. Irrigação 5. Resposta termal I.
Título

A minha família

Meus Pais: Alexandre e Maria do Socorro

Meus Irmãos: Vanda, Vando, Alex e Edson

Minha Avó: Maria das Dores (*In Memoriam*)

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me permitido caminhar aqui, nunca deixando que eu perca a minha fé.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, pela acolhida e oportunidade de melhorar a minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, pela confiança em mim depositada, incentivo e respeito durante o período de estudos na ESALQ/USP. A orientação, conselhos e convivência durante estes anos fizeram dele mais do que um professor, mas um amigo.

Ao Prof. Dr. Sérgio Nascimento Duarte, pelos conselhos, amizade e apoio durante este período de estudos, que foram muito importantes nesta fase da minha vida acadêmica. Seus conselhos e amizade foram com certeza fundamentais para a minha chegada até aqui.

Aos amigos Timóteo Barros, Jéfferson Costa, irmãos de pesquisa que a vida me deu, que foram essenciais com seus conselhos e mão amiga na elaboração deste trabalho.

Aos amigos Carlos Quiloango, Ângelo Azevedo, Diego José, José Eustáquio (Juninho) pela amizade do dia-a-dia, colaboração na condução da fase experimental deste trabalho e por deixar mais leve a caminhada acadêmica.

Aos amigos Elizabeth Carnevisks, Asdrubal Farias, Maria Alejandra, Alex Nunes, Débora Pantojo, Marcos Amaral, Ana Sátiro e Otávio Neto pela amizade, conselhos e contribuição no meu dia a dia em Piracicaba.

Aos meus colegas de orientação Nathalia Lopes, Alex Nunes, Marcos Amaral, Lucas Santos, Isabela, Alice Gundim, Ana Carolina e Flavio pela convivência respeitosa e companheirismo. Aos amigos de pós-graduação, João Paulo Débora Pantojo, Artur Carniato, Jefferson Vieira, Wagner Wolff, Wagner Ávila, Adriano Biccioni, Brenda Pinheiro, Daniele Moraes, Juliana, Thais, Tércio, Larissa Bretas, Tibério Feitosa, Álex Bordignon, Leonardo Leite, Rogério Lavanholi, Jéssica Garcia, Fernanda Lamede, Luiz Sobenko, Bruno Araújo, Rony, José Leôncio, Éder Duarte, Luiz Carvalho, Yesid Mariño, Pedro Garcia, Eusímio Felisbino, Daniel Veloso e Jhonathan V. Lizcano. Aos demais amigos da pós-graduação não citados, agradeço a convivência cordial e amistosa.

Agradeço a estagiária vinda da UFRPE Kátia Ribeiro pelo grande auxílio na condução do experimento e convívio sadio.

Aos membros da banca de qualificação Prof. Dr. Sérgio N. Duarte, Prof. Dr. Fernando Campos Mendonça e Prof. Dr. Raoni Wainer Duarte Bosquilia, pela compreensão e paciência durante a realização do exame, bem como, pelas contribuições, considerações e conselhos acerca deste trabalho, me fizeram crescer profissionalmente. Também agradeço aos demais professores do Departamento de Biossistemas, sobretudo, a Profa. Dra. Patrícia Angélica Alves Marques, ao Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel, e Prof. Dr. José Antonio Frizzzone, pela convivência cordial e experiências compartilhadas.

Aos meus pais, Alexandre Ribeiro e Socorro Maciel, que criaram aos meus irmãos e a mim com amor, dignidade e respeito, sempre ensinando o real valor das coisas e que nada nesta vida vem por acaso. Tenho certeza que sem a educação e confiança que eles depositaram em mim ao longo destes anos, jamais teria trilhado este caminho.

Aos meus irmãos, Vanda, Vando, Alex e Edson, pela amizade e respeito, meus primeiros e eternos amigos, agradeço pela amizade, incentivo e confiança a mim depositados, e por incondicionalmente, estarem ao meu lado, bem como, agradeço a minha sobrinha, Stefany, que sempre me alegrou e foi companheira dessa jornada nunca deixando eu me sentir só, apesar de não estar em família por muito tempo.

Aos meus parentes residentes no estado de São Paulo, sobretudo, tia Madalena, tio Valmir, tia Elisangela, tia Rosinha, tio Marcelo tio Junior (*in memorian*) e tio Jackson, sendo eles pessoas que me acolheram, acreditaram em mim e me apoiaram nesta estrada estão sempre ao meu lado, incondicionalmente.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

BIOGRAFIA

Ailson Maciel de Almeida nasceu em Garanhuns, Pernambuco, no dia 03 de outubro de 1989, criado na cidade vizinha, Paranatama, cursou o Fundamental I na Escola Estadual Narciso Correia, o Fundamental II no Colégio Municipal Dom Vital, e concluiu o ensino médio novamente na Escola Estadual Narciso Correia, concluindo o ensino médio em 2008. Em 2009, entrou na Fundação Bradesco, no curso Técnico em Agropecuária, concluindo em 2010. No mesmo ano, entrou na Universidade Federal de Pernambuco (UFRPE), na Unidade Acadêmica de Garanhuns (UAG), atualmente Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), graduando-se em 2015, ano em que entrou para o curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas da ESALQ/USP, e, dois anos depois, obteve o título de Mestre em Ciências, Área: Engenharia de Sistemas Agrícolas. No ano de 2017 ingressou no curso de Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas da ESALQ/USP, e, quatro anos depois, submeteu-se à defesa da Tese para obtenção do título de Doutor em Ciências, Área: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

A ninguém torneis mal por mal; procurai as coisas honestas, perante todos os homens.

Romanos 12:17

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Cultura da soja	17
2.2 Relações hídricas da cultura da soja	20
2.3 Estresse hídrico na cultura da soja	21
2.4 Resposta termal ao déficit hídrico.....	22
2.5 Relações biométricas da cultura da soja e Eficiência do uso da água	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 Localização e caracterização da área experimental	27
3.2 Implantação e condução do experimento	28
3.3 Irrigação	29
3.4 Monitoramento micrometeorológico.....	32
3.5 Tratamentos e delineamento experimental	33
3.6 Avaliações das respostas termais	35
3.7 Avaliações biométricas e Eficiência do uso da água.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Dados micrometeorológicos e de irrigação	39
4.2 Respostas termais.....	42
4.3 Respostas biométricas	46
4.4 Eficiência do uso da água.....	58
4.5 Relações entre as variáveis estudadas	59
5 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS.....	66

RESUMO

Eficiência do uso da água e resposta termal da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica

Dentre as estratégias utilizadas para gerenciamento da água na agricultura destaca-se a irrigação deficitária que introduz o termo Eficiência do uso da água (EUA). Existem evidências que sugerem que a irrigação deficitária pode incrementar a EUA sem ocasionar prejuízos na produtividade de diversas culturas, no entanto, a informação é limitada sobre o nível de reposição hídrica que não cause efeitos negativos na soja, assim, o presente trabalho teve como objetivos determinar o nível de reposição hídrica sob déficit que não cause danos na produtividade por área da cultura da soja, identificar o estresse hídrico através dos padrões de resposta termal do dossel das plantas de soja e verificar as relações entre o Crop Water Stress Index (CWSI) e o rendimento e entre o CWSI e a EUA. O estudo foi realizado em uma estufa na área de pesquisa da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” / Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). A cultivar de soja utilizada neste trabalho foi a TMG 7062 de crescimento semi-determinado. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados com seis blocos e oito tratamentos de níveis de irrigação. O nível de reposição hídrica de referência (L100) foi mantido ao longo do experimento na capacidade de campo. Foram avaliados as respostas termais (temperatura foliar, diferença entre a temperatura da cultura e do ar e CWSI) e biométricas (altura de plantas, peso de folhas secas, das hastes, das vagens, das sementes secas e frescas, índice de colheita, produtividade e EUA) da cultura da soja. As maiores produtividades foram encontradas para os tratamentos de maior disponibilidade hídrica. A produtividade de grãos variou de 2,7 a 5,4 toneladas ha⁻¹, para níveis de reposição hídrica entre 40 e 120%. A EUA da soja aumenta à medida que a disponibilidade hídrica no solo é reduzida, sendo que os valores de EUA encontrados variaram de 0,6 a 1,2 kg m⁻³. Houve relação entre o CWSI e a disponibilidade hídrica na cultura da soja e foram encontrados níveis de reposição hídrica deficitária em que a cultura da soja não sofreu prejuízo à produtividade da cultura.

Palavras-chave: Biometria, Déficit hídrico, *Glycine max*, Irrigação, Resposta termal

ABSTRACT

Water use efficiency and thermal response of soybean crop subjected to different water replacement levels

Among the strategies used for water management in agriculture, deficit irrigation is highlighted, which introduces the term water use efficiency (WUE). There is evidence to suggest that deficit irrigation can increase the WUE without causing losses in the productivity of several crops, however, information is limited on the water replacement level that does not cause negative effects on soybeans, thus, the present work had as objectives determine the water replacement level under a deficit that does not cause damage to productivity by soybean crop area, identify water stress through the thermal response patterns of the soybean plant canopy and verify the relationships between the Crop Water Stress Index (CWSI) and income and between the CWSI and the WUE. The study was carried out in a greenhouse in the research area of the “Luiz de Queiroz” College of Agriculture / University of São Paulo (ESALQ-USP). The soybean cultivar used in this work was TMG 7062 with semi-determined growth. The experimental design adopted was a randomized block with six blocks and eight treatments of irrigation levels. The reference water replacement level (L100) was maintained throughout the experiment at field capacity. Thermal responses (leaf temperature, difference between crop and air temperature and CWSI) and biometric responses (plants height, weight of dry leaves, stems, pods, dry and fresh seeds, harvest index, productivity and WUE) were evaluated of the soybean crop. The highest yields were found for treatments with greater water availability. Grain yield ranged from 2.7 to 5.4 Mg ha⁻¹, for water replacement levels between 40 and 120%. Soybean WUE increases as soil water availability is reduced, and the WUE values found ranged from 0.6 to 1.2 kg m⁻³. There was a relationship between the CWSI and the water availability in the soybean crop and levels of deficient water replacement were found in which the soybean crop did not suffer damage to the productivity of the crop.

Keywords: Biometrics, Water deficit, *Glycine max*, Irrigation, Thermal response

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais componentes morfológicos da cultura da soja em estágio vegetativo.	19
Figura 2 - Detalhe do ambiente protegido onde a pesquisa foi conduzida (a) e esquema de como foi depositado o solo em cada unidade experimental (b).	27
Figura 3 - Detalhes dos componentes e sensores da estação meteorológica instalada dentro da estufa experimental.	33
Figura 4 - Croqui do experimento com seis blocos e duas repetições por bloco.	34
Figura 5 - Câmera térmica utilizada no experimento.	35
Figura 6 - Exemplos de imagens obtidas com a câmera térmica nos diferentes tratamentos de níveis de reposição hídrica.	36
Figura 7 - Variação diária da temperatura média (A), da umidade relativa do ar (B) e da radiação solar (C) ao longo do ciclo da cultura da soja.	40
Figura 8 - Volumes acumulados de água (A) e volumes de água aplicados em cada irrigação (B) realizada nos diferentes tratamentos de níveis de reposição hídrica.	42
Figura 9 - Gráficos box-plot de valores de temperatura foliar (A) e de valores da diferença entre a temperatura da cultura e do ar ($T_c - T_a$) (B) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	44
Figura 10 - Gráficos box-plot de valores do Crop Water Stress Index da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%). Valores referentes a avaliação realizada na época 1 (A), valores referentes a avaliação realizada na época 2 (B), valores referentes a avaliação realizada na época 3 (C) e valores médios de CWSI nas três épocas avaliadas (D).	45
Figura 11 - Gráficos box-plot de valores de altura das plantas nas quatro épocas avaliadas (A-D) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	48
Figura 12 - Gráficos box-plot de valores de massa de folhas secas coletadas ao longo do ciclo (A), coletadas na colheita (B) e massa de folhas secas totais (C) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	50

Figura 13 - Gráficos box-plot de valores de massa das hastes (A) e das vagens (B) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	52
Figura 14 - Gráficos box-plot de valores de massa das sementes frescas (A) e sementes secas (B) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	54
Figura 15 - Gráficos box-plot de valores do índice de colheita da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	55
Figura 16 - Gráficos box-plot de valores de produtividade em g por parcela (A), em sacas por hectare (B) e em toneladas por hectare (C), da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	57
Figura 17 - Gráficos box-plot de valores de Eficiência do uso da água da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).	59
Figura 18 - Gráfico de análises das relações entre as variáveis estudadas.	60
Figura 19 - Relações entre a produtividade da cultura da soja (sacas ha ⁻¹) e o CWSI (A) e entre a Eficiência do uso da água (kg m ⁻³) e o CWSI (B).	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Soja em números (safra 2020/2021).	18
Tabela 2 - Resultados das análises química do solo para macro e micronutrientes feitas antes do plantio.....	28
Tabela 3 - Valores dos parâmetros empíricos (α , m e n), umidade residual e de saturação (θ_r , θ_s) do modelo de Van Genuchten (1980), umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e capacidade de água disponível no solo (CAD).	30
Tabela 4 - Distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação (F.V.), de acordo com o delineamento experimental adotado.	34
Tabela 5 - Resumo da análise de variância com valores de F para a temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$), para a diferença entre a temperatura da cultura e do ar ($T_c - T_a$) e para o Crop Water Stress Index (CWSI).....	43
Tabela 6 - Resumo da análise de variância com valores de F para a altura de plantas (cm) nas quatro épocas de avaliação.	47
Tabela 7 - Resumo da análise de variância com valores de F para a massa de folhas secas (g) nas duas pesagens realizadas e no total.	49
Tabela 8 - Resumo da análise de variância com valores de F para a massa de hastes e vagens (g).	51
Tabela 9 - Resumo da análise de variância com valores de F para a massa de sementes frescas e secas (g).	53
Tabela 10 - Resumo da análise de variância com valores de F para o índice de colheita (%).	55
Tabela 11 - Resumo da análise de variância com valores de F para a produtividade em g, em sacas ha^{-1} e em toneladas ha^{-1}	56
Tabela 12 - Resumo da análise de variância com valores de F para a Eficiência do uso da água (kg m^{-3}).....	58

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* L.) é uma das principais *commodities* mundial, de grande importância na nutrição humana e animal, também como fonte de bioenergia. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial com uma área plantada de aproximadamente 38,5 milhões de hectares e uma produtividade média de 3517 kg ha⁻¹, estima-se que a safra 2020-2021 seja de 135 milhões de toneladas (Companhia Nacional de Abastecimento, 2021). Na maioria das regiões produtoras do Brasil a quebra da produtividade é causada principalmente pela deficiência hídrica (Battisti e Sentelhas, 2019).

O estresse hídrico durante o crescimento da soja pode atingir reduções do rendimento entre 46 e 74% (Sentelhas et al., 2015; Battisti et al., 2018). Além disso, esses efeitos negativos podem se acentuar com o aumento da escassez da água disponível para a agricultura (Mangena, 2018). Estes problemas exigem estratégias de planejamento para a introdução de novas tecnologias que favoreçam o uso racional da água na agricultura (Blum, 2009; Coelho, 2021).

Dentro das estratégias utilizadas para gerenciamento da água na agricultura destaca-se a irrigação deficitária que introduz o termo Eficiência do uso da água ou produtividade da água (Geerts e Raes, 2009). A produtividade da água define-se como a quantidade de carbono assimilado como biomassa ou grão produzido por unidade de água usada pelo cultivo (Hatfield e Dold, 2019). Existem evidências que sugerem que a irrigação deficitária pode incrementar a produtividade da água sem ocasionar prejuízos na produtividade, por exemplo, em feijão, arroz e soja (Calvache et al., 1997; Kumar et al., 2017a; Alves et al., 2021). Porém, a informação é limitada sobre o nível de reposição hídrica que não cause efeitos negativos na soja. Assim, a introdução de vários níveis em períodos longos de estresse poderia esclarecer o nível de tolerância à seca do cultivo da soja.

Os efeitos do estresse hídrico podem ser avaliados por vários métodos tanto na planta como no solo (Petrie et al., 2019), no entanto, um dos indicadores custo-efetivos mais importantes para mensurar diretamente e em tempo real o status hídrico da planta é a temperatura do dossel das plantas (Zia et al., 2013; Biju et al., 2018; Costa et al., 2020). Esta forma de avaliação de deficiência hídrica na planta está associada ao princípio de que a redução da temperatura é proporcional à taxa de perda de água devido ao processo de resfriamento evaporativo (Petrie et al., 2019). A forma de aquisição de dados termais tem evoluído nos últimos 50 anos

(Gutiérrez et al., 2018), assim, câmeras termais estão sendo integradas ou podem ser facilmente adaptadas aos *smarthphones*. Além disso, podem apresentar boas correlações com parâmetros fisiológicos ou de produtividade (Candogan et al., 2013; Kumar et al., 2017b). A resposta termal pode ser usada para calcular índices e um dos mais usados é o Crop Water Stress Index (CWSI).

O CWSI permite interpretar de forma mais simples o status hídrico da planta (Bian et al., 2019), posto que o índice varia de 0 (não estresse) a 1 (estresse máximo). As facilidades e robustez que brinda a termometria permitiria que os agricultores tomassem melhores decisões para irrigar. Além disso, poderiam estimar possíveis quedas de rendimento da cultura da soja com certa confiabilidade.

A hipótese deste trabalho é de que as variações na temperatura foliar produto do estresse hídrico tem relação com as respostas da produtividade da água e rendimento da cultura da soja. Sendo assim, os objetivos foram: determinar o nível de reposição hídrica sob déficit que não cause danos na produtividade por área da cultura da soja, identificar o estresse hídrico por meio dos padrões de resposta termal do dossel das plantas de soja e verificar as relações entre o CWSI e o rendimento e entre o CWSI e a produtividade da água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura da soja

A soja (*Glycine max* L.) é um legume anual originário da China que foi introduzido na produção a grande escala nos Estados Unidos no século XIX (Fehr, 1980). Os teores de óleo (18%) e proteína (~40%) permitiram que a soja seja utilizada na nutrição humana e animal, em razão disso, reportou-se um incremento produtivo de 1200% nos últimos 60 anos. Os Estados Unidos, Brasil e Argentina dominam a produção global com aproximadamente 80% da oferta mundial de soja. A grande demanda da soja, principalmente da China, tem permitido um aumento progressivo da produção de soja na América Latina, nos países associados ao Mercosul (Brasil, Argentina e Paraguai) (Gazzoni e Dall'Agnol, 2018; Tanwar e Goyal, 2021).

O complexo da soja é o principal eixo do agronegócio brasileiro ocupando mais do 50% da área plantada (Defante et al., 2018). No Brasil, o cultivo é realizado em todas as regiões (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte), principalmente nos estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás. A produção de soja estimada para a safra 2020/2021 deve alcançar 135 milhões de toneladas, levando o país a ser o maior produtor mundial da oleaginosa com uma área plantada de mais de 38,5 milhões de hectares e produtividade média de 3517 kg ha⁻¹ (Companhia Nacional de Abastecimento, 2021). O Brasil superou os Estados Unidos que produziram mais de 112,5 milhões de toneladas de soja em uma área plantada de mais de 33 milhões de hectares. No ano de 2021, 37% da soja produzida no mundo (quase 363 milhões de toneladas) teve origem brasileira. O Estado de Mato Grosso é o maior produtor brasileiro de soja com quase 36 milhões de toneladas em uma área plantada de mais de 10 milhões de hectares. Em seguida, destacam-se os Estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás que no ano de 2021 produziram 19,9, 20,2 e 13,7 milhões de toneladas de soja, respectivamente. Esses quatro Estados que se destacam na produção de soja no Brasil têm juntos uma área plantada de 25,7 milhões de hectares, ou seja, 66,7% da área plantada no Brasil (Tabela 1).

Tabela 1 - Soja em números (safra 2020/2021).

Produção (milhões de toneladas)	Área plantada (milhões de hectares)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
-----Soja no mundo-----		
362,947	127,842	2839
-----Soja no Brasil (maior produtor mundial do grão) -----		
135,409	38,502	3517
-----Soja nos EUA (segundo produtor mundial do grão) -----		
112,549	33,313	3379
-----Mato Grosso (maior produtor brasileiro de soja) -----		
35,947	10,294	3492
-----Paraná-----		
19,872	5,618	3537
-----Rio Grande do Sul-----		
20,164	6,055	3330
-----Goiás-----		
13,720	3,694	3714

Fonte: EMBRAPA (2021).

A soja possui folhas trifoliadas ou compostas (Figura 1), as quais são responsáveis da fotossíntese e possuem uma estrutura em escala que protege as flores imaturas antes da antese (Mangena, 2018). A planta tem um caule ramoso, hispido, que apresenta inflorescência do tipo racemo em seu ápice em variedades de crescimento determinado (Singh, 2010). A soja é uma planta autógama, ou seja, possui flores completas; aparecem no estágio reprodutivo a partir do nó número 5 ou superior (Liu, 2012). Depois da inflorescência, a planta forma vagens, sementes e entra em maturação (Mangena, 2018). As vagens são levemente arqueadas, pilosas, compostas por duas valvas simples, de comprimento variando de 2 cm até 7 cm, que alojam uma a cinco sementes que, por sua vez, são lisas, ovais, globosas e elípticas, podem apresentar as cores amarela preta ou verde, com hilo, predominantemente marrom, preto ou cinza (Borém, 2005).

Figura 1 - Principais componentes morfológicos da cultura da soja em estágio vegetativo.

Fonte: Singh (2010)

A soja é uma planta com mecanismo de fixação de carbono do tipo C3. Porém, é uma das C3 que sofrem redução de carbono fotossintético e não possuem mecanismo de concentração de CO₂ (Mangena, 2018), diferenciando-se de outros grãos como arroz, milho e sorgo. Seu ciclo produtivo é bastante variado e depende da interação genótipo (cultivar) por ambiente (Battisti e Sentelhas, 2014). A soja é extremamente influenciada pelo fotoperíodo, assim, em dias curtos (< horas luz), a planta tende a acelerar o florescimento, podendo incidir negativamente na produtividade (Borém, 2005). Em razão disso, a latitude é um elemento importante no momento da adaptação de certos genótipos. Assim, as variedades na América se dividem em 13 grupos de maturação (Liu, 2012). No Brasil, as variedades cultivadas variam entre os grupos de maturação VI a VIII (Alliprandini et al., 2009).

As variedades de soja podem apresentar três tipos de crescimento: determinado, indeterminado e semideterminado. Predominantemente, a soja plantada no Brasil apresenta tipo determinado, que se caracteriza pelos seguintes atributos: crescimento vegetativo nulo após o florescimento, florescimento uniforme

em toda a planta, desenvolvimento de vagens no topo e na base da planta, tamanho similar das folhas e concentração de vagens no nó terminal (Machado et al., 2017).

2.2 Relações hídricas da cultura da soja

No Brasil, os produtores agrícolas geralmente visam altas produtividades desprezando o uso racional da água empregada na agricultura. Esse manejo inadequado dos recursos hídricos pode ser consequência de que na maioria das áreas irrigadas não é cobrado o volume de água aplicado e sim os custos de condução e bombeamento (Frizzzone et al., 2012). Porém, os recursos hídricos estão se tornando mais limitados devido à mudança climática o que sugere aumentar a eficiência do uso da água na agricultura para garantir principalmente a segurança alimentar (Coelho, 2021). Os efeitos negativos do desperdício da água podem levar a prejuízos econômicos e ambientais, tais como, lixiviação de agroquímicos, eutrofização de água, aumento dos custos de energia elétrica, entre outros (Frizzzone et al., 2012).

Stanhill (1986) sugere duas perspectivas para a definição da Eficiência do uso da água: hidrológica e fisiológica. Assim, hidrológicamente se define a EUA como a razão entre a produtividade e o volume de água usado, onde o volume de água corresponde a chuva e/ou irrigação (Geerts e Raes, 2009). Desde o ponto de vista fisiológico o termo EUA faz referência à razão entre a biomassa do cultivo e a perda de água da planta à atmosfera (Stanhill, 1986). Usando estas definições EUA pode ser mensurada em diferentes escalas: instantâneas a nível folha ou a nível de cultivo, porém, existem dificuldades para relacioná-las (Medrano et al., 2015). Neste sentido, a decisão do nível ao qual vai ser mensurada a EUA vão depender da facilidade ou do tipo do estudo.

A água e a energia são recursos importantes para o desenvolvimento econômico e social, bem como para a integridade ambiental, enquanto ambos são essenciais para a agricultura irrigada do Brasil e do mundo (Tarjuelo et al., 2015). Uma abordagem para melhorar a Eficiência do uso da água é substituir os sistemas de irrigação de superfície por sistemas pressurizados mais eficientes como a irrigação localizada (Pfeiffer e Lin, 2014; Kothari et al., 2019). Esta interdependência, que é muitas vezes referida como o "nexus água-energia", tem sido cada vez mais destacada como uma questão importante para futuras considerações de políticas públicas estratégicas (Soto-García et al., 2013).

A soja é uma cultura que tem o pico de exigência hídrica no momento da floração e enchimento de grãos (7 - 8 mm dia⁻¹). Dependendo do cultivar e das condições climáticas da região, o período de crescimento da soja varia de 90 a 135 dias, requerendo uma lâmina total de irrigação para fechamento do seu ciclo sem restrições hídricas de 450 a 700 mm (Doorenbos e Kassam, 1979; Ludwig et al., 2011).

Estratégias de irrigação deficitárias (ID) para aumentar a produtividade da água vem sendo empregadas em de muitas culturas de interesse agrícola (Zhang et al., 2016; Gajić et al., 2018; Yonts et al., 2018). ID é uma técnica de conservação de água que expõe as culturas a um nível específico de estresse hídrico durante uma certa fase de desenvolvimento ou durante toda a estação de crescimento sem uma redução significativa no rendimento (Lipan et al., 2019). Até a presente data, poucos são os trabalhos avaliando níveis de reposição hídrica na cultura da soja, de maneira detalhada para determinar qual seria o nível de reposição hídrica que não cause danos fisiológicos e consequentemente na produtividade para as variedades atuais de soja plantadas no Brasil.

2.3 Estresse hídrico na cultura da soja

Em função da importância econômica da soja para o Brasil. Torna-se importante o conhecimento das respostas da cultura à irrigação deficitária. Além disso, com os efeitos da mudança climática no futuro, prevê-se cenários de seca em algumas áreas ocupadas por soja (Battisti e Sentelhas, 2019). O estresse hídrico durante o crescimento da soja é a principal causa da variabilidade no rendimento de grão com reduções entre 46 e 74% (Sentelhas et al., 2015; Battisti et al., 2018).

A sensibilidade da soja ao déficit hídrico tem diferentes respostas ao estágio fenológico, intensidade e duração (Machado et al., 2017). Geralmente, as plantas de soja são mais susceptíveis ao estresse hídrico severo durante o período reprodutivo. A resposta à seca nas plantas é expressa através de mecanismos biofísicos ou químicos (Xiong et al., 2021). Assim, por exemplo, sob déficit hídrico as plantas podem incrementar a resistência estomática (Ohsumi et al., 2007), aumentar a Eficiência do uso da água (Blum, 2009) e modificar o sistema radicular para obter água de camadas de solo mais profundas (Miyazaki e Arita, 2020).

A nível morfológico as plantas de soja expostas ao déficit hídrico podem mostrar mudanças na parte aérea e na zona radicular (Hudak e Patterson, 1995). As

mudanças são mais frequentes quando as plantas são submetidas a períodos longos de seca e podem incluir redução de talos e folhas trifoliadas (Jaleel et al., 2009; Mangena, 2018). Além disso, Mesquita et al. (2020) em 48 genótipos brasileiros submetidos a irrigação deficitária reportaram diminuição do porte da planta e volume de raízes.

A deficiência hídrica a nível fisiológico produz mudanças nas trocas gasosas que acarretam variações na temperatura foliar, modificações nas estruturas fotossintéticas e pigmentos como a clorofila e carotenoides (Mangena, 2018). A redução dos pigmentos limita a transformação da energia do sol em energia química que é utilizada nas funções metabólicas. Em soja sobre estresse hídrico moderado as limitações em trocas gasosas não comprometem o PSII, portanto também não há modificações no potencial quântico e taxa de transporte de elétrons (Mesquita et al., 2020).

As mudanças morfofisiológicas produzem grandes reduções na porcentagem de floração, formação de vagens e outros componentes de rendimento (Battisti et al., 2018). As maiores quedas de produtividade ocorrem quando o estresse hídrico se apresenta na etapa reprodutiva, porque tem sido observadas taxas elevadas de abortamentos de flores (Mangena, 2018). Por outro lado, quando o estresse acontece no período de enchimento de grão o tamanho das sementes é menor devido à perda de umidade (Mangena, 2018).

2.4 Resposta termal ao déficit hídrico

O estresse hídrico se configura como um grande causador de quebras de produção de soja em regiões áridas e semiáridas ao redor do mundo (Androcioli et al., 2020). Em regiões como estas, a sazonalidade das chuvas acarreta variação da absorção de água e nutrientes, e da produtividade tanto espacialmente quanto temporalmente nas regiões produtoras (Candogan et al., 2013). Em áreas semiáridas, a detecção do status hídrico da cultura para fins de programação do manejo de irrigação é importante para a estabilidade da produtividade do cultivo (Zia et al., 2013).

O manejo da água na irrigação é diretamente influenciado pelos fatores relacionados à cultura, às condições do tempo e ao solo, os quais determinarão a lâmina de irrigação e o momento mais adequado de sua aplicação. Várias metodologias têm sido pesquisadas a fim de racionalizar o uso da água na

agricultura, tendo em vista o aumento da demanda desse recurso em vários setores da economia. Assim sendo, diversos métodos que analisam o estresse hídrico das plantas no campo têm sido empregados, dentre eles, a determinação da temperatura da cobertura vegetal, a qual tem sido utilizada para estimar índices de estresse hídrico da cultura (Fernandes, 2010).

A termometria de infravermelho se apresenta como uma técnica confiável e facilmente utilizável para a mensuração da temperatura foliar (Zia et al., 2013). Através das medições da temperatura do dossel tem se conseguido detectar estresse hídrico nas culturas (Jackson et al., 1981; Gutiérrez et al., 2018), manejar irrigação (Veysi et al., 2017) e inclusive fenotipar variedades resistentes à seca (Romano et al., 2011; Biju et al., 2018). A temperatura foliar é determinada pelo status hídrico da cultura e as condições ambientais (Jackson et al., 1981). A interação destas variáveis pode combinar-se no Crop Water Stress Index (CWSI) (Jackson et al., 1988).

A primeira evidência sobre a investigação da temperatura de plantas em relação ao meio ambiente é de Rameaux (1843), citado por Ehlers (1915), que utilizou termômetros de mercúrio para a determinação da temperatura das folhas. Posteriormente, o uso de termopares, tornou-se padrão na realização de pesquisas para a determinação da temperatura de folhas. Miller e Saunders (1923) utilizaram esses sensores em um dos primeiros relatos no qual a temperatura da folha foi registrada como menor que a do ar (Jackson et al., 1988).

Eaton e Belden (1929), Wallace e Clum (1939) seguiram a mesma linha, porém Curtis (1936, 1938) argumentou que o resfriamento, causado pela transpiração, não explicou de maneira satisfatória os resultados obtidos, sendo esses justificados por outros fatores, entre os quais medidas erradas da temperatura. Somente o trabalho de Ehrler (1973), utilizando-se de termopares mais finos de arame, foi demonstrado de forma conclusiva que a temperatura da folha poderia ser menor que a do ar, e que esta era função do déficit da pressão de vapor do ar (Jackson et al., 1988).

A estimativa da temperatura do dossel das culturas obteve um destaque especial a partir da abordagem empírica e teórica para a determinação do CWSI proposta por Idso et al. (1982) e Jackson et al. (1981), respectivamente, onde foi utilizado termômetro infravermelho para a determinação da temperatura, contrastando com as medidas individuais realizadas por termopares. De acordo com

DeJonge et al. (2015), a termometria por infravermelho é um método ideal para monitorar o estresse hídrico, pois não é destrutivo, possibilitando a medida contínua e menos dispendiosa do que muitos métodos alternativos.

O desenvolvimento tecnológico comanda a evolução de aspectos como resolução e precisão, que determinam a qualidade e custo desses equipamentos. A imagem térmica permite que informações sobre as temperaturas em uma grande área sejam obtidas simultaneamente em uma imagem. Portanto, fornece uma abordagem ideal para a coleta do grande número de temperaturas foliares individuais quando utilizadas para a determinação do CWSI (Leinonen e Jones, 2004).

Termômetros infravermelhos e câmeras termais são importantes instrumentos utilizados para estimar a temperatura da superfície da cultura atualmente. Quando operados de forma manual, podem ser portáteis ou montados (fixos), sendo auxiliados por equipamentos como tripés, plataformas ou guindastes, (Möller et al., 2007).

Para o cálculo do CWSI para uma cultura é indispensável conhecer as linhas base superior (temperatura de dossel de uma planta sob estresse hídrico) e inferior (temperatura de dossel de uma planta sob irrigação plena) (Idso, 1982). As linhas base para calcular o CWSI podem ser definidas de diversas maneiras (Bian et al., 2019). Assim, na atualidade existem métodos estatísticos, empíricos e teóricos (Jackson et al., 1988; Bian et al., 2019; Costa et al., 2020). Um dos mais utilizados é o método teórico proposto por Jackson et al. (1981) no qual as linhas base são estimadas a partir da equação do balanço de energia.

Desta maneira, o limite superior experimental representa uma condição de estresse máximo da cultura, quando os estômatos estariam completamente fechados, e o limite inferior é a medida representativa da planta sem restrição hídrica alguma (Biju et al., 2018). A posição de linha de estresse máximo pode ser determinada experimentalmente quando a umidade do solo está próxima do ponto de murcha permanente. Assim sendo, de acordo com os limites experimentais, um índice de estresse hídrico para as culturas está compreendido entre 0 (estresse hídrico nulo) e 1 (máximo estresse hídrico) (Trentin, 2010).

Quando uma cultura está sob estresse hídrico, os estômatos reduzem sua abertura, podendo chegar ao extremo do fechamento total e a transpiração diminui de modo que a temperatura da folha apresenta um determinado acréscimo (Costa,

2016). Uma planta sem estresse hídrico apresenta uma temperatura foliar de 1°C a 4°C mais baixa que a temperatura da do ambiente, e neste caso, o CWSI está perto de zero. Quando a transpiração diminui, a temperatura da folha sobe e pode ficar entre 4°C e 6°C acima da temperatura ambiente, neste caso, então, o estresse hídrico é elevado e a planta tem sua transpiração foliar fortemente reduzida e o CWSI fica mais próximo a 1 (Trentin, 2010).

O cálculo do CWSI utiliza três variáveis ambientais principais; temperatura do dossel da planta (T_c), temperatura do ar (T_a) e deficiência de pressão do vapor atmosférico (DPV). Todas essas três variáveis têm muita influência sobre a água utilizada pela planta (Alderfasi e Nielsen, 2001).

O método proposto por Jackson, foi investigado ao longo dos anos por diversos autores em diversas culturas, tais como o milho (Nielsen e Anderson, 1989; Irmak et al., 2000), soja (Candogan et al., 2013), berinjela (Çolak et al., 2015), tomate cereja (Ramírez et al., 2015), cana de açúcar (Veysi et al., 2017), alface (Adeyemi et al., 2018), entre outras.

O'Shaughnessy et al. (2012), utilizaram um total de 16 termômetros infravermelhos montados na linha lateral de um pivô central conectados a um datalogger para estimar e gravar a temperatura do dossel em um cultivo de sorgo. O autor teve como objetivo a comparação do método direto baseado na sonda de nêutrons, com o método composto por termômetros infravermelhos para a determinação do CWSI, e posteriormente desenvolver um planejamento de irrigação. Ben Gal et al. (2009), utilizaram duas câmeras termais montadas em um caminhão guindaste, 15 m acima do dossel de oliveiras sobre cinco diferentes regimes de irrigação, para investigar a utilização de imagens termais na estimativa de campo do status hídrico do solo e da cultura.

2.5 Relações biométricas da cultura da soja e Eficiência do uso da água

Chu et al (2014) mencionam que a redução da irrigação limita a absorção de nutrientes, crescimento das raízes e movimentação de reservas de carbono do tecido vegetal aos grãos. Porém, a resposta da Eficiência do uso da água pode mudar na mesma espécie dependendo do tipo de estresse hídrico ao qual a planta for submetida (Mathobo et al., 2017). Por outro lado, fatores como a intervenção humana na decisão da irrigação (Coelho, 2021), diferentes estratégias e sistemas de

irrigação (Webber et al., 2006), podem afetar os valores da Eficiência do uso da água.

Os valores de referência da Eficiência do uso da água variam entre os diferentes estudos o que também não permite ter uma ideia clara sobre as relações biométricas com a Eficiência do uso da água na cultura da soja em condições tropicais. O uso da irrigação de precisão por gotejamento, poderia esclarecer algumas dessas lacunas de conhecimento. Exemplos são dados por Blum (2009) que destaca que o uso efetivo da água implica em um máximo aproveitamento da umidade do solo para a transpiração evitando perdas de água por evaporação e drenagem.

A eficiência de uso da água a escala instantânea e de cultivo tem sido relacionada com a biomassa e a área foliar em feijão sob irrigação deficitária (Anyia e Herzog, 2004), resultando em coeficientes baixos entre 0.03 e 0.33. Por outro lado, (Mansour et al., 2016) testando tratamentos de irrigação com salinidade reportou coeficientes significativos entre a Eficiência do uso da água e o rendimento da cultura do trigo. Campos et al. (2018) estudando a cultura da soja por meio de ferramentas de sensoriamento remoto, encontraram bons índices de correlação no estágio vegetativo entre a Eficiência do uso da água e a produtividade da soja. Além disso, em experimentos de manejo de coberturas de solo em plantios de soja, se reportou uma mínima correspondência entre a eficiência de uso da água e a produtividade (Adeboye et al., 2017). Assim, as causas da variabilidade da relação de variáveis biométricas e a Eficiência do uso da água na soja não estão esclarecidas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em uma estufa (Figura 3A) na área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” unidade da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP) situada no município de Piracicaba - SP. O clima da região, pela classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, isto é, subtropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto), caracterizado por chuvas no verão e seca no inverno. A descrição das condições micrometeorológicas no interior da estufa podem ser encontradas em Costa et al. (2015) e Chaves et al. (2021).

A estufa apresentava as seguintes características: pé direito de 3,0 m, constituída de cobertura de filme plástico de polietileno transparente de 150 micras de espessura e laterais fechadas com tela tipo sombrite, com 30% de interceptação da radiação global. As unidades experimentais foram distribuídas em uma área útil de estufa de aproximadamente 160 m², e constaram de 96 caixas de fibrocimento (cimento amianto) de volume aproximado de 100 dm³ (Figura 3B), com dimensões de 60 x 45 x 40 cm (comprimento, largura e profundidade, respectivamente). As caixas foram distribuídas em quatro linhas espaçadas em 0,8 m umas das outras e com espaçamento de 0,5 m entre as caixas nas linhas, mantendo-se uma distância de 1,0 m das laterais da estufa e sendo suspensas do solo por dois blocos de concreto.

Figura 2 - Detalhe do ambiente protegido onde a pesquisa foi conduzida (a) e esquema de como foi depositado o solo em cada unidade experimental (b).

O solo utilizado para o preenchimento das caixas foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico série Sertãozinho, textura franco-arenosa. O preenchimento das 96 caixas ocorreu da seguinte maneira: alinhamento das caixas, seguido da colocação de uma camada de aproximadamente 1,0 cm de pedrisco e colocação de manta geotêxtil sobre o pedrisco, em seguida, efetuou-se o preenchimento da caixa com o solo até atingir 40 cm de profundidade.

3.2 Implantação e condução do experimento

A semeadura foi efetuada no dia 16 de dezembro de 2019 (primavera) utilizando-se sementes da cultivar de soja TMG 7062 de crescimento semi-determinado e ciclo médio para o estado de São Paulo de 110 a 134 dias. Para o plantio foram feitas amostragens de solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm e estas foram levadas para análise química. Com os resultados da análise de macro e de micronutrientes (Tabela 2), procedeu-se a correção da fertilidade química do solo, procurando-se alcançar os níveis adequados e recomendados no Boletim 100 (Raij et. al., 1997).

Tabela 2 - Resultados das análises química do solo para macro e micronutrientes feitas antes do plantio.

	B	Cu	Fe	Mn	Zn	pH	M.O.	V	m
Profundidades	mg.dm ⁻³					-	g.dm ⁻³	%	
0-20 cm	0,3375	1,275	17,75	4,825	2,1	6,15	15,75	75,25	0
20-40 cm	0,41	1,175	23	6,225	2,275	5,925	17,25	76,25	0
	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC
Profundidades	mg.dm ⁻³					mmolc.dm ⁻³			
0-20 cm	41,25	47,25	0,9	33,25	15,75	< 0,02	16,5	49,75	66,25
20-40 cm	60,5	96,5	0,9	38	20,25	< 0,02	18,5	59,15	77,65

Métodos: Boro (B) extração com água quente e determinação por colorimetria, cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe) extração com DTPA e determinação por espectrofotometria de absorção atômica pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; fósforo (P) método colorimétrico extraído com resina trocadora de íons, enxofre (S) determinação por turbidimetria e extração com fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹, potássio (K) extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica, cálcio (Ca) e magnésio (Mg) extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica, alumínio trocável (Al) método titulométrico extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹, acidez potencial (H+Al) extraído com tampão SMP. Soma de bases trocáveis (SB); Capacidade de troca de cátions (CTC); Saturação da CTC por bases (V); Saturação por Alumínio (m).

Na adubação de plantio foi utilizada a recomendação para baixas exigências de fósforo e potássio, conforme interpretação dos resultados das análises de solo. As quantidades aplicadas foram de 300 g por parcela dos fertilizantes fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio, em fundação. Para as adubações de cobertura foram utilizados fertilizantes foliares com mix de macro e micronutrientes aplicados via fertirrigação.

O controle de plantas invasoras foi realizado de forma manual durante todo o ciclo da cultura e o controle fitossanitário foi realizado com o método químico, utilizando-se produtos para algumas pragas (ácaro e lagarta-da-soja) e doenças (ferrugem) aplicados por quimigação.

Quanto ao manejo cultural, realizou-se um raleio de plantas ajustando o espaçamento para 10 plantas por metro linear, seguindo recomendação para a cultivar da soja adotada.

3.3 Irrigação

O sistema de irrigação utilizado no experimento era composto por um reservatório de 500 L, tubulação de polietileno, conjunto motobomba KSB® 500N, um filtro de discos, quatro cabeçais com 8 saídas cada, para controle da vazão do sistema. Em cada parcela, havia dois gotejadores do tipo botão de 8 L h⁻¹. Para uma melhor distribuição da água aplicada e melhor formação da área molhada, foram instalados divisores de descarga com duas hastes.

O sistema de irrigação era controlado por meio de um microcontrolador em plataforma arduino, consistindo em um arduino mega, oito relés que acionavam 32 válvulas solenoides, adicionalmente, um relé para acionar o conjunto motobomba e outro que acionava uma válvula solenoide ligada a saída de retorno do sistema para o reservatório.

Antes do início do experimento, o sistema de irrigação foi avaliado para se verificar a vazão dos gotejadores, o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), bem como a vazão total do sistema. O valor do CUC do sistema foi de 95,5 %, o valor do CUD para o sistema foi de 86,1 %, a vazão média dos gotejadores foi de 7,8 L h⁻¹ e a vazão do sistema foi de 1,5 m³ h⁻¹, dessa forma, o desempenho do sistema foi considerado excelente.

Para caracterização físico-hídrica do solo, foram coletadas amostras indeformadas no início do trabalho. Para isto, foi utilizado um trado para amostra indeformada com cilindros de aço inox de 50 cm³. As amostras foram retiradas em três profundidades, 15, 25 e 35 cm, representando as camadas de 0-20, 20-30 e 30-40 cm, respectivamente. As características físico-hídricas do solo e os valores dos parâmetros necessários para a utilização do modelo de Van Genuchten (1980) determinadas a partir das análises laboratoriais podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros empíricos (α , m e n), umidade residual e de saturação (θ_r , θ_s) do modelo de Van Genuchten (1980), umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e capacidade de água disponível no solo (CAD).

Profundidade	θ_r	θ_s	α	m	n	θ_{cc}	θ_{pmp}	CAD
cm	cm ³ cm ⁻³		KPa ⁻¹			cm ³ cm ⁻³		mm
0-20	0,095	0,422	1,3461	0,1802	2,7275	0,225	0,102	24,60
20-30	0,0845	0,4121	1,571	0,1649	2,5001	0,226	0,098	12,80
30-40	0,123	0,375	1,128	0,2758	1,5638	0,242	0,133	10,90

Para a realização do manejo da irrigação foram instalados três tensiômetros em três profundidades (15, 25 e 35 cm) em cada parcela do tratamento L100 (nível de reposição hídrica de 100 % da CAD do solo, θ_{cc}). As leituras da tensão de água no solo foram feitas com tensímetro digital de punção devidamente calibrado em um manômetro de coluna de mercúrio. Para realização dos cálculos do manejo da irrigação, utilizou-se uma planilha desenvolvida no software Microsoft Excel® e utilizada em outros trabalhos como Costa et al. (2020b).

Os dados coletados com o tensímetro digital foram transformados em potencial matricial da água no solo (ψ_m) utilizando a Equação 1, na qual desconta-se a pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro para cada profundidade medida.

$$\Psi_m = L_t - h_c \quad (1)$$

Em que: ψ_m é o potencial matricial da água no solo, (KPa); L_t é a tensão da água no solo (leitura do tensiômetro), (KPa); e h_c é a pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro, (KPa).

Depois de calculado o potencial matricial da água no solo (ψ_m) calculou-se a média entre as leituras nas parcelas, obtendo-se uma leitura para cada camada do solo. A partir destes valores, foi estimada a umidade (θ), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, através do modelo proposto por Van Genuchten (1980), que relaciona os valores de ψ_m com os respectivos valores de θ , utilizando os parâmetros característicos deste solo (Equação 2).

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha \psi_m)^n)^m} \quad (2)$$

Em que: $\theta(\psi_m)$ é a umidade volumétrica em função do potencial mátrico, ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_r – umidade volumétrica residual do solo, ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_s é a umidade volumétrica do solo saturado, ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); m e n são os parâmetros de regressão da equação, adimensionais; α é o parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, (KPa^{-1}); e ψ_m é o potencial mátrico, (KPa).

Com os dados de umidade estimados e a caracterização físico-hídrica do solo de cada camada, as lâminas de irrigação necessárias para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo foram calculadas por meio da Equação 3.

$$L_x = \theta_{cc} - (\theta Z) \quad (3)$$

Em que: L_x é a lâmina necessária para elevar a umidade da camada x até a capacidade de campo, (mm); θ_{cc} é a umidade volumétrica na capacidade de campo para a camada x , ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ é a umidade volumétrica atual estimada para a camada x , ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); e Z é a espessura da camada x , (mm).

A soma das lâminas necessárias de cada camada resultou na lâmina de irrigação a ser aplicada, conforme a Equação 4.

$$LI = L_{0-20} + L_{20-30} + L_{30-40} \quad (4)$$

Em que: LI é a lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, (mm); L_{0-20} é a lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0-20 cm até a capacidade de campo, (mm); L_{20-30} é a lâmina necessária para elevar a umidade da camada 20 a 30 cm até a capacidade de

campo, (mm); e L_{30-40} é a lâmina necessária para elevar a umidade da camada 30 a 40 cm até a capacidade de campo, (mm).

Por fim, calculou-se o tempo de irrigação necessário usando a Equação 5. Para este cálculo, adotou-se a vazão do sistema de 8 L h^{-1} para cada caixa, área de superfície do solo de $0,27 \text{ m}^2$ e eficiência de aplicação do sistema de 95%.

$$TI = \frac{LI \cdot A}{Q \cdot Ea} \cdot 60 \quad (5)$$

Em que: TI é o tempo de irrigação, (minutos); LI é a lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, (mm); A é a área de solo da parcela, (m^2); Q é a vazão do sistema, (L h^{-1}); e Ea é a eficiência de aplicação, (decimal).

3.4 Monitoramento micrometeorológico

Os dados micrometeorológicos foram monitorados no interior da estufa por intermédio de uma estação meteorológica instalada no centro do vão onde estão alocadas as parcelas experimentais. Foram monitorados a densidade de fluxo (W.m^{-2}) da radiação solar global (Q_g) por meio de piranômetro de fotodiodo de silício (LI200X - Campbell Sci.), da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA, $\lambda = 400\text{--}700 \text{ nm}$), com o uso do sensor quântico (LI190SB - Campbell Sci.) e da radiação líquida (R_n), utilizando-se de saldo radiômetro (NRLITE - Campbell Sci.). A temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%), por meio do sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.), bem como a pressão atmosférica (em kPa) com o barômetro (Vaissala CS 106 - Campbell Sci.). Os sensores (Figura 3) foram instalados acima do dossel da cultura, a aproximadamente 1,6 m de altura, ligados a um datalogger modelo CR1000 - Campbell Sci, armazenando os dados em intervalos de 15 minutos (valores médios).

Figura 3 - Detalhes dos componentes e sensores da estação meteorológica instalada dentro da estufa experimental.

3.5 Tratamentos e delineamento experimental

As parcelas (unidades experimentais) consistiram em uma caixa contendo seis plantas, sendo adotado um espaçamento aproximado de 10 plantas por metro linear. O delineamento adotado foi o delineamento em blocos casualizados (DBC), com seis blocos e oito tratamentos de níveis de irrigação (Figura 4). Os níveis de reposição hídrica foram baseados na Capacidade de Água Disponível (CAD) do solo, observada via análise física do solo, em que L120 é a reposição até 120% da CAD do solo, L100 é a reposição até 100% da CAD do solo, L90 é a reposição até 90% da CAD do solo, L80 é a reposição até 80% da CAD do solo, L70 é a reposição até 70% da CAD do solo, L60 é a reposição até 60% da CAD do solo, L50 é a reposição até 50% da CAD do solo e L40 é a reposição até 40% da CAD do solo. A lâmina de irrigação foi definida para o tratamento de 100% a partir de leituras dos tensiômetros. Para os demais tratamentos foi calculada a fração proporcional a partir do tratamento de L100.

Figura 4 - Croqui do experimento com seis blocos e duas repetições por bloco.

Na Tabela 4 é apresentada a distribuição dos graus de liberdade para as fontes de variação experimental (blocos, níveis de reposição hídrica e resíduo). Os pressupostos de normalidade de variância foram testados por meio do teste de Shapiro e Wilk (1965) e homocedasticidade pelo teste de Levene (1960). Para a análise de variância dos resultados, foi utilizado o software R® e as variáveis que tiveram valores de F significativo a 5% de probabilidade foram submetidas à análise de regressão e ao teste de Tukey a 5% de probabilidade. Também foi avaliada a ocorrência de respostas atípicas, utilizando gráficos do tipo box-plot criados no software R®.

Tabela 4 - Distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação (F.V.), de acordo com o delineamento experimental adotado.

Fontes de variação (F.V.)	Graus de liberdade (G.L.)
Blocos	5
Níveis de reposição hídrica	7
Resíduo	35
Total	47

3.6 Avaliações das respostas termais

Para avaliação da temperatura foliar utilizou-se a câmera térmica modelo FLIR One Pro (Figura 5). Essas avaliações foram realizadas acima do dossel, em folhas completamente expostas ao sol e com ângulo de inserção em relação ao plano vertical semelhante, em três repetições por parcela, sendo realizadas em dias de céu claro e em torno de meio-dia (horário que a radiação incidente apresenta pouca variação).

Figura 5 - Câmera térmica utilizada no experimento.

As avaliações utilizando a câmera térmica foram realizadas em três épocas ao longo do ciclo da cultura da soja, sendo elas: Fase vegetativa, aos 20 DAE (dias após a emergência), 35 DAE, em floração, e em 50 DAE, na fase de frutificação. Todas as plantas submetidas aos tratamentos foram fotografadas e as imagens foram analisadas no software FLIR Tools (Figura 6). A partir dos dados coletados foram feitas as médias de temperatura por planta nos diferentes tratamentos.

A análise dentro do programa foi feita selecionando-se uma área da imagem considerada como uma porção representativa do dossel. Depois de selecionar essa área, calculou-se, através do mesmo software (FLIR Tools), a temperatura média da planta com base nos valores de temperatura desses pixels. Assim, utilizando os valores de temperatura média das parcelas de cada tratamento foram calculadas as médias de temperatura por parcela.

Figura 6 - Exemplos de imagens obtidas com a câmera térmica nos diferentes tratamentos de níveis de reposição hídrica.

Com os dados de temperatura foliar e os dados micrometeorológicos calculou-se o *Crop Water Stress Index* (CWSI). Os dados micrometeorológicos foram obtidos na estação meteorológica instalada no interior da estufa. O CWSI foi calculado de acordo a metodologia de Jackson, Kustas e Choudhury (1988), conforme a Equação 1:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LBI}}{(T_c - T_a)_{LBS} - (T_c - T_a)_{LBI}} \quad (9)$$

em que:

T_c é a temperatura do dossel;

T_a é a temperatura média do ar;

$(T_c - T_a)_{LBI}$ é a linha base de temperatura inferior, que corresponde à diferença de temperatura do ar para uma cultura sem déficit hídrico, quando a resistência para a perda de água é nula ou correspondente a temperatura da superfície molhada;

$(T_c - T_a)_{LBS}$ é a linha base de temperatura superior, correspondente a diferença de temperatura do ar quando a resistência para a perda de água do dossel aumentar sem limites ou correspondente a temperatura da superfície seca.

As linhas base de temperatura, inferior e superior, foram determinadas por meio da mínima e da máxima diferença entre a temperatura da cultura observada (T_c) e a temperatura média do ar (T_a) na data e hora de coleta dos dados. Para aplicação da temperatura do dossel no cálculo do CWSI seguiu-se a metodologia de Meron et al., 2013 que sugerem descartar os valores que apresentem diferenças entre a temperatura da cultura e a do ar ($T_c - T_a$) acima de 7 °C e abaixo de -10 °C.

3.7 Avaliações biométricas e Eficiência do uso da água

Para as avaliações biométricas, foram consideradas seis plantas por vaso. A altura das plantas foi avaliada em quatro épocas ao longo do ciclo da cultura da soja. Utilizou-se uma trena graduada e foi considerada a altura máxima vertical da superfície do solo até o final de cada folha, em cada época de avaliação.

As plantas foram divididas em seus componentes vegetativos e reprodutivos para processar a secagem, em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C durante 72 horas. A soma dos valores da massa seca das hastes, das vagens (sem as sementes) e das sementes resultou no rendimento biológico da cultura. O resultado expressa o acúmulo de matéria seca na parte aérea, excluindo as folhas. A pesagem dos componentes vegetativos e reprodutivos foi feita em uma balança de precisão.

A colheita foi efetuada aos 115 DAE, com os dados do rendimento biológico da cultura e os valores da pesagem das sementes secas calculou-se o índice de colheita da cultura (IC) utilizando a Equação 10.

$$IC = \frac{P_s}{R_B} 100 \quad 10)$$

Em que: IC é o índice de colheita, (%); P_s é a massa seca das sementes, (g); e R_B é o rendimento biológico da cultura (g).

Para o cálculo da produtividade (g, sacas ha^{-1} e toneladas ha^{-1}) obtida em função dos tratamentos de níveis de reposição hídrica considerou-se um valor de 13% de umidade na massa dos grãos, que é a umidade na qual os grãos são

comercializados geralmente. Os dados obtidos depois da colheita manual dos grãos em cada parcela seguido da secagem e pesagem, foram convertidos em valores de produtividade considerando uma área da parcela de 0,27 m². A produtividade foi calculada por meio da Equação 11.

$$P_{gp} = \frac{\left(\frac{P_g}{A}\right)}{10} \quad (11)$$

Em que: P_{gp} é a produtividade média de grãos, (kg ha⁻¹); P_g é a produtividade de grãos das parcelas, (g m⁻²); e A é a área da unidade experimental (0,27 m²).

Os valores de matéria seca foram convertidos para sacas (1 saca = 60 kg) por hectare (sacas ha⁻¹) e para toneladas (1 Ton = 1000kg) por hectare (Ton ha⁻¹) por intermédio das Equações 12 e 13:

$$P_{gs} = \frac{P_{gp}}{60} \quad (12)$$

Em que: P_{gs} é a produtividade média de grãos, (sacas ha⁻¹); P_{gp} é a produtividade média de grãos, (kg ha⁻¹); e 60 é o fator de conversão.

$$P_{gt} = \frac{P_{gp}}{1000} \quad (13)$$

Em que: P_{gt} é a produtividade média de grãos, (toneladas ha⁻¹); P_{gp} é a produtividade média de grãos, (kg ha⁻¹); e 1000 é o fator de conversão.

A eficiência do uso da água para a produção de biomassa foi estimada através da razão entre a produção de grãos na cultura e o volume total de água aplicado em cada parcela, conforme a Equação 14:

$$EUA = \frac{P}{V_t} \quad (14)$$

Em que: EUA é a Eficiência do uso da água, (kg m⁻³); P é a produção de grãos, (g); e V_t é o volume de água total aplicado, (L).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados micrometeorológicos e de irrigação

Os dados micrometeorológicos diários obtidos ao longo do ciclo da cultura da soja são apresentados na Figura 7. A temperatura média diária ao longo do período do experimento ficou entre 20 e 30 °C (Figura 7A) que é a faixa ótima para o bom desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura da soja (Garcia et al., 2007). A umidade relativa do ar média variou entre 60 e 100% (Figura 7B) ao longo do período do experimento e a radiação solar média diária apresentou valores que ficaram em uma faixa próxima aos 13 MJ m⁻² dia⁻¹, oscilando entre 3 e 23 MJ m⁻² dia⁻¹ ao longo do ciclo da cultura avaliada (Figura 7C).

Os dados micrometeorológicos, principalmente a temperatura média diária, atestam uma condição ideal para que a cultura possa expressar o seu potencial produtivo e, assim, ter respostas termais e biométricas passíveis de comparações com cultivos em campo aberto. Alguns resultados de pesquisa demonstram a possibilidade de utilização de estufa para caracterização biométrica e padrões de resposta termal em diversas culturas como café (Costa et al., 2018; Costa et al., 2019; Costa et al., 2020a), cana-de-açúcar (Leal et al., 2017; Santos et al., 2019), gramados (Tapparo et al., 2019), pimenta (Chaves et al., 2022), dentre outras.

Figura 7 - Variação diária da temperatura média (A), da umidade relativa do ar (B) e da radiação solar (C) ao longo do ciclo da cultura da soja.

Os volumes de água acumulados e aplicados em cada irrigação realizada nos diferentes tratamentos de níveis de reposição hídrica são apresentados na Figura 8. Os volumes acumulados de água (Figura 8A) aplicados nos diferentes tratamentos de níveis de reposição hídrica variaram entre 101 (tratamento L40) e 304 L parcela⁻¹ (tratamento L120). Nos tratamentos L50, L60, L70, L80, L90 e L100 os volumes acumulados de água aplicados foram 127, 152, 177, 203, 228 e 253 L parcela⁻¹, respectivamente.

Os volumes de água aplicados em cada irrigação (Figura 8B) realizada nos diferentes tratamentos de níveis de reposição hídrica variaram entre 0,01 e 8,23 L parcela⁻¹. O número de irrigações realizadas ao longo do ciclo da cultura da soja nos diferentes tratamentos foi de 82, sendo destes, quatro irrigações de estabelecimento até os 10 dias após o plantio (DAP) (nível de 100% da reposição da CAD). O volume médio de água aplicada em cada irrigação no tratamento de referência L100 foi de 3,1 L parcela⁻¹.

Os volumes de água que foram aplicados no tratamento de referência (L100) foram suficientes para suprirem as necessidades hídricas das plantas. De acordo Doorenbos e Kassam (1994), a necessidade de água da cultura da soja durante todo o ciclo, para que expresse o seu máximo potencial produtivo, varia de 450 a 800 mm dependendo do clima, do manejo cultural e da variedade empregada. Nas condições experimentais (cultivo em estufa e uso da cultivar TMG 7062) o consumo hídrico da cultura da soja mostrou-se maior do que a faixa média apresentada.

Figura 8 - Volumes acumulados de água (A) e volumes de água aplicados em cada irrigação (B) realizada nos diferentes tratamentos de níveis de reposição hídrica.

4.2 Respostas termais

Na análise de variância da temperatura foliar verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica, conforme a Tabela 5. Para as variáveis $T_c - T_a$ e CWSI também se verificou que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância com valores de F para a temperatura foliar (°C), para a diferença entre a temperatura da cultura e do ar ($T_c - T_a$) e para o Crop Water Stress Index (CWSI).

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Temperatura foliar-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	212,87	30,41	18,23*
Blocos	5	62,31	12,46	7,47*
Resíduo	35	58,39	1,67	
Total	47	333,57		
----- ($T_c - T_a$) -----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	212,87	30,41	18,23*
Blocos	5	62,31	12,46	7,47*
Resíduo	35	58,39	1,67	
Total	47	333,57		
----- CWSI (média) -----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	1,19	0,17	17,96*
Blocos	5	0,35	0,07	7,33*
Resíduo	35	0,33	0,01	
Total	47	1,88		
----- CWSI (época 1) -----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	0,90	0,13	10,28*
Blocos	5	0,25	0,05	3,97*
Resíduo	35	0,44	0,01	
Total	47	1,59		
----- CWSI (época 2) -----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	1,55	0,22	17,76*
Blocos	5	0,47	0,09	7,49*
Resíduo	35	0,44	0,01	
Total	47	2,45		
----- CWSI (época 3) -----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	1,03	0,15	41,33*
Blocos	5	0,10	0,02	5,87*
Resíduo	35	0,12	0,01	
Total	47	1,26		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

As plantas submetidas aos tratamentos de menor nível de reposição hídrica (40, 50, 60 e 70%) apresentaram os maiores valores de temperatura foliar quando comparadas as plantas submetidas aos tratamentos de maior nível de reposição

hídrica (80, 90, 100 e 120%). As médias de temperatura foliar obtidas para os tratamentos L40, L50, L60, L70, L80, L90, L100 e L120 foram de 38,1, 37,4, 37,5, 35,7, 34,9, 32,8, 32,9 e 32,9 °C, respectivamente (Figura 10A).

As diferenças entre a temperatura da cultura e a temperatura do ar ($T_c - T_a$) foram de 2,5, 1,8, 1,9 e 0,1 °C (valores positivos) para os tratamentos L40, L50, L60 e L70, respectivamente. Para os tratamentos L80, L90, L100 e L120, os valores de $T_c - T_a$ foram de -0,7, -2,8, -2,7 e -2,8 °C (valores negativos), respectivamente (Figura 10B). Os valores positivos de $T_c - T_a$ indicam que a temperatura da folha estava maior que a temperatura do ar e os valores negativos indicam o contrário.

Singh et al. (2021) afirmam que $T_c - T_a$ tende a aumentar com o aumento do déficit de água no solo quando esse déficit atinge valores maiores que 160 mm para a soja e que $T_c - T_a$ e o déficit de água não estão relacionados até que um limite de esgotamento da água do solo seja atingido, assim, esses valores limites de déficit hídrico podem ser considerados como indicadores para iniciar a irrigação e alcançar uma gestão eficiente da água na agricultura.

Figura 9 - Gráficos box-plot de valores de temperatura foliar (A) e de valores da diferença entre a temperatura da cultura e do ar ($T_c - T_a$) (B) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

Quanto aos dados do CWSI (Figura 10), observou-se que as plantas submetidas aos níveis de reposição hídrica de 40, 50 e 60% apresentaram maiores valores de CWSI, quando comparadas com as plantas submetidas aos demais tratamentos, indicando estresse hídrico alto nos tratamentos de menores níveis de reposição hídrica. Os valores de CWSI encontrados para os tratamentos L40, L50,

L60, L70, L80, L90, L100 e L120 foram 0,7, 0,7, 0,7, 0,5, 0,5, 0,3, 0,3 e 0,3, respectivamente, indicando que na medida em que se aumenta os níveis de reposição hídrica, os valores de CWSI e, conseqüentemente, a severidade do estresse hídrico diminuem.

Figura 10 - Gráficos box-plot de valores do Crop Water Stress Index da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%). Valores referentes a avaliação realizada na época 1 (A), valores referentes a avaliação realizada na época 2 (B), valores referentes a avaliação realizada na época 3 (C) e valores médios de CWSI nas três épocas avaliadas (D).

Resultados semelhantes foram encontrados em estudos do CWSI da soja por Nielsen (1990), Candogan et al. (2013), Anda et al. (2019) e Anda et al. (2020). Dold et al. (2017) estudando a resposta termal da cultura da soja em função de padrões sazonais de chuva, verificaram que o CWSI da soja aumentou com os níveis de umidade do solo muito seco e úmido, indicando que essa cultura é afetada negativamente pela ausência e pelo excesso de água no solo. O'Shaughnessy et al. (2011) demonstraram que o CWSI calculado a partir de imagens de termografia infravermelha está relacionado às medições de potencial de água na folha da cultura

da soja tomadas em parcelas de tratamentos irrigados diferencialmente. As medições do potencial da água nas folhas diminuíram à medida que o CWSI aumentou após os tratamentos de irrigação serem estabelecidos e mantidos.

4.3 Respostas biométricas

Na análise de variância da altura de plantas na época 1 verificou-se que não houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica, conforme a Tabela 6. Na análise de variância da altura de plantas na época 2 verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade apenas da fonte de variação blocos. E nas análises de variância da altura de plantas na época 3 e 4 verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica.

Tabela 6 - Resumo da análise de variância com valores de F para a altura de plantas (cm) nas quatro épocas de avaliação.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Altura de plantas (época 1)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	6,52	0,93	0,31 ^{ns}
Blocos	5	16,86	3,37	1,10 ^{ns}
Resíduo	35	106,84	3,05	
Total	47	130,22		
-----Altura de plantas (época 2)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	75,97	10,85	1,53 ^{ns}
Blocos	5	133,40	26,68	3,77 [*]
Resíduo	35	247,87	7,08	
Total	47	457,25		
-----Altura de plantas (época 3)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	752,70	107,53	6,48 [*]
Blocos	5	237,16	47,43	2,86 [*]
Resíduo	35	581,10	16,60	
Total	47	1570,96		
-----Altura de plantas (época 4)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	2134,50	304,93	14,82 [*]
Blocos	5	415,10	83,02	4,04 [*]
Resíduo	35	720,00	20,57	
Total	47	3269,70		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

Os valores médios de altura de plantas obtidos nas quatro épocas avaliadas podem ser vistos na Figura 11A-D. Nas épocas 3 e 4 (Figura 11C e Figura 11D) observa-se que os tratamentos L40 e L50 foram os que apresentaram os menores valores de altura de plantas e o tratamento L120 foi o que apresentou as maiores médias de altura da cultura da soja. Na época 3 a altura de plantas para os tratamentos L50 e L120 foram 58,1 e 71,1 cm, respectivamente. Na época 4 a altura de plantas para os tratamentos L40 e L120 foram 71,4 e 89,5 cm, respectivamente.

Corroborando com esses resultados, Doss e Thurlow (1974) afirmaram que as taxas médias de crescimento da cultura da soja variam de 0,05 a 0,84 cm dia⁻¹, dependendo da quantidade de água disponível no solo e que os valores de altura de plantas de soja são aumentados pela irrigação.

Figura 11 - Gráficos box-plot de valores de altura das plantas nas quatro épocas avaliadas (A-D) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

Na análise de variância de folhas secas (pesagem 1) verificou-se que não houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica, conforme a Tabela 7. Na análise de variância de folhas secas (pesagem 2) verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade apenas da fonte de variação níveis de reposição hídrica. E na análise de variância de folhas secas totais verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica.

Tabela 7 - Resumo da análise de variância com valores de F para a massa de folhas secas (g) nas duas pesagens realizadas e no total.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Folhas secas (pesagem 1)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	4229,00	689,88	0,99 ^{ns}
Blocos	5	8145,00	1628,94	2,35 ^{ns}
Resíduo	35	24306,00	694,45	
Total	47	37280,00		
-----Folhas secas (pesagem 2)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	15826,00	2260,85	4,23 [*]
Blocos	5	3573,00	714,53	1,34 ^{ns}
Resíduo	35	18715,00	534,71	
Total	47	38113,00		
-----Folhas secas (total)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	18239,00	2605,59	5,04 [*]
Blocos	5	11513,00	2302,51	4,46 [*]
Resíduo	35	18083,00	516,66	
Total	47	47835,00		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

As médias das massas de folhas secas coletadas em cada tratamento de níveis de reposição hídricas em diferentes períodos do ciclo da cultura da soja podem ser vistas na Figura 12A-C. O valor médio de massa de folhas secas totais foi maior no tratamento L120 e menor no tratamento L40, com médias de 165,6 e 106,4 g, respectivamente.

Figura 12 - Gráficos box-plot de valores de massa de folhas secas coletadas ao longo do ciclo (A), coletadas na colheita (B) e massa de folhas secas totais (C) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

Na análise de variância da massa das hastes verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica, conforme a Tabela 8. Na análise de variância da massa das vagens verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade apenas da fonte de variação níveis de reposição hídrica.

Tabela 8 - Resumo da análise de variância com valores de F para a massa de hastes e vagens (g).

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Massa das hastes-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	23961,00	3424,00	15,94*
Blocos	5	3118,00	623,50	2,90*
Resíduo	35	7516,00	214,70	
Total	47	34595,00		
-----Massa das vagens-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	15451,00	2350,15	10,48*
Blocos	5	26533,50	530,71	2,37 ^{ns}
Resíduo	35	7852,20	224,35	
Total	47	26958,80		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

A massa das hastes observada diminui a medida que se diminui o nível de reposição hídrica (Figura 13A) e a massa das vagens observada também foi menor nos tratamentos com menor nível de reposição hídrica (Figura 13B). A massa das hastes nos tratamentos L120, L100 e L90 foi de 129,9, 120,0 e 118,5 g, respectivamente. Nos tratamentos de menor nível de reposição hídrica (L40 e L50), as médias de massa das hastes observadas foram de 68,7 e 69,3 g. A massa das vagens nos tratamentos L120 e L100 foi de 95,1 e 97,7 g e nos tratamentos L40 e L50 os valores observados de massa das vagens foram de 46,8 e 50,8 g.

Figura 13 - Gráficos box-plot de valores de massa das hastes (A) e das vagens (B) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

Na análise de variância da massa de sementes frescas verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica, conforme a Tabela 9. Na análise de variância da massa de sementes secas observou-se que também houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das duas fontes de variação.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância com valores de F para a massa de sementes frescas e secas (g).

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Massa de sementes frescas-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	56207,00	8029,50	4,44*
Blocos	5	26175,00	5234,90	2,90*
Resíduo	35	63269,00	1807,70	
Total	47	145650,00		
-----Massa de sementes secas-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	50953,00	7279,00	4,41*
Blocos	5	24160,00	4832,10	2,93*
Resíduo	35	57787,00	1651,00	
Total	47	132900,00		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

A massa de sementes frescas da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica foi maior no tratamento L100 com valor médio de 223,1 g e menor no tratamento L40 com valor médio de 118,4 g (Figura 14A). Observou-se que para a massa de sementes secas, a maior média também foi obtida no tratamento L100 com valor de 213,4 g e a menor média observada foi no tratamento L40 com valor de 113,3 g (Figura 14B).

De acordo Gava et al. (2017) o rendimento da massa de grãos é prejudicado pelo déficit hídrico e a irrigação na cultura da soja permite incrementos de produtividade. Quanto ao excedente hídrico, os autores afirmam que o excesso pode não ser prejudicial, dependendo do tipo de solo e indicam a possibilidade de se aplicar lâminas de irrigação até 50% maiores que a lâmina de referência, sem causar danos às plantas.

Estudando a resposta da cultura da soja em função de irrigação limitada, Schlegel et al. (2016) verificaram que o rendimento de grãos de soja foi 16% maior no tratamento com 254 mm de irrigação quando comparado ao tratamento com 127 mm de irrigação. Verificaram também que os níveis de irrigação de 254 e 381 mm foram semelhantes. Essas respostas são semelhantes as encontradas nessa pesquisa onde observamos que os tratamentos com níveis de irrigação acima de determinados limites não diferiram estatisticamente dos tratamentos com maiores níveis de reposição hídrica.

Figura 14 - Gráficos box-plot de valores de massa das sementes frescas (A) e sementes secas (B) da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

Na análise de variância do índice de colheita verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade da fonte de variação blocos e não houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade da fonte de variação níveis de reposição hídrica, conforme a

Tabela 10 - Resumo da análise de variância com valores de F para o índice de colheita (%).

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Índice de colheita-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	144,72	20,68	1,40 ^{ns}
Blocos	5	290,62	58,12	3,94 [*]
Resíduo	35	516,35	14,75	
Total	47	951,69		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

Os valores médios do índice de colheita variaram de 29,9 a 36,6% nos diferentes níveis de reposição hídrica, no entanto, não apresentaram diferença estatística (Figura 15). Gajić et al. (2018) estudaram o efeito do regime de irrigação no índice de colheita da soja cultivada sob diferentes condições de precipitação em clima temperado e verificaram resultados diferentes dos que foram encontrados nesta pesquisa. Os autores testaram quatro níveis de irrigação, irrigação total (L100), 65% e 40% da irrigação total (L65 e L40) e controle não irrigado (L0), verificaram que o tratamento L0 resultou no maior índice de colheita e L100 produziu o menor HI, demonstrando que condições edafoclimáticas e varietais podem resultar em respostas distintas da cultura da soja em termos de índice de colheita.

Figura 15 - Gráficos box-plot de valores do índice de colheita da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

Na análise de variância da produtividade (em g, em sacas ha^{-1} e em toneladas ha^{-1}) verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo da análise de variância com valores de F para a produtividade em g, em sacas ha^{-1} e em toneladas ha^{-1} .

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Produtividade (g)-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	68892,00	9841,80	4,41*
Blocos	5	32667,00	6533,30	2,93*
Resíduo	35	78132,00	2232,40	
Total	47	179691,00		
-----Produtividade (sacas ha^{-1})-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	9327,30	1338,19	7,99*
Blocos	5	2217,30	443,46	2,65*
Resíduo	35	5862,60	167,50	
Total	47	17447,20		
-----Produtividade (ton ha^{-1})-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	33,72	4,82	7,99*
Blocos	5	7,98	1,60	2,65*
Resíduo	35	21,10	0,60	
Total	47	62,81		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

A produtividade da cultura da soja aumentou em função da elevação do nível de reposição hídrica em quase todas as comparações entre tratamentos (Figura 16A-C). A produtividade média dos tratamentos L40, L50, L60, L70, L80, L90, L100 e L120 foi de 45,7, 48,6, 55,2, 65,8, 74,9, 73,3, 90,0 e 70,9 sacas ha^{-1} , respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Irmak et al. (2014) que observaram que a produtividade da cultura da soja teve uma relação quadrática com a água de irrigação aplicada e que a cada aumento incremental de 25,4 mm na água de irrigação aplicada aumentou a produtividade da soja em 0,3 ton ha^{-1} .

Figura 16 - Gráficos box-plot de valores de produtividade em g por parcela (A), em sacas por hectare (B) e em toneladas por hectare (C), da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

4.4 Eficiência do uso da água

Na análise de variância da Eficiência do uso da água verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos e níveis de reposição hídrica, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo da análise de variância com valores de F para a Eficiência do uso da água (kg m^{-3}).

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
-----Eficiência do uso da água-----				
Níveis de reposição hídrica (%)	7	1,08	0,15	3,41*
Blocos	5	0,70	0,14	3,08*
Resíduo	35	1,58	0,08	
Total	47	3,36		

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; *: Significativo ao nível de 5% de significância; ns: Não significativo.

A Eficiência do uso da água foi maior nos tratamentos de menor nível de reposição hídrica (Figura 17). A Eficiência do uso da água dos tratamentos L40, L50, L60, L70, L80, L90, L100 e L120 foi de 1,17, 0,99, 0,94, 0,96, 0,97, 0,83, 0,88 e 0,61 kg m^{-3} , respectivamente. Essas grandes variações dos valores médios de Eficiência do uso da água em função dos níveis de reposição hídrica indicam que existe um potencial significativo para aumentar a eficiência dos sistemas de produção de soja irrigada.

Candogan et al. (2013) avaliaram a Eficiência do uso da água da cultura da soja submetida a diferentes níveis de irrigação (100, 75, 50, 25 e 0%) em condições de clima sub-úmido e obtiveram valores de 0,49, 0,50, 0,56, 0,63 e 0,55 kg m^{-3} para os tratamentos L100, L75, L50, L25 e L0, respectivamente. Irmak e Sharma (2015) estudando a cultura da soja em condições de sequeiro e irrigada no estado de Nebraska-EUA observaram que para soja irrigada a Eficiência do uso da água média encontrada nas regiões do Estado foi de 0,64 kg m^{-3} , com um desvio padrão de 0,14 kg m^{-3} e para o cultivo de soja em sequeiro o valor médio encontrado foi de 0,57 kg m^{-3} . Alves et al. (2021) avaliando soja sob déficit hídrico no Cerrado brasileiro obtiveram valores de eficiência do uso da água de 1,00 kg m^{-3} para níveis de irrigação entre 20 e 40% e de 1,10 kg m^{-3} para níveis de irrigação entre 60 e 100%.

Figura 17 - Gráficos box-plot de valores de Eficiência do uso da água da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica (%).

4.5 Relações entre as variáveis estudadas

Nas análises das relações entre as variáveis estudadas verificamos que os coeficientes de correlação de Pearson ora foram positivos (cor azul) e ora negativos (cor vermelha) entre determinadas variáveis. O grau da correlação foi consideravelmente alto (gráfico de pizza quase cheia) para a grande maioria das relações entre as variáveis analisadas (Figura 18). Destacamos as relações entre a produtividade da cultura da soja (sacas ha⁻¹) e o CWSI e entre a EUAe o CWSI que podem ser indicadoras do quanto de estresse hídrico podem afetar a produtividade e a PA.

Figura 18 - Gráfico de análises das relações entre as variáveis estudadas. Variáveis: CWSI1: CWSI da época 1 (fase vegetativa), CWSI2: CWSI da época 2 (fase de floração), CWSI3: CWSI da época 3 (frutificação), CWSI4: CWSI médio das épocas, Tc-Ta: diferença da temperatura de dossel com a temperatura do ar, T_folha: temperatura média foliar, ICPA: Índice de colheita da parte aérea, Peso_100_sem: Peso médio de cem sementes, Folha_seca_16_02: Folhas secas colhidas ao longo do experimento, Folha_seca_total_g: folha seca total, em gramas (g), hastes: peso das hastes (g), água_apl_: volume de água aplicada (em litros); sem_seca_MG_ha: peso de sementes secas (megagrama por hectare), Soja_ton_ha_14P: soja em toneladas por hectare, Saca_ha_14P: soja em sacas por hectare, folha.seca.colheita: massa seca de folhas (g), Semente_fresca: peso fresco de sementes na colheita (g), sem_seca: peso seco de sementes (g), saca.ha: produtividade em sacas por hectare.

Os maiores valores de produtividade foram encontrados quando os valores de CWSI estavam baixos (Figura 19). A relação quadrática obtida pela comparação entre produtividade da soja e CWSI mostrou claramente essa tendência com um coeficiente de determinação de 0,85 ($P=0,009$). Esses achados estão de acordo com Nielsen et al. (1990), O'Shaughnessy et al. (2011) e Candogan et al. (2013), que relataram que a produtividade da soja diminuiu com o aumento do déficit hídrico. Embora o tratamento de nível de reposição hídrica de 80 % apresente um valor de CWSI mais alto, este nível de irrigação pode manter uma produtividade da soja no

mesmo patamar que o tratamento de referência (L100), assim, podemos recomendar o nível de reposição hídrica de 80 % para condições de escassez ou alta taxa de uso da água.

Na relação entre Eficiência do uso da água e CWSI observou-se que há uma relação quadrática entre essas duas variáveis com um coeficiente de determinação de 0,73 ($P=0,037$). Como esperado, as relações quadráticas significativas existiram entre a eficiência do uso de água da soja e o CWSI para os diferentes níveis de reposição hídrica, semelhante aos resultados relatados por Dogan et al. (2007) que verificaram que a Eficiência do uso da água foi significativamente maior para as parcelas de maior déficit hídrico, devido à menor quantidade total de água aplicada via irrigação durante o ciclo da cultura. Com base nas análises de CWSI, produtividade da soja e Eficiência do uso da água deste estudo, a decisão final relacionada ao manejo da água de irrigação para soja pode ser feita de forma mais racionalizada.

Figura 19 - Relações entre a produtividade da cultura da soja (sacas ha^{-1}) e o CWSI (A) e entre a Eficiência do uso da água (kg m^{-3}) e o CWSI (B).

5 CONCLUSÕES

A cultura da soja apresentou maiores produtividades de biomassa para os tratamentos de maior disponibilidade hídrica. A produtividade de grãos com umidade de 13% variou de 2,7 a 5,4 toneladas por ha, para níveis de reposição hídrica entre 40 e 120%.

A eficiência do uso da água na cultura da soja aumenta à medida que a disponibilidade hídrica no solo é reduzida. A faixa de Eficiência do uso da água variou de 0,6 a 1,2 kg de grãos na umidade comercial por m³ de água evapotranspirada.

O CWSI apresentou compatibilidade com os tratamentos de níveis de reposição hídrica, evidenciando ser um indicador adequado de estresse hídrico para a cultura da soja no campo.

O CWSI também apresentou relações quadráticas significativas com as variáveis produtividade da soja e Eficiência do uso da água.

REFERÊNCIAS

- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O., Prasad, K. 2017. Soil water storage, yield, water productivity and transpiration efficiency of soybeans (*Glyxine max* L. Merr) as affected by soil surface management in Ile-Ife, Nigeria. *International Soil and Water Conservation Research*, 5, 141-150.
- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., Domun, Y., Norton, T. 2018. Dynamic modelling of the baseline temperatures for computation of the crop water stress index (CWSI) of a greenhouse cultivated lettuce crop. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, 102-114.
- Alderfasi, A. A., Nielsen, D. C. 2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural water management*, 47, 69-75.
- Androcioni, L. G., Zeffa, D. M., Alves, D. S., Tomaz, J. P., Moda-Cirino, V. 2020. Effect of Water Deficit on Morphoagronomic and Physiological Traits of Common Bean Genotypes with Contrasting Drought Tolerance. *Water*, 12, 217.
- Anyia, A. O., Herzog, H. 2004. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. *European Journal of Agronomy*, 20, 327-339.
- Alves, E. D. S., Rodrigues, L. N., de Oliveira, R. A., Lorena, D. R. 2021. Water deficit on the growth and yield of irrigated soybean in the Brazilian Cerrado region. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 25, 750-757.
- Alliprandini, L. F., Abatti, C., Bertagnolli, P.F., Cavassim, J.E., Gabe, H.L., Kurek, A. 2009. Understanding soybean maturity groups in brazil: Environment, cultivar classification and stability. *Crop Science*, 49, 801-8.
- Anda, A., Simon, B., Soós, G., da Silva, J. A. T., Kucserka, T. 2019. Crop-water relation and production of two soybean varieties under different water supplies. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 1515-1528.
- Anda, A., Soos, G., Menyhart, L., Kucserka, T., Simon, B. 2020. Yield features of two soybean varieties under different water supplies and field conditions. *Field crops research*, 245, 107673.
- Battisti, R., Sentelhas, P. C. 2014. Nova abordagem para recomendação de datas de semeadura na cultura da soja: Estudo de caso. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 1149-1156.

Battisti, R., Sentelhas, P. C. 2019. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. *Field Crops Research*, 240, 95-105.

Battisti, R., Sentelhas, P. C., Pascoalino, J. A. L., Sako, H., de Sá Dantas, J. P., Moraes, M. F. 2018. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. *International Journal of Plant Production*, 12, 159-168.

Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, U., Zipori, I., Dag, A. 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27, 367-376.

Bian, J., Zhang, Z., Chen, J., Chen, H., Cui, C., Li, X., Fu, Q. 2019. Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery. *Remote Sensing*, 11, 267.

Biju, S., Fuentes, S., Gupta, D. 2018. The use of infrared thermal imaging as a non-destructive screening tool for identifying drought-tolerant lentil genotypes. *Plant physiology and biochemistry*, 127, 11-24.

Borém, A. Melhoria de espécies cultivadas. UFV; 2005.

Blum, A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field crops research*, 112, 119-123.

Calvache, M., Reichardt, K., Bacchi, O. O. S., Dourado Neto, D. 1997. Deficit irrigation at different growth stages of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L., cv. Imbabello). *Scientia Agricola*, 54, 1-16.

Campos, I., Neale, C. M., Arkebauer, T. J., Suyker, A. E., Gonçalves, I. Z. 2018. Water productivity and crop yield: A simplified remote sensing driven operational approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 501-511.

Candogan, B. N., Sincik, M., Buyukcangaz, H., Demirtas, C., Goksoy, A. T., Yazgan, S. 2013. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 118, 113-121.

Chaves, S. W. P., Coelho, R. D., Costa, J. O., Tapparo, S. A. 2021. Micrometeorological modeling and water consumption of tabasco pepper cultivated under greenhouse conditions. *Italian Journal of Agrometeorology*, 1, 21-36.

Chaves, S. W. P., Coelho, R. D., Costa, J. O., Tapparo, S. A. 2022. Vegetative and productive responses of tabasco pepper to fertigation and plastic mulching. *Scientia Agricola*, 79, e20210084.

Chu, G., Chen, T., Wang, Z., Yang, J., Zhang, J. 2014. Reprint of "Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice". *Field Crops Research*, 165, 36-48.

Coelho R. D. 2021. A Revolução azul no contexto da agricultura irrigada. Diferentes abordagens sobre a agricultura irrigada no Brasil. *Técnica e Cultura*, Piracicaba: ESALQ-USP, p. 3-27.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da Safra Brasileira de Café, Brasília, DF, v. 6, safra 2021, p. 6 -125.

Costa, J. O. 2016. Padrões de resposta termal ao déficit hídrico na cultura do café irrigado por gotejamento. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo. 98p.

Costa, J. O., Almeida, A. N., Coelho, R. D., Folegatti, M. V., José, J. V. 2015. Modelos de estimativa de elementos micrometeorológicos em ambiente protegido. *Water Resources and Irrigation Management*, 4, 25-31.

Costa, J. O., Coelho, R. D., Barros, T. H. S., Fraga Junior, E. F., Fernandes, A. L. T. 2018. Physiological responses of coffee tree under different irrigation levels. *Engenharia Agrícola*, 38, 648-656.

Costa, J. O., Coelho, R. D., Barros, T. H. S., Fraga Junior, E. F., Fernandes, A. L. T. 2019. Leaf area index and radiation extinction coefficient of a coffee canopy under variable drip irrigation levels. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 41, 1-8.

Costa, J. O., Coelho, R. D., Barros, T. H. S., Fraga Junior, E. F., Fernandes, A. L. T. 2020a. Canopy thermal response to water deficit of coffee plants under drip irrigation. *Irrigation and Drainage*, 69, 472-482.

Costa, J. O., Coelho, R. D., Barros, T. H. S., Fraga Junior, E. F., Fernandes, A. L. T. 2020b. Tensiometria aplicada na estimativa do consumo hídrico do cafeeiro irrigado por gotejamento. *Revista Geama*, 6: 17-24.

Çolak, Y. B., Yazar, A., Çolak, İ., Akça, H., Duraktekin, G. 2015. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Agriculture and agricultural science procedia*, 4, 372-382.

Curtis, O. F. 1936. Leaf temperatures and the cooling of leaves by radiation. *Plant Physiology*, 11, 343.

Curtis, O. F. 1938. Wallace and Clum," Leaf temperatures": a critical analysis with additional data. *American Journal of Botany*, 761-771.

Defante, L. R., Vilpoux, O. F., Sauer, L. 2018. Rapid expansion of sugarcane crop for biofuels and influence on food production in the first producing region of Brazil. *Food Policy*, 79, 121-131.

DeJonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., Comas, L. H. 2015. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural water management*, 156, 51-62.

Dogan, E., Kirnak, H., Copur, O. 2007. Effect of seasonal water stress on soybean and site-specific evaluation of CROPGRO-Soybean model under semi-arid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 90, 56-62.

Dold, C., Hatfield, J. L., Prueger, J., Sauer, T., Büyükcangaz, H., Rondinelli, W. 2017. Long-Term Application of the Crop Water Stress Index in Midwest Agro-Ecosystems. *Agronomy Journal*, 109, 2172-2181.

Doorenbos, J., Kassam, A. H. 1994. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB/FAO, Estudos: Irrigação e Drenagem, 33. 306p.

Doss, B. D., Thurlow, D. L. 1974. Irrigation, row width, and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. *Agronomy Journal*, 66, 620-623

Eaton, F. M., Belden, G. O. 1929. Leaf temperatures of cotton and their relation to transpiration, varietal differences and yields (No. 1488-2016-124121).

Ehlers, J. H. 1915. The temperature of leaves of Pinus in winter. *American Journal of Botany*, 2, 32-70.

Fehr, W.R.1980. Soybean 42: 589-99.

Fernandes, E. J. 2010. Determinação do índice de estresse hídrico em cultura do feijoeiro com termômetro de infravermelho. *Irriga*, 248-257.

Frizzone, J. A., Freitas, P. D., Rezende, R., Faria, M. D. 2012. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá: Eduem.

Gajić, B., Kresović, B., Tapanarova, A., Životić, L., Todorović, M. 2018. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. *Agricultural water management*, 210, 224-231.

Garcia, A., Pípolo, A. E., Lopes, I., Portugal, F. A. 2007. Instalação da lavoura de soja: época, cultivares, espaçamento e população de plantas. *Embrapa Soja-Circular Técnica* (Infoteca-E).

Gava, R., Anselmo, J. L., Neale, C. M., Frizzzone, J. A., Leal, A. J. 2017. Different soybean plant populations under central pivot irrigation. *Engenharia Agrícola*, 37, 441-452.

Gazzoni, D., Dall'Agnol, A. 2018. *A saga da soja*. 1st ed. Brasília-DF.

Geerts, S., Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management*, 96, 1275-1284.

Gutiérrez, S., Diago, M. P., Fernández-Navales, J., Tardaguila, J. 2018. Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning. *PLoS One*, 13, e0192037.

Hatfield, J. L., Dold, C. 2019. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 10, 103.

Hudak, C. M., Patterson, R. P. 1995. Vegetative growth analysis of a drought-resistant soybean plant introduction. *Crop Science*, 35, 464-471.

Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59-70.

Irmak, S., Haman, D. Z., Bastug, R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92, 1221-1227.

Irmak, S., Sharma, V. 2015. 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*, 58, 103-120.

Irmak, S., Specht, J. E., Odhiambo, L. O., Rees, J. M., Cassman, K. G. 2014. Soybean yield, evapotranspiration, water productivity, and soil water extraction response to subsurface drip irrigation and fertigation. *Transactions of the ASABE*, 57, 729-748.

Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., Pinter Jr, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water resources research*, 17, 1133-1138.

Jackson, R. D., Kustas, W. P., Choudhury, B. J. 1988. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation science*, 9: 309-317.

Jackson, R. D., Reginato, R. J., Idso, S. 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water resources research*, 13, 651-656.

Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R., Panneerselvam, R. 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int. J. Agric. Biol*, 11, 100-105.

Kothari, K., Ale, S., Bordovsky, J. P., Thorp, K. R., Porter, D. O., Munster, C. L. 2019. Simulation of efficient irrigation management strategies for grain sorghum production over different climate variability classes. *Agricultural Systems*, 170, 49-62.

Kumar, A., Nayak, A. K., Pani, D. R., Das, B. S. 2017a. Physiological and morphological responses of four different rice cultivars to soil water potential based deficit irrigation management strategies. *Field Crops Research*, 205, 78-94.

Kumar, M., Govindasamy, V., Rane, J., Singh, A. K., Choudhary, R. L., Raina, S. K., Singh, N. P. 2017b. Canopy temperature depression (CTD) and canopy greenness associated with variation in seed yield of soybean genotypes grown in semi-arid environment. *South African Journal of Botany*, 113, 230-238.

Leal, D. P., Coelho, R. D., Barbosa, F. D. S., Fraga Junior, E. F., Mauri, R., Santos, L. C. 2017. Water productivity for sugar and biomass of sugarcane varieties. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21, 618-622.

Leinonen, I., Jones, H. G. 2004. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of experimental botany*, 55, 1423-1431.

Levene, H. 1960. Levene test for equality of variances. *Contributions to probability and statistics*.

Lipan, L., Martín-Palomo, M. J., Sánchez-Rodríguez, L., Cano-Lamadrid, M., Sendra, E., Hernández, F., Carbonell-Barrachina, Á. A. 2019. Almond fruit quality can be improved by means of deficit irrigation strategies. *Agricultural Water Management*, 217, 236-242.

Liu, K. 2012. *Soybeans: chemistry, technology, and utilization*. Springer.

Ludwig, F., Biemans, H., Jacobs, C., Supit, I., Van Diepen, C. A., Fawell, J., Steduto, P. 2011. Water use of oil crops: current water use and future outlooks. *ILSI Europe aisbl*.

- Machado, C. S., Silva, C. R. D., Sanches, M. C., Hamawaki, O. T., Sousa, L. B. D. 2017. Physiologic parameters of soybean of determinate and indeterminate growth habit subjected to levels of soil moisture. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52, 419-425.
- Mangena, P. 2018. Water stress: morphological and anatomical changes in soybean (*Glycine max* L.) plants. *Plant, Abiotic Stress and Responses to Climate Change*, 9-31.
- Mansour, H. A., Abd El-Hady, M., Bralts, V. F., Engel, B. A. 2016. Performance automation controller of drip irrigation systems using saline water for wheat yield and water productivity in Egypt. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142, 05016005.
- Mathobo, R., Marais, D., Steyn, J. M. 2017. The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management*, 180, 118-125.
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Flexas, J., Hernández, E., Rosselló, J., Bota, J. 2015. From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as a selection target. *The Crop Journal*, 3, 220-228.
- Mesquita, R. O., Coutinho, F. S., Vital, C. E., Nepomuceno, A. L., Williams, T. C. R., de Oliveira Ramos, H. J., Loureiro, M. E. 2020. Physiological approach to decipher the drought tolerance of a soybean genotype from Brazilian savana. *Plant Physiology and Biochemistry*, 151, 132-143.
- Meron, M., Sprintsin, M., Tzipris, J., Alchanatis, V., Cohen, Y. 2013. Foliage temperature extraction from thermal imagery for crop water stress determination. *Precision Agriculture*, 14: 467-477.
- Miller, E. C., Saunders, A. R. 1923. Some observations on the temperature of the leaves of crop plants. *Journal of Agricultural Research*, 26, 15.
- Miyazaki, A., Arita, N. 2020. Deep rooting development and growth in upland rice NERICA induced by subsurface irrigation. *Plant Production Science*, 23, 211-219.
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tzipris, J., Naor, A., Cohen, S. 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of experimental botany*, 58, 827-838.
- Nielsen, D. C. 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). *Field Crops Research*, 23, 103-116.

Nielsen, D. C., Anderson, R. L. 1989. Infrared thermometry to measure single leaf temperatures for quantification of water stress in sunflower. *Agronomy journal*, 81, 840-842.

Ohsumi, A., Kanemura, T., Homma, K., Horie, T., Shiraiwa, T. 2007. Genotypic variation of stomatal conductance in relation to stomatal density and length in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 10, 322-328.

O'shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Colaizzi, P. D., Howell, T. A. 2011. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management*, 98, 1523-1535.

O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Colaizzi, P. D., Howell, T. A. 2012. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. *Agricultural water management*, 107, 122-132.

Petrie, P. R., Wang, Y., Liu, S., Lam, S., Whitty, M. A., Skewes, M. A. 2019. The accuracy and utility of a low-cost thermal camera and smartphone-based system to assess grapevine water status. *Biosystems Engineering*, 179, 126-139.

Pfeiffer, L., Lin, C. Y. C. 2014. Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67, 189-208.

Raij, B. V., Cantarella, H., Quaggio, J. A., Furlani, A. M. C. 1997. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC.

Ramírez, A. J. F., Coelho, R. D., Pizani, M. A. M., da Silva, C. J. 2015. Determinação do índice de estresse hídrico em tomateiros cereja (*Lycopersicum solanum* var. cerasiforme.) com câmara infravermelha. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI*, 9, 218-224.

Romano, G., Zia, S., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J. L., Müller, J. 2011. Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79, 67-74.

Santos, L. C., Coelho, R. D., Barbosa, F. S., Leal, D. P., Fraga Júnior, E. F., Barros, T. H. S., Lizcano, J. V., Ribeiro, N. L. 2019. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. *Agricultural Water Management*, 221, 322-333.

Schlegel, A. J., Assefa, Y., O'Brien, D., Lamm, F. R., Haag, L. A., Stone, L. R. 2016. Comparison of corn, grain sorghum, soybean, and sunflower under limited irrigation. *Agronomy Journal*, 108, 670-679.

Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., Nendel, C. 2015. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The journal of agricultural science*, 153, 1394-1411.

Singh, G. 2010. *The soybean: botany, production and uses*. CABI.

Singh, J., Ge, Y., Heeren, D. M., Walter-Shea, E., Neale, C. M., Irmak, S., Maguire, M. S. 2021. Inter-relationships between water depletion and temperature differential in row crop canopies in a sub-humid climate. *Agricultural Water Management*, 256, 107061.

Shapiro, S. S., Wilk, M. B. 1965. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika* 52: 591.

Soto-García, M., Martín-Gorriz, B., García-Bastida, P. A., Alcon, F., Martínez-Alvarez, V. 2013. Energy consumption for crop irrigation in a semiarid climate (south-eastern Spain). *Energy*, 55, 1084-1093.

Stanhill, G. 1986. Water Use Efficiency. In: Brady, N. C. Editor. Vol. 39, Academic Press, p. 53-85.

Tapparo, S. A., Coelho, R. D., Costa, J. O., Chaves, S. W. P. 2019. Growth and establishment of irrigated lawns under fixed management conditions. *Scientia Horticulturae*, 256, 108580.

Tanwar, B., Goyal, A. 2021. *Oilseeds: Health Attributes and Food Applications*. Springer.

Tarjuelo, J. M., Rodríguez-Díaz, J. A., Abadía, R., Camacho, E., Rocamora, C., Moreno, M. A. 2015. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agricultural Water Management*, 162, 67-77.

Trentin, R. 2010. Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar.

Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44: 892-898.

Veysi, S., Naseri, A. A., Hamzeh, S., Bartholomeus, H. 2017. A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. *Agricultural water management*, 189, 70-86.

Wallace, R. H., Clum, H. H. 1938. Leaf temperatures. *American Journal of Botany*, 83-97.

Webber, H. A., Madramootoo, C. A., Bourgault, M., Horst, M. G., Stulina, G., Smith, D. L. 2006. Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 86, 259-268.

Xiong, R., Liu, S., Considine, M. J., Siddique, K. H., Lam, H. M., Chen, Y. 2021. Root system architecture, physiological and transcriptional traits of soybean (*Glycine max* L.) in response to water deficit: A review. *Physiologia Plantarum*, 172, 405-418.

Yonts, C. D., Haghverdi, A., Reichert, D. L., Irmak, S. 2018. Deficit irrigation and surface residue cover effects on dry bean yield, in-season soil water content and irrigation water use efficiency in western Nebraska high plains. *Agricultural Water Management*, 199, 138-147.

Zia, S., Romano, G., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J. L., Müller, J. 2013. Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress tolerant maize genotypes of different phenology. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199, 75-84.

Zhang, B., Feng, G., Kong, X., Lal, R., Ouyang, Y., Adeli, A., Jenkins, J. N. 2016. Simulating yield potential by irrigation and yield gap of rainfed soybean using APEX model in a humid region. *Agricultural Water Management*, 177, 440-453.