

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO DO DÉFICIT  
HÍDRICO E FENOLOGIA DA CULTURA DA SOJA**

Diego Bispo Dos Santos Farias  
*Doctor Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

**DIEGO BISPO DOS SANTOS FARIAS**

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO DO DÉFICIT  
HÍDRICO E FENOLOGIA DA CULTURA DA SOJA**

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

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

Coorientadora: Marina R Bilich Neumann

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

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

T

F224s  
2024 Farias, Diego Bispo dos Santos, 1993-  
Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento do  
déficit hídrico e fenologia da cultura da soja / Diego Bispo dos  
Santos Farias. – Viçosa, MG, 2024.  
1 tese eletrônica (105 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.

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

Referências bibliográficas: f. 89-105.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.771>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja - Cultivo. 2. Soja - Fenologia. 3. Déficit hídrico.  
4. Sensoriamento remoto. 5. Drone. 6. Evapotranspiração.  
7. Água - Uso. 8. Irrigação. I. Rodrigues, Lineu Neiva, 1968-  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.  
III. Título.

CDD 22. ed. 633.34

**DIEGO BISPO DOS SANTOS FARIAS**

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO DO DÉFICIT  
HÍDRICO E FENOLOGIA DA CULTURA DA SOJA**

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

APROVADA: 17 de setembro de 2024.

Assentimento:

---

Diego Bispo Dos Santos Farias  
Autor

---

Lineu Neiva Rodrigues  
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 21/11/2024 às 16:51:28 e pelo orientador em 21/11/2024 às 16:54:54. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **BLR4.D1N8.JOYE** e clique no botão 'Validar documento'.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

À minha família, pelo incentivo, confiança e amor.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao Lineu Neiva Rodrigues e Marina Rolim Bilich Neumann, pela orientação, confiança e apoio.

Ao Henrique Llacer Roig e sua equipe de trabalho pelo apoio e pelo fornecimento de equipamentos fundamentais para o desenvolvimento das pesquisas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação do Distrito Federal (FAP-DF).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

FARIAS, Diego Bispo Dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2024. **Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento do déficit hídrico e fenologia da cultura da soja.** Orientador: Lineu Neiva Rodrigues. Coorientadora: Marina Rolim Bilich Neumann.

Avaliar o impacto do déficit hídrico nos diferentes estádios fenológicos da soja é essencial para o manejo da cultura. Considerando regiões como a do Cerrado, onde essa cultura tem sido cada vez mais irrigada, essa informação é importante também para o manejo da irrigação e planejamento de uso de recursos hídricos. O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem sido incentivado como uma alternativa às imagens de satélite para o monitoramento de culturas agrícolas, principalmente no que diz respeito à demanda hídrica. Esta tese objetivou verificar o impacto do déficit hídrico na soja e utilizar técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento deste impacto. Utilizou-se um delineamento experimental em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (TR1), a irrigação atendeu à demanda hídrica da cultura em todos os estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em estádios fenológicos específicos (TR2 = VC-V2, TR3 = V2-R1, TR4 = R1-R5 e TR5 = R5-R7) e depois retomada. A maior redução de índice de área foliar (56%), em relação ao TR1, foi observada no estágio fenológico V2-R1, no tratamento TR3. O TR4 foi o tratamento que apresentou a maior redução na altura de plantas (28%), em relação ao TR1. As maiores reduções de produtividade foram observadas nos tratamentos TR4 (50%) e TR5 (52%). A produtividade de uso da água foi menor em 28% no tratamento TR4 e 39% no TR5. A ETa foi menor em 14%, 26%, 26% e 22% nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5, respectivamente. Observou-se correlação linear entre a produtividade e o déficit hídrico no solo, ETa total e produtividade média, déficit hídrico no solo médio e ETa total, com valor de  $r^2$  igual a 0,77, 0,91 e 0,85, respectivamente. Os índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI foram altamente correlacionados com o índice de área foliar (IAF), apresentando  $r^2$  superiores a 0,80 e RMSE inferiores a 0,5. Para a biomassa (BIO), EVI2, OSAVI e RDVI também mostraram correlações significativas com  $r^2 = 0,70$  e  $RMSE < 1,75$ . Além disso, os índices NDRE, SCCC1, RECI, GRVI, GCI e GNDVI foram altamente correlacionados com a produtividade, com  $r^2 =$

0,90 e RMSE < 0,18. O IEHC nos tratamentos aos 30 DAS variou entre 0,31 e 0,36. O IEHC médio do tratamento TR1 dos 30 aos 93 DAS foi de 0,29, com um valor máximo de 0,46, podendo este ser o limite para a aplicação de irrigação na soja. Os resultados indicaram uma forte correlação entre a ETa e o IEHC, com um  $r^2$  maior que 0,8. O IAF e BIO tiveram melhores correlações com o IEHC aos 65 DAS, com valores de  $r^2$  acima de 0,60. Em relação à produtividade, a melhor correlação com o IEHC foi observada aos 93 DAS, com valor de  $r^2$  igual a 0,72. Os valores de ETa medidos mostraram forte correlação com o modelo SSEBop, produzindo alto valor de  $r^2$ , baixo RMSE de 0,65 mm d<sup>-1</sup>, MBE de -0,30 mm d<sup>-1</sup> e EF de 0,71.

Palavras-chave: estádios fenológicos ; veículos aéreos não tripulados ; evapotranspiração ; irrigação ; produtividade de uso da água

## ABSTRACT

FARIAS, Diego Bispo Dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2024. **Remote sensing applied to monitoring water deficit and phenology of soybean.** Adviser: Lineu Neiva Rodrigues. Co-adviser: Marina Rolim Bilich Neumann.

Evaluating the impact of water deficit on different phenological stages of soybeans is essential for crop management. Considering regions like the Cerrado, where this crop has been increasingly irrigated, this information is also important for irrigation management and water resource planning. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) has been encouraged as an alternative to satellite images for monitoring agricultural crops, especially regarding water demand. This thesis aimed to verify the impact of water deficit on soybeans and use remote sensing techniques to monitor this impact. A randomized block experimental design with five treatments and four repetitions was used. In the control treatment (TR1), irrigation met the crop's water demand at all development stages. In the other treatments, irrigation was suspended at specific phenological stages (TR2 = VC-V2, TR3 = V2-R1, TR4 = R1-R5, and TR5 = R5-R7) and then resumed. The greatest reduction in leaf area index (56%) compared to TR1 was observed at the V2-R1 phenological stage in treatment TR3. TR4 showed the greatest reduction in plant height (28%) compared to TR1. The largest yield reductions were observed in treatments TR4 (50%) and TR5 (52%). Water use efficiency was reduced by 28% in treatment TR4 and 39% in TR5. Actual evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) was reduced by 14%, 26%, 26%, and 22% in treatments TR2, TR3, TR4, and TR5, respectively. A linear correlation was observed between yield and soil water deficit, total ET<sub>a</sub> and average yield, average soil water deficit and total ET<sub>a</sub>, with  $r^2$  values of 0.77, 0.91, and 0.85, respectively. The SAVI index showed the highest  $r^2$  value (0.83) and the lowest RMSE (0.44) for the leaf area index. The indices EVI2, OSAVI, SAVI, and RDVI were highly correlated with leaf area index (LAI), with  $r^2$  values above 0.80 and RMSE below 0.5. For biomass (BIO), EVI2, OSAVI, and RDVI also showed significant correlations with  $r^2 = 0.70$  and RMSE < 1.75. Additionally, the indices NDRE, SCCCI, RECI, GRVI, GCI, and GNDVI were highly correlated with yield, with  $r^2 = 0.90$  and RMSE < 0.18. The crop water stress index (CWSI) in the treatments at 30 DAS ranged between 0.31 and 0.36. The average CWSI of treatment TR1 from 30 to 93 DAS was 0.29, with a maximum value of 0.46, which could be the

threshold for irrigation application in soybeans. The results indicated a strong correlation between ET<sub>a</sub> and CWSI, with an  $r^2$  greater than 0.8. LAI and BIO had better correlations with CWSI at 65 DAS, with  $r^2$  values above 0.60. Regarding yield, the best correlation with CWSI was observed at 93 DAS, with an  $r^2$  value of 0.72. The measured ET<sub>a</sub> values showed a strong correlation with the SSEBop model, producing a high  $r^2$  value, low RMSE of 0.65 mm d<sup>-1</sup>, MBE of -0.30 mm d<sup>-1</sup>, and EF of 0.71.

Keywords: phenological stages; unmanned aerial vehicles; evapotranspiration; irrigation; water use efficiency

## 1 Introdução geral

A produção agrícola tem aumentado de forma progressiva nas últimas décadas, porém, estima-se que a demanda por alimentos duplicará até 2050, devido, entre outros fatores, ao aumento da população que deverá atingir os 9,8 bilhões de habitantes (SIJPESTIJN *et al.*, 2022). A soja (*Glycine max* L.), por servir de base para a alimentação humana e animal, tem se destacado como uma cultura fundamental no desenvolvimento de estratégias de segurança alimentar.

O Brasil exportou 101,9 milhões de toneladas de soja em 2023, gerando uma receita de US\$ 53,24 bilhões (MDIC, 2024). Esse crescimento é atribuído à expansão das áreas cultivadas (AGROSTAT, 2023; FAO, 2023) e ao uso de irrigação suplementar visando evitar o estresse hídrico e favorecer a uniformidade da maturidade dos grãos (UMBURANAS *et al.* 2022).

No Cerrado, região responsável por produzir mais da metade da soja brasileira (MAGALHÃES *et al.*, 2020), tem-se observado um aumento da irrigação na soja, uma cultura tipicamente cultivada em condições de sequeiro (DA SILVA *et al.*, 2019). Neste cenário, nota-se ser importante adotar estratégias de irrigação visando o uso adequado da água, como, por exemplo, a irrigação com déficit que, se conduzida adequadamente, pode contribuir efetivamente para reduzir a demanda de irrigação com pouco impacto na qualidade e quantidade da produção (MORALES-SANTOS *et al.*, 2023; GONEN; KARA, 2022, CUI *et al.*, 2021).

A soja é altamente sensível ao déficit hídrico durante o período de floração e enchimento de grãos, conforme evidenciado por Farias *et al.* (2024). Devido às características específicas da cultura, a soja pode exibir uma variedade de respostas morfofisiológicas quando submetida a condições de déficit hídrico (BRAGA *et al.*, 2021; CRUSIOL *et al.*, 2021). Estudos conduzidos por Alves *et al.* (2021a) demonstraram que, mesmo com restrições hídricas, é possível manter rendimentos satisfatórios aplicando entre 60% e 80% da água disponível no solo, sem comprometer significativamente a produtividade. No entanto, esses estudos não diferenciaram os déficits hídricos em estádios fenológicos específicos. Portanto, pesquisas que aplicam déficits hídricos em diferentes estádios fenológicos são cruciais para uma compreensão mais detalhada da capacidade de tolerância ou sensibilidade das culturas ao longo de suas fases de desenvolvimento (FARIAS *et al.*, 2024). Esse conhecimento é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo de irrigação que otimizem a eficiência do uso da água e garantam a produtividade em condições de déficit hídrico.

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para mapear as condições da cultura em campo (CHANG *et al.*, 2021; JOHANSEN *et al.*, 2019). Geralmente, utilizam-se imagens de

satélite para o monitoramento da vegetação, porém, esses produtos satelitais possuem algumas desvantagens como baixa resolução espacial, condições de nuvens atmosféricas e frequência de aquisição de dados, que muitas vezes impossibilita o monitoramento detalhado de plantas (CHANG *et al.*, 2021).

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem sido encorajada como alternativa a imagens satelitais para o monitoramento dos cultivos. O uso de VANTs possibilita embarcar sensores para a aquisição de imagens de alta resolução espectral ao longo do tempo e do espaço, possibilitando avaliar o desenvolvimento das culturas com maior acurácia, quando comparado a imagens satelitais (SAGAN *et al.*, 2019; SIDIKE *et al.*, 2018), utilizando principalmente índices de vegetação derivados de imagens multiespectrais (ROMA; CATANIA, 2022).

Os índices de vegetação (VIs) são modelos matemáticos para diferentes comprimentos de onda que são utilizados para a avaliação da cobertura vegetal, vigor e dinâmica de crescimento, estado nutricional, entre outras aplicações (BAIO *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR *et al.*, 2018) e pode mostrar uma alta correlação com o rendimento (DA SILVA *et al.*, 2020). Variáveis como índice de área foliar, biomassa e produtividade são fundamentais para avaliar o impacto do déficit hídrico na planta e este impacto pode ser avaliado por sensores multiespectrais acoplados a drones que fornecem medidas de comprimento de onda nas faixas visível (VIs; ~400–700 nm) e infravermelho próximo (NIR; ~700–1200 nm) (QIU *et al.*, 2018).

A termografia tem sido aplicada para o monitoramento do déficit hídrico nas culturas, devido à sua confiabilidade, rapidez na aquisição de dados e por não ser um método destrutivo (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017; MWINUKA *et al.*, 2021). As variações de temperatura do dossel são frequentemente quantificadas usando imagens e termômetros infravermelhos térmicos (RAMÍREZ-CUESTA *et al.*, 2022) e podem ser utilizadas para desenvolver índices que refletem o déficit hídrico nas culturas, como o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) (IDSO *et al.*, 1981). Alguns estudos apontaram fortes relações entre o CSWI e outros indicadores de estresse, incluindo potencial hídrico foliar (KING *et al.*, 2020, GONZALEZ-DUGO *et al.*, 2020) e condutância estomática (LENA *et al.*, 2020, GONZALEZ-DUGO *et al.*, 2019), promovendo o uso do IEHC para manejo de irrigação (COSTA-FILHO *et al.*, 2020).

Além do IEHC, outro parâmetro importante para verificar o impacto do déficit hídrico nas culturas é a evapotranspiração atual (ETa). A obtenção da ETa através de imagens térmicas é possível, principalmente, devido à relação entre a temperatura da superfície da vegetação e a transpiração (HAN *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2015; PÔÇAS *et al.*, 2020; VEYSI *et al.*, 2017). Dentre os modelos de base térmica para o cálculo da ET, pode-se citar o Simplified

Surface Energy Balance (SSEBop) que calcula a ETa para cada imagem de satélite (SENAY *et al.*, 2019; SENAY, 2018). O modelo utiliza a temperatura da superfície obtida através de imagens de satélite e a evapotranspiração de referência (ETo) como as principais variáveis, e com estas variáveis utiliza a abordagem do balanço de energia onde o fluxo de calor latente é resolvido apenas na escala de tempo diária para calcular a fração ET (ETf) para cada pixel da imagem do satélite. O SSEBop tem sido utilizado massivamente em vários estudos para determinação da ETa das culturas (SINGH *et al.*, 2014; SENAY *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2016; PAULA *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2019; YIN *et al.*, 2020) e tem apresentado valores de  $R^2 > 0,90$  na representação da variabilidade espacial da ETa (SENAY *et al.*, 2022).

O presente trabalho se divide em capítulos que abordam aspectos fundamentais relacionados ao manejo da soja sob condições de déficit hídrico. O primeiro capítulo investiga o impacto do déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos da soja, proporcionando uma compreensão detalhada de como cada fase de desenvolvimento responde a estas condições adversas. No segundo capítulo, são avaliados índices de vegetação como ferramentas para monitorar o impacto do déficit hídrico na fenologia da soja. O terceiro capítulo explora a relação entre o déficit hídrico, o índice de estresse hídrico da cultura e a temperatura foliar, correlacionando esses fatores com o rendimento da soja. Finalmente, o quarto capítulo aborda a modelagem da evapotranspiração atual da cultura da soja por meio de veículos aéreos não tripulados, destacando a precisão e a aplicabilidade dessa tecnologia no manejo hídrico da cultura.

## 2 Artigos científicos

### 2.1 Impacto do déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos da soja

#### Resumo

O Brasil desempenha um papel importante na produção mundial de alimentos, se destacando como produtor e exportador de várias *commodities* agrícolas, sendo a soja uma das principais. Avaliar o impacto do déficit hídrico nos diferentes estádios fenológicos da soja é fundamental para o manejo da cultura e da irrigação visando a gestão de recursos hídricos. Objetivou-se avaliar o impacto do déficit hídrico em estádios fenológicos da soja sobre a altura de plantas, área foliar, biomassa, produtividade, produtividade de uso da água e evapotranspiração. Para isso, foram instalados dois experimentos de maio a setembro de 2021 e maio a agosto de 2022. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (TR1), a irrigação foi realizada de forma a atender a demanda hídrica da cultura em todos os seus estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em determinados estádios de desenvolvimento da cultura (TR2 = VC-V2, TR3 = V2-R1, TR4 = R1-R5 e TR5 = R5-R7) e depois retomada. O tratamento TR4 foi o mais impactado na biomassa com redução média dos dois anos de 25%. A maior redução de índice de área foliar (56%), em relação ao TR1, foi observada no estágio fenológico V2-R1, no tratamento TR3. O TR4 foi o tratamento que apresentou a maior redução na altura de plantas (28%), em relação ao TR1. As maiores reduções de produtividade foram observadas nos tratamentos TR4 (50%) e TR5 (52%). A produtividade de uso da água foi menor em 28% no tratamento TR4 e 39% no TR5. A ETa foi menor em 14%, 26%, 26% e 22% nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5, respectivamente. Observou-se correlação linear entre a produtividade e o déficit hídrico no solo, ETa total e produtividade média, déficit hídrico no solo médio e ETa total, com valor de  $r^2$  igual a 0,77, 0,91 e 0,85, respectivamente.

**Palavras-chave:** Componente de produção. Biomassa. Déficit hídrico. Irrigação.

### 2.1.1 Introdução

A produção agrícola tem aumentado de forma progressiva nas últimas décadas, no entanto, ainda não é suficiente para suprir o aumento da demanda por alimentos esperada para 2050 (GOUEL; GUIMBARD, 2019). A soja (*Glycine max* L.), por servir de base para a alimentação humana e animal, tem se destacado como uma cultura fundamental no desenvolvimento de estratégias de segurança alimentar.

O Brasil desempenha um papel importante na produção mundial de alimentos, se destacando como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, sendo a soja uma das principais. Em 2023 o Brasil exportou 101,9 milhões de toneladas de soja, gerando uma receita de US\$ 53,24 bilhões (MDIC, 2024). No entanto, a produção de soja no Brasil tem sido ameaçada pelos eventos climáticos desfavoráveis, principalmente a seca (CRUSIOL *et al.*, 2020).

No Cerrado, região responsável por produzir mais da metade da soja brasileira (52%) (RAUSCH *et al.*, 2019), a irrigação tem sido cada vez mais utilizada. O aumento observado da irrigação na soja, uma cultura tipicamente cultivada em condições de sequeiro (DA SILVA *et al.*, 2019), se deve a tendência decrescente das chuvas (SILVA *et al.*, 2023) e ocorrência frequente de veranicos na estação quente e chuvosa (DA SILVA *et al.*, 2021), que é o período em que se concentra o cultivo de soja na região. Devido à má distribuição das chuvas e à ocorrência de veranicos, as perdas de rendimento da soja podem chegar a 46% (BATTISTI *et al.*, 2018; TAGLIAPIETRA *et al.*, 2021).

O aumento da irrigação da cultura da soja no Cerrado, região que concentra cerca de 80% dos pivôs centrais do Brasil (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019) e que já apresenta restrições hídricas em algumas bacias hidrográficas, indica a necessidade de melhorar as estratégias de manejo de irrigação, visando o aumento da eficiência. Neste contexto, várias estratégias de irrigação podem ser utilizadas (ALVES *et al.*, 2021a; FELISBERTO *et al.*, 2023), como, por exemplo, a irrigação com déficit que, se conduzida adequadamente, pode contribuir efetivamente para reduzir a demanda de irrigação com pouco impacto na qualidade e quantidade da produção (MORALES-SANTOS *et al.*, 2023; CUI *et al.*, 2021).

Entretanto, para que uma estratégia de irrigação seja bem sucedida, é fundamental que se tenha estimativas acuradas da evapotranspiração atual (ETa) (ALVES *et al.*, 2021b; HELMAN; BONFIL; LENSKEY, 2019). É importante que essas estimativas considerem as especificidades das culturas e as características regionais do Cerrado, uma vez que a ETa pode variar de uma área para outra e até mesmo na mesma área, durante diferentes estações de

cultivo, em função das variações climáticas (SANDHU; IRMAK, 2022). Além disso, as necessidades hídricas das culturas são dependentes do período de semeadura (BATEMAN *et al.*, 2020) e de características específicas, como, por exemplo, a altura da planta e o índice de área foliar (ANDA *et al.*, 2020).

A soja é altamente sensível ao déficit hídrico durante o período de floração e enchimento de grãos, conforme evidenciado por Farias *et al.* (2024). Devido às características específicas da cultura, a soja pode exibir uma variedade de respostas morfofisiológicas quando submetida a condições de déficit hídrico (BRAGA *et al.*, 2021; CRUSIOL *et al.*, 2021). Estudos conduzidos por Alves *et al.* (2021a) demonstraram que, mesmo com restrições hídricas, é possível manter rendimentos satisfatórios aplicando entre 60% e 80% da água disponível no solo, sem comprometer significativamente a produtividade. No entanto, esses estudos não diferenciaram os déficits hídricos em estádios fenológicos específicos. Portanto, pesquisas que aplicam déficits hídricos em diferentes estádios fenológicos são cruciais para uma compreensão mais detalhada da capacidade de tolerância ou sensibilidade das culturas ao longo de suas fases de desenvolvimento (FARIAS *et al.*, 2024). Esse conhecimento é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo de irrigação que otimizem a eficiência do uso da água e garantam a produtividade em condições de déficit hídrico.

Diversas pesquisas já foram realizadas visando avaliar os efeitos do déficit hídrico na produção de soja. Por exemplo, Jumrani e Bhatia (2018) conduziram experimentos em ambiente controlado e observaram que a falta de água durante o crescimento vegetativo e reprodutivo da soja resultou em diminuição da matéria seca e do rendimento. Da mesma forma, durante a fase reprodutiva, houve uma redução ainda maior no rendimento. Em outro estudo, Wei *et al.* (2018) realizaram experimentos em vasos e compararam diferentes níveis de irrigação, constatando que a seca em cada estágio do desenvolvimento da soja levou a uma redução na altura das plantas, na área foliar, na biomassa acima do solo e na produção de grãos, em comparação com o tratamento com irrigação completa. Estes trabalhos são fundamentais para a obtenção de informações sobre o cultivo com déficit hídrico na soja, porém, trata-se de experimentos em que o déficit hídrico foi aplicado através de níveis de água aplicado, e não expressa bem o efeito de veranicos nos estádios fenológicos.

O crescimento do cultivo de soja irrigada indica a necessidade do aperfeiçoamento de critérios para o manejo de irrigação dessa cultura, bem como, a quantificação dos impactos do déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos, principalmente por que a resposta da soja submetida a estratégias de déficit hídrico, pode não ser a mesma, uma vez que dependem do material genético da planta, condições climáticas locais, entre outros fatores. Dessa forma, o

objetivo deste estudo foi avaliar o impacto do déficit hídrico em estádios fenológicos da soja sobre a altura de plantas, área foliar, biomassa, produtividade, produtividade de uso da água e evapotranspiração.

## 2.1.2 Material e Métodos

### 2.1.2.1 Área de estudo

Para a avaliação do impacto do déficit hídrico aplicado em estádios fenológicos da soja, cultivar BRS 7581RR (tipo indeterminado), foram instalados dois experimentos, sendo o primeiro realizado de maio a setembro de 2021 e segundo de maio a agosto de 2022, na Unidade de Referência em Manejo da Água (URMA), do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do planalto central do bioma Cerrado (15°35'55.1"S, 47°42'27.4"W), com altitude de 979 m. O clima da região é sazonal e corresponde ao tipo Aw-tropical chuvoso (KÖPPEN, 1948), com presença de verões chuvosos de outubro a março e invernos secos de abril a setembro (CORREIA FILHO *et al.*, 2023). A precipitação média anual é de 1.383,7 mm e as temperaturas mínima e máxima médias iguais a 16,5°C e 27,8°C, respectivamente (SILVA *et al.*, 2017). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (EMBRAPA, 2011). Na Tabela 1 apresenta-se características físicas e químicas do solo da área experimental.

**Tabela 1.** Propriedades físicas e químicas do solo da área experimental

Camada (m)	MO (%)	pH	Ds (g cm <sup>3</sup> )	CC	PM
				m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
0-0,2	2,7	5,6	1,10	0,35	0,21
0,2-0,4	2,6	5,6	1,08	0,35	0,20

MO: Matéria orgânica; Ds: Densidade do solo; CC: Capacidade de Campo; PM: Ponto de Murcha

### 2.1.2.2 Sistema de irrigação e manejo da cultura

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por microaspersão. O sistema consistia em tubos de 16 mm conectados a uma tubulação de 32 mm. O espaçamento utilizado foi de 5 m entre os microaspersores e de 3,0 m entre as linhas. A pressão de serviço foi de 20 mca, a vazão de 87 L h<sup>-1</sup> e a intensidade de precipitação de 5,3 mm h<sup>-1</sup>.

A semeadura da soja ocorreu com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir uma densidade de 360.000 plantas por hectare (ALVES *et al.*, 2021a). A adubação foi realizada com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004).

### 2.1.2.3 Delineamento experimental

Em cada um dos dois experimentos, conduzidos em 2021 e 2022, foram realizados cinco tratamentos. O primeiro tratamento (TR1), foi realizado com irrigação plena, ou seja, sem aplicação de déficit hídrico à cultura. Nos demais tratamentos (TR2, TR3, TR4 e TR5), a irrigação foi completamente suspensa em determinados estádios de desenvolvimento. Finalizado o estágio de desenvolvimento, a irrigação voltava a ser plena. No tratamento 2 (TR2), a irrigação foi totalmente suspensa no estágio vegetativo (VC-V2), estágio de cotilédones até dois nós. No TR3, a suspensão da irrigação ocorreu no estágio de dois nós até o início do florescimento (vegetativo/florescimento: V2-R1). No TR4, a suspensão ocorreu do início do estágio de floração até o início do enchimento das sementes (formação de vagens: R1:R5). Por fim, no tratamento 5 (TR5), a suspensão da irrigação foi feita na fase de enchimento das sementes até o início da maturação fisiológica (enchimento de sementes: R5-R7).

Os estádios fenológicos da planta foram acompanhados visualmente com base em Fehr e Caviness (1971). Cada um dos tratamentos foi repetido quatro vezes com um tamanho de parcela individual de 2 × 6 m. O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados.

Os dados de altura, área foliar, biomassa e produtividade, nos tratamentos de cada ano, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A análise de regressão foi utilizada para verificar a relação entre produtividade, ETA e déficit hídrico no solo.

### 2.1.2.4 Umidade do solo, irrigação e dados meteorológicos

O momento de irrigação foi definido com base no déficit máximo permitido no manejo, no caso, metade da quantidade de água máxima disponível para a planta (ALVES *et al.*, 2021a).

A umidade do solo foi medida pelo método gravimétrico em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, no intervalo máximo de 7 dias entre uma amostragem e outra, de forma que uma amostra fosse retirada antes da irrigação e outra amostra 24 horas após a irrigação. A lâmina de irrigação foi calculada por meio da Eq. (1).

$$I = 10 (\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) Z \quad \text{para } Z \leq 0,20\text{ m} \quad (1)$$

$$I = 10 [(\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) + (\theta_{CC(0,20-0,40\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0,20-0,40\text{ m})})(Z - D_{20})] \quad \text{para } Z > 0,20\text{ m}$$

em que,

- I = irrigação aplicada, mm;
- $\theta_{CC}$  = umidade do solo na capacidade de campo,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;
- $\theta_{\text{atual}}$  = umidade do solo atual,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;
- $D_{20}$  = espessura da camada de solo (20 cm)
- Z = profundidade do sistema radicular (80% da profundidade máxima), cm.

Os dados meteorológicos de temperatura do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência ( $ETo$ ), que foi calculada usando a equação de Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), desde a semeadura até a colheita, foram adquiridos da estação meteorológica localizada próxima a área experimental.

#### 2.1.2.5 Déficit hídrico no solo

O déficit de hídrico no solo (DHS), nos quatro tratamentos onde a irrigação foi suspensa, foi calculado pela Eq. (2), utilizando a metodologia proposta por Berliner e Oosterhuis (1978).

$$DHS = \left[ 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,20\text{ m})}} \right] \times 100\% \quad \text{para } Z \leq 0,20\text{ m} \quad (2)$$

$$DHS = \left[ \left( 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0,20\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,20\text{ m})}} \right) + \left( 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,40\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,40\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,40\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,40\text{ m})}} \right) \right] \times 100\% \quad \text{para } Z > 0,20\text{ m}$$

Considerou-se como DHS prejudicial à cultura, para fins de análise, os valores de déficits maiores que o déficit hídrico máximo permitido no manejo (DMPM) que foi igual a 50%.

### 2.1.2.6 Evapotranspiração atual e produtividade da água

A evapotranspiração atual (ETa), para cada estágio fenológico da cultura, foi calculada para todos os tratamentos utilizando o balanço hídrico de água no solo (ALLEN *et al.*, 1998) através da Eq. (3).

$$ET_{a(0-0,40\text{ m})} = \left\{ [(\theta_{1i\ 0-0,20\text{ m}} - \theta_{2i-1\ 0-0,20\text{ m}}) D_i] + [(\theta_{1i\ 0,20-0,40\text{ m}} - \theta_{2i\ 0,20-0,40\text{ m}}) D_i] \right\}, \text{ para } 0 \leq Z \leq 40 \quad (3)$$

em que,

$\theta_{1i}$  = umidade volumétrica no momento da primeira amostragem,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;

$\theta_{2i}$  = umidade volumétrica no momento da segunda amostragem,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;

$D_i$  = espessura da camada (20 cm). Para  $Z \leq 20$ .

A percolação profunda foi desprezada, pois a irrigação foi aplicada apenas na camada correspondente ao sistema radicular da cultura (0,0-0,40 m). Não foi observado escoamento superficial. A ascensão capilar também foi desprezada, por se tratar de solo profundo.

A produtividade de uso de água (PUA) foi obtida em cada experimento e tratamento, em  $\text{kg m}^{-3}$ , por meio da Eq. (4) (Payero *et al.*, 2009).

$$PUA = \frac{Y}{ET_a} \quad (4)$$

em que,

$Y$  = produtividade,  $\text{kg ha}^{-1}$ .

### 2.1.2.7 Fenologia e rendimento da cultura da soja

Nos dois experimentos, as medições foram realizadas 65 dias após a semeadura (DAS). Para obtenção dos dados de altura, área foliar e biomassa seca acima do solo, quatro plantas, em cada uma das quatro repetições, dos cinco tratamentos, foram retiradas e levadas ao laboratório para análise.

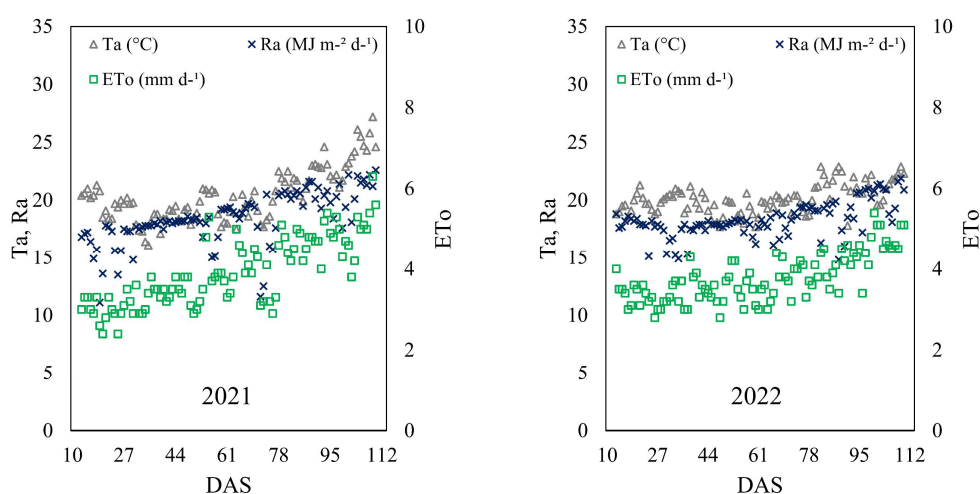
A altura de planta foi obtida com o auxílio de uma régua milimetrada. A área foliar foi avaliada por meio de um medidor de área foliar LI-3100c (Licor, Inc., Lincoln, NE, EUA). Após medição da área foliar e altura de plantas, o material era acondicionado em sacos de papel

e levados para a estufa, onde ficavam secando por 36h a uma temperatura de 75°C e posteriormente obtinha-se o peso para computar a biomassa. Para avaliar a produtividade de sementes, uma área em cada uma das quatro repetições foi escolhida aleatoriamente e todas as plantas existentes dentro de 2 metros lineares foram colhidas. As vagens de cada planta foram descascadas e os grãos devidamente acondicionados em sacos de papel identificados e encaminhados ao laboratório de análise de sementes da Embrapa Cerrados, onde foram pesados em uma balança analítica. Após a correção da umidade dos grãos para 13%, o rendimento da soja em cada tratamento foi calculado.

## 2.1.3 Resultados e discussão

### 2.1.3.1 Condições climáticas

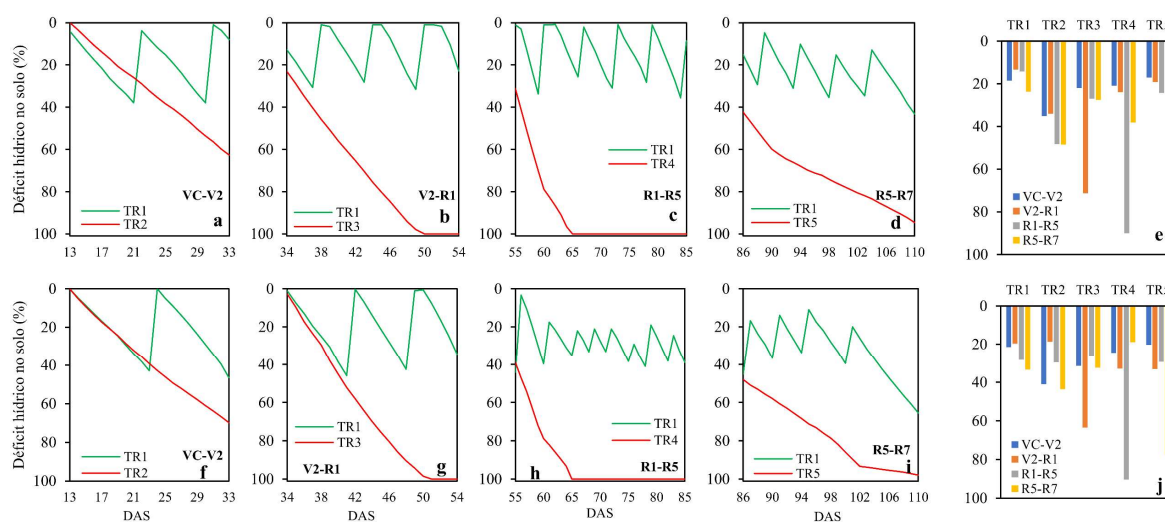
Apresenta-se na Figura 1 as condições climáticas observadas durante os experimentos de 2021 e 2022. Não foram registradas ocorrências de precipitação nos dois experimentos. Em 2021, a temperatura média diária do ar variou entre 16 e 27 °C, com média igual a 20,4 °C. A radiação solar variou entre 11 e 23 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e a evapotranspiração de referência variou entre 2,4 e 6,3 mm d<sup>-1</sup>, com médias iguais a 18,4 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e 3,9 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente. Em 2022, a temperatura média diária do ar variou de 18 a 23 °C, com média igual a 20,1 °C. A radiação solar variou entre 15 e 22 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e a evapotranspiração de referência variou entre 2,8 e 5,4 mm d<sup>-1</sup>, com médias iguais a 18,3 °C e 3,9 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 1.** Temperatura média do ar (Ta), Radiação solar (Ra) média e Evapotranspiração de Referência (ETo) média nos experimentos de 2021 e 2022.

### 2.1.3.2 Déficit hídrico no solo

A Figura 2 mostra o déficit hídrico no solo, ocorrido em cada tratamento, durante os experimentos de 2021 e 2022. Em 2021, os maiores déficits foram observados nos tratamentos TR3, TR4 e TR5, dentro dos estádios fenológicos V2-R1, R1-R5 e R5-R7, com valores iguais a 71%, 90% e 73%, respectivamente (Figura 2e). Em 2022, os mesmos tratamentos foram os mais impactados no déficit hídrico do solo, com valores iguais a 64%, 90% e 78% (Figura 2j). Os déficits hídricos nos tratamentos TR3, TR4 e TR5 foram maiores que o DMPM durante 16, 29 e 25 dias, respectivamente em 2021 e 14, 29 e 24 dias em 2022, respectivamente.

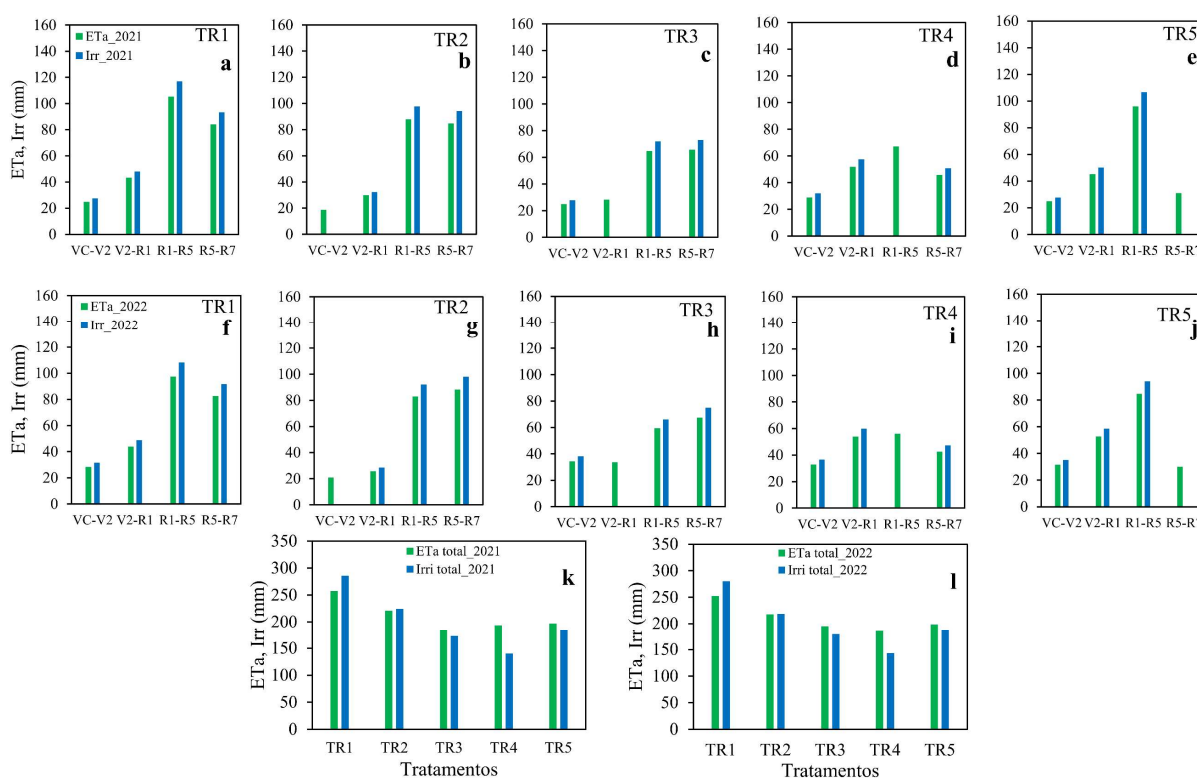


**Figura 2.** Déficit hídrico no solo observado, nos diferentes tratamentos, durante os estádios fenológicos nos experimentos de 2021 (a, b, c e d) e 2022 (f, g, h e i) e valor médio de déficit hídrico, por estádio fenológico, em cada tratamento nos experimentos de 2021 (e) e 2022 (j). Sendo: VC-V2 = estádio fenológico de cotilédone até o segundo nó; V2-R1 = estádio fenológico desde o segundo nó até o início do florescimento; R1-R5 = estádio fenológico desde o início do florescimento até a o início do enchimento de grãos; R5-R7 = estádio fenológico desde o início do enchimento de grãos até a maturação fisiológica. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico R5-R7.

### 2.1.3.3 Evapotranspiração e irrigação

A Figura 3, além dos totais de irrigação e da ETa observada nos tratamentos, apresenta a irrigação e a evapotranspiração atual observada nos estádios fenológicos da cultura. No experimento de 2021, a irrigação aplicada nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 durante os estádios

fenológicos VC-V2, V2-R1, R1-R5 e R5-R7 foram, respectivamente, 22%, 39%, 51% e 35% menor que a irrigação aplicada no tratamento TR1 (286 mm) para os mesmos estádios fenológicos (Figura 3, b, c, d e e, respectivamente). Em 2022, a irrigação aplicada nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 durante os estádios fenológicos VC-V2, V2-R1, R1-R5 e R5-R7 foram, respectivamente, 22%, 36%, 49% e 33% menor que a irrigação aplicada no tratamento TR1 (280 mm) para os mesmos estádios fenológicos (Figura 3, g, h, i e j, respectivamente). O valor médio (2021-2022) da lâmina de irrigação aplicada no tratamento TR1 foi igual a 283 mm e a lâmina média aplicada nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 durante os estádios fenológicos VC-V2, V2-R1, R1-R5 e R5-R7 foram, respectivamente, 22%, 38%, 50% e 34% menores que o TR1.



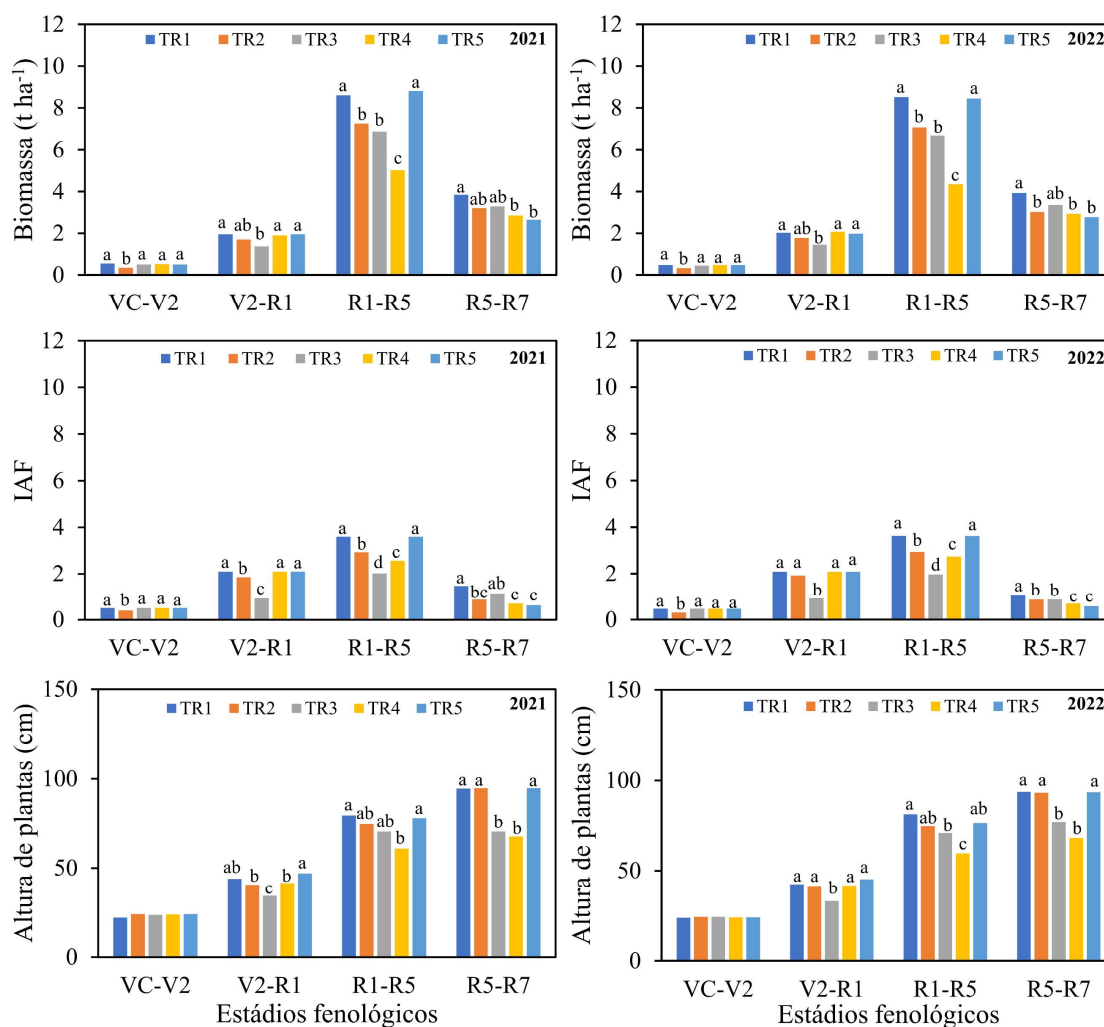
**Figura 3.** Irrigação (Irr) e evapotranspiração atual (ETa), nos diferentes tratamentos, nos anos de 2021 (a, b, c, d e e) e 2022 (f, g, h, i e j) e os valores totais de Irr e ETa para os anos 2021 (k) e 2022 (l). TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. VC-V2 = estágio fenológico de cotilédone até o segundo nó; V2-R1 = estágio fenológico desde o segundo nó até o início do florescimento; R1-R5 = estágio fenológico desde o início do florescimento até a o início do enchimento de

grãos; R5-R7 = estágio fenológico desde o início do enchimento de grãos até a maturação fisiológica.

O valor da ETa foi menor em todos os tratamentos com déficit hídrico. A ETa nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 durante os estádios fenológicos VC-V2, V2-R1, R1-R5 e R5-R7 foram, respectivamente, 14%, 29%, 25% e 24% menores em relação ao TR1 em 2021 (Figura 3k) e 14%, 23%, 27% e 21% menores em relação ao TR1 em 2022 (Figura 3l). O valor médio (2021-2022) de ETa foi igual a 255 mm, no tratamento TR1 e foi 14%, 26%, 26% e 22% menor nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 durante os estádios fenológicos VC-V2, V2-R1, R1-R5 e R5-R7, respectivamente. Isto corre pois em situações de déficit, as plantas tendem a reduzir a transpiração através do fechamento dos estômatos, para conservar e prevenir a perda excessiva de água, diminuindo a condutância estomática e consequentemente a transpiração, impactando diretamente na evapotranspiração da planta (BHATTI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021).

#### 2.1.3.4 Características fenológicas da cultura

A biomassa foi significativamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre os cinco tratamentos (Figura 4). No estágio fenológico VC-V2, o tratamento TR2 sofreu redução de 36% (2021) e 32% (2022) na biomassa em comparação com o TR1. No estágio fenológico V2-R1, o tratamento TR3 teve redução de 30% (2021) e 28% (2022) em relação ao TR1. O tratamento TR4 teve redução de 42% (2021) e 49% (2022), em relação ao TR1, no estágio fenológico R1-R5. No estágio fenológico R5-R7 o tratamento TR4 obteve reduções de 26% (2021) e 25% (2022) e o TR5 obteve reduções de 31% (2021) e 29% (2022), respectivamente, em relação ao TR1. O tratamento TR4, onde a irrigação foi suspensa no estágio fenológico R1-R5, foi o mais impactado, neste tratamento o processo de assimilação de matéria seca pode ter sido afetado, e as plantas podem ter passado a modular as taxas de expansão celular a valores menores. Cui *et al.* (2021) observaram reduções na biomassa da ordem de 54% na soja sob déficit hídrico no estágio fenológico R1-R5. Estes resultados estão de acordo com as observações de Wei *et al.* (2018) e Anda *et al.* (2020), que notaram reduções maiores nas características de crescimento e desenvolvimento da soja durante a fase reprodutiva.



**Figura 4.** Valores médios de biomassa, índice de área foliar (IAF) e altura de plantas da soja nos diferentes tratamentos e estádios fenológicos durante os anos de 2021 e 2022. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. As diferentes letras acima das barras representam o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os diferentes tratamentos.

O IAF foi significativamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre os cinco tratamentos (Figura 4). No estágio fenológico VC-V2, o tratamento TR2 sofreu redução de 20% (2021) e 34% (2022) no IAF em comparação com o TR1. No estágio fenológico V2-R1, o tratamento TR3 teve redução de 56% (2021) e 56% (2022) em relação ao TR1. No estágio fenológico R1-R5 os tratamentos mais impactados foram o TR3, com redução de 44% (2021) e 46% (2022), e o TR4 com redução de 29% (2021) e 24% (2022), respectivamente, em relação ao TR1. No estágio fenológico R5-R7, os tratamentos mais impactados foram o TR4, com redução de 53% (2021) e 33% (2022), e o TR5, com redução de 58% (2021) e 44% (2022), em relação ao TR1. Os

tratamentos TR3 e TR4, onde a irrigação foi suspensa nos estádios fenológico V2-R1 e R1-R5, foram os mais impactados, essa redução é devida ao mecanismo utilizado pelas plantas para reduzir o impacto do déficit hídrico, reduzindo a transpiração e restringindo a expansão da área foliar, para conservar mais água dentro da planta (MEEKS *et al.*, 2019; WIJWARDANA *et al.*, 2019). Alguns estudos (WIJWARDANA *et al.*, 2019; DONG *et al.*, 2019) relataram reduções significativas na área foliar de soja submetida ao déficit hídrico.

A altura de plantas foi significativamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre os cinco tratamentos (Figura 4). No estágio fenológico VC-V2, não houve diferença significativa entre os tratamentos. No estágio fenológico V2-R1, o tratamento TR3 teve redução de 22% (2021) e 22% (2022) em relação ao TR1. O tratamento TR4 teve redução de 23% (2021) e 26% (2022), em relação ao TR1, no estágio fenológico R1-R5. No estágio fenológico R5-R7, os tratamentos mais impactados foram o TR3, com redução de 25% (2021) e 18% (2022), e o TR4, com redução de 28% (2021) e 27% (2022), em relação ao TR1. Os tratamentos TR3 e TR4 passaram por déficit hídrico nos estádios fenológicos V2-R1 e R1-R5, nesses estádios as plantas estavam ainda em processo de desenvolvimento vegetativo, e o déficit hídrico aplicado pode ter causado redução na expansão celular (SALEEM *et al.*, 2022), uma vez que durante esses estádios fenológicos o déficit hídrico causa efeitos irreversíveis no crescimento da soja (ISMANOV *et al.*, 2019; BOULCH *et al.*, 2021; PINNAMANENI *et al.*, 2021).

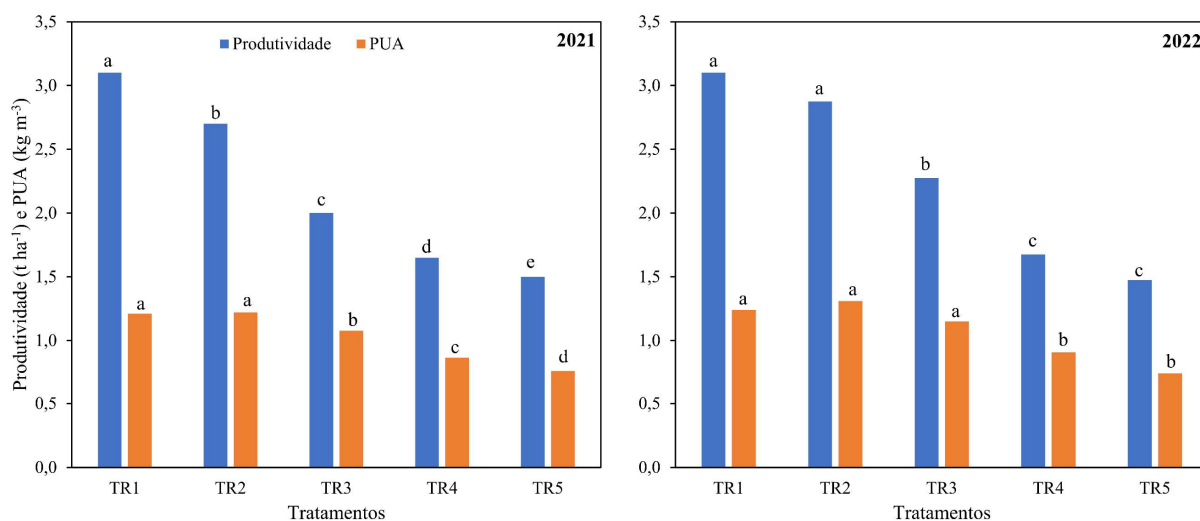
### 2.1.3.5 Produtividade da cultura e produtividade da água

A produtividade foi significativamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre os cinco tratamentos em 2021 e em 2022 o TR2 foi igual estatisticamente ao TR1 (Figura 5). A maior produtividade obtida foi observada no tratamento TR1 nos dois anos de estudo. Em 2021 a produtividade de uso da água (PUA) foi significativamente diferente ( $p < 0,05$ ) para os tratamentos TR3, TR4 e TR5 e o TR2 foi igual estatisticamente ao TR1 (Figura 5). No tratamento TR2, a produtividade foi menor em 13% (2021) e 7% (2022) e a PUA foi maior em 0,8% (2021) e 5,6% (2022); No tratamento TR3, a redução na produtividade foi de 35% (2021) e 27% (2022) e a PUA foi menor em 11% (2021) e 7% (2022); No tratamento TR4, a redução na produtividade foi de 47% (2021) e 52% (2022) e a PUA foi menor em 29% (2021) e 27% (2022); no tratamento TR5 houve redução na produtividade de 52% (2021) e 52% (2022) e na PUA de 38% (2021) e 41% (2022).

Os tratamentos TR4 e TR5 foram os mais impactados no rendimento. Nesses tratamentos, a duração e a intensidade do déficit hídrico aplicado nos estádios R1-R5 e R5-R7 impactou a fisiologia da planta, inibindo a fotossíntese, que é o processo fundamental para manter o crescimento e garantir a produtividade (WANG *et al.*, 2018; IQBAL *et al.*, 2019; SAKODA *et al.*,

2021). Nesses estádios, a redução do rendimento da cultura foi proporcionalmente maior que a redução na demanda hídrica, refletindo na redução do valor da PUA. A irrigação da cultura da soja nesses estádios é importante para obtenção da PUA elevada (JAYBHAY *et al.*, 2019), devido ao aumento de produtividade resultante da maior disponibilidade de água e nutrientes (HUYNH *et al.*, 2019).

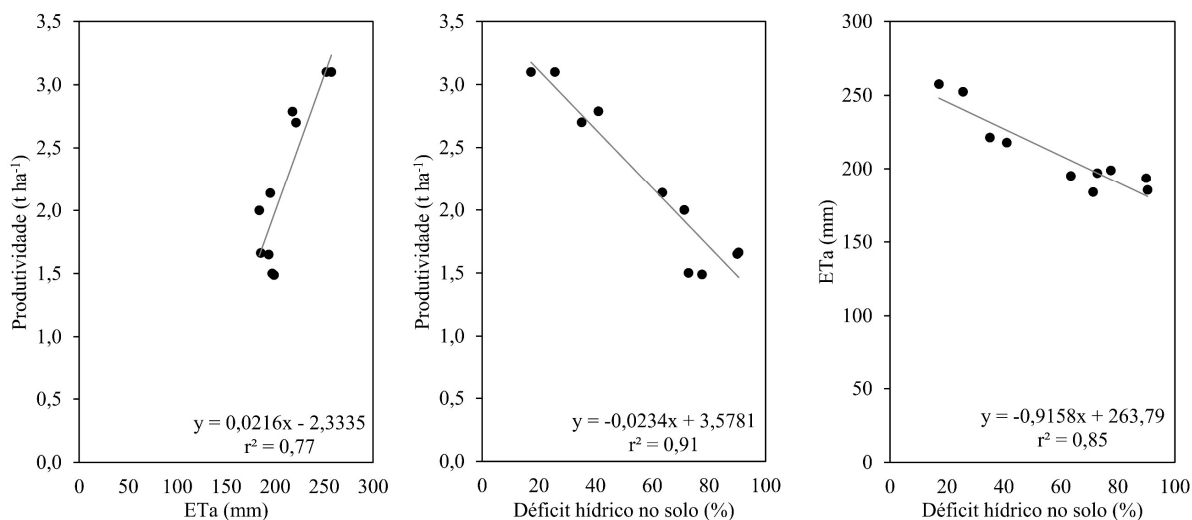
Embora tenha-se observado diferença de produtividade entre TR1 e TR2, em 2021, não foi observada diferença em 2022. Não foi observada diferença na PUA nesses dois tratamentos. Por outro lado, nos tratamentos TR2 e TR3 houve uma utilização mais eficiente da água sob condições hídricas limitadas, devido ao fechamento dos estômatos (SERNA, 2022; COMAS *et al.*, 2019; LAMPTEY *et al.*, 2020; MEMON *et al.*, 2021). No TR2 as plantas estavam em processo de formação de área foliar e no TR3 as plantas chegaram até o início do florescimento sob déficit hídrico, o que justifica a diferença de produtividade e PUA entre estes tratamentos. Os resultados mostram que a aplicação de um déficit hídrico durante o estágio fenológico vegetativo pode reduzir o consumo de água, melhorando assim significativamente a PUA das culturas (WANG *et al.*, 2023).



**Figura 5.** Produtividade de uso da água da soja cultivada com déficit hídrico aplicado em diferentes estádios de desenvolvimento nos anos de 2021 e 2022. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. As diferentes letras acima das barras representam o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os diferentes tratamentos.

### 2.1.3.6 Relações entre evapotranspiração atual, déficit hídrico no solo e produtividade da cultura

A Figura 6 mostra as relações entre produtividade média, déficit hídrico no solo médio e evapotranspiração atual total durante o ciclo da soja nos experimentos de 2021 e 2022.



**Figura 6.** Relação entre a produtividade, evapotranspiração atual (ETa), déficit hídrico no solo para os dados observados nos tratamentos durante os anos de 2021 e 2022.

Observou-se correlação linear entre a produtividade e o déficit hídrico no solo, ETa total e produtividade média, déficit hídrico no solo médio e ETa total, com valor de  $r^2$  de 0,77, 0,91 e 0,85, respectivamente. Alves *et al.* (2021a), encontraram correlação entre a produtividade e a ETa total da soja sob diferentes níveis de déficit hídrico com  $r^2$  de 0,99. A alta correlação entre a ETa e o déficit hídrico no solo é justificada pois o teor de umidade do solo é diretamente ligado ao processo de evapotranspiração, uma vez que vários métodos para estimar a ETa com base na dinâmica da umidade do solo (LI *et al.*, 2019, CHAI *et al.*, 2023). A equação linear gerada entre a produtividade média e a ETa total estima que a cada milímetro de ETa reduzido ocasionará uma redução de 21,6 kg ha<sup>-1</sup>, da mesma forma, a cada incremento de 1% no déficit hídrico no solo ocasionará uma redução de 23,4 kg ha<sup>-1</sup> e uma redução de ETa de 0,92 mm. Estes resultados confirmam que a ETa e o déficit hídrico no solo interferem na produtividade da soja, de forma que quanto maior for a ETa da cultura, maior será o rendimento e quanto maior o déficit hídrico no solo, menor será o rendimento e a ETa.

#### 2.1.4 Conclusões

O déficit hídrico impactou mais severamente a produtividade nos estádios fenológicos correspondentes à floração até formação de vagens (R1-R5) e enchimento de sementes (R5-R7), com reduções na ETa de 26% e 22%.

No estágio fenológico VC-V2, apesar do déficit hídrico aplicado, a perda de produtividade foi inferior a 15% e a produtividade de uso da água foi similar ao tratamento sem déficit hídrico.

Observou-se alta correlação linear existente entre a produtividade e o déficit hídrico no solo ( $r^2 = 0,91$ ), Eta total e produtividade média ( $r^2 = 0,77$ ) e déficit hídrico no solo médio e Eta total ( $r^2 = 0,85$ ).

## 2.2 Avaliação de índices de vegetação para monitoramento do impacto do déficit hídrico na fenologia da soja

### Resumo

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem sido incentivado como uma alternativa às imagens de satélite para o monitoramento de culturas agrícolas. Os índices de vegetação (VIs) são modelos matemáticos, para diferentes comprimentos de onda, que são utilizados para a avaliação da cobertura vegetal, vigor e dinâmica de crescimento, estado nutricional, entre outras aplicações e pode mostrar uma alta correlação com o rendimento. Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi analisar índices de vegetação para mapeamento das condições da cultura da soja sob déficit hídrico. Para tanto, um experimento foi conduzido entre maio e setembro de 2021. Utilizou-se um delineamento experimental em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (TR1), a irrigação atendeu à demanda hídrica da cultura em todos os estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em estádios específicos (TR2 = VC-V2, TR3 = V2-R1, TR4 = R1-R5 e TR5 = R5-R7) e depois retomada. Os índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI foram altamente correlacionados com o índice de área foliar (IAF), apresentando  $r^2$  superiores a 0,80 e RMSE inferiores a 0,5. Para a biomassa (BIO), EVI2, OSAVI e RDVI também mostraram correlações significativas com  $r^2 \geq 0,70$  e  $RMSE < 1,75$ . Além disso, os índices NDRE, SCCCI, RECI, GRVI, GCI e GNDVI foram altamente correlacionados com a produtividade, com  $r^2 \geq 0,90$  e  $RMSE < 0,18$ . Esses resultados indicam a eficácia desses índices na estimativa destes parâmetros para soja sob déficit hídrico.

**Palavras-chave:** Índices espectrais. Mapeamento. Irrigação. VANTs.

### 2.2.1 Introdução

A soja (*Glycine max* L.) está na vanguarda da economia agrícola mundial como uma importante cultura oleaginosa. Em termos de área cultivada, a soja ocupa o quarto lugar no mundo e o primeiro entre as leguminosas (STANIAK *et al.*, 2023). Em 2020, foram cultivados 134 milhões de hectares em todo o mundo, com uma produção de 349 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2022). No Brasil a soja é a principal commodity agrícola, o país se destaca por ser o maior exportador de soja do mundo. Na safra 2023/24, o Brasil foi responsável por 59% das exportações de soja mundial (IPAD, 2024).

A produção de alimentos e a segurança alimentar são ameaçadas por ocorrência de secas agrícolas. Ferramentas computacionais que possam auxiliar no monitoramento desses eventos são de grande importância para o planejamento agrícola. O sensoriamento remoto tem sido utilizado para mapear as condições da cultura em campo (CHANG *et al.*, 2021; JOHANSEN *et al.*, 2019). Geralmente, utilizam-se imagens de satélite para o monitoramento da vegetação, porém, esses produtos satelitais possuem algumas desvantagens como baixa resolução espacial, condições de nuvens atmosféricas e frequência de aquisição de dados, que muitas vezes impossibilita o monitoramento detalhado de plantas (CHANG *et al.*, 2021).

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs), tem sido encorajada como alternativa a imagens satelitais para o monitoramento de cultivos agrícolas. O uso de VANTs possibilita embarcar sensores para a aquisição de imagens de alta resolução espectral ao longo do tempo e do espaço, possibilitando avaliar o desenvolvimento das culturas com maior acurácia, quando comparado a imagens satelitais (SAGAN *et al.*, 2019; SIDIKE *et al.*, 2018), utilizando principalmente índices de vegetação derivados de imagens multiespectrais (ROMA; CATANIA, 2022).

Os índices de vegetação (VIs) são modelos matemáticos para diferentes comprimentos de onda que são utilizados para a avaliação da cobertura vegetal, vigor e dinâmica de crescimento, estado nutricional, entre outras aplicações (BAIO *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR *et al.*, 2018), podendo ser correlacionado com o rendimento da cultura (DA SILVA *et al.*, 2020). Variáveis como índice de área foliar, biomassa e produtividade são fundamentais para avaliar o impacto do déficit hídrico na planta e esse impacto pode ser avaliado por sensores multiespectrais acoplados a drones que fornecem medidas de comprimento de onda nas faixas visível (VIs; ~400–700 nm) e infravermelho próximo (NIR; ~700–1200 nm) (QIU *et al.*, 2018).

Vários índices de vegetação têm sido utilizados para o acompanhamento dos cultivos. Wang *et al.* (2023), observaram que o NDRE foi o índice que mais se correlacionou com o

índice de área foliar de pastagem. He *et al.* (2023) obtiveram correlação exponencial entre matéria seca de repolho chinês e os índices NDRE, NDVI e RVI com valores de  $R^2$  acima de 0,80. Andrade *et al.* (2022) mostraram que a produtividade da soja foi melhor estimada com o EVI2, porém, este índice apresentou alta variabilidade espacial. Shrestha *et al.* (2023) encontraram forte correlação com a produtividade e índices de vegetação baseados nas bandas do vermelho, borda vermelha e infravermelho próximo. Como relatado nestes trabalhos, as estimativas baseadas em índices de vegetação podem variar entre os métodos e estádios fenológicos da cultura (HUANG *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2021) e, por isso, a avaliação destes índices se torna importante para o monitoramento dos cultivos. Assim, para ter uma avaliação abrangente da correlação entre as características de crescimento e fenologia das culturas vários índices devem ser testados, principalmente para cultivos que são susceptíveis ao déficit hídrico como a soja na região do Cerrado.

Para estimar o impacto do déficit hídrico sobre as características de crescimento e rendimento das culturas utilizando índices de vegetação, faz-se necessário calibrar equações com experimentos de campo (PIPATSITEE *et al.*, 2023). Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi analisar índices de vegetação para mapeamento das condições da cultura da soja sob déficit hídrico.

## **2.2.2 Material e Métodos**

### **2.2.2.1 Área de estudo e manejo da cultura**

O experimento foi conduzido durante o período de maio a setembro de 2021, na Unidade de Referência em Manejo da Água (URMA), do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do planalto central do bioma Cerrado (15°35'55.1"S, 47°42'27.4"W), com altitude de 979 m. O clima da região é sazonal e corresponde ao tipo Aw-tropical chuvoso (KÖPPEN, 1948), com presença de verões chuvosos de outubro a março e invernos secos de abril a setembro (CORREIA FILHO *et al.*, 2023). A precipitação média anual é de 1.383,7 mm e as temperaturas mínima e máxima médias iguais a 16,5°C e 27,8°C, respectivamente (SILVA *et al.*, 2017). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (EMBRAPA, 2011). Na Tabela 1 apresenta-se características físicas e químicas do solo da área experimental.

**Tabela 1.** Propriedades físicas e químicas do solo da área experimental

Camada (m)	MO (%)	pH	Ds (g cm <sup>3</sup> )	CC	PM
				m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
0-0,2	2,7	5,6	1,10	0,35	0,21
0,2-0,4	2,6	5,6	1,08	0,35	0,20

MO: Matéria orgânica; Ds: Densidade do solo; CC: Capacidade de Campo; PM: Ponto de Murcha

A soja (cv. '7581RR') foi semeada em maio e colhida em setembro de 2021. A semeadura da soja foi feita com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir uma densidade de 360.000 plantas por hectare (ALVES *et al.*, 2021a). A adubação foi realizada com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). Durante o experimento foram realizadas observações visuais das fases fenológica da soja, com base em Fehr e Caviness (1977).

Os estádios fenológicos da soja e suas respectivas durações estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Estádios fenológicos e durações

Estádios fenológicos e durações (dias)						
Ano	Semeadura	V	VF	FV	ES	Total
2021	26/05/2021	21	21	31	25	98

V = Vegetativo; VF = Vegetativo/Florescimento; FV = Formação de Vagens; ES = Enchimento de Sementes

Foram conduzidos cinco tratamentos, o primeiro tratamento (TR1), foi realizado com irrigação plena, ou seja, sem aplicação de déficit hídrico à cultura. Nos demais tratamentos (TR2, TR3, TR4 e TR5), a irrigação foi completamente suspensa em determinados estádios de desenvolvimento. Finalizado o estágio de desenvolvimento, a irrigação voltava a ser plena. No tratamento 2 (TR2), a irrigação foi totalmente suspensa no estágio vegetativo (VC-V2), estágio de cotilédones até dois nós. No TR3, a suspensão da irrigação ocorreu no estágio de dois nós até o início do florescimento (vegetativo/florescimento: V2-R1). No TR4, a suspensão ocorreu do início do estágio de floração até o início do enchimento das sementes (formação de vagens: R1-R5). Por fim, no tratamento 5 (TR5), a suspensão da irrigação foi feita na fase de enchimento das sementes até o início da maturação fisiológica (enchimento de sementes: R5-R7). Cada um dos tratamentos foi repetido quatro vezes com um tamanho de parcela individual de 2 × 6 m. O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados.

### 2.2.2.2 Umidade do solo, irrigação e dados meteorológicos

O momento de irrigação foi definido com base no déficit máximo permitido no manejo, no caso, metade da quantidade de água máxima disponível para a planta (ALVES *et al.*, 2021a). A umidade do solo foi medida pelo método gravimétrico em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, no intervalo máximo de 7 dias entre uma amostragem e outra, de forma que uma amostra fosse retirada antes da irrigação e outra amostra 24 horas após a irrigação. A lâmina de irrigação foi calculada por meio da Eq. (1).

$$I = 10 (\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) Z \quad \text{para } Z \leq 0,20 \text{ m} \quad (1)$$

$$I = 10 [(\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) + (\theta_{CC(0,20-0,40\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0,20-0,40\text{ m})})(Z - D_{20})] \quad \text{para } Z > 0,20 \text{ m}$$

em que,

- I = irrigação aplicada, mm;
- $\theta_{CC}$  = umidade do solo na capacidade de campo,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;
- $\theta_{\text{atual}}$  = umidade do solo atual,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;
- $D_{20}$  = espessura da camada de solo (20 cm)
- Z = profundidade do sistema radicular (80% da profundidade máxima), cm.

Os dados meteorológicos de temperatura do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), que foi calculada usando a equação de Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), desde a semeadura até a colheita, foram adquiridos da estação meteorológica localizada próxima a área experimental. A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por microaspersão. Os microaspersores foram espaçados 3,0 m entre linhas e 5,0 m entre emissores. A pressão de serviço foi de 20 mca, a vazão de 87 L h<sup>-1</sup> e a intensidade de precipitação de 5,3 mm h<sup>-1</sup>.

### 2.2.2.3 Fenologia e rendimento da cultura da soja

As medições da fenologia da soja foram realizadas em 25/06 (30 DAS), 30/07 (65 DAS) e 28/08 (93 DAS) de 2021. Para obtenção dos dados de área foliar e biomassa seca acima do solo, foram retiradas quatro plantas, em cada uma das quatro repetições, dos cinco tratamentos. A área foliar foi avaliada por meio de um medidor de área foliar LI-3100c (Licor, Inc., Lincoln, NE, EUA). Após medição da área foliar, o material era acondicionado em sacos de papel e

levados para a estufa, onde ficavam secando por 36h a uma temperatura de 75°C e posteriormente obtinha-se o peso para computar a biomassa. Para avaliar a produtividade de sementes, uma área em cada uma das quatro repetições foi escolhida aleatoriamente e todas as plantas existentes dentro de 2 metros lineares foram colhidas. As vagens de cada planta foram descascadas e os grãos devidamente acondicionados em sacos de papel identificados e encaminhados ao laboratório de análise de sementes, onde foram pesados em uma balança analítica. Após a correção da umidade dos grãos para 13%, foi determinado o rendimento em cada tratamento.

#### 2.2.2.4 Imagens multiespectrais

As imagens foram capturadas utilizando um veículo aéreo não tripulado (VANT) da DJI® modelo Phantom 4 (SZ DJI Technology Co.). As imagens multiespectrais foram adquiridas utilizando um sensor multiespectral Micasense modelo RedEdge acoplada ao VANT. Esse sensor, com resolução de 1280 x 960 pixels para cada banda, captura imagens em cinco bandas espectrais, denominadas azul (intervalo: 465-485 nm; largura: 20 nm), verde (intervalo: 550-570 nm; largura: 20 nm), vermelho (intervalo: 663-673 nm; largura: 10nm), Red Edge (intervalo: 712-722nm; largura: 10nm), Near Infra Red (NIR) (intervalo: 820-860nm; largura: 40nm) (MICASENSE, 2020).

Os voos com o VANT, realizados entre 10h e 12h (GMT+3), foram feitos nos dias 25/06 (30 DAS), 30/07 (65 DAS) e 28/08 (93 DAS) de 2021. Os voos foram planejados usando o software DJI GS Pro® que permite criar um plano de voo onde a aeronave percorre pontos pré-definidos guiados pelo sistema GNSS. Os planos de voo foram elaborados garantindo que a captura fosse feita com sobreposição lateral e frontal mínima de 80%, mantendo uma linha de voo a 60 metros acima do nível do solo para o multiespectral.

As imagens coletadas foram importadas e processadas no software Pix4D Mapper® (Pix4D®, Lausanne, Suíça). Ortomosaicos contendo valores de reflectância (multiespectral) foram gerados computacionalmente pela tecnologia fotogramétrica Structure from Motion (SfM) que trabalha com a identificação automática de características semelhantes em um conjunto de imagens sobrepostas (WESTOBY *et al.*, 2012). Considerando imagens sobrepostas, o Pix4D Mapper® calcula os valores de refletância para cada pixel do ortomosaico usando uma média ponderada de pixels em todas as imagens originais que correspondem a esse pixel específico, mas atribuindo mais peso às imagens em que o pixel é mais central. Correções radiométricas foram aplicadas para melhorar a qualidade dos dados usando parâmetros da câmera, irradiância e correções através do painel de calibração. Os ortomosaicos de refletância

gerados no Pix4D<sup>®</sup> foram importados para o software QGIS 3.28.11, onde as imagens foram recortadas para apresentar apenas a área de interesse contendo os tratamentos.

### 2.2.2.5 Índices de vegetação

A resposta espectral da soja aos tratamentos foi quantificada utilizando 12 VIs estimados a partir das bandas da imagem multiespectral (R, G, red-edge e NIR) (Tabela 3). Os índices de vegetação foram calculados usando a calculadora raster do QGIS 3.28.11. Para a análise estatística, quatro áreas de linhas de planta foram selecionadas de forma visual em cada tratamento, perfazendo quatro repetições. As áreas foram selecionadas visualmente para não haver contaminação com pixels de solo e superestimar ou subestimar os valores referente a superfície foliar. Os valores de VIs de cada tratamento foram extraídos com o plugin de estatística zonal do QGIS QGIS v. 3.28.11. Para tanto, utilizou-se a camada vetorial dos tratamentos, contendo apenas as áreas classificadas como folhas.

**Tabela 3.** Índices de vegetação multiespectral avaliados no estudo

Acrônimo	Equação	Referência
EVI2	$\frac{2,5(R_n - R_r)}{R_n + 2,4R_r + 1}$	Jiang <i>et al.</i> (2008)
NDRE	$\frac{R_n - R_{RE}}{R_n + R_{RE}}$	Gitelson e Merzlyak (1994)
NDVI	$\frac{R_n - R_r}{R_n + R_r}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
OSAVI	$\frac{R_n - R_r}{R_n + R_r + 0,16}$	Roundeaux, Steven e Baret (1996)
SAVI	$\frac{1,5(R_n - R_r)}{R_n + R_r + 0,5}$	Huete (1988)
SCCCI	$\frac{NDRE}{NDVI}$	Raper e Varco (2015)
RVI	$\frac{R_n}{R_r}$	Gitelson <i>et al.</i> (2005)
RECI	$\frac{R_n}{R_r} - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2005)
RDVI	$\frac{R_n - R_r}{(R_n + R_r)^{0,5}}$	Roujean e Breon (1995)
GRVI	$\frac{R_n}{R_g}$	Sripada <i>et al.</i> (2006)
GCI	$\frac{R_n}{R_g} - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2005)
GNDVI	$\frac{R_n - R_g}{R_n + R_g}$	Gitelson, Kaufman e Merzlyak. (1996)

Rn - Refletância espectral - infravermelho próximo (840 nm); Rg - Refletância espectral - verde (560 nm); RRE - Refletância espectral – borda vermelha (717 nm); Rr - Refletância espectral - vermelho (668 nm)

### 2.2.2.6 Análise estatística

Para análise estatística foi utilizado o programa R versão 4.3.2. Os dados de área foliar, biomassa e produtividade, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Foram estabelecidos modelos de regressão linear entre os índices de vegetação (VIs), índice de área foliar (IAF), biomassa (BIO) e produtividade (PROD) da soja e o melhor modelo de regressão linear foi utilizado para prever o resultado. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o RMSE foram utilizados para avaliar o desempenho de cada modelo. Matematicamente, um  $r^2$  mais alto corresponde a um RMSE menor e, portanto, representa melhor precisão do modelo. As Eq. (2) e Eq. (3) foram utilizadas para calcular o  $r^2$  e RMSE, respectivamente.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (3)$$

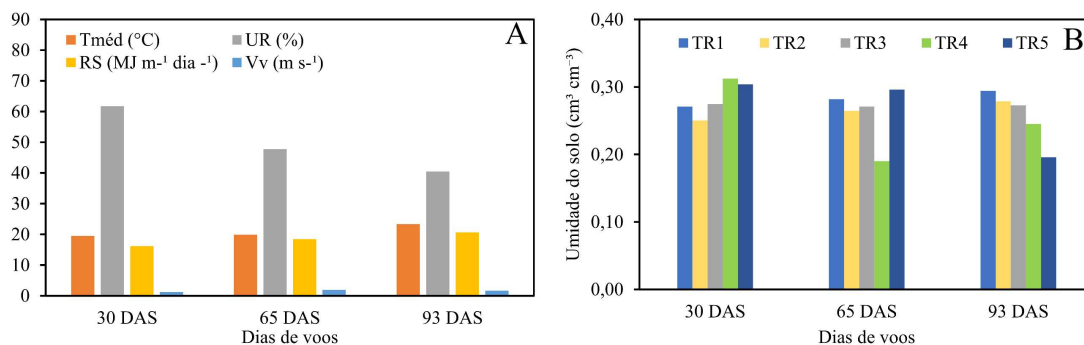
em que,

- $O_i$  = valor observado no experimento em campo de ordem  $i$ ;
- $\bar{O}$  = média dos valores observados;
- $P_i$  = valor simulado pelo modelo de ordem  $i$ ;
- $\bar{P}_i$  = média dos valores simulados;
- $n$  = número de observações.

## 2.2.3 Resultados e discussão

### 2.2.3.1 Umidade do solo, dados meteorológicos e irrigação aplicada

As condições climáticas observadas e a umidade do solo aos 30 DAS, 65 DAS e 93 DAS, estão apresentadas na Figura 1A e B, respectivamente.



**Figura 1.** Dados meteorológicos (A) e umidade do solo (B) observados durante os dias de voo. Tméd = temperatura média do ar; UR = umidade relativa do ar média; RS = radiação solar; Vv = velocidade do vento. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura.

Nota-se uma redução na umidade relativa média do ar de 34% do primeiro voo (30 DAS) para o último (93 DAS). Os valores de umidade do solo observados aos 30 DAS, ficaram acima dos  $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5, já no TR2 a umidade do solo estava em  $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , valor menor em 7% em relação ao observado no TR1. Aos 65 DAS, os tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR5 estavam com umidade do solo acima de  $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e o tratamento TR4 estava com umidade igual a  $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , cerca de 32% abaixo do tratamento TR1, e isso é devido ao déficit hídrico aplicado nestes tratamentos, uma vez que o TR4 estava sob déficit hídrico. Aos 93 DAS, os tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR4 apresentavam umidade do solo acima de  $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e o TR5 estava com umidade do solo igual a  $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , valor menor em 31%, refletindo o déficit hídrico aplicado neste tratamento.

A Tabela 4, apresenta a irrigação aplicada nos estádios fenológicos da cultura. A irrigação total aplicada nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 foram, respectivamente, 22%, 39%, 51% e 35% menores que a irrigação aplicada no tratamento TR1 (286 mm). Observa-se que nos estádios fenológicos de formação de vagens e enchimento de sementes foi onde houve a maior aplicação de irrigação, comportamento normal, uma vez que as necessidades hídricas da soja dobram durante a fase reprodutiva em comparação com a fase vegetativa (POUDEL *et al.*, 2023). Nota-se que os tratamentos que passaram por déficit hídrico tiveram reduções nas necessidades de irrigação posteriormente, e isso é devido ao impacto do déficit hídrico que fez com que a biomassa e área foliar das plantas fossem reduzidas, necessitando de menor quantidade de água, uma vez que as plantas expostas ao estresse hídrico têm menor evapotranspiração (WANG *et al.*, 2015).

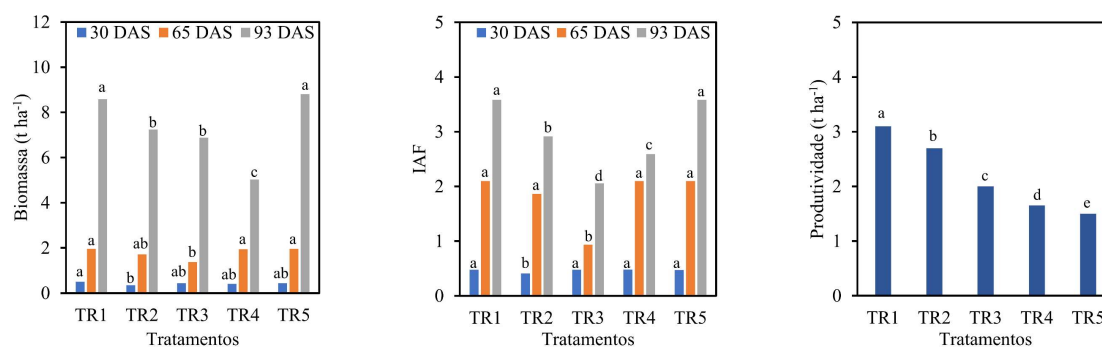
**Tabela 4.** Irrigação aplicada durante as fases fenológicas para os tratamentos

Trat.	V	VF	FV	ES	Total
TR1	28	48	117	94	286
TR2	0	32	98	94	224
TR3	28	0	72	73	173
TR4	32	58	0	51	140
TR5	28	50	107	0	184

V = Vegetativo; VF = Vegetativo/Florescimento; FV = Formação de Vagens; ES = Enchimento de Sementes

### 2.2.3.2 Fenologia nos dias de voo e rendimento da cultura da soja

A Figura 2 mostra os valores de biomassa e índice de área foliar (IAF) no momento de realização de cada voo e a produtividade para os diferentes tratamentos.



**Figura 2.** Valores de biomassa e índice de área foliar (IAF) no momento de realização de cada voo e a produtividade para os diferentes tratamentos. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura. As diferentes letras acima das barras representam o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os diferentes tratamentos.

Observou-se diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos. A biomassa foi 30% menor em TR2 (30 DAS) e TR3 (65 DAS) do que TR1; já, para 93 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4 apresentaram redução de aproximadamente 16%, 20% e 41% em relação ao TR1, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com Wijewardana *et al.* (2019), que observaram redução da biomassa total da soja sob déficit hídrico.

Para o IAF, aos 30 DAS, observou-se que o tratamento TR2 estava cerca de 14% menor em relação ao tratamento TR1; já aos 65 DAS, observou-se que o IAF em TR3 estava 56% menor que TR1. Por fim, aos 93 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4, apresentaram redução

de aproximadamente 19%, 43% e 28% em relação ao TR1, respectivamente. Fatema *et al.* (2023) observaram reduções significativas na área foliar da soja sob déficit hídrico.

Essas reduções observadas na biomassa e no IAF são devido ao déficit hídrico aplicado nesses tratamentos. Nesses casos, para evitar o impacto do déficit hídrico na fisiologia, a planta reduz a transpiração, restringindo a expansão da área foliar, para reduzir a perda de água (MEEKS *et al.*, 2019; WIJewardana *et al.*, 2019), impactando no desenvolvimento da biomassa e do IAF.

O déficit hídrico aplicado nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 causaram uma redução de 13%, 35%, 47% e 52% na produtividade em relação ao TR1, respectivamente. Os tratamentos TR3, TR4 e TR5 foram os que apresentaram maior impacto no rendimento. Nesses tratamentos, o déficit hídrico foi aplicado nos estádios V2-R1, R1-R5 e R5-R7.

### **2.2.3.3 Correlação entre VIs, fenologia e produtividade da soja**

Na Tabela 5 apresenta-se as correlações entre os índices de vegetação e o índice de área foliar (IAF), a biomassa (BIO) e a produtividade (PROD), bem como as equações geradas para cada correlação. Na correlação entre os índices e o IAF, os que tiveram menores correlações foram o NDRE e RECI, com valor de  $r^2 = 0,58$  e  $RMSE = 0,69$ . Para a biomassa as piores correlações foram com os índices NDRE, NDVI, SCCC, RVI e RECI com  $r^2 < 0,50$  e  $RMSE > 2,4$ . Para a produtividade a pior correlação foi obtida com o RDVI com  $r^2 = 0,66$  e  $RMSE > 0,35$ .

**Tabela 5.** Correlações entre índices de vegetação (VIs), biomassa (BIO), índice de área foliar (IAF) e produtividade (PROD) e equações geradas para os índices selecionados.

VIs	IAF		BIO		PROD	
	r <sup>2</sup>	RMSE	r <sup>2</sup>	RMSE	r <sup>2</sup>	RMSE
EVI2	0,82***	0,45	0,70***	1,72	0,74	0,31
NDRE	0,58***	0,69	0,40*	2,4	0,94**	0,14
NDVI	0,76***	0,52	0,46**	2,25	0,86*	0,22
OSAVI	0,81***	0,46	0,60***	1,97	0,79*	0,28
SAVI	0,83***	0,44	0,70***	1,74	0,74	0,31
SCCCI	0,63***	0,65	0,37*	2,44	0,98**	0,09
RVI	0,64***	0,64	0,38*	2,41	0,90*	0,19
RECI	0,58***	0,69	0,40*	2,38	0,93**	0,15
RDVI	0,83***	0,44	0,76***	1,51	0,66	0,35
GRVI	0,71***	0,57	0,55**	2,07	0,94**	0,15
GCI	0,71***	0,57	0,55**	2,07	0,94**	0,15
GNDVI	0,77***	0,52	0,54**	2,08	0,92**	0,17

Equações		
IAF	BIO	PROD
8,563EVI2 - 1,25	22,56EVI2 - 4,58	21,8NDRE - 1,76
8,62OSAVI - 1,63	24,41SAVI - 5,31	41,64SCCCI - 8,86
9,38SAVI - 1,57	38,86RDVI - 13,90	6,96RECI - 0,94
14,06RDVI - 4,49		0,82GRVI - 1,28
		0,82GCI - 0,46
		12,63GNDVI - 5,44

\* nível de significância de 0,05, \*\* nível de significância de 0,01 e \*\*\* nível de significância de 0,001

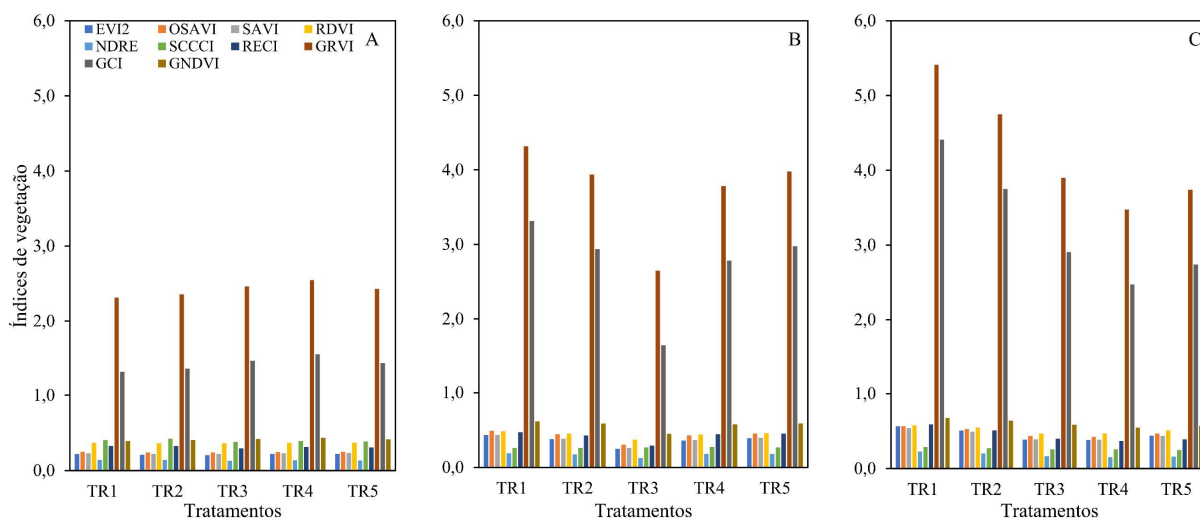
Os resultados indicaram quatro índices (EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI) significantes ao nível de 0,001 com  $r^2 > 0,80$  e  $RMSE < 0,5$  para IAF. Jafari e Keshavarz (2022) observaram  $r^2 = 0,87$  na correlação entre o EVI2 e o índice de área foliar de trigo e Qiao *et al.* (2022) observaram que o SAVI e OSAVI, foram correlacionados positivamente com o IAF, com valores de  $r^2 = 0,85$  e  $0,83$ , respectivamente. Yang, Deng e Zhang (2020) observaram  $r^2 > 0,90$  através de uma função exponencial entre o índice de área foliar de arroz e o RDVI.

Três índices (EVI2, OSAVI e RDVI) foram significantes ao nível de 0,001 com  $r^2 \geq 0,70$  e  $RMSE < 1,75$  para a BIO. Adamu *et al.* (2021) observaram valor de  $r^2 = 0,67$  para a correlação linear entre a biomassa florestal e o EVI2. Bretas *et al.* (2021) observaram que a correlação entre o OSAVI e a biomassa de pastagem obteve  $r^2 = 0,54$ . Liu *et al.* (2022) observaram valores de  $r^2 > 0,70$  para a correlação entre biomassa em diferentes estádios fenológicos da batata e o RDVI.

Seis índices (NDRE, SCCCI, RECI, GRVI, GCI e GNDVI) foram melhor correlacionados com a produtividade, apresentando  $r^2 \geq 0,90$  e  $RMSE < 0,18$ . Thompson *et al.* (2020), observaram que a produtividade de fibra de algodão foi bem correlacionada com o NDRE ( $r^2 = 0,71$ ). Barzin *et al.* (2020), observaram que o SCCCI se correlacionou bem ( $r^2 = 0,69$ ) com a produtividade do milho no estágio fenológico V4-5. De Lara, Longchamps e Khosla (2019), obtiveram  $r^2 = 0,72$  para a correlação entre o RECI e a produtividade do milho. Sapkota e Paudyal (2023), observaram  $r^2 > 0,90$  para a correlação entre a produtividade do milho e o GRVI. Xue *et al.* (2024), observaram valores de  $r^2 \leq 0,67$  para a correlação entre a produtividade de arroz e os índices GRVI, GCI e GNDVI.

A boa correlação destes índices ocorre pois os índices que utilizam a banda do vermelho e infravermelho próximo, refletem a forte absorção causada pela clorofila (TONG *et al.*, 2023) e em todos os índices avaliados, a banda do infravermelho próximo foi utilizada. A produtividade obteve correlação com valor de  $r^2 > 0,90$  com os índices selecionados, isso é devido a utilização apenas dos dados referentes aos 93 DAS, pelo fato de as plantas já terem atingido seu desenvolvimento vegetativo máximo e chegado ao seu pico de clorofila nas folhas (BREWER *et al.*, 2022).

Na Figura 3A, B, e C apresenta-se os valores de cada índice melhor correlacionado aos 30 DAS, 65 DAS e 93 DAS com o índice de área foliar, biomassa e produtividade.



**Figura 3.** Valores observados dos índices de vegetação melhor correlacionados com o índice de área foliar, biomassa e produtividade aos 30 DAS (A), 65 DAS (B) e 93 DAS (C). TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura.

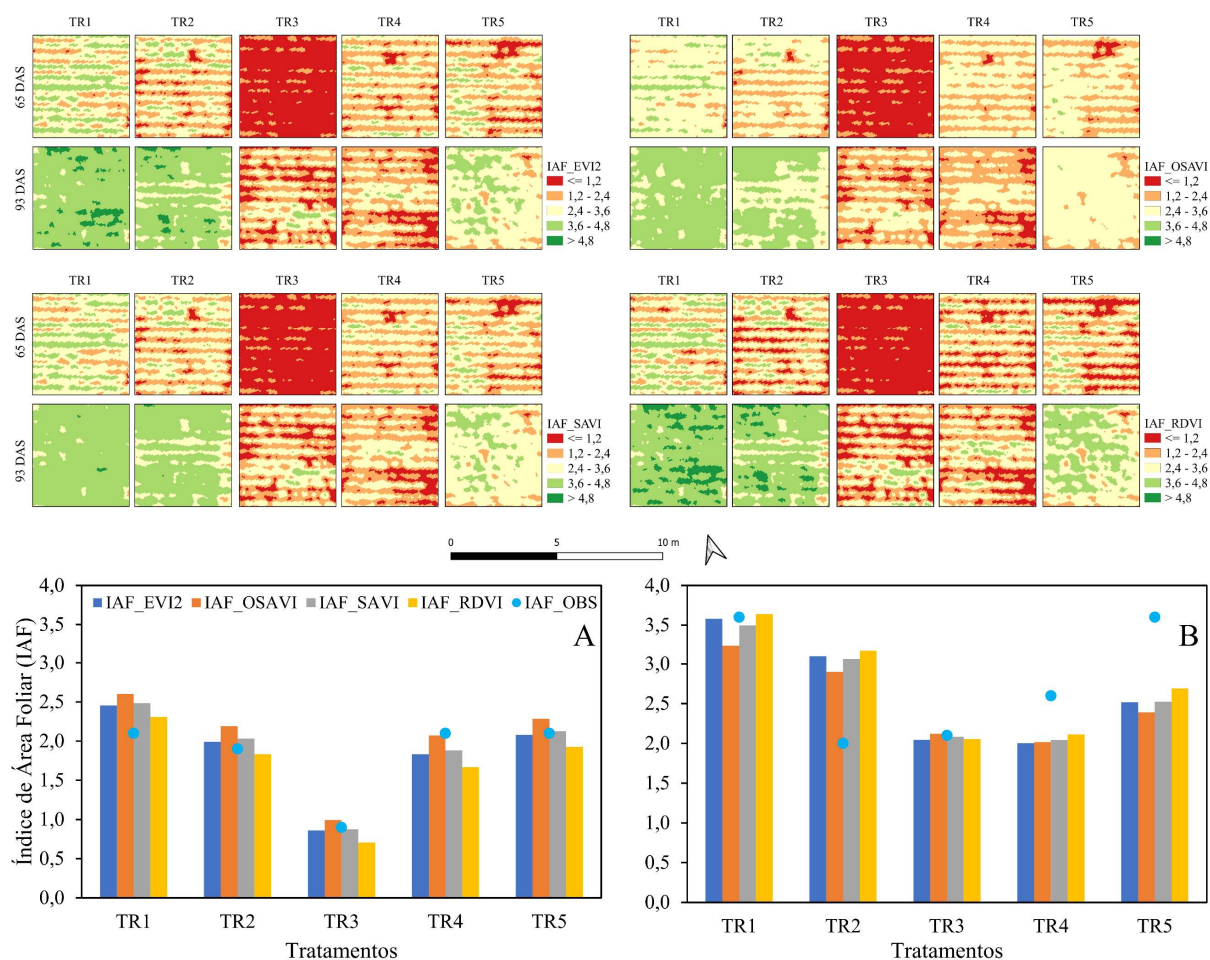
Observa-se que entre os tratamentos aos 30 DAS, não há uma diferença de valores expressivas com EVI2 variando de 0,21 a 0,22, OSAVI de 0,24 a 0,25, SAVI de 0,22 a 0,23, RDVI de 0,36 a 0,37, NDRE de 0,13 a 0,14, SCCCI de 0,38 a 0,42, RECI de 0,30 a 0,32, GRVI de 2,3 a 2,5, GCI de 1,3 a 1,5 e GNDVI de 0,4 a 0,43, e isso ocorre, pois, as plantas estavam no estágio fenológico VC-V2 em desenvolvimento e, portanto, não possuíam IAF elevado, refletindo no valor do índice de vegetação.

Aos 65 DAS, nota-se um incremento nos índices de vegetação, com EVI2 variando de 0,25 a 0,43, OSAVI de 0,30 a 0,50, SAVI de 0,26 a 0,43, RDVI de 0,37 a 0,50, NDRE de 0,13 a 0,19, SCCCI de 0,26 a 0,27, RECI de 0,30 a 0,47, GRVI de 2,6 a 4,3, GCI de 1,6 a 3,3 e GNDVI de 0,45 a 0,61. Aos 93 DAS os valores de EVI2 variaram de 0,38 a 0,56, OSAVI de 0,42 a 0,56, SAVI de 0,38 a 0,54 e RDVI de 0,46 a 0,58, NDRE de 0,15 a 0,22, RECI de 0,37 a 0,60, GRVI de 3,5 a 5,4, GCI de 2,5 a 4,4 e GNDVI de 0,55 a 0,67.

Os índices de vegetação EVI2, OSAVI, SAVI, RDVI, NDRE, RECI, GRVI, GCI e GNDVI do TR3 foram menores aos 65 DAS em relação ao TR1, com valores de 0,25, 0,30, 0,26, 0,37, 0,13, 0,30, 2,6, 1,6, e 0,45, respectivamente, e aos 93 DAS os menores valores foram observados nos tratamentos TR3, TR4 e TR5 com valores de EVI2 variando de 0,38 a 0,44, OSAVI de 0,42 a 0,47, SAVI de 0,38 a 0,44 e RDVI de 0,46 a 0,51, NDRE de 0,15 a 0,16, RECI de 0,37 a 0,40, GRVI de 3,5 a 3,9, GCI de 2,5 a 2,9 e GNDVI de 0,55 a 0,59, respectivamente. As reduções nestes tratamentos são devido ao déficit hídrico aplicado, comportamento também observado por Zhou *et al.* (2022) que obtiveram valores de índices de vegetação menores nos tratamentos com déficit hídrico em milho.

#### **2.2.3.4 Variabilidade espacial do índice de área foliar**

Na Figura 4 apresenta-se os mapas de variação do índice de área foliar (IAF) derivado dos índices de vegetação e os valores observados e preditos nos diferentes tratamentos. Os mapas e valores apresentados são referentes aos 65 DAS e 93 DAS, pois aos 65 DAS pode-se observar o efeito do déficit hídrico sobre o TR3 e aos 93 DAS as plantas já tinham atingido seu desenvolvimento vegetativo máximo.



**Figura 4.** Mapa de variação do índice de área foliar (IAF) derivado dos índices de vegetação e os valores observados e preditos nos diferentes tratamentos aos 65 DAS (A) e 93 DAS (B). IAF\_OBS = índice de área foliar observado; IAF\_EVI2 = índice de área foliar predito com EVI2; IAF\_OSAVI = índice de área foliar predito com OSAVI; IAF\_SAVI = índice de área foliar predito com SAVI; IAF\_RDVI = índice de área foliar predito com RDVI; TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura.

Nota-se um incremento do índice de área foliar desde os 65 DAS até os 93 DAS. Os tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5, aos 93 DAS, estavam com índice de área foliar maior em 42%, 5%, 57%, 19% e 42% do que aos 65 DAS, respectivamente. Este comportamento está de acordo com Raza *et al.* (2021) que observaram maior valor de área foliar para a soja no estágio fenológico R5. O tratamento TR2 e TR3 não tiveram aumento expressivo no IAF devido ao déficit hídrico aplicado nestes tratamentos, ou seja, mesmo após a retomada da irrigação, as plantas não conseguiram recuperar a área foliar completamente.

Aos 65 DAS, observou-se superestimativa do IAF derivado dos índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI de 17%, 24%, 18% e 10% no tratamento TR1, respectivamente. O IAF derivado dos índices EVI2, OSAVI, SAVI, superestimaram em 5%, 15%, 7% no tratamento TR2, respectivamente. O IAF derivado do índice OSAVI foi superestimado em 10% no TR3, no TR5 o IAF derivado dos índices OSAVI e SAVI geraram superestimativa de 9% e 1% respectivamente. Observou-se subestimativa do IAF derivado dos índices EVI2, SAVI e RDVI de 4%, 3% e 21%, respectivamente no tratamento TR3. O IAF derivado dos índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI foi subestimado no TR4 em 13%, 1%, 10% e 21%, respectivamente. No TR5 houve subestimativa no IAF derivado dos índices EVI2 e RDVI de 1% e 8%, respectivamente.

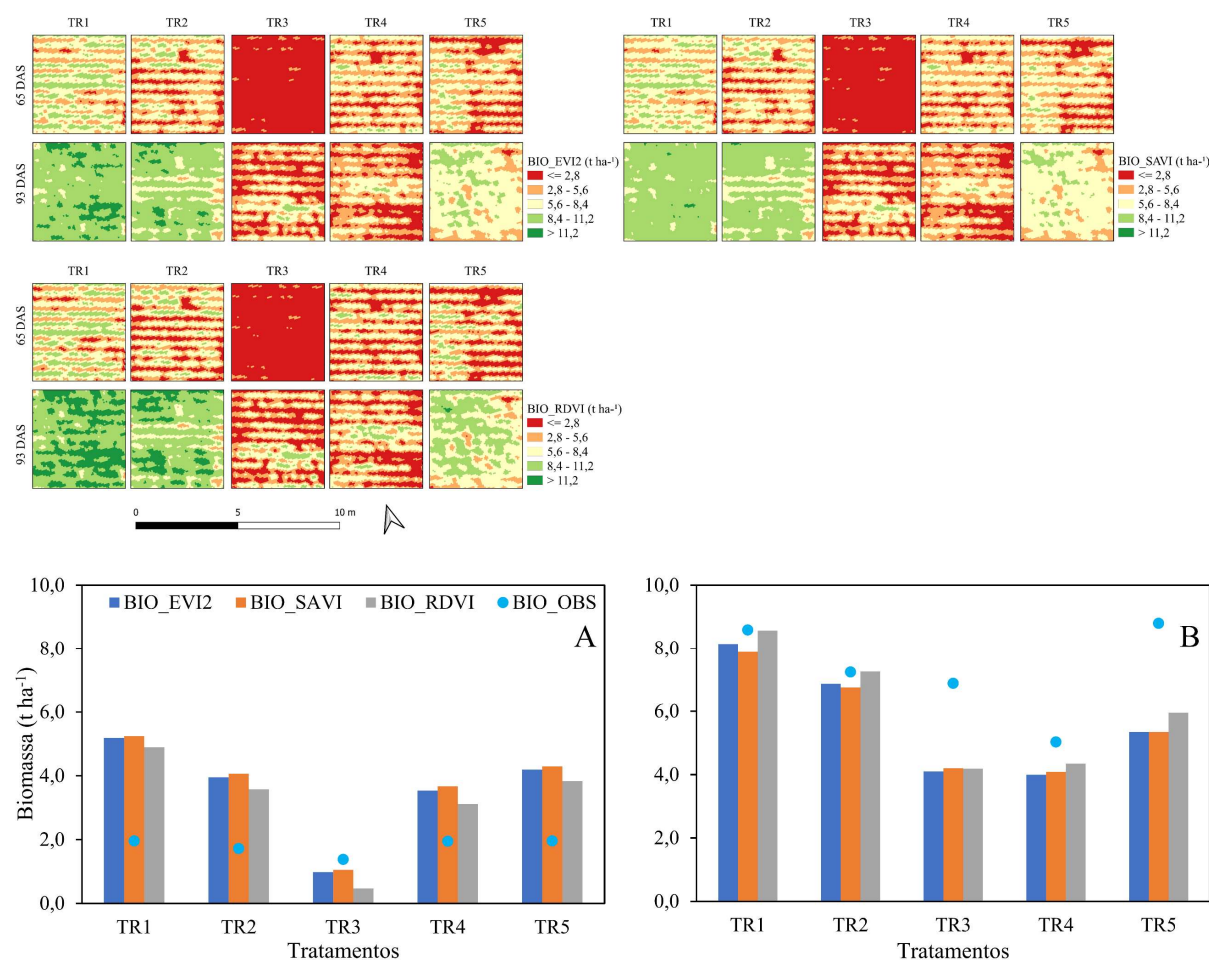
Aos 93 DAS, observou-se superestimativa do IAF derivado do índice RDVI de 1% no tratamento TR1. O IAF derivado dos índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI superestimaram em 55%, 45%, 53% e 58% no tratamento TR2, respectivamente. O IAF derivado do índice OSAVI foi superestimado em 1% no TR3. Observou-se subestimativa do IAF derivado dos índices EVI2, OSAVI e SAVI de 1%, 10% e 3% no tratamento TR1, respectivamente. O IAF derivado dos índices EVI2, SAVI e RDVI foi subestimado no TR3 em 3%, 1% e 2%, respectivamente. No TR4 houve subestimativa no IAF derivado dos índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI de 23%, 22%, 22% e 20%, respectivamente. O IAF derivado dos índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI foi subestimado no TR5 em 30%, 34%, 30% e 25%, respectivamente.

As melhores previsões de IAF foram observadas aos 65 DAS, com diferenças abaixo de 25% entre o estimado e o observado. Aos 65 DAS o TR3 apresentou valores de IAF menores, quando comparado aos demais tratamentos, pelo fato de estar saindo do período de restrição hídrica e mudanças relacionadas à seca são sensíveis a diferentes bandas espectrais (MAGNEY *et al.*, 2016; BERGER *et al.*, 2022). Aos 93 DAS, é possível observar que os valores de índice de área foliar estimados pelos índices são menores nos tratamentos TR3 e TR4 com subestimativa abaixo de 34% e isso pode ter ocorrido devido à redução de clorofila causada nestes tratamentos devido ao déficit hídrico, uma vez que os índices de vegetação estão fortemente correlacionados com o conteúdo de clorofila das folhas (POKHREL *et al.*, 2023) e dessa forma houve impacto na previsão do IAF para estes tratamentos.

### **2.2.3.5 Variabilidade espacial da biomassa**

Na Figura 5 apresenta-se os mapas de variação da biomassa (BIO) derivado dos índices de vegetação e os valores observados e preditos nos diferentes tratamentos. Os mapas e valores apresentados são referentes aos 65 DAS e 93 DAS, pois aos 65 DAS pode-se observar o efeito

do déficit hídrico sobre o TR3 e aos 93 DAS as plantas já tinham atingido seu desenvolvimento vegetativo máximo.



**Figura 5.** Mapa de variação da biomassa (BIO) derivado dos índices de vegetação e os valores observados e preditos nos diferentes tratamentos aos 65 DAS (A) e aos 93 DAS (B). BIO\_OBS = biomassa observada; BIO\_EVI2 = biomassa predita com EVI2; BIO\_SAVI = biomassa predita com SAVI; BIO\_RDVI = biomassa predita com RDVI; TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura.

Nota-se um incremento de biomassa desde os 65 DAS até os 93 DAS. Os tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5, aos 93 DAS, estavam com biomassa maior em 77%, 76%, 80%, 61% e 78% do que aos 65 DAS, respectivamente. Este comportamento está de acordo com Cui *et al.* (2021) que observaram maior valor de biomassa para a soja no estágio fenológico de enchimento de sementes.

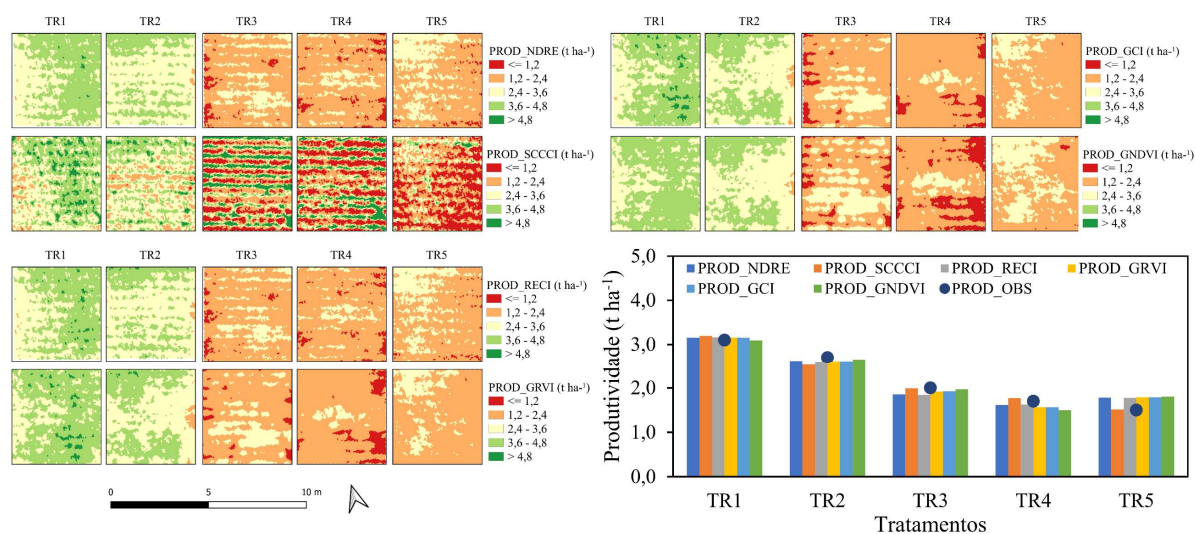
Aos 65 DAS, observou-se superestimativa da biomassa derivada dos índices EVI2, OSAVI e RDVI de 164%, 167% e 150% no tratamento TR1, respectivamente, 130%, 136%, 108% no tratamento TR2, respectivamente, 81%, 88%, e 60% no tratamento TR3, respectivamente, 114%, 119% e 96% no TR5, respectivamente. Observou-se subestimativa da biomassa derivada dos índices EVI2, OSAVI e RDVI de 30%, 24% e 66% no tratamento TR3, respectivamente.

Aos 93 DAS, observou-se superestimativa da biomassa derivada do índice RDVI de 0,2% no tratamento TR2. Observou-se subestimativa da biomassa derivada dos índices EVI2, OSAVI e RDVI de 5%, 8% e 0,2% no tratamento TR1, respectivamente. No tratamento TR2 a biomassa derivada dos índices EVI2 e OSAVI foi subestimada em 5% e 7%, respectivamente. No TR3 a biomassa derivada dos índices EVI2, OSAVI e RDVI foi subestimada em 40%, 40% e 40%, respectivamente. No TR4 a biomassa derivada dos índices EVI2, OSAVI e RDVI foi subestimada em 21%, 19% e 14%, respectivamente. No TR5 a biomassa derivada dos índices EVI2, OSAVI e RDVI foi subestimada em 40%, 40% e 32%, respectivamente.

As melhores previsões de biomassa foram observadas aos 93 DAS nos tratamentos TR1 e TR2, com diferenças abaixo de 10% entre o estimado e o observado. Os valores de BIO foram mais subestimados nos tratamentos que estavam em déficit hídrico ou tinham saído recentemente do período de restrição hídrico, como, por exemplo os tratamentos TR3, TR4 e TR5. Isso ocorre pois em eventos de seca prolongada as funções fisiológicas das plantas são afetadas, induzindo o fechamento estomático e reduzindo significativamente a absorção fotossintética (BHATTI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021) e nem sempre os índices de vegetação podem capturar essa variabilidade (SAKAMOTO, 2020).

### **2.2.3.6 Variabilidade espacial da produtividade**

Na Figura 6 apresenta-se os mapas de variação da produtividade (PROD) derivado dos índices de vegetação e os valores observados e preditos nos diferentes tratamentos. Os mapas são referentes aos 93 DAS, uma vez que maior poder preditivo é obtido quando a soja está no estágio fenológico R5, ou seja, enchimento inicial de grãos. Outros estudos também destacam especificamente o estágio fenológico R5 como o melhor para fornecer imagens para fins de estimativa de produtividade (MA *et al.*, 2001; ZHANG *et al.*, 2019).



**Figura 6.** Mapa de variação da produtividade (PROD) derivado dos índices de vegetação e os valores observados e preditos nos diferentes tratamentos aos 93 DAS. PROD\_OBS = produtividade observada; PROD\_NDRE = produtividade predita com NDRE; PROD\_SCCCI = produtividade predita com SCCCI; PROD\_REC1 = produtividade predita com RECI; PROD\_GRVI = produtividade predita com GRVI; PROD\_GCI = produtividade predita com GCI; PROD\_GNDVI = produtividade predita com GNDVI. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7.

Nos tratamentos TR3, TR4 e TR5, a produtividade média da soja foi menor que  $2 \text{ t ha}^{-1}$  e entre  $2$  e  $4 \text{ t ha}^{-1}$  nos TR1 e TR2. Nos tratamentos TR3, TR4 e TR5 os eventos de seca prolongada afetou as funções fisiológicas das plantas, induzindo o fechamento estomático e reduzindo significativamente a absorção fotossintética (BHATTI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021). Todos os índices selecionados foram capazes de captar a dinâmica de redução da produtividade em função do déficit hídrico aplicado e isso ocorre, pois, as mudanças relacionadas à seca são sensíveis a diferentes bandas espectrais (MAGNEY *et al.*, 2016; BERGER *et al.*, 2022). Os índices tiveram diferenças entre a produtividade estimada e a observada variando de 0,35% a 20%, porém, o índice que mais se aproximou dos valores de produtividade observados em todos os tratamentos foi o SCCCI, com diferença abaixo de 7%. O desempenho do SCCCI é devido principalmente a sua correlação com a clorofila (BARBEDO, 2019; WANG *et al.*, 2021) e ao fato de que este índice integra o NDRE e NDVI (BARZIN *et al.*, 2020; SUMMER *et al.*, 2021). Observa-se na Figura 4 que o solo apresenta valores acima de  $4,8 \text{ t ha}^{-1}$ , isso ocorre pois os

valores de SCCCI das folhas eram menores que os do solo exposto, porém, como este índice possui correlação com a clorofila (BARBEDO, 2019; WANG *et al.*, 2021), deve-se fazer a análise apenas para as folhas e ignorar valores para solo exposto.

#### 2.2.4 Conclusões

Os índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI foram altamente correlacionados com o índice de área foliar (IAF), apresentando  $r^2$  superiores a 0,80 e RMSE inferiores a 0,5. Para a biomassa (BIO), EVI2, OSAVI e RDVI também mostraram correlações significativas com  $r^2 \geq 0,70$  e  $RMSE < 1,75$ . Além disso, os índices NDRE, SCCCI, RECI, GRVI, GCI e GNDVI foram altamente correlacionados com a produtividade, com  $r^2 \geq 0,90$  e  $RMSE < 0,18$ . Esses resultados indicam a eficácia desses índices na estimativa destes parâmetros para soja sob déficit hídrico.

Os índices EVI2, OSAVI, SAVI e RDVI superestimaram ou subestimaram o IAF dependendo do tratamento. As variações entre estimativas e valores observados foram mais pronunciadas, especialmente nos tratamentos afetados pelo déficit hídrico, devido à redução de clorofila que impactou a precisão das previsões de IAF.

Houve subestimativa e superestimativa da biomassa de forma que nos tratamentos com déficit hídrico ou recém-saídos dele, como TR3, TR4 e TR5, as subestimativas foram mais acentuadas, devido à redução da atividade fisiológica das plantas em resposta à seca, impactando a precisão dos índices de vegetação na previsão da biomassa.

Todos os índices selecionados captaram a redução da produtividade devido ao déficit hídrico, com diferenças entre a produtividade estimada e a observada variando de 0,35% a 20%. O índice SCCCI foi o mais preciso, com diferença abaixo de 7%, devido à sua correlação com a clorofila e integração dos índices NDRE e NDVI.

Em síntese, a integração de VANTs e índices de vegetação proporciona uma ferramenta poderosa para o monitoramento e manejo eficiente das culturas agrícolas, permitindo a detecção precoce de estresses hídricos e a implementação de estratégias de irrigação mais precisas e sustentáveis.

## **2.3 Impacto do déficit hídrico no índice de estresse e temperatura foliar e sua relação com o rendimento da soja**

### **Resumo**

O crescimento dos cultivos de soja irrigada e o aumento das disputas por água em diversas bacias hidrográficas do Cerrado indicam a necessidade de aumentar a eficiência de irrigação, utilizando, por exemplo, estratégias de déficit hídrico planejado. Para isto, é importante conhecer como de o déficit hídrico, ocorrido em diferentes estádios fenológicos, impacta na produtividade da soja. Nesse sentido, o uso de métodos baseados em técnicas de sensoriamento remoto, como a utilização de termografia, tem sido encorajado devido à sua confiabilidade, rapidez na aquisição de dados e por não ser um método destrutivo. Os objetivos deste estudo foram examinar os efeitos do déficit hídrico nos valores médios de Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) e de temperatura foliar e verificar a relação entre características de crescimento, rendimento e consumo hídrico da soja e o IEHC. Um experimento foi conduzido entre maio e setembro de 2021. Utilizou-se um delineamento experimental em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (TR1), a irrigação atendeu à demanda hídrica da cultura em todos os estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em estádios específicos (TR2 = VC-V2, TR3 = V2-R1, TR4 = R1-R5 e TR5 = R5-R7) e depois retomada. Aos 65 DAS, a Tc média entre os tratamentos variou de 22 a 27 °C, com a maior Tc média observada no TR3, cerca de 18% a mais que o TR1 (22 °C) e o IEHC entre os tratamentos variou de 0,46 a 0,67, sendo o maior IEHC observado no TR3, cerca de 31% a mais que o TR1 (0,46). Aos 93 DAS, os tratamentos TR4 e TR5 estavam com Tc média maiores em 10% e 16% em relação ao TR1 e IEHC maiores em 29% e 37% em relação ao TR1. O IEHC médio do tratamento TR1 dos 30 aos 93 DAS foi de 0,29, com um valor máximo de 0,46, podendo este ser o limite para a aplicação de irrigação na soja. Os resultados indicaram uma forte correlação entre a ETa e o IEHC, com um  $r^2$  maior que 0,8. O IAF e BIO tiveram melhores correlações com o IEHC aos 65 DAS, com valores de  $r^2$  acima de 0,60. Em relação à produtividade, a melhor correlação foi observada aos 93 DAS, com valor de  $r^2$  igual a 0,72.

**Palavras-chave:** Termografia. Estádios fenológicos. Irrigação. Evapotranspiração.

### 2.3.1 Introdução

Estima-se que a população mundial atingirá aproximadamente 10 bilhões de pessoas até 2050, e a demanda por alimentos deve aumentar cerca de 49% (SIJPESTIJN *et al.*, 2022). Devido a isto, vários países trabalham para garantir a segurança alimentar, entre eles o Brasil, que vem desempenhando importante papel na produção mundial de alimentos.

A soja (*Glycine max* L.) está na vanguarda da economia agrícola mundial como uma importante cultura oleaginosa. Em termos de área cultivada, a soja ocupa o quarto lugar no mundo e o primeiro entre as leguminosas (STANIAK *et al.*, 2023). O Brasil exportou 101,9 milhões de toneladas de soja em 2023, gerando uma receita de US\$ 53,24 bilhões (MDIC, 2024). No Brasil, a soja é a principal commodity agrícola, o país se destaca por ser o maior exportador de soja do mundo. Na safra 2023/24, o Brasil foi responsável por 56% das exportações de soja mundial (IPAD, 2024).

A maior parte da produção de soja no Brasil é proveniente de áreas de sequeiro (DA SILVA *et al.*, 2019), porém, há cada vez mais lavouras em sistemas irrigados. Esse aumento da área irrigada com soja tem sido justificado pelo aumento dos veranicos e maior concentração das chuvas, que pode coincidir com fases importantes do desenvolvimento da cultura, causando reduções significativas de rendimento (SAH *et al.*, 2020).

Neste contexto, torna-se cada vez mais estratégico, em termos de produção da soja, identificar quais os estádios fenológicos da soja são mais susceptíveis ao déficit hídrico. Várias formas podem ser utilizadas para estimar este impacto, tais como medição do potencial hídrico foliar (DZIKITI *et al.*, 2010), condutância estomática (ZHOU *et al.*, 2013), teor de água nas folhas (ZHANG; ZHOU, 2019) e teor de umidade do solo (CHENG *et al.*, 2022). Porém, estes métodos são demorados e trabalhosos (FORKEL *et al.*, 2023).

Dessa forma, métodos baseados em técnicas de sensoriamento remoto, como a utilização de termografia, têm sido encorajados devido à sua confiabilidade, rapidez na aquisição de dados e por não ser um método destrutivo (IHUOMA; MADRAMOOTOO, 2017; MWINUKA *et al.*, 2021). Dessa forma, avaliar a resposta térmica das folhas da soja com base em ferramentas de sensoriamento remoto térmico, pode contribuir para a gestão dos recursos hídricos em cultivos irrigados, bem como, monitorar o estresse hídrico sob condições de sequeiro.

As variações de temperatura do dossel são frequentemente quantificadas usando imagens e termômetros infravermelhos térmicos (RAMÍREZ-CUESTA *et al.*, 2022) e podem ser utilizadas para desenvolver índices que refletem o déficit hídrico nas culturas, como o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) (IDSO *et al.*, 1981). O IEHC é calculado através da diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar, e tem ganhado importância nos

últimos anos (KIRNAK *et al.*, 2019; BOZKURT *et al.*, 2021; YETIK; CANDOĞAN, 2023) e é comumente usado para monitorar o estresse hídrico (KING *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2021). Vários estudos foram realizados utilizando o IEHC como indicadores de estresse hídrico para culturas como uva (RU *et al.*, 2020), azeitona (EGEA *et al.*, 2017), nectarina (PARK *et al.*, 2021), pêssego (GONZALEZ-DUGO *et al.*, 2021), batata (EKINZOG *et al.*, 2022), girassol (NOURAKI *et al.*, 2021) e trigo (QIN *et al.*, 2021).

Alguns estudos indicaram relações entre o CSWI e outros indicadores de estresse, incluindo potencial hídrico foliar (KING *et al.*, 2020, GONZALEZ-DUGO *et al.*, 2020) e condutância estomática (LENA *et al.*, 2020, GONZALEZ-DUGO *et al.*, 2019). Portanto, avaliar o uso do IEHC na detecção automatizada do déficit hídrico pode contribuir para aprimorar o monitoramento de cultivos agrícolas irrigados de maneira simples, robusta e operacional. Os objetivos deste estudo foram examinar os efeitos do déficit hídrico nos valores médios de IEHC e temperatura foliar e verificar a relação entre características de crescimento, rendimento e consumo hídrico da soja e o IEHC.

## 2.3.2 Material e Métodos

### 2.3.2.1 Área de estudo e manejo da cultura

O experimento foi conduzido durante o período de maio a setembro de 2021, na Unidade de Referência em Manejo da Água (URMA), do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do planalto central do bioma Cerrado (15°35'55.1"S, 47°42'27.4"W), com altitude de 979 m. O clima da região é sazonal e corresponde ao tipo Aw-tropical chuvoso (KÖPPEN, 1948), com presença de verões chuvosos de outubro a março e invernos secos de abril a setembro (CORREIA FILHO *et al.*, 2023). A precipitação média anual é de 1.383,7 mm e as temperaturas mínima e máxima médias iguais a 16,5°C e 27,8°C, respectivamente (SILVA *et al.*, 2017). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (EMBRAPA, 2011). Na Tabela 1 apresenta-se características físicas e químicas do solo da área experimental.

**Tabela 1.** Propriedades físicas e químicas do solo da área experimental

Camada (m)	MO (%)	pH	Ds (g cm <sup>3</sup> )	CC	PM
				m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
0-0,2	2,7	5,6	1,10	0,35	0,21
0,2-0,4	2,6	5,6	1,08	0,35	0,20

MO: Matéria orgânica; Ds: Densidade do solo; CC: Capacidade de Campo; PM: Ponto de Murcha

A soja (cv. ‘7581RR’) foi semeada em maio e colhida em setembro de 2021. A semeadura da soja foi feita com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir uma densidade de 360.000 plantas por hectare (ALVES *et al.*, 2021a). A adubação foi realizada com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). Durante o experimento foram realizadas observações visuais das fases fenológica da soja, com base em Fehr e Caviness (1977). Os estádios fenológicos da soja e suas respectivas durações estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Estádios fenológicos e durações

Estádios fenológicos e durações (dias)						
Ano	Semeadura	V	VF	FV	ES	Total
2021	26/05/2021	21	21	31	25	98

V = Vegetativo; VF = Vegetativo/Florescimento; FV = Formação de Vagens; ES = Enchimento de Sementes

Foram conduzidos cinco tratamentos, o primeiro tratamento (TR1), foi realizado com irrigação plena, ou seja, sem aplicação de déficit hídrico à cultura. Nos demais tratamentos (TR2, TR3, TR4 e TR5), a irrigação foi completamente suspensa em determinados estádios de desenvolvimento. Finalizado o estágio de desenvolvimento, a irrigação voltava a ser plena. No tratamento 2 (TR2), a irrigação foi totalmente suspensa no estágio vegetativo (VC-V2), estágio de cotilédones até dois nós. No TR3, a suspensão da irrigação ocorreu no estágio de dois nós até o início do florescimento (vegetativo/florescimento: V2-R1). No TR4, a suspensão ocorreu do início do estágio de floração até o início do enchimento das sementes (formação de vagens: R1-R5). Por fim, no tratamento 5 (TR5), a suspensão da irrigação foi feita na fase de enchimento das sementes até o início da maturação fisiológica (enchimento de sementes: R5-R7). Cada um dos tratamentos foi repetido quatro vezes com um tamanho de parcela individual de 2 × 6 m. O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados.

### 2.3.2.2 Umidade do solo, irrigação e dados meteorológicos

O momento de irrigação foi definido com base no déficit máximo permitido no manejo, no caso, metade da quantidade de água máxima disponível para a planta (ALVES *et al.*, 2021a). A umidade do solo foi medida pelo método gravimétrico em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, no intervalo máximo de 7 dias entre uma amostragem e

outra, de forma que uma amostra fosse retirada antes da irrigação e outra amostra 24 horas após a irrigação. A lâmina de irrigação foi calculada por meio da Eq. (1).

$$I = 10 (\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) Z \quad \text{para } Z \leq 0,20 \text{ m} \quad (1)$$

$$I = 10 [(\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) + (\theta_{CC(0,20-0,40\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0,20-0,40\text{ m})})(Z - D_{20})] \quad \text{para } Z > 0,20 \text{ m}$$

em que,

- I = irrigação aplicada, mm;
- $\theta_{CC}$  = umidade do solo na capacidade de campo,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;
- $\theta_{\text{atual}}$  = umidade do solo atual,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;
- $D_{20}$  = espessura da camada de solo (20 cm)
- Z = profundidade do sistema radicular (80% da profundidade máxima), cm.

Os dados meteorológicos de temperatura do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), que foi calculada usando a equação de Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), desde a semeadura até a colheita, foram adquiridos da estação meteorológica localizada próxima a área experimental. A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por microaspersão. Os microaspersores foram espaçados 3,0 m entre linhas e 5,0 m entre emissores. A pressão de serviço foi de 20 mca, a vazão de 87 L h<sup>-1</sup> e a intensidade de precipitação de 5,3 mm h<sup>-1</sup>.

### 2.3.2.3 Fenologia e rendimento da cultura da soja

As medições da fenologia da soja foram realizadas em 25/06 (30 DAS), 30/07 (65 DAS) e 28/08 (93 DAS) de 2021. Para obtenção dos dados de área foliar e biomassa seca acima do solo, foram retiradas quatro plantas, em cada uma das quatro repetições, dos cinco tratamentos. A área foliar foi avaliada por meio de um medidor de área foliar LI-3100c (Licor, Inc., Lincoln, NE, EUA). Após medição da área foliar, o material era acondicionado em sacos de papel e levados para a estufa, onde ficavam secando por 36h a uma temperatura de 75°C e posteriormente obtinha-se o peso para computar a biomassa. Para avaliar a produtividade de sementes, uma área em cada uma das quatro repetições foi escolhida aleatoriamente e todas as plantas existentes dentro de 2 metros lineares foram colhidas. As vagens de cada planta foram descascadas e os grãos devidamente acondicionados em sacos de papel identificados e encaminhados ao laboratório de análise de sementes, onde foram pesados em uma balança analítica. Após a correção da umidade dos grãos para 13%, foi determinado o rendimento em cada tratamento.

### 2.3.2.4 Déficit hídrico no solo

O déficit de hídrico no solo (DHS), nos quatro tratamentos onde a irrigação foi suspensa, foi calculado pela Eq. (2), utilizando a metodologia proposta por Berliner e Oosterhuis (1978).

$$DHS = \left[ 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,20\text{ m})}} \right] \times 100\% \quad \text{para } Z \leq 0,20\text{ m} \quad (2)$$

$$DHS = \left[ \left( 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0,20\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,20\text{ m})}} \right) + \left( 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,40\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,40\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,40\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,40\text{ m})}} \right) \right] \times 100\% \quad \text{para } Z > 0,20\text{ m}$$

Considerou-se como DHS prejudicial à cultura, para fins de análise, os valores de déficits maiores que o déficit hídrico máximo permitido no manejo (DMPM) que foi igual a 50%.

### 2.3.2.5 Evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual (ETa), para cada estágio fenológico da cultura, foi calculada para todos os tratamentos utilizando o balanço hídrico de água no solo (ALLEN *et al.*, 1998) através da Eq. (3).

$$ET_{a(0-0,40\text{ m})} = \left\{ [(\theta_{1i\ 0-0,20\text{ m}} - \theta_{2i-1\ 0-0,20\text{ m}}) D_i] + [(\theta_{1i\ 0,20-0,40\text{ m}} - \theta_{2i\ 0,20-0,40\text{ m}}) D_i] \right\}, \quad \text{para } 0 \leq Z \leq 40 \quad (3)$$

em que,

$\theta_{1i}$  = umidade volumétrica no momento da primeira amostragem,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ;

$\theta_{2i}$  = umidade volumétrica no momento da segunda amostragem,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ;

$D_i$  = espessura da camada (20 cm). Para  $Z \leq 20$ .

A percolação profunda foi desprezada, pois a irrigação foi aplicada apenas na camada correspondente ao sistema radicular da cultura (0,0-0,40 m). Não foi observado escoamento superficial. A ascensão capilar também foi desprezada, por se tratar de solo profundo.

### 2.3.2.6 Coleta de imagens termais e pré-processamento de imagens

As imagens foram capturadas utilizando um veículo aéreo não tripulado (VANT) da DJI® tipo M600 hexacóptero (SZ DJI Technology Co.) com autonomia de 30 minutos de voo e capacidade de carga de até 3kg. O sensor FLIR DUO PRO R 640 (FLIR® Systems, Danderyd, Suécia) foi usado para adquirir as imagens termográficas: resolução espacial de 640 x 512, resposta espectral de 7,5 a 13,5  $\mu\text{m}$ , detector de microbolômetro não resfriado, taxa de quadros

de 30 Hz, sensibilidade térmica de < 50 mK, precisão de 5°C ou 5% (o que for maior) a 25°C e peso de 325g. A câmera foi configurada para as condições ambientais no momento da captura da imagem seguindo os princípios da termografia apresentados por (USAMETIAGA et al, 2014), que incluem temperatura ambiente, distância do objeto de imagem, emissividade da planta, temperatura refletida e umidade do ar. As imagens termográficas foram salvas em formato JPEG radiométrico.

Os voos foram realizados nos dias 25/06 (30 DAS – voo 1), 30/07 (65 DAS – voo 2) e 28/08 (93 DAS – voo 3) de 2021, estes voos foram realizados dentro dos estádios fenológicos VC-V2, V2-R1, R1-R5 e R5-R7, respectivamente, entre 10h e 12h (GMT+3). Os voos foram planejados usando o software DJI GS Pro<sup>®</sup> que permite criar um plano de voo onde a aeronave percorre pontos pré-definidos guiados pelo sistema GNSS. Os planos de voo foram elaborados garantindo que a captura fosse feita com sobreposição lateral e frontal mínima de 90%, mantendo uma linha de voo a 60 metros acima do nível do solo.

As imagens termográficas foram alinhadas e transformadas em ortomosaicos utilizando o Pix4D<sup>®</sup>, porém com o modo de processamento térmico. Para a análise estatística, quatro áreas de linhas de planta foram selecionadas de forma visual em cada tratamento, perfazendo quatro repetições. As áreas foram selecionadas visualmente para não haver contaminação com pixels de solo e superestimar as temperaturas das plantas.

### 2.3.2.7 Cálculo do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC)

As temperaturas do dossel, adquiridas a partir de imagens térmicas, foram utilizadas para calcular o IEHC. As linhas de base da temperatura, superior e inferior, foram obtidos através da diferença mínima e máxima encontrada entre  $T_c$  e  $T_a$ , conforme descrito na Eq. 4 (IDSO *et al.*, 1981).

$$IEHC = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{li}}{(T_c - T_a)_{ls} - (T_c - T_a)_{li}} \quad (4)$$

em que,

$(T_c - T_a)_{li}$  = menor diferença média entre a temperatura da copa e a temperatura do ar no conjunto de dados (limite inferior);

$(T_c - T_a)_{ls}$  = maior diferença média entre a temperatura da copa e a temperatura do ar no conjunto de dados (limite superior).

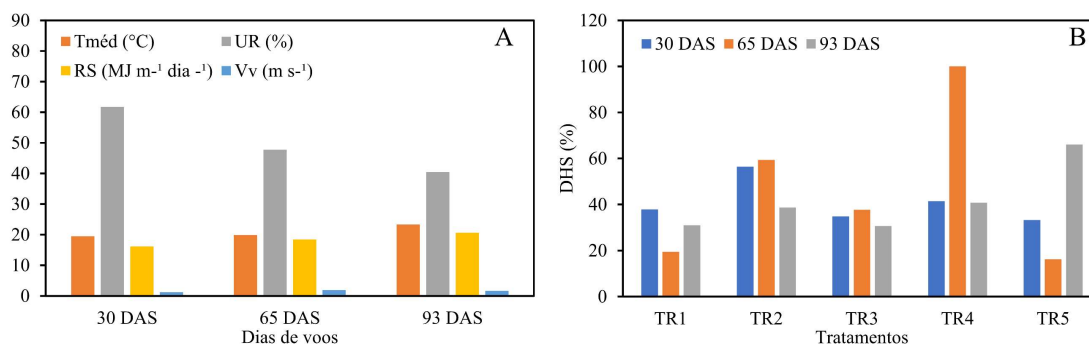
### 2.3.2.8 Análise estatística

Para análise estatística foi utilizado o programa R versão 4.3.2. Os dados de índice de área foliar, biomassa, produtividade e IEHC, nos tratamentos em cada dia de voo, foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Foram estabelecidos modelos de regressão entre o IEHC, evapotranspiração atual, índice de área foliar, biomassa e produtividade.

## 2.3.3 Resultados e discussão

### 2.3.3.1 Déficit hídrico no solo e dados meteorológicos

As condições climáticas e o déficit hídrico no solo observados aos 30 DAS, 65 DAS e 93 DAS, estão apresentadas na Figura 1A e B, respectivamente.

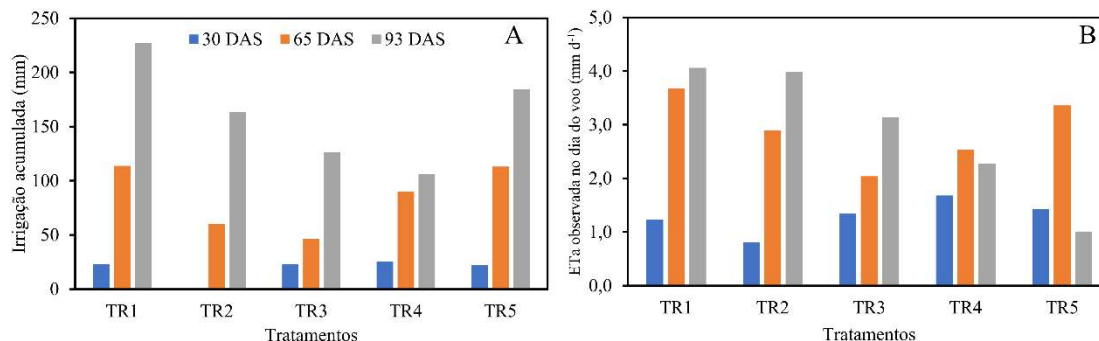


**Figura 1.** Dados meteorológicos (A) e déficit hídrico no solo (B) observados durante os dias de voo. Tméd = temperatura média do ar; UR = umidade relativa do ar média; RS = radiação solar; Vv = velocidade do vento. DHS = déficit hídrico no solo. DAS = dias após a semeadura. DHS = déficit hídrico no solo. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7

Nota-se uma redução na umidade relativa média do ar de 34% do primeiro voo (30 DAS) para o último (93 DAS). Os valores de déficit hídrico no solo (DHS) observadas aos 30 DAS, ficaram abaixo dos 40% nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5, já no TR2 o DHS estava em 56%, valor maior em 32% em relação ao observado no TR1. Aos 65 DAS, os tratamentos TR1, TR3 e TR5 estavam com DHS abaixo de 40% e os tratamentos TR2 e TR4 estavam com 59% e 100% de DHS, e isso é devido ao déficit hídrico aplicado nestes tratamentos, uma vez que o TR2 tinha recém-saído do déficit hídrico e o TR4 estava sob déficit hídrico. Aos 93 DAS, os tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR4 apresentavam DHS abaixo de 40% e o TR5 estava com DHS igual a 66%, refletindo o déficit hídrico aplicado neste tratamento.

### 2.3.3.2 Irrigação e evapotranspiração atual

Os valores acumulados de irrigação até o dia dos voos e a evapotranspiração atual nos dias de voos estão apresentadas na Figura 2.



**Figura 2.** Irrigação acumulada até o dia de voo (A) e evapotranspiração atual (B) observada nos dias de voo (ETa). DAS = dias após a semeadura. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7.

A irrigação acumulada no TR1 aos 93 DAS foi 90% e 45% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR2, a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 63% maior que a observada aos 65 DAS. Em TR3 a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 82% e 63% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR4 a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 75% e 15% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR5 a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 88% e 39% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente.

Os valores de irrigação acumulada observados aos 30 DAS, ficaram abaixo dos 26 mm nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5. Aos 65 DAS, os tratamentos TR2 e TR3 estavam com irrigação acumulada de 60 mm e 46 mm, valores menores em 47% e 60% em comparação ao TR1, e isso é devido ao fato de que o TR2 não teve irrigação até os 33 DAS conforme estágio fenológico do tratamento e o TR3 estava apenas com a irrigação acumulada até os 33 DAS, pois após esse período entrou no estágio fenológico correspondente ao momento de aplicação do déficit hídrico. Aos 93 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4 estavam com irrigação acumulada menores em 28%, 44% e 53%. Esses valores expressam os efeitos da suspensão da irrigação em cada tratamento, com consequente redução da quantidade total de água aplicada a planta.

A ETa diária do TR1 aos 93 DAS foi 71% e 10% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR2, a ETa diária aos 93 DAS foi 80% e 28% maior que a

observada aos 30 e 65 DAS. Em TR3 a ETa diária aos 93 DAS foi 58% e 35% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR4 a ETa diária aos 93 DAS foi 26% maior que a observada aos 30 e 8% menor aos 65 DAS. Em TR5 a ETa diária aos 93 DAS foi menor 28% e 70% aos 30 e 65 DAS, respectivamente.

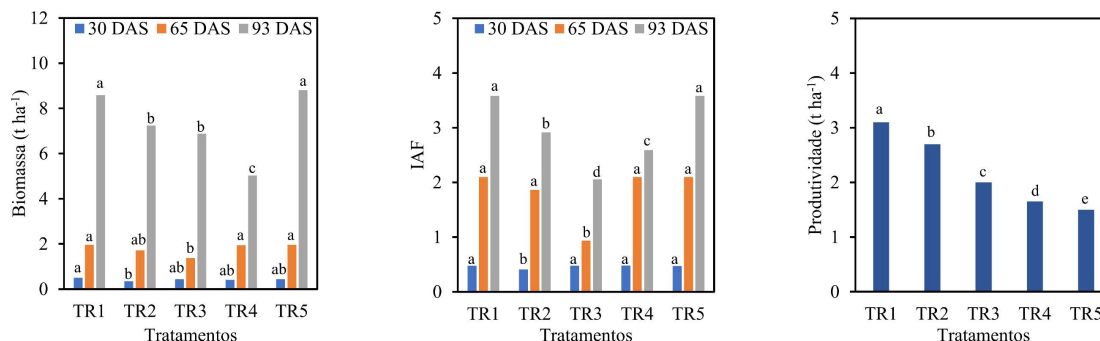
Os valores de ETa diária observados aos 30 DAS variaram entre 1,2 a 1,7 mm d<sup>-1</sup> nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5; já em TR2 a ETa estava 33% menor que em TR1. Aos 65 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4 estavam com ETa diária menores em 21%, 46% e 32% em comparação ao TR1, e isso é devido ao fato de que o TR2 e TR3 estavam em recuperação do déficit hídrico aplicado e o TR4 estava sob déficit hídrico. Aos 93 DAS, o tratamento TR2 estava com ETa diária similar ao TR1 e os tratamentos TR3, TR4 e TR5 estavam com valores de ETa diária menores em 24%, 44% e 75%, respectivamente. Esses valores expressam os efeitos da suspensão da irrigação em cada tratamento, com conseqüente redução da quantidade total de água aplicada a planta.

Observa-se que após os 65 DAS a necessidade de irrigação e a ETa diária aumentam nos tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR4, comportamento normal, uma vez que as necessidades hídricas da soja aumentam significativamente durante a fase reprodutiva em comparação com a fase vegetativa (POUDEL *et al.*, 2023). Resultado similar foi observado por Wang, Cai e Wang (2020) para o trigo sob déficit de irrigação. Nota-se que os tratamentos TR2, TR3 e TR4 que passaram por déficit hídrico tiveram reduções nas necessidades de irrigação e na ETa diária posteriormente, e isso é devido ao impacto do déficit hídrico que fez com que a biomassa e área foliar das plantas fossem reduzidas em decorrência da diminuição da transpiração através do fechamento dos estômatos, para conservar e prevenir a perda excessiva de água (BHATTI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021) reduzindo a necessidade hídrica.

Estes resultados estão de acordo com os encontrados na literatura. Alves *et al.* (2021a), observaram redução de 32% na ETa total da soja quando a água disponível no solo estava entre 0 e 20%. Liu, Wu e Yang (2022), observaram redução na ETa em tratamentos com déficit hídrico em alfafa. Trout e DeJonge (2021), observaram reduções significativas na ETa nos tratamentos com déficit hídrico em milho.

### 2.3.3.3 Fenologia e produtividade da soja

A Figura 3 mostra os valores de biomassa e índice de área foliar (IAF) no momento de realização de cada voo e a produtividade para os diferentes tratamentos.



**Figura 3.** Valores de biomassa e índice de área foliar (IAF) no momento de realização de cada voo e a produtividade para os diferentes tratamentos. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura. As diferentes letras acima das barras representam o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os diferentes tratamentos.

Observou-se diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos. A biomassa foi 30% menor em TR2 (30 DAS) e TR3 (65 DAS) do que TR1; já, para 93 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4 apresentaram redução de aproximadamente 16%, 20% e 41% em relação ao TR1, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com Wijewardana *et al.* (2019), que observaram redução da biomassa total da soja sob déficit hídrico.

Para o IAF, aos 30 DAS, observou-se que o tratamento TR2 estava cerca de 14% menor em relação ao tratamento TR1; já aos 65 DAS, observou-se que o IAF em TR3 estava 56% menor que TR1. Por fim, aos 93 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4, apresentaram redução de aproximadamente 19%, 43% e 28% em relação ao TR1, respectivamente. Fatema *et al.* (2023) observaram reduções significativas na área foliar da soja sob déficit hídrico.

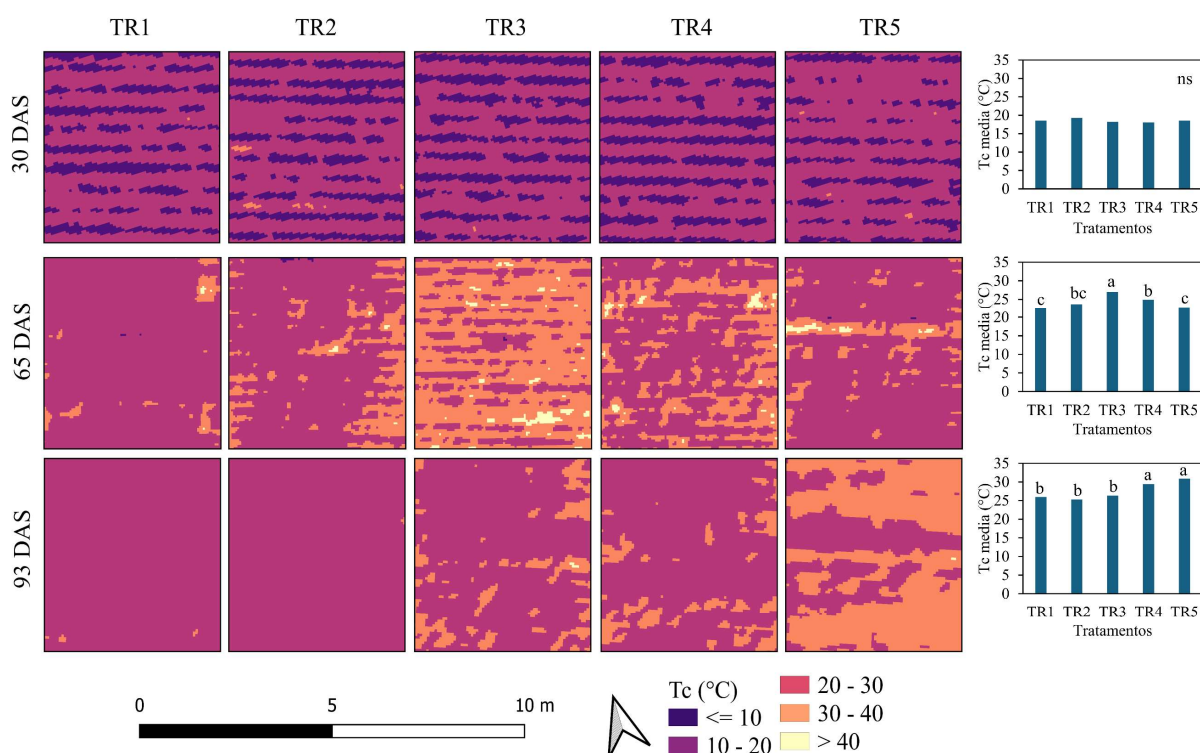
Essas reduções observadas na biomassa e no IAF são devido ao déficit hídrico aplicado nesses tratamentos. Nesses casos, para evitar o impacto do déficit hídrico na fisiologia, a planta reduz a transpiração, restringindo a expansão da área foliar, para reduzir a perda de água (MEEKS *et al.*, 2019; WIJEWARDANA *et al.*, 2019), impactando no desenvolvimento da biomassa e do IAF.

O déficit hídrico aplicado nos tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 causaram uma redução de 13%, 35%, 47% e 52% na produtividade em relação ao TR1, respectivamente. Os

tratamentos TR3, TR4 e TR5 foram os que apresentaram maior impacto no rendimento. Nesses tratamentos, o déficit hídrico foi aplicado nos estádios V2-R1, R1-R5 e R5-R7.

### 2.3.3.4 Variabilidade espacial da temperatura foliar e do índice de estresse hídrico da cultura da soja

Na Figura 4 apresenta-se a variação da temperatura foliar nos tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5 e a Tc média, para 30, 65 e 93 DAS, para os diversos tratamentos.



**Figura 4.** Mapa de variação da temperatura foliar (Tc) e valores de temperatura foliar média (Tc média) no dia de realização de cada voo para os diferentes tratamentos. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura. As diferentes letras acima das barras representam o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os diferentes tratamentos e ns é não significativo.

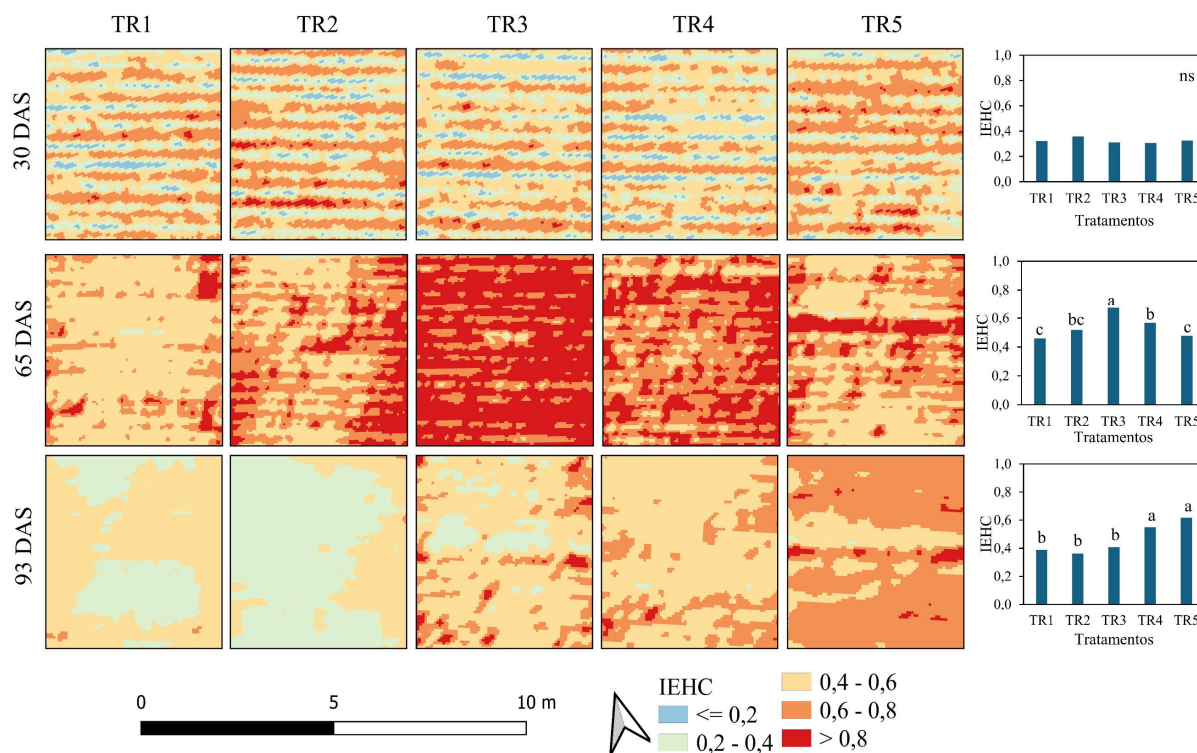
Aos 30 DAS, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos aos 65 DAS e 93 DAS. Nota-se um incremento da Tc média desde os 30 DAS até os 93 DAS. Os tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5, aos 93 DAS, estavam com Tc média maior em 31%, 24%, 31%, 38% e 39% do que aos 30 DAS, respectivamente. O aumento da temperatura se deve ao incremento da área foliar

das plantas, uma vez que a energia da radiação é absorvida pelos cloroplastos, onde é transformada em energia térmica e transferida para os tecidos celulares circundantes (KUME, 2017). Du *et al.* (2022), também observaram incremento da temperatura foliar do trigo com o aumento do índice de área foliar no estágio reprodutivo.

A Tc média nos tratamentos aos 30 DAS variaram entre 18 e 19 °C. Aos 65 DAS, a Tc média entre os tratamentos variou de 22 a 27 °C e a maior Tc média foi observada no TR3, cerca de 18% a mais que o TR1 (22 °C) e o mapa mostra as plantas de TR3 com temperaturas entre 30 e 40°C, captando a variação da temperatura das plantas sob déficit hídrico e os TR2 e TR4 tiveram valores maiores em 8% e 12% em relação ao TR1, respectivamente. Aos 93 DAS, os tratamentos TR4 e TR5 estavam com Tc média maiores em 10% e 16% em relação ao TR1.

As alterações na temperatura foliar observadas no TR3 aos 65 DAS e no TR4 e TR5 aos 93 DAS são devidas aos déficits hídricos aplicados em cada um destes tratamentos. No tratamento TR3, as plantas passaram por um período de estresse hídrico de 21 dias. No tratamento TR4, a irrigação voltou a ser realizada, colocando solo em boas condições hídricas, mas a resposta da planta não foi imediata a essa reposição hídrica e no TR5, as plantas se encontravam em déficit hídrico, sem receber irrigação. Sob déficit hídrico, as plantas fecham os estômatos, reduzem a transpiração e aumentam a temperatura foliar acima do nível ideal (DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; MOORE *et al.*, 2021). Os resultados encontrados estão de acordo com Elsalahy e Reckling (2022), que observaram aumento da temperatura da soja sob déficit hídrico no estágio reprodutivo de aproximadamente 21%.

Na Figura 5 apresenta-se a variação do índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) nos tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5 e o IEHC médio, para 30, 65 e 93 DAS, para os diversos tratamentos.



**Figura 5.** Mapa de variação do índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) e valores de IEHC médio no dia de realização de cada voo para os diferentes tratamentos. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura. As diferentes letras acima das barras representam o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os diferentes tratamentos e ns é não significativo.

Aos 30 DAS, não foram observadas diferenças significativas no IEHC entre os tratamentos. Houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos aos 65 DAS e 93 DAS. O IEHC nos tratamentos aos 30 DAS variou entre 0,31 e 0,36. Aos 65 DAS, o IEHC entre os tratamentos variou de 0,46 a 0,67 e o maior IEHC foi observado no TR3, cerca de 31% a mais que o TR1 (0,46) e o mapa mostra as plantas de TR3 com temperaturas entre 0,60 e 0,80, captando a variação do IEHC das plantas sob déficit hídrico e os TR2 e TR4 tiveram valores maiores em 11% e 19% em relação ao TR1, respectivamente. Aos 93 DAS, os tratamentos TR4 e TR5 estavam com IEHC maiores em 29% e 37% em relação ao TR1 (0,39). As alterações no IEHC, principalmente nos tratamentos com déficit hídrico, podem ter ocorrido devido à redução na condutância estomática, o que induziu o aumento da temperatura foliar e consequentemente o IEHC (LIU *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2021). Anda *et al.* (2020) relataram valores de IEHC cerca de 50% maior em um tratamento com 50% do requerimento hídrico da soja em

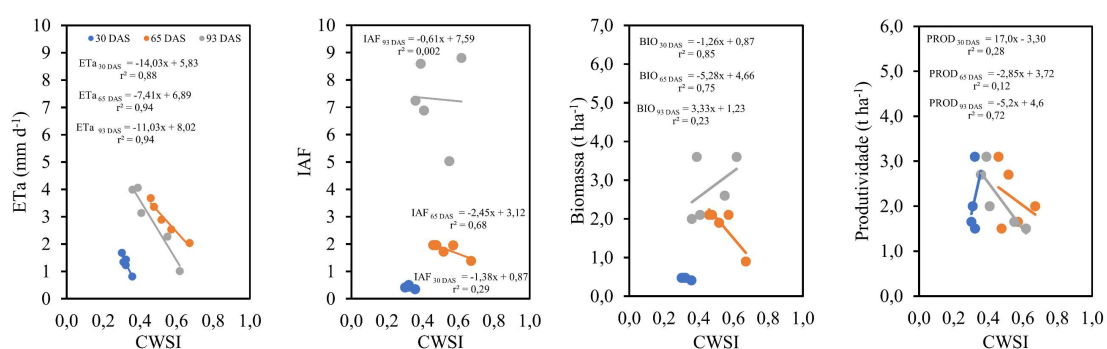
comparação com o tratamento controle. Saleem *et al.* (2022), observaram valores mais elevados de IEHC para os tratamentos de déficit hídrico do que para condições bem irrigadas.

Observa-se que os tratamentos TR2 e TR3 estavam com valor de IEHC aos 93 DAS menores em 29% e 39%, respectivamente. Esse comportamento se deve a retomada da irrigação nestes tratamentos, concordando com os resultados de Niu *et al.* (2021) que observaram redução significativa ( $IEHC < 0,20$ ) no IEHC do milho após a retomada da irrigação.

O IEHC médio do tratamento TR1 dos 30 DAS aos 93 DAS foi igual a 0,29 com maior valor de 0,46, podendo ser este o limite para a aplicação de irrigação para a soja. O IEHC mais próximo de 1 indica que as plantas estão estressadas (IDSO *et al.*, 1981), porém estes valores podem variar conforme as condições climáticas (LENA *et al.*, 2020). Candogan *et al.* (2013) sugeriram um valor IEHC de 0,36 como ideal para o momento de irrigação da soja para evitar a redução da produtividade. Morales-Santos e Nolz (2023) indicaram que o valor de IEHC pode ser aproximadamente 0,33 para indicar condições boas de disponibilidade hídrica para a soja, indicando que a irrigação pode ser necessária o IEHC excede esse valor.

### 2.3.3.5 Correlação entre o índice de estresse hídrico da cultura e a evapotranspiração atual, a produtividade média, o índice de área foliar e a biomassa

Na Figura 6 apresenta-se, para 30, 65 e 93 DAS, as correlações entre o índice de estresse hídrico da cultura e a evapotranspiração atual, o índice de área foliar e a biomassa e a produtividade. O valor de produtividade utilizado foi o referente a colheita final e estes valores foram correlacionados com o IEHC em cada dia.



**Figura 6.** Correlação, para 30, 65 e 93 DAS, entre o índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) e a evapotranspiração atual (ETa), o índice de área foliar (IAF), a biomassa (BIO) e a produtividade média (PROD) da soja.

Os resultados indicaram uma forte correlação entre a ETa e o IEHC, com um  $r^2$  maior que 0,8, em todos os dias de voos. Pode-se observar que valores maiores de IEHC estão associados a menores valores de ETa, principalmente nos 65 e 93 DAS. Isto corre pois em

situações de déficit, as plantas tendem a reduzir a transpiração através do fechamento dos estômatos, para conservar e prevenir a perda excessiva de água, diminuindo a condutância estomática e conseqüentemente a transpiração, impactando diretamente na evapotranspiração da planta (BHATTI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021) e aumentando a temperatura foliar (ORTA; KUYUMCU, 2023) com conseqüente aumento no IEHC.

O IAF e BIO tiveram melhores correlações com o IEHC aos 65 DAS, com valores de  $r^2$  acima de 0,60. Isso ocorre porque a temperatura foliar em plantas como a soja, afetam diretamente a estabilidade térmica das enzimas fotossintéticas, resultando na inibição da fotossíntese (IQBAL *et al.*, 2019; DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; MOORE *et al.*, 2021) e conseqüências para a produção de biomassa e área foliar, de forma que quanto maior o déficit hídrico, maior será o impacto sobre essas variáveis. Aos 93 DAS, a má correlação está relacionada ao fato de que as plantas do tratamento TR5 conseguiram chegar ao pico do desenvolvimento vegetativo e quando do déficit hídrico foi aplicado não causou impacto na biomassa e índice de área foliar, atingindo valores próximos ao tratamento TR1 (Figura 3).

Em relação à produtividade, a melhor correlação foi observada aos 93 DAS, com valor de  $r^2$  igual a 0,72. Observa-se redução na produtividade quando o valor de IEHC ultrapassa 0,50, concordando com Jamshidi *et al.* (2020) que observaram, para a cultura dos citros, redução na produtividade quando os valores de IEHC foram maiores que 0,40. Carvalho *et al.* (2022) observaram boa correlação entre o IEHC ( $r^2 > 0,93$ ) e a produtividade do feijão.

### 2.3.4 Conclusões

O índice de estresse hídrico variou devido aos tratamentos aplicados, de forma que nos tratamentos com déficit hídrico, principalmente nos estádios reprodutivos, os valores do índice de estresse hídrico foram maiores.

A correlação positiva entre o índice de estresse hídrico e a evapotranspiração, índice de área foliar, biomassa e produtividade evidenciam o potencial de uso deste índice para o monitoramento do déficit hídrico na cultura da soja.

O índice de estresse hídrico da soja, que pode ser utilizado para fins de manejo de irrigação, possui valor de 0,46 para que não haja redução da produtividade.

## 2.4 Modelagem da evapotranspiração atual da cultura da soja com dados de veículos aéreos não tripulados

### Resumo

Os recentes avanços nas tecnologias de sensoriamento remoto e nos modelos que usam dados espacializados têm contribuído para um melhor entendimento da variabilidade espacial da evapotranspiração atual de culturas (ETa) em áreas irrigadas, possibilitando melhores estimativas da demanda hídrica e melhoria na eficiência de irrigação. Nas últimas décadas, modelos que possibilitam o monitoramento da ETa, a partir de dados de sensoriamento remoto, têm sido desenvolvidos e estudados. Nesse contexto, o modelo *Simplified Surface Energy Balance for Operational Application* (SSEBop), pela sua simplicidade e facilidade de operação, tem se destacado. Necessita-se, entretanto, avançar na aplicação desse modelo utilizando imagens térmicas obtidas por veículos aéreos não tripulados (VANTs). Objetivou-se neste trabalho estimar a evapotranspiração atual da cultura da soja por meio de veículos aéreos não tripulados. O modelo SSEBop foi utilizado para estimativa da ETa da cultura da soja submetida a diferentes condições de estresse hídrico. Para tanto, um experimento de campo foi conduzido entre maio e setembro de 2021. Utilizou-se um delineamento experimental em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (TR1), a irrigação atendeu à demanda hídrica da cultura em todos os estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em estádios específicos (TR2 = VC-V2, TR3 = V2-R1, TR4 = R1-R5 e TR5 = R5-R7) e depois retomada. Imagens térmicas foram coletadas aos 30, 65 e 93 dias após a semeadura por meio de VANT do tipo hexacóptero. Os valores de ETa medidos mostraram forte correlação com o modelo SSEBop, produzindo alto valor de  $r^2$ , baixo RMSE de 0,65 mm d<sup>-1</sup>, MBE de -0,30 mm d<sup>-1</sup> e EF de 0,71.

**Palavras-chave:** Manejo de irrigação. Irrigação deficitária. Modelagem agrícola. Sensoriamento remoto.

### 2.4.1 Introdução

A soja (*Glycine max* L.) está na vanguarda da economia agrícola mundial como uma importante cultura oleaginosa. Em termos de área cultivada, a soja ocupa o quarto lugar no mundo e o primeiro entre as leguminosas (STANIAK *et al.*, 2023). O Brasil exportou 101,9 milhões de toneladas de soja em 2023, gerando uma receita de US\$ 53,24 bilhões (MDIC, 2024). No Brasil a soja é a principal commodity agrícola. O país se destaca por ser o maior exportador de soja do mundo. Na safra 2023/24, o Brasil foi responsável por 59% das exportações de soja mundial (IPAD, 2024).

A maior parte da produção de soja no Brasil é proveniente de áreas de sequeiro (DA SILVA *et al.*, 2019), porém, há cada vez mais lavouras em sistemas irrigados, principalmente porque no verão, onde se concentra a maior parte da precipitação na região, há períodos de veranicos que coincidem com fases importantes do desenvolvimento da cultura, o que pode causar reduções significativas de rendimento, devido a duração e intensidade do stress hídrico e do estágio fenológico em que a cultura é afetada (SAH *et al.*, 2020).

As áreas de cultivo de soja são vastas e frequentemente dispersas, tornando as medições diretas em campo trabalhosas. Dada a extensão dessas áreas, o sensoriamento remoto se torna uma ferramenta essencial para o monitoramento desses cultivos. A utilização de imagens de satélite tem sido encorajada ao longo dos anos para o monitoramento dos cultivos, porém, possuem baixa resolução, dificultando o monitoramento (PIÑÓN-VILLARREA *et al.*, 2020). Além disso, a disponibilidade de imagens é limitada devido a passagens pouco frequentes de satélite e nebulosidade (MOKARI *et al.*, 2022).

Com a redução da disponibilidade hídrica em várias regiões do cerrado e o aumento da área irrigada, será cada vez mais preponderante melhorar a eficiência de irrigação, sendo necessário, para isso, priorizar o manejo da irrigação, que dependerá de estimativa mais precisa da evapotranspiração atual da cultura (ETa). A evapotranspiração atual é um dos produtos que pode ser obtido a partir de dados coletados por sensoriamento remoto.

Embora seja uma técnica comum, os dados de satélite podem não capturar a variação detalhada da ETa em nível de cultivo agrícola, devido à baixa resolução espacial e às condições climáticas variáveis (WAN *et al.*, 2020). Dessa forma, a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV) para aquisição de dados em sistemas agrícolas tem sido cada vez mais encorajada (DAS *et al.*, 2021; MOKARI *et al.*, 2022; GAUTAM; OSTENDORF; PAGAY, 2021).

Pode-se encontrar na literatura a descrição de vários modelos que são utilizados para calcular a ETa, com base em dados provenientes de imagens de satélite, tais como o *Two-Source Energy Balance* - TSEB (NORMAN *et al.*, 1995), *Surface Energy Balance Algorithm for Land*

– SEBAL (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998), *Mapping Evapotranspiration at high resolution and with Internalized Calibration* – METRIC (ALLEN *et al.*, 2007), *Atmosphere-Land Exchange Inverse* – ALEXI (ANDERSON *et al.*, 2007) e o *Operational Simplified Surface Energy Balance* – SSEBop (SENAY *et al.*, 2013).

A ETa foi estimada, para a região oeste do Estado da Bahia, Brasil, para a cultura da soja irrigada, utilizando o METRIC (VENANCIO *et al.*, 2020), e para o milho irrigado, utilizando o SEBAL (FILGUEIRAS *et al.*, 2019). Ambos os modelos apresentaram bom desempenho. Lopes *et al.* (2019) utilizaram o SSEBop para estimar a ETa do trigo e obtiveram com  $R^2$  igual a 0,66 e RMSE igual a 0,95 mm d<sup>-1</sup>.

Embora esses modelos tenham requisitos e necessidades de dados diferentes, eles podem ser modificados para usar sensores multiespectrais e térmicos montados em VANTs para estimar a ETa. Devido à relação entre a temperatura da superfície da vegetação e a transpiração, os métodos de base térmica são altamente adequados para a detecção do estado de estresse hídrico (HAN *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2015; PÔÇAS *et al.*, 2020; VEYSI *et al.*, 2017). Kullberg *et al.* (2017) comparou vários índices com base na temperatura foliar para avaliar o coeficiente de estresse hídrico da cultura (Ks) e ETa para a cultura do milho e observaram que os métodos de coeficiente de estresse com menor quantidade de dados captam o estresse hídrico da cultura com menor RMSE na estimativa da ETa.

Dentre os modelos de base térmica, pode-se citar o SSEBop (SENAY *et al.*, 2019; SENAY, 2018). Esse modelo apresenta uma abordagem simplificada, estimando a ETa com base em dados de temperatura facilmente derivados de imagens termográficas. O modelo utiliza a temperatura da superfície obtida através de imagens de satélite e a evapotranspiração de referência (ETo) como as principais variáveis de entrada, e com estas variáveis utiliza a abordagem do balanço de energia, onde o fluxo de calor latente é resolvido apenas na escala de tempo diária para calcular a fração ET (ETf) para cada pixel da imagem do satélite.

O SSEBop foi utilizado em vários países, em diferentes condições climáticas, para estimativa da ETa (SINGH *et al.*, 2014; SENAY *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2016; PAULA *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2019; YIN *et al.*, 2020), tendo apresentado boa acurácia, com valores de  $R^2 > 0,90$  na representação da variabilidade espacial da ETa (SENAY *et al.*, 2022).

O uso de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) em combinação com o modelo SSEBop tem mostrado grande potencial em diversas aplicações agrícolas e ambientais. Mokari *et al.* (2022) utilizaram dados de imagens termográficas para estimar a ETa de nozes através do modelo SSEBop, obtendo um RMSE de 0,60 e um  $R^2$  de 0,72 na comparação entre a ETa estimada pelo modelo SSEBop modificado e a ETa observada em campo. No entanto, ainda

são necessários estudos para validar e calibrar o modelo em escala de campo, analisar a escalabilidade, além de desenvolver soluções automatizadas para processamento e análise dos dados coletados.

Assim, estudos adicionais, que sejam capazes de representar a variabilidade espacial da ETa com base em dados provenientes de VANTs, são essenciais para melhoria do manejo da irrigação. Dessa forma, objetivou-se neste estudo avaliar o desempenho do modelo SSEBop na estimativa da ETa da soja.

## 2.4.2 Material e Métodos

### 2.4.2.1 Área de estudo e manejo da cultura

O experimento foi conduzido durante o período de maio a setembro de 2021, na Unidade de Referência em Manejo da Água (URMA), do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do planalto central do bioma Cerrado (15°35'55.1"S, 47°42'27.4"W), com altitude de 979 m. O clima da região é sazonal e corresponde ao tipo Aw-tropical chuvoso (KÖPPEN, 1948), com presença de verões chuvosos de outubro a março e invernos secos de abril a setembro (CORREIA FILHO *et al.*, 2023). A precipitação média anual é de 1.383,7 mm e as temperaturas mínima e máxima médias iguais a 16,5°C e 27,8°C, respectivamente (SILVA *et al.*, 2017). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (EMBRAPA, 2011). Na Tabela 1 apresenta-se características físicas e químicas do solo da área experimental.

**Tabela 1.** Propriedades físicas e químicas do solo da área experimental

Camada (m)	MO (%)	pH	Ds (g cm <sup>3</sup> )	CC	PM
				m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
0-0,2	2,7	5,6	1,10	0,35	0,21
0,2-0,4	2,6	5,6	1,08	0,35	0,20

MO: Matéria orgânica; Ds: Densidade do solo; CC: Capacidade de Campo; PM: Ponto de Murcha

A soja (cv. '7581RR') foi semeada em maio e colhida em setembro de 2021. A semeadura da soja foi feita com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir uma densidade de 360.000 plantas por hectare (ALVES *et al.*, 2021a). A adubação foi realizada com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). Durante o experimento foram realizadas observações visuais das fases

fenológica da soja, com base em Fehr e Caviness (1977). Os estádios fenológicos da soja e suas respectivas durações estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Estádios fenológicos e durações

Estádios fenológicos e durações (dias)						
Ano	Semeadura	V	VF	FV	ES	Total
2021	26/05/2021	21	21	31	25	98

V = Vegetativo; VF = Vegetativo/Florescimento; FV = Formação de Vagens; ES = Enchimento de Sementes

Foram conduzidos cinco tratamentos, o primeiro tratamento (TR1), foi realizado com irrigação plena, ou seja, sem aplicação de déficit hídrico à cultura. Nos demais tratamentos (TR2, TR3, TR4 e TR5), a irrigação foi completamente suspensa em determinados estádios de desenvolvimento. Finalizado o estágio de desenvolvimento, a irrigação voltava a ser plena. No tratamento 2 (TR2), a irrigação foi totalmente suspensa no estágio vegetativo (VC-V2), estágio de cotilédones até dois nós. No TR3, a suspensão da irrigação ocorreu no estágio de dois nós até o início do florescimento (vegetativo/florescimento: V2-R1). No TR4, a suspensão ocorreu do início do estágio de floração até o início do enchimento das sementes (formação de vagens: R1-R5). Por fim, no tratamento 5 (TR5), a suspensão da irrigação foi feita na fase de enchimento das sementes até o início da maturação fisiológica (enchimento de sementes: R5-R7). Cada um dos tratamentos foi repetido quatro vezes com um tamanho de parcela individual de 2 × 6 m. O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados.

#### 2.4.2.2 Umidade do solo, irrigação e dados meteorológicos

O momento de irrigação foi definido com base no déficit máximo permitido no manejo, no caso, metade da quantidade de água máxima disponível para a planta (ALVES *et al.*, 2021a). A umidade do solo foi medida pelo método gravimétrico em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, no intervalo máximo de 7 dias entre uma amostragem e outra, de forma que uma amostra fosse retirada antes da irrigação e outra amostra 24 horas após a irrigação. A lâmina de irrigação foi calculada por meio da Eq. (1).

$$I = 10 (\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) Z \quad \text{para } Z \leq 0,20\text{ m} \quad (1)$$

$$I = 10 [(\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0-0,20\text{ m})}) + (\theta_{CC(0,20-0,40\text{ m})} - \theta_{\text{atual}(0,20-0,40\text{ m})})(Z - D_{20})] \quad \text{para } Z > 0,20\text{ m}$$

em que,

- I = irrigação aplicada, mm;  
 $\theta_{CC}$  = umidade do solo na capacidade de campo,  $m^3 m^{-3}$ ;  
 $\theta_{atual}$  = umidade do solo atual,  $m^3 m^{-3}$ ;  
 $D_{20}$  = espessura da camada de solo (20 cm)  
 Z = profundidade do sistema radicular (80% da profundidade máxima), cm.

Os dados meteorológicos de temperatura do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), que foi calculada usando a equação de Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), desde a semeadura até a colheita, foram adquiridos da estação meteorológica localizada próxima a área experimental. A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por microaspersão. Os microaspersores foram espaçados 3,0 m entre linhas e 5,0 m entre emissores. A pressão de serviço foi de 20 mca, a vazão de 87 L h<sup>-1</sup> e a intensidade de precipitação de 5,3 mm h<sup>-1</sup>.

#### 2.4.2.3 Déficit hídrico no solo

O déficit de hídrico no solo (DHS), nos quatro tratamentos onde a irrigação foi suspensa, foi calculado pela Eq. (2), utilizando a metodologia proposta por Berliner e Oosterhuis (1978).

$$DHS = \left[ 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{atual(0-0,20\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,20\text{ m})}} \right] \times 100\% \quad \text{para } Z \leq 0,20\text{ m} \quad (2)$$

$$DHS = \left[ \left( 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{atual(0,20\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,20\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,20\text{ m})}} \right) + \left( 1 - \frac{\theta_{CC(0-0,40\text{ m})} - \theta_{atual(0-0,40\text{ m})}}{\theta_{CC(0-0,40\text{ m})} - \theta_{PMP(0-0,40\text{ m})}} \right) \right] \times 100\% \quad \text{para } Z > 0,20\text{ m}$$

Considerou-se como DHS prejudicial à cultura, para fins de análise, os valores de déficits maiores que o déficit hídrico máximo permitido no manejo (DMPM) que foi igual a 50%.

#### 2.4.2.4 Evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual (ET<sub>a</sub>), para cada estágio fenológico da cultura, foi calculada para todos os tratamentos utilizando o balanço hídrico de água no solo (ALLEN *et al.*, 1998) através da Eq. (3).

$$ET_{a(0-0,40\text{ m})} = \left\{ [(\theta_{1i\ 0-0,20\text{ m}} - \theta_{2i-1\ 0-0,20\text{ m}}) D_i] + [(\theta_{1i\ 0,20-0,40\text{ m}} - \theta_{2i\ 0,20-0,40\text{ m}}) D_i] \right\}, \quad \text{para } 0 \leq Z \leq 40 \quad (3)$$

em que,

$\theta_{1i}$  = umidade volumétrica no momento da primeira amostragem,  $m^3 m^{-3}$ ;

$\theta_{2i}$  = umidade volumétrica no momento da segunda amostragem,  $m^3 m^{-3}$ ;

$D_i$  = espessura da camada (20 cm). Para  $Z \leq 20$ .

A percolação profunda foi desprezada, pois a irrigação foi aplicada apenas na camada correspondente ao sistema radicular da cultura (0,0-0,40 m). Não foi observado escoamento superficial. A ascensão capilar também foi desprezada, por se tratar de solo profundo.

#### 2.4.2.5 Coleta de imagens termais e pré-processamento de imagens

As imagens foram capturadas utilizando um veículo aéreo não tripulado (VANT) da DJI® tipo M600 hexacóptero (SZ DJI Technology Co.) com autonomia de 30 minutos de voo e capacidade de carga de até 3kg. O sensor FLIR DUO PRO R 640 (FLIR® Systems, Danderyd, Suécia) foi usado para adquirir as imagens termográficas: resolução espacial de 640 x 512, resposta espectral de 7,5 a 13,5  $\mu m$ , detector de microbolômetro não resfriado, taxa de quadros de 30 Hz, sensibilidade térmica de < 50 mK, precisão de 5°C ou 5% (o que for maior) a 25°C e peso de 325g.

A câmera foi configurada para as condições ambientais no momento da captura da imagem seguindo os princípios da termografia apresentados por (USAMETIAGA *et al.*, 2014), que incluem temperatura ambiente, distância do objeto de imagem, emissividade da planta, temperatura refletida e umidade do ar. As imagens termográficas foram salvas em formato JPEG radiométrico.

Os voos foram realizados, entre 10h e 12h (GMT+3), nos dias 25/06 (30 DAS – voo 1), 30/07 (65 DAS – voo 2) e 28/08 (93 DAS – voo 3) de 2021, correspondendo aos estádios fenológicos VC-V2, R1-R5 e R5-R7, respectivamente.

Os voos foram planejados usando o software DJI GS Pro® que permite criar um plano de voo onde a aeronave percorre pontos pré-definidos guiados pelo sistema GNSS. Os planos de voo foram elaborados garantindo que a captura fosse feita com sobreposição lateral e frontal mínima de 90% para melhorar a precisão do monitoramento (WANG *et al.*, 2021), mantendo uma linha de voo a 60 metros acima do nível do solo (SILVA *et al.*, 2023).

As imagens termográficas foram alinhadas e transformadas em ortomosaicos utilizando o Pix4D®, porém com o modo de processamento térmico. Foram seguidos os procedimentos e recomendações descritos na documentação do software PIX4D® (2019). Para a análise estatística, quatro áreas de linhas de planta foram selecionadas visualmente, em cada tratamento,

perfazendo quatro repetições, de forma a não haver contaminação com pixels de solo e, consequentemente, superestimativa das temperaturas das plantas.

#### 2.4.2.6 Estimativa da evapotranspiração atual utilizando o modelo SSEBop

A estimativa da evapotranspiração atual utilizando imagens termais foi realizada através do modelo SSEBop (SENAY *et al.*, 2019; SENAY, 2018). O modelo considera que a ETa é diretamente relacionada com a fração evapotranspirativa (ETf), que, quando multiplicada pela evapotranspiração de referência e ajustada por um fator de escala (k), representa a evapotranspiração atual. A equação de Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) foi utilizada para calcular a ETo. A ETa, em escala diária, é calculada pela Eq. (4).

$$ETa = ETf \cdot k \cdot ETo \quad (4)$$

em que,

ETf = fração evapotranspirativa, adimensional;

k = fator de escala, adimensional.

Seguindo a recomendação de Senay *et al.* (2013), foi utilizado o valor de  $k = 1,2$ , equivalente a uma superfície aerodinamicamente mais rugosa que a grama. Entretanto, esse coeficiente pode ser determinado em campo, com base na vegetação da área, ou validado/calibrado a partir de dados de balanço hídrico. A ETf, por sua vez, é calculada pela Eq. (5).

$$ETf = \left[ \frac{(T_h - T_s)}{(T_h - T_c)} \right] = \frac{(T_h - T_s)}{dT} \quad (5)$$

em que,

Ts = temperatura de superfície do pixel observada na imagem termográfica, K;

Th = temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente, K;

Tc = temperatura de superfície estimada para a condição de pixel frio, K;

dT = diferença de temperatura de pixel quente e de pixel frio, K.

Valores com ETf negativo foram convertidos para zero e sua medida de valor máximo foi limitado a 1,05 (SENAY, 2018). SENAY *et al.* (2016) recomenda que pixels com presença de nuvens sejam desconsiderados do processamento, porém, como estamos trabalhando com imagens de baixa altitude de voo e em período seco, não há necessidade de desconsiderar esses pixels.

A estimativa de Tc baseou-se na suposição de que, para um dia ou um período de céu claro, a superfície de um pixel frio deverá apresentar uma evapotranspiração igual à potencial, sendo a temperatura do ar próximo a superfície (Ta), aproximadamente igual a temperatura da superfície. A Ta horária, referente ao horário de realização dos voos, foi obtida da estação meteorológica localizada próximo da área de estudo, em graus Celsius com posterior conversão para Kelvin. A Tc é calculada pela Eq. (6).

$$T_c = c T_a \quad (6)$$

em que,

Ta = temperatura máxima do ar próximo a superfície, K;

c = fator de correção que relaciona Ta a Ts, considerando uma superfície de vegetação bem irrigada e em condições plenas de transpiração.

Em função das diferenças metodológicas e nos horários de aquisição dos dados, a temperatura de superfície de um pixel frio não será exatamente igual a temperatura do ar, sendo necessário adotar um fator de correção (SENAY *et al.*, 2013). O fator de correção c é determinado como uma média sazonal entre Ts e Ta em todos os pixels onde o NDVI (ROUSE *et al.*, 1974) é maior ou igual a 0,8 (SENAY *et al.*, 2013) e é calculado utilizando a Eq. (7).

$$c = \frac{T_{s\_cold}}{T_a} \quad (7)$$

em que,

Ts\_cold = temperatura de superfície do pixel observada pela imagem termográfica para o pixel frio onde o NDVI  $\geq 0,8$ , K;

A diferença de temperatura (dT) predefinida foi calculada de acordo com o princípio do balanço de energia sob condições de céu claro, considerando que para uma superfície nua e seca o fluxo de calor latente e do solo é próximo de zero e o fluxo de calor sensível é máximo. A dT é calculada pela Eq. (8).

$$dT = \frac{Rn_{\text{claro}} r_{\text{ah}}}{\rho_a C_p} \quad (8)$$

em que,

$Rn_{\text{claro}}$  = média diária de radiação líquida em céu claro,  $W m^{-2}$ ;

$C_p$  = calor específico do ar a pressão constante,  $kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ ;

$\rho_a$  = densidade do ar,  $kg m^{-3}$ ;

$r_{\text{ah}}$  = resistência aerodinâmica ao fluxo de calor de uma superfície hipotética nua e seca,  $s m^{-1}$ .

A  $Rn_{\text{claro}}$  foi calculada utilizando os dados meteorológicos da estação localizada próximo da área experimental. A  $\rho_a$  foi calculada em função da temperatura do ar e pressão (ALLEN *et al.*, 1998), o  $C_p$  foi considerado igual a  $1013 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$  e  $r_{\text{ah}}$  igual a  $110 s m^{-1}$  (SENAY *et al.*, 2013). Finalmente,  $T_h$  foi calculado através da Eq. (9).

$$T_h = T_c + dT \quad (9)$$

#### 2.4.2.7 Avaliação de desempenho do modelo SSEBop na estimativa da evapotranspiração atual

A ETa estimada pelo modelo SSEBop modificado foi comparada com a ETa medida através do balanço hídrico do solo no dia do voo. Para verificar o desempenho do modelo, as métricas estatísticas utilizadas foram a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o erro de viés médio (MBE), a eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Estas métricas foram calculadas conforme equações 10, 11, 12 e 13.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (10)$$

$$MBE = \bar{P}_i - \bar{O}_i \quad (11)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

em que,

$O_i$  = valores, de ordem  $i$ , observados no experimento em campo;

$\bar{O}$  = média dos valores observados;

$P_i$  = valores, de ordem  $i$ , simulados pelo modelo;

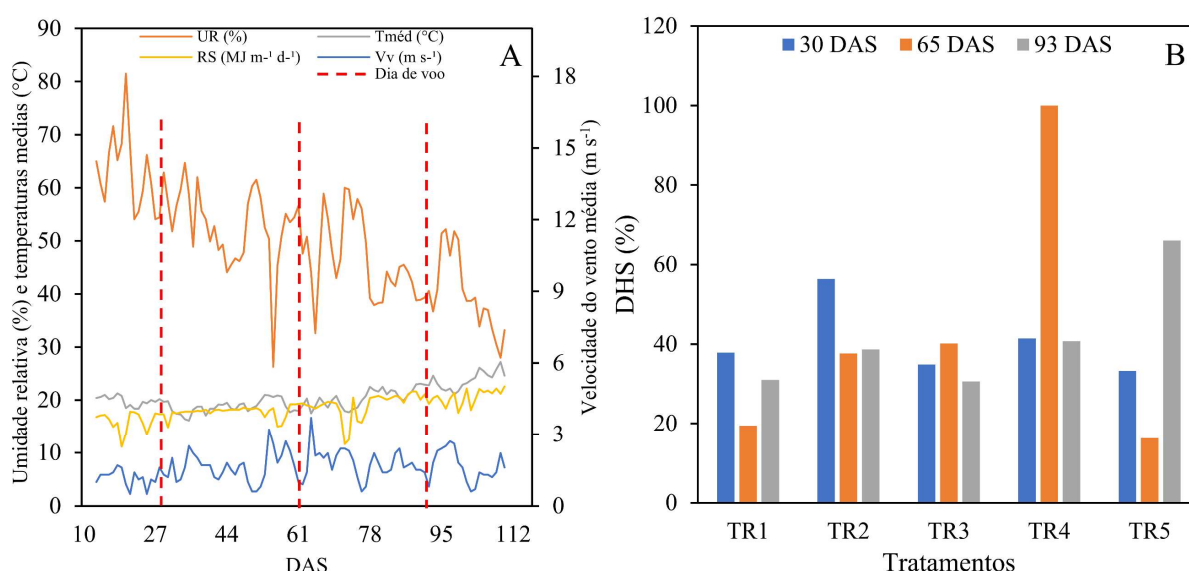
$\bar{P}_i$  = média dos valores simulados;

$n$  = número de observações.

## 2.4.3 Resultados e discussão

### 2.4.3.1 Análise dos dados observados

As condições climáticas observadas durante o experimento e o déficit hídrico no solo aos 30 DAS, 65 DAS e 93 DAS, estão apresentadas na Figura 1A e B, respectivamente.



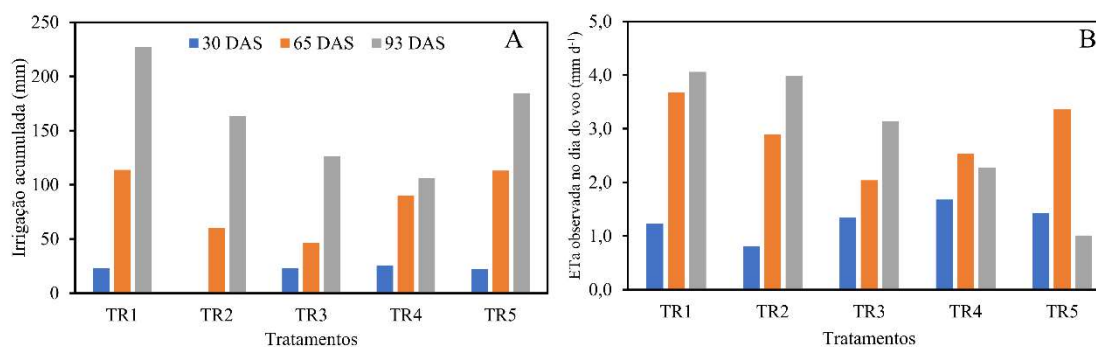
**Figura 1.** Dados meteorológicos observados durante o experimento (A) e déficit hídrico no solo aos 30, 65 e 93 DAS (B). Tméd = temperatura média do ar; UR = umidade relativa média do ar; RS = radiação solar média; Vv = velocidade do vento média. DHS = déficit hídrico no solo. DAS = dias após a semeadura. DHS = déficit hídrico no solo. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7.

Não foram registradas ocorrências de precipitação durante o experimento. A umidade relativa média do ar variou de 26% a 81%, com média igual a 50%. A temperatura média diária do ar variou entre 16 e 27 °C, com média igual a 20,4 °C. A radiação solar média variou entre 11 e 23 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, com média igual a 18,4 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. A velocidade do vento média variou de 0,5 a 3,7 m s<sup>-1</sup>, com média igual a 1,6 m s<sup>-1</sup>. Estas condições são normais para a área de estudo, uma vez que durante o inverno a região é marcada por clima seco, com baixa umidade do ar e falta de precipitação.

Observou-se que aos 30 DAS, a UR estava 34% menor que aos 93 DAS e os valores de DHS estavam abaixo dos 40% nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5; já no TR2, o valor de DHS, nessa mesma data, era igual a 56%, valor 32% maior que o observado no TR1. Aos 65 DAS, os tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR5 apresentaram valores de DHS abaixo de 40%. O tratamento TR4 apresentava valor de DHS igual a 100%. Essa variação ocorreu devido ao déficit hídrico aplicado nesse tratamento. Nessa data, o TR4 estava sob déficit hídrico havia 10 dias. Aos 93 DAS, os tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR4 apresentavam DHS abaixo de 40% e o TR5 estava com DHS igual a 66%, refletindo o déficit hídrico aplicado neste tratamento.

#### 2.4.3.2 Irrigação e evapotranspiração atual

Os valores acumulados de irrigação até o dia dos voos e a evapotranspiração atual nos dias de voos estão apresentadas na Figura 2.



**Figura 2.** Irrigação acumulada até o dia de voo (A) e evapotranspiração atual (B) observada nos dias de voo (ETa). DAS = dias após a semeadura. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estádio fenológico R5-R7.

A irrigação acumulada no TR1, aos 93 DAS, foi 90% e 45% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR2, a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 63% maior que

a observada aos 65 DAS. Em TR3, a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 82% e 63% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR4 a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 75% e 15% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR5, a irrigação acumulada aos 93 DAS foi 88% e 39% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente.

Os valores de irrigação acumulada observados aos 30 DAS, ficaram abaixo dos 26 mm nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5. Aos 65 DAS, os tratamentos TR2 e TR3 estavam com irrigação acumulada de 60 mm e 46 mm, respectivamente, valores 47% e 60% menores do que o observado no TR1. No TR2 não teve irrigação até os 33 DAS e o TR3 estava apenas com a irrigação acumulada até os 33 DAS, pois, após esse período, entrou no estágio fenológico correspondente ao momento de aplicação do déficit hídrico. Aos 93 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4 apresentaram irrigação acumulada 28%, 44% e 53 % menores do que TR1. Esses valores expressam os efeitos da suspensão da irrigação em cada tratamento, com consequente redução da quantidade total de água aplicada a planta.

A ETa diária do TR1, aos 93 DAS, foi 71% e 10% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR2, a ETa diária, aos 93 DAS, foi 80% e 28% maior que a observada aos 30 e 65 DAS. Em TR3, a ETa diária, aos 93 DAS, foi 58% e 35% maior que a observada aos 30 e 65 DAS, respectivamente. Em TR4 a ETa diária aos 93 DAS foi 26% maior que a observada aos 30 e 8% menor aos 65 DAS. Em TR5 a ETa diária aos 93 DAS foi menor 28% e 70% aos 30 e 65 DAS, respectivamente.

Os valores de ETa diária observados aos 30 DAS variaram entre 1,2 a 1,7 mm d<sup>-1</sup> nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5; já em TR2, a ETa foi 33% menor que em TR1. Aos 65 DAS, os tratamentos TR2, TR3 e TR4 estavam com ETa diária 21%, 46% e 32% menor que TR1, respectivamente. Isto pode ser explicado pelo fato que o TR2 e TR3 estavam em recuperação do déficit hídrico e o TR4 estava sob déficit hídrico. Aos 93 DAS, o tratamento TR2 estava com ETa diária similar ao TR1 e os tratamentos TR3, TR4 e TR5 apresentavam valores de ETa diária 24%, 44% e 75% menores, respectivamente. Esses valores expressam os efeitos da suspensão da irrigação em cada tratamento, com consequente redução da quantidade total de água aplicada a planta.

Observou-se que, após os 65 DAS, a necessidade de irrigação e a ETa diária aumentaram nos tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR4. Esse comportamento era esperado, uma vez que as necessidades hídricas da soja aumentam significativamente durante a fase reprodutiva em comparação com a fase vegetativa (POUDEL *et al.*, 2023). Resultado similar foi observado por Wang, Cai e Wang (2020) para o trigo sob déficit de irrigação.

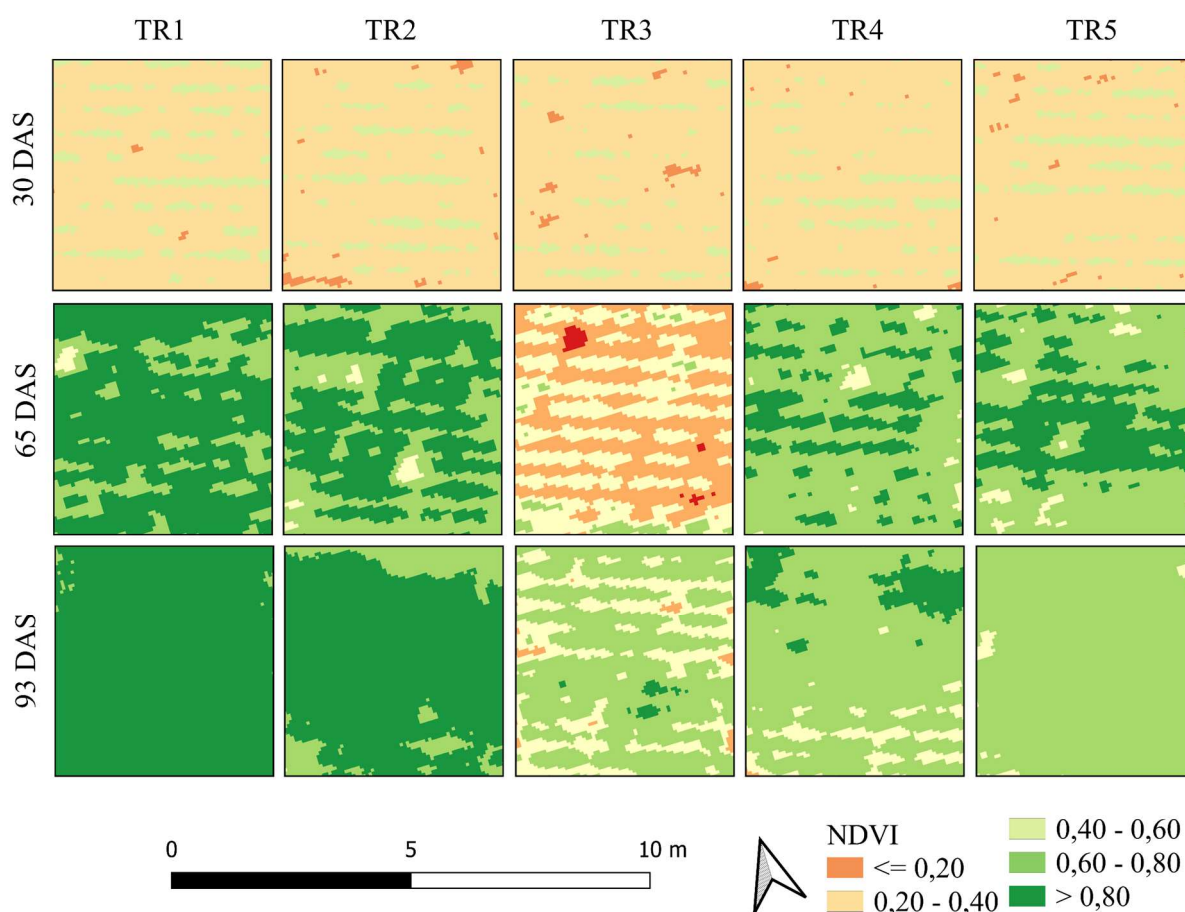
Nota-se que os tratamentos TR2, TR3 e TR4, que foram submetidos ao déficit hídrico, apresentaram reduções nas necessidades de irrigação e na ETa diária posteriormente. Isso foi devido ao efeito do déficit hídrico na fisiologia da planta, reduzindo a biomassa e área foliar, em decorrência do fechamento dos estômatos, para conservar e prevenir a perda excessiva de água, e diminuição da transpiração (BHATTI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2021).

Estes resultados estão de acordo com os encontrados na literatura. Alves *et al.*, (2021a), observaram redução de 32% na ETa total da soja quando a água disponível no solo estava entre 0 e 20%. Liu, Wu e Yang (2022), observaram redução na ETa em tratamentos com déficit hídrico em alfafa. Trout e DeJonge (2021), observaram reduções significativas na ETa nos tratamentos com déficit hídrico em milho.

### 2.4.3.3 Dados de sensoriamento remoto

#### 2.4.3.3.1 Variabilidade espacial do NDVI

Na Figura 3 apresenta-se os mapas de variação do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) aos 30 DAS, 65 DAS e 93 DAS.

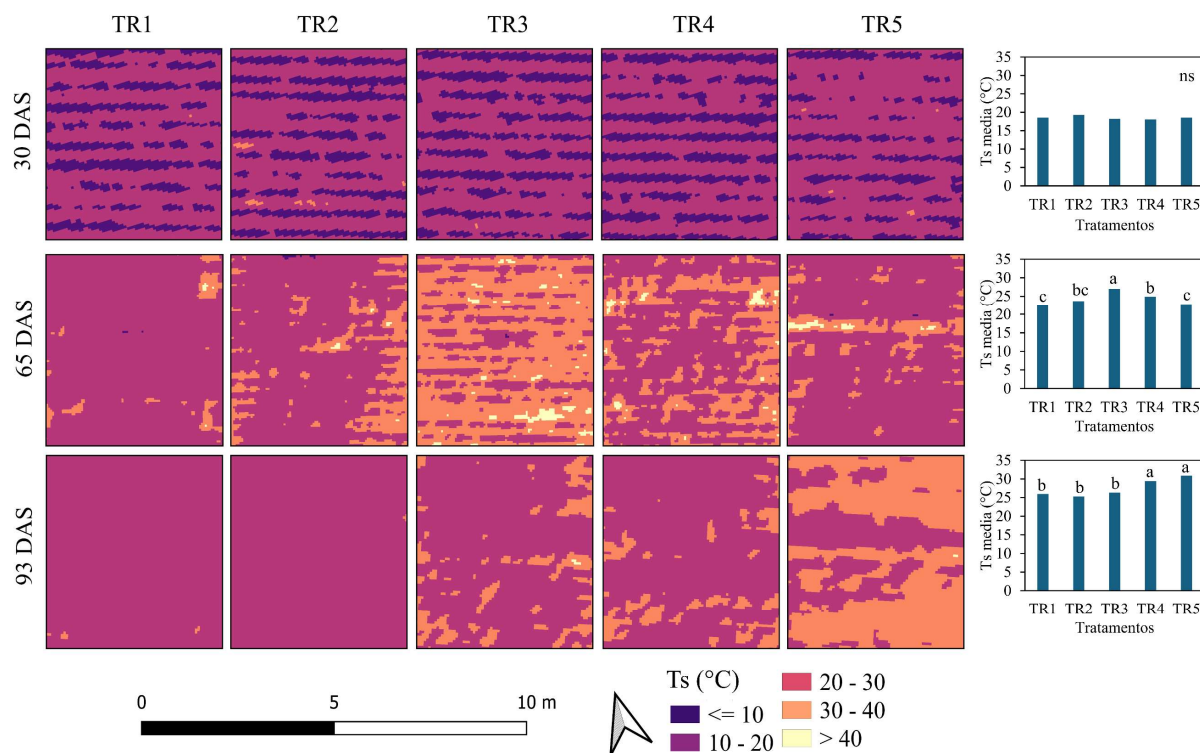


**Figura 3.** Mapa de variação do NDVI no dia de realização de cada voo para os diferentes tratamentos. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura.

Aos 30 DAS, observa-se que não houve grandes diferenças no NDVI entre os tratamentos aos, com valores variando de 0,4 a 0,6, o que pode ser explicado pelo fato das plantas se encontrarem no início do estágio fenológico VC-V2, com baixos valores de IAF. Aos 65 DAS, nos tratamentos TR1, TR2, TR4 e TR5, nota-se um aumento do número de folhas e da cobertura vegetal, com aumento no NDVI, que apresentou valores variando de 0,6 a 0,8; já no TR3, os valores de NDVI estavam entre 0,2 e 0,4. Aos 93 DAS, observa-se que os tratamentos TR1 e TR2, possuíam valores similares, com NDVI maior que 0,80, enquanto, os tratamentos TR3, TR4 e TR5 estavam com valores entre 0,6 e 0,8. As reduções no NDVI observadas no TR3 aos 65 DAS, e nos TR3, TR4 e TR5 aos 93 DAS, são atribuídas ao déficit hídrico aplicado nesses tratamentos. Isso ocorre principalmente porque as plantas estavam saindo ou ainda estavam no período de restrição hídrica, e as mudanças relacionadas à seca são sensíveis a diferentes bandas espectrais (MAGNEY *et al.*, 2016; BERGER *et al.*, 2022). Esse comportamento também foi observado por Zhou *et al.* (2022), que relataram valores menores de índices de vegetação em tratamentos de milho submetidos a déficit hídrico.

#### **2.4.3.3.2 Temperatura foliar (Ts)**

Na Figura 4 apresenta-se a variação da temperatura foliar (Ts) nos tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5 e a Ts média, para 30, 65 e 93 DAS, para os diversos tratamentos.



**Figura 4.** Mapa de variação da temperatura foliar ( $T_s$ ) e valores de temperatura foliar média ( $T_s$  média), no dia de realização de cada voo para os diferentes tratamentos. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura. As diferentes letras acima das barras representam o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) entre os diferentes tratamentos e ns é não significativo.

Aos 30 DAS, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Aos 65 DAS e 93 DAS foi observada diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos. Nota-se um incremento da  $T_s$  média desde os 30 DAS até os 93 DAS. Os tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5, aos 93 DAS, estavam com  $T_s$  média maior em 31%, 24%, 31%, 38% e 39% do que aos 30 DAS, respectivamente. O aumento da temperatura se deve ao incremento da área foliar das plantas, uma vez que a energia da radiação é absorvida pelos cloroplastos, sendo transformada em energia térmica e transferida para os tecidos celulares circundantes (KUME, 2017). Du *et al.* (2022) observaram também incremento da temperatura foliar do trigo com o aumento do índice de área foliar no estágio reprodutivo.

A  $T_s$  média, nos tratamentos aos 30 DAS, variou entre 18 e 19 °C. Aos 65 DAS, a  $T_s$  média entre os tratamentos variou de 22 a 27 °C. O maior valor de  $T_s$  média foi observada no TR3, cerca de 18% maior que em TR1 (22 °C). Os TR2 e TR4 apresentaram valores de  $T_s$

média 8% e 12% quando comparado com TR1, respectivamente. Aos 93 DAS, os tratamentos TR4 e TR5 estavam com  $T_s$  média maiores em 10% e 16% do que TR1.

As alterações na temperatura foliar observadas no TR3, aos 65 DAS, e no TR4 e TR5, aos 93 DAS, são devidas aos déficits hídricos aplicados em cada um desses tratamentos. No tratamento TR3, as plantas passaram por um período de estresse hídrico de 21 dias. No tratamento TR4, a irrigação voltou a ser realizada, colocando o solo em boas condições hídricas, mas a resposta da planta não foi imediata a essa reposição hídrica. No TR5, as plantas se encontravam em déficit hídrico, sem receber irrigação. Sob déficit hídrico, as plantas fecham os estômatos, reduzem a transpiração e aumentam a temperatura foliar acima do nível ideal (DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; MOORE *et al.*, 2021). Os resultados encontrados estão de acordo com Elsalahy e Reckling (2022), que observaram aumento da temperatura da soja sob déficit hídrico no estágio reprodutivo de aproximadamente 21%.

#### 2.4.3.4 Avaliação do modelo SSEBop

Na Tabela 3 apresenta-se, para cada DAS, os valores das principais variáveis de processamento do modelo SSEBop para estimativa da ETa.

**Tabela 3.** Variáveis de processamento para estimativa da evapotranspiração atual pelo modelo SSEBop.

DAS	dT (K)	ET <sub>o</sub> (mm d <sup>-1</sup> )	T <sub>a</sub> (K)	c	T <sub>c</sub> (K)	NDVI T <sub>c</sub>	T <sub>h</sub> (K)	NDVI T <sub>h</sub>
30	15,9	2,9	300,6	0,97	291,6	0,60	307,5	0,14
65	19,8	4,6	301,8	0,95	286,7	0,87	306,5	0,10
93	22,6	5,4	303,7	0,95	288,5	0,85	311,1	0,14

DAS, dias após a semeadura; ET<sub>o</sub>, evapotranspiração de referência; T<sub>a</sub>, temperatura máxima diária do ar; dT, diferença de temperatura; c, coeficiente de correção da temperatura; T<sub>c</sub>, temperatura do pixel frio; T<sub>h</sub>, temperatura do pixel quente; NDVI\_T<sub>c</sub>, índice de vegetação por diferença normalizada do pixel frio; NDVI\_T<sub>h</sub>, índice de vegetação por diferença normalizada do pixel quente.

Nota-se um incremento de aproximadamente 30% na dT e de 46% na ET<sub>o</sub>, desde os 30 DAS até os 93 DAS (Tabela 3). Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento, neste mesmo período de 21% no valor da radiação solar (Figura 1A). Esse um comportamento esperado para o período de cultivo (inverno), uma vez que se espera que dT, bem como a radiação solar, aumentem até atingir seu valor máximo no solstício de verão, quando começa a diminuir (LOPES *et al.*, 2019). O valor médio de dT, obtido para a soja, foi igual a 19 K (Tabela 3). A dT é dependente da localização, porém Senay *et al.* (2013) observaram que a maioria das

regiões com vegetação mostram valores dT que variam entre 20 e 25 K, corroborando os resultados obtidos nesse trabalho.

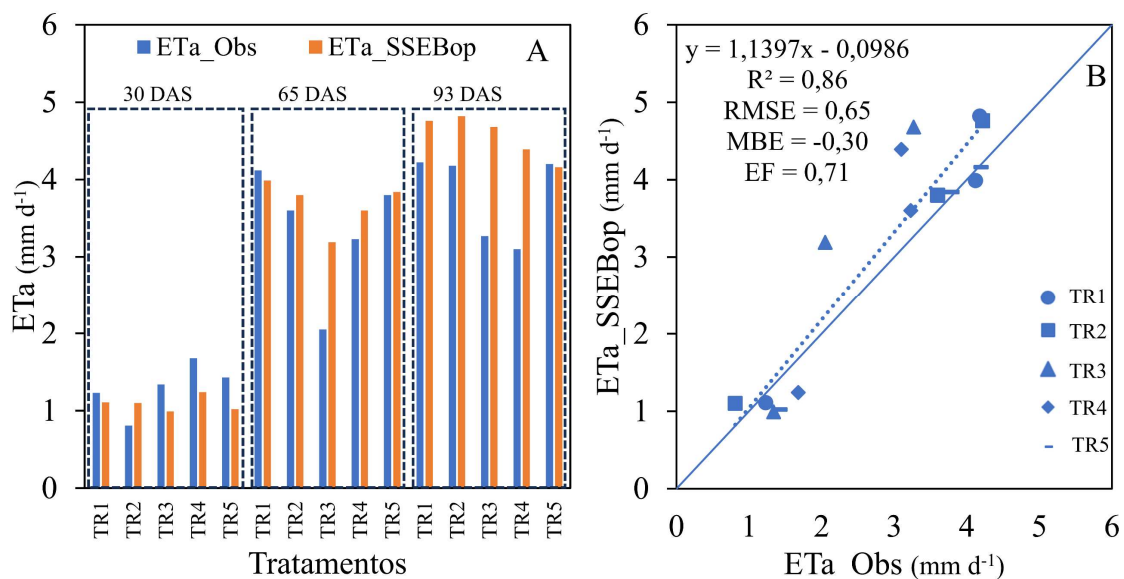
O coeficiente “c” apresentou valor médio de 0,96, confirmando sua estabilidade após os 65 DAS (Tabela 3). Senay *et al.* (2017) observaram que o valor de c varia regionalmente e sazonalmente e que uma variação de 1,0% no valor de c, reflete uma variação de até 20% no valor de ETa, justificando o desenvolvimento de estudos para calibração do valor deste coeficiente.

Nota-se um incremento de aproximadamente 1% na Ta e de 1,5% na Tc, dos 30 DAS até os 93 DAS (Tabela 3). Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da temperatura média que foi de 16%, neste mesmo período (Figura 1A). Os valores de NDVI variaram de 0,10 a 0,14 e de 0,60 a 0,87 para os pixels quentes e frios, respectivamente, no mesmo conjunto de imagens.

Dos 30 DAS até os 93 DAS, observa-se um aumento de 31% no NDVI. Esse aumento observado no NDVI é devido ao fato que, aos 30 DAS, as plantas estavam no estágio fenológico VC-V2, baixo índice de área foliar, e aos 93 DAS, as plantas já se encontravam completamente desenvolvidas. A importância da determinação do NDVI para definição do pixel quente e frio, foi destacado por Taheri *et al.* (2022).

Os valores de ETa medidos mostraram forte correlação com o modelo SSEBop, o que pode ser constatado pelo alto valor de  $r^2 = 0,86$ , RMSE igual a  $0,65 \text{ mm d}^{-1}$ , MBE =  $-0,30 \text{ mm d}^{-1}$  e EF igual a 0,71 (Figura 5B). Perdinti e Kisekka (2022), relataram um RMSE de  $1,06 \text{ mm d}^{-1}$  para estimar ETa em amêndoas utilizando o modelo SEBAL e atribuíram isto a complexidade da copa da cultura. Meza *et al.* (2023), relataram valores de RMSE para ETa abaixo  $0,6 \text{ mm d}^{-1}$  utilizando o modelo TSEB em gramado irrigado com o uso de imagens obtidas por VANTs. Esses resultados fornecem evidências de que os modelos de balanço de energia superficial originalmente desenvolvido para estimativa baseada em satélite de ETa pode ser usado com imagens aéreas de alta resolução de VANTs. A Figura 5 mostra a variabilidade da ETa calculada pelo SSEBop para cada tratamento.

Na Figura 5A apresenta-se, para cada tratamento e DAS, a evapotranspiração atual diária observada e estimada. Na Figura 5B apresenta-se a comparação da ETa calculada pelo modelo SSEBop em função da ETa observada pelo balanço de água no solo para os três dias de voos.



**Figura 5.** Valores diários, nos tratamentos, de evapotranspiração atual estimada pelo SSEBop (ETa\_SSEBop) e medida pelo balanço de água no solo (ETa\_Obs) (A), e correlação, para as três datas de voos, entre a ETa\_SSEBop e ETa\_Obs (B). TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura. RMSE = raiz quadrada do erro médio. MBE = erro de viés médio. EF = eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe.  $r^2$  = coeficiente de determinação.

Aos 30 DAS, observou-se que o SSEBop subestimou em 10%, 26%, 26% e 29% os valores de ETa nos tratamentos TR1, TR3, TR4 e TR5, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída à baixa área foliar das plantas, uma vez que o modelo SSEBop é mais apropriado para condições em que se tem vegetação uniforme e cobertura completa do solo. No estado do Texas, por exemplo, Senay *et al.* (2014) avaliaram o desempenho do SSEBop e observaram que o modelo subestimou a ETa em 14% nas áreas não irrigadas.

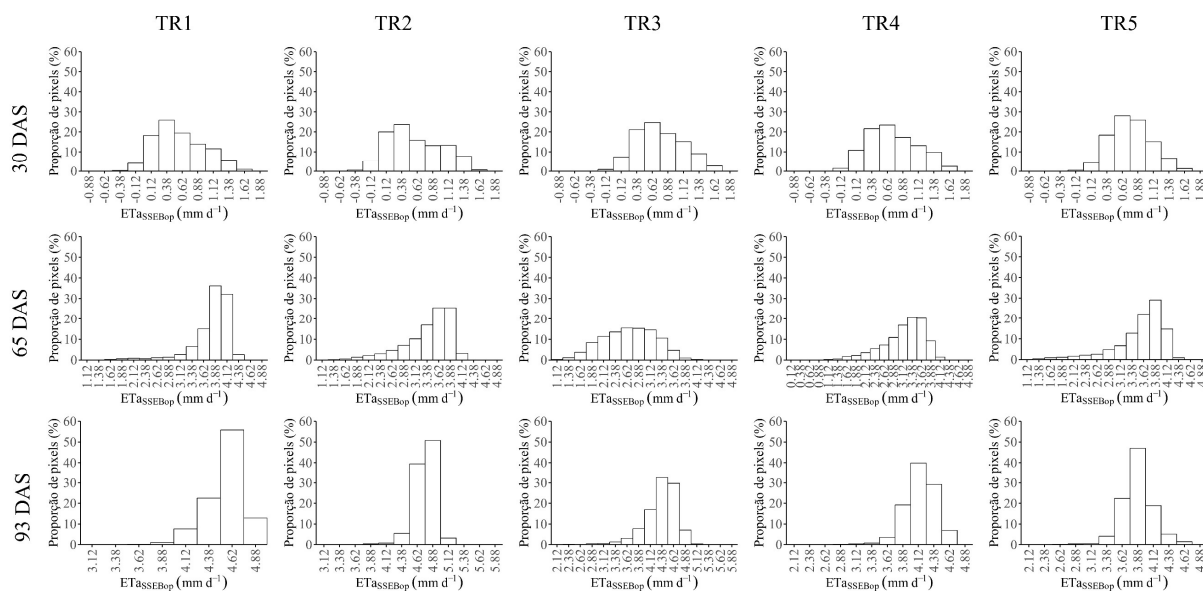
No tratamento TR2, observou-se que o modelo superestimou a ETa em 36%. Aos 65 DAS, o modelo SSEBop subestimou a ETa no TR1 em 3% e superestimou os tratamentos TR2, TR3, TR4 e TR5 em 5%, 56%, 11% e 1%, respectivamente. Aos 93 DAS, houve subestimativa de 1% no TR5 e superestimativa de 13%, 15%, 43% e 42% nos tratamentos TR1, TR2, TR3 e TR4. As superestimativas observadas nos tratamentos TR2 (30 DAS), TR3 (65 DAS) e TR4 (93 DAS) é devido ao déficit hídrico aplicado, uma vez que estes tratamentos estavam sem irrigação há 18 dias, 10 dias e 31 dias, respectivamente, aumentando o fluxo de calor no solo e superestimando a ETa (SENAY; BUDDE; VERDIN, 2011).

Aos 30 DAS, o TR2, que estava sob déficit hídrico, apresentou ETa observada de 0,8 e modelada de 1,1 mm d<sup>-1</sup>, representando redução de 34% e 1%, respectivamente, em relação ao TR1. Aos 65 DAS, o TR3, que estava sob déficit hídrico, apresentou ETa observada de 2,1 e modelada de 3,2 mm d<sup>-1</sup>, representando redução de 50% e 20%, respectivamente, em relação ao TR1. Aos 93 DAS, os tratamentos TR3 e TR4 estavam com ETa observada de 3,3 e 3,1 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente, representando uma diminuição de 22% e 26% em relação ao TR1, e a modelada nestes mesmos tratamentos, foram iguais a 4,7 e 4,7 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente, representando uma redução de 2% e 8% em relação a ETa modelada do TR1.

Observou-se que o modelo não representou adequadamente o efeito do déficit hídrico na ETa. Isto pode ser explicado pelo fato de que para estimar a ETa pelo SSEBop deve-se ter condições favoráveis para a transpiração potencial das plantas, ou seja, boa disponibilidade hídrica. Isso pode ser comprovado ao analisar o comportamento da ETa no TR1, onde a diferença entre a ETa observada e a estimada pelo SSEBop foi menor que 12%.

#### 2.4.3.5 Variabilidade espacial da evapotranspiração atual da cultura

A Figura 6 mostra os histogramas da ETa estimada pelo SSEBop nos tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5, para 30, 65 e 93 DAS.

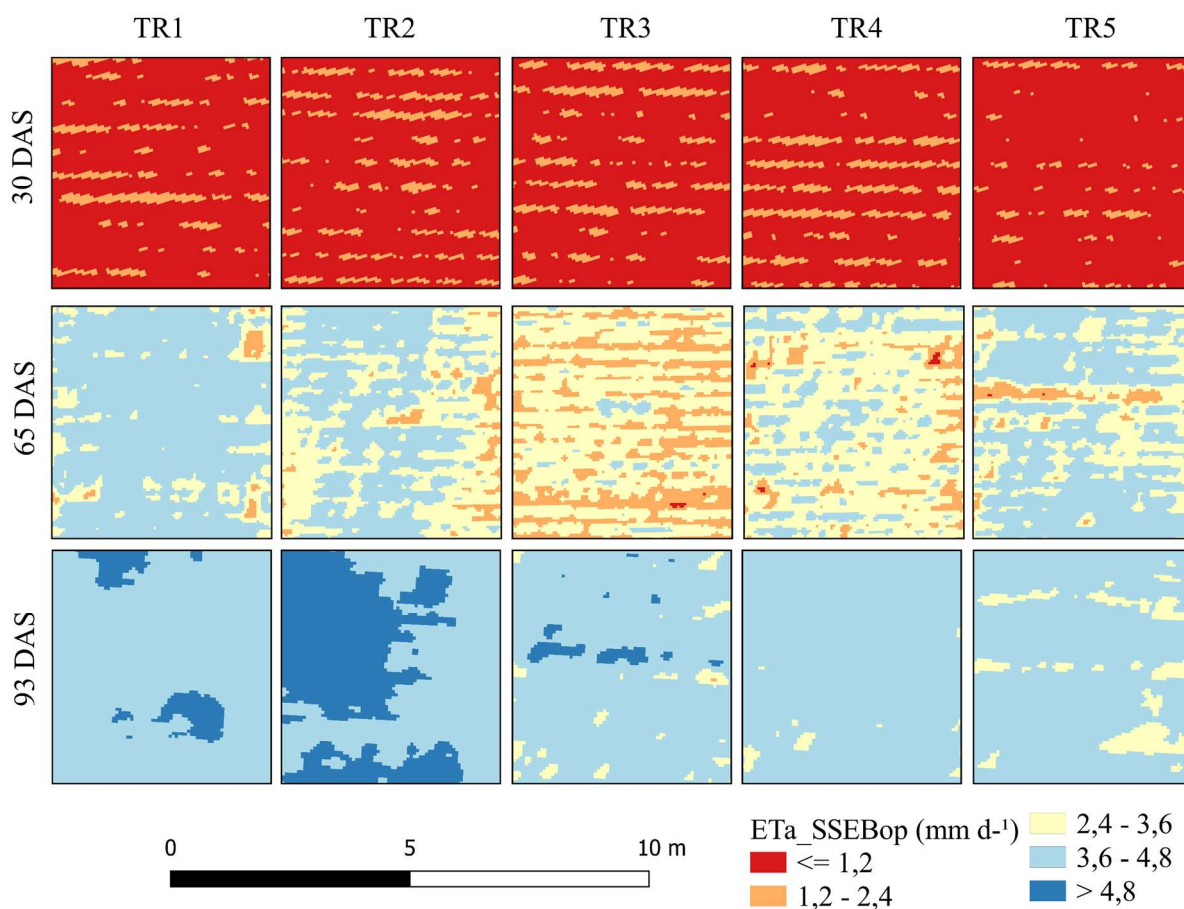


**Figura 6.** Distribuição de frequência da evapotranspiração atual da soja calculada pelo SSEBop para os dias de realização de cada voo para os diferentes tratamentos.  $ET_{a\text{SSEBop}}$  = evapotranspiração atual da soja calculada pelo SSEBop. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação

no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a sementeira.

Conforme Figura 6, aos 30 DAS, observa-se comportamentos similares na distribuição da  $ET_{ASSEBop}$  entre os tratamentos, com 90% da  $ET_{ASSEBop}$  entre 0,12 e 1,12  $mm\ d^{-1}$ . Aos 65 DAS, maior variabilidade foi observada no tratamento TR3 com 90% da  $ET_{ASSEBop}$  entre 1,9 e 3,4  $mm\ d^{-1}$ . Aos 93 DAS, os tratamentos TR3, TR4 e TR5 possuíam maior variabilidade, aproximadamente 60% dos pixels apresentavam  $ET_{ASSEBop}$  igual a 4,6  $mm\ d^{-1}$  no TR1; já no TR2 50% dos pixels apresentavam  $ET_{ASSEBop}$  igual a 4,9  $mm\ d^{-1}$ , no TR3 60% dos pixels apresentavam  $ET_{ASSEBop}$  entre 4,3 e 4,6  $mm\ d^{-1}$ , no TR4 90% dos pixels apresentavam  $ET_{ASSEBop}$  entre 3,8 e 4,4  $mm\ d^{-1}$  e no TR5 aproximadamente 90% dos pixels apresentavam  $ET_{ASSEBop}$  entre 3,6 e 4,1  $mm\ d^{-1}$ . As variações observadas nos tratamentos com déficit hídrico são devidas as diferentes formas de comportamento das plantas ao déficit hídrico, principalmente por que a variedade utilizada neste estudo é de crescimento indeterminado.

Na Figura 7 apresenta-se a variação da ETa estimada pelo SSEBop nos tratamentos TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5, para 30, 65 e 93 DAS.



**Figura 7.** Mapa de variação da evapotranspiração atual da soja calculada pelo SSEBop para os dias de realização de cada voo para os diferentes tratamentos. TR1 = tratamento com irrigação em todos os estádios fenológicos; TR2 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico VC-V2; TR3 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico V2-R1; TR4 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R1-R5; TR5 = tratamento sem irrigação no estágio fenológico R5-R7. DAS = dias após a semeadura.

A ETa\_SSEBop aos 30 DAS variou entre 1,2 e 2,4, com valores similares entre os tratamentos. Isso pode ser explicado pelo baixo índice de área foliar ( $IAF < 1,0$ ), com grande área de solo descoberto que são considerados nos cálculos e contribuem para a subestimativa da ETa. Aos 65 DAS, quando as plantas já estavam mais desenvolvidas ( $IAF > 2,0$ ), verifica-se valores de ETa variando de 3,6 a 4,8 mm d<sup>-1</sup>, com média = 3,8 mm d<sup>-1</sup>, nos tratamentos TR1, TR2, TR4 e TR5. Todavia, no tratamento TR3, os valores de ETa variaram de 2,4 a 3,6, com valor médio igual a 3,2 mm d<sup>-1</sup>. Isso deve ao fato desse tratamento ter ficado 21 dias sem irrigação (período de déficit). No momento do voo, havia onze dias que a irrigação tinha sido

retomada, as plantas, entretanto, não havia ainda se recuperado do déficit hídrico aplicado, refletindo na ETa. Aos 93 DAS, a ETa\_SSEBop variou entre 3,6 e 4,8 mm d<sup>-1</sup>, com valores similares entre os tratamentos.

Os valores de ETa observados e modelados pelo SSEBop estão de acordo com os encontrados na literatura para a soja. Alves *et al.* (2021b) observaram valores de ETa calculados por diferentes modelos de estimativa variando de 2,0 a 8,3 mm d<sup>-1</sup>. Farias *et al.* (2024), obtiveram valor de ETa para a soja variando de 1 mm d<sup>-1</sup> no estágio vegetativo inicial a 3,5 mm d<sup>-1</sup> no estágio de enchimento de sementes da soja.

A integração de modelos de balanço de energia superficial, como o SSEBop, com imagens aéreas de VANTs, mostra-se uma metodologia promissora para a otimização do uso da água na agricultura. Esta abordagem permite um monitoramento preciso e eficiente da evapotranspiração, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes. A aplicação dessas tecnologias pode proporcionar uma gestão hídrica mais eficaz, crucial em cenários de escassez de água e mudanças climáticas, promovendo a sustentabilidade e a resiliência dos sistemas agrícolas.

#### **2.4.4 Conclusões**

O desempenho do modelo SSEBop para estimativa da evapotranspiração atual da cultura da soja foi considerado satisfatório ( $R^2 = 0,86$  e  $EF = 0,71$ ), principalmente nos estádios reprodutivos das plantas, quando as condições de cobertura vegetal eram uniformes e completas.

Nos dias dos voos, considerando todos os cinco tratamentos, o SSEBop superestimou a evapotranspiração atual em média em 25% e subestimou em média 16%.

A distribuição da ETa<sub>SSEBop</sub> variou ao longo do ciclo da cultura, com maior variabilidade observada nos tratamentos sob déficit hídrico, especialmente nos estágios mais avançados de crescimento.

### 3 Conclusões gerais

O maior déficit hídrico nos estádios fenológicos críticos, como R1-R5 e R5-R7, resultou em uma redução significativa na evapotranspiração e na produtividade da soja. Os resultados demonstraram que a suspensão da irrigação nesses estádios afeta diretamente a biomassa, o índice de área foliar, a altura das plantas e a produtividade final. A correlação linear entre produtividade, déficit hídrico no solo e evapotranspiração atual total (ETa) indicou que, quanto maior a ETa, maior a produtividade, e quanto maior o déficit hídrico, menor o rendimento da soja.

No estágio fenológico desde o segundo nó até o início do florescimento (V2-R1), apesar do déficit hídrico, a perda de produtividade foi menor que 15%, e a produtividade da água foi similar ao tratamento controle. Esses resultados indicam que a gestão do déficit hídrico deve ser cuidadosamente planejada, especialmente durante os estádios fenológicos mais sensíveis, para minimizar os impactos negativos na produtividade da soja.

Conforme evidenciado na análise dos índices de vegetação (VIs) neste estudo, diversos VIs demonstraram robustez em correlacionar-se com parâmetros representativos do crescimento e produção da soja, como índice de área foliar (IAF), biomassa e produtividade. Os índices *Enhanced Vegetation Index 2* (EVI2), *Optimized Soil Adjusted Vegetation Index* (OSAVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) e *Renormalized Difference Vegetation Index* (RDVI) se destacaram com coeficiente de determinação maior que 0,80 e erro médio quadrático menor que 0,50 para a correlação com o IAF. Similarmente, os índices EVI2, OSAVI e RDVI apresentaram um  $r^2 \geq 0,70$  e  $RMSE < 1,75$  para a correlação com a biomassa. Para a produtividade, os índices NDRE, SCCCI, RECI, GRVI, GCI e GNDVI foram melhor correlacionados, apresentando  $r^2 \geq 0,90$  e  $RMSE < 0,18$ . Além das correlações diretas, a aplicação dos VIs foi validada por meio de mapeamentos que demonstraram sua eficácia em estimar o IAF, a biomassa seca e a produtividade ao longo dos diferentes estádios fenológicos da cultura da soja. As superestimativas e subestimativas observadas nos mapas refletem não apenas a resposta dos VIs às condições de cultivo, mas também suas limitações em capturar variações extremas causadas por eventos climáticos adversos, como secas prolongadas.

Com base nos resultados deste estudo, foi possível observar variações significativas na temperatura foliar ( $T_c$ ) e no índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) entre os diferentes tratamentos ao longo dos estádios fenológicos da soja. A análise das relações entre IEHC, evapotranspiração atual (ETa), índice de área foliar, biomassa e produtividade da soja, destacou a forte correlação entre IEHC e ETa em todos os dias de medição, indicando que maiores valores de IEHC estão associados a menores taxas de evapotranspiração, particularmente

evidentes nos estádios fenológicos mais avançados. Além disso, observou-se que o IEHC aos 65 DAS correlacionou-se mais fortemente com índice de área foliar e biomassa, evidenciando como o estresse hídrico afeta diretamente o desenvolvimento vegetativo e a produção de biomassa na cultura da soja. Já aos 93 DAS, a relação entre IEHC e produtividade mostrou-se significativa, comprovando que altos valores de IEHC estão associados a uma redução na produtividade da soja.

As análises realizadas demonstraram que o modelo SSEBop apresentou um desempenho satisfatório na estimativa da ETa, principalmente quando as condições de cobertura vegetal eram uniformes e completas, especialmente nos estádios reprodutivos das plantas.

A importância da calibração regional e sazonal foi destacada, uma vez que a variação das variáveis do modelo, como o coeficiente de correção da temperatura e a diferença de temperatura, mostrou a necessidade de ajustes específicos para a região de estudo.

#### 4 Referências

ADAMU, B.; RASUL, A.; WHANDA, S. J.; HEADBOY, P.; MUHAMMED, I.; MAIHA, I. A. Evaluating the accuracy of spectral indices from Sentinel-2 data for estimating forest biomass in urban areas of the tropical savanna. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100484, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100484>>.

AGROSTAT – Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. **Balança Comercial do Agronegócio – Série Histórica**, 2023. Disponível em: <<https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Agrostat/Agrostat.html>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy**, 1998. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>>.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 395–406, ago. 2007. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%282007%29133%3A4%28395%29>>.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The Expansion of Center-Pivot Irrigation in the Cerrado Biome. **Agricultural Water Management**, v. 267, p. 107614, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.15809/irriga.2019v1n1p56-61>>.

ALVES, E. D. S.; RODRIGUES, L. N.; CUNHA, F. F.; FARIAS, D. B. Evaluation of models to estimate the actual evapotranspiration of soybean crop subjected to different water deficit conditions. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 4, p. e20201801, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201801>>.

ALVES, E. D. S.; RODRIGUES, L. N.; OLIVEIRA, R. A. D.; LORENA, D. R. Water deficit on the growth and yield of irrigated soybean in the Brazilian Cerrado region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 750-757, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n11p750-757>>.

ANDA, A.; SOÓS, G.; MENYHÁRT, L.; KUCSERKA, T.; SIMON, B. Yield features of two soybean varieties under different water supplies and field conditions. **Field Crops Research**, v. 245, p. 107673, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107673>>.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MECIKALSKI, J. R.; OTKIN, J. A.; KUSTAS, W. P. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 112, D10, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2006JD007506>>.

ANDRADE, A. S. D.; SILVA, S. P. D.; SETÚBAL, I. S.; SOUZA, H. A. D.; VIEIRA, P. F. D. M.; CASARI, R. A. D. C. Predicting soybean grain yield using aerial drone images. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 6, p. 466-476, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n6p466-476>>.

AYDINSAKIR, K. Yield and quality characteristics of drip-irrigated soybean under different irrigation levels. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, p. 1473-1481, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0748>>.

BAIO, F. H. R.; SILVA, E. E. E.; VRECH, M. A.; SOUZA, F. H. Q.; ZANIN, A. R. A.; TEODORO, P. E. Vegetation indices to estimate spray application rates of crop protection products in corn. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 1–6, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0718>>.

BARBEDO, J. G. A. A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses. **Drones**, v. 3, n. 2, p. 1-27, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/drones3020040>>.

BARZIN, R.; PATHAK, R.; LOTFI, H.; VARCO, J.; BORA, G. C. Use of UAS multispectral imagery at different physiological stages for yield prediction and input resource optimization in corn. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, p. 2392, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12152392>>.

BASTIAANSEN, W. G.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212, p. 198-212, 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)>.

BATEMAN, N. R.; CATCHOT, A. L.; GORE, J.; COOK, D. R.; MUSSER, F. R.; IRBY, J. T. Effects of planting date for soybean growth, development, and yield in the southern USA. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 596, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy10040596>>.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DE SÁ DANTAS, J. P.; MORAES, M. F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159–168, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>>.

BERGER, K.; MACHWITZ, M.; KYCKO, M.; KEFAUVER, S. C.; VAN WITTENBERGHE, S.; GERHARDS, M.; VERRELST, J.; ATZBERGER, C.; VAN DER TOL, C.; DAMM, A.; RASCHER, U.; HERRMANN, I.; PAZ, V. S.; FAHRNER, S.; PIERUSCHKA, R.; PRIKAZIUK, E.; BUCHAILLOT, M. L.; HALABUK, A.; CELESTI, M.; KOREN, G.; GORMUS, E. T.; ROSSINI, M.; FOERSTER, M.; SIEGMANN, B.; ABDELBAKI, A.; TAGLIABUE, G.; HANK, T.; DARVISHZADEH, R.; AASEN, H.; GARCIA, M.; PÔÇAS, I.; BANDOPADHYAY, S.; SULIS, M.; TOMELLERI, E.; ROZENSTEIN, O.; FILCHEV, L.; STANCILE, G.; SCHLERF, M. Multi-sensor spectral synergies for crop stress detection and monitoring in the optical domain: A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 280, p. 113198, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113198>>.

BERLINER, P. R.; OOSTERHUIS, D. M. Effect of root and water distribution in lysimeters and in the field on the onset of crop water stress. **Irrigation Science**, v. 8, n. 4, p. 245-255, 1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00257509>>.

BHATTI, S.; HEEREN, D. M.; EVETT, S. R.; O'SHAUGHNESSY, S. A.; RUDNICK, D. R.; FRANZ, T. E.; NEALE, C. M. Crop response to thermal stress without yield loss in irrigated maize and soybean in Nebraska. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107946, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107946>>.

BOULCH, G.; ELMERICH, C.; DJEMEL, A.; LANGE, B. Evaluation of soybean (*Glycine max* L.) adaptation to northern European regions under different agro-climatic scenarios. **In Silico Plants**, v. 3, p. 1–13, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab008>>.

BOZKURT ÇOLAK, Y.; YAZAR, A.; ALGHORY, A.; TEKIN, S. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and

subsurface drip systems. **Irrigation Science**, v. 39, p. 81-100, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00271-020-00681-4>>.

BRAGA, P.; CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; et al. Vegetation indices and NIR-SWIR spectral bands as a phenotyping tool for water status determination in soybean. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 249–266, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-020-09740-4>>.

BRETAS, I. L.; VALENTE, D. S.; SILVA, F. F.; CHIZZOTTI, M. L.; PAULINO, M. F.; D'ÁUREA, A. P.; CHIZZOTTI, F. H. Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in Brachiaria pastures by combining meteorological data and satellite imagery. **Grass and Forage Science**, v. 76, n. 3, p. 340-352, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/gfs.12517>>.

BREWER, K.; CLULOW, A.; SIBANDA, M.; GOKOOL, S.; NAIKEN, V.; MABHAUDHI, T. Predicting the chlorophyll content of maize over phenotyping as a proxy for crop health in smallholder farming systems. **Remote Sensing**, v. 14, p. 518, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs14030518>>.

CANDOGAN, B. N.; SINCIK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; DEMIRTAS, C.; GOKSOY, A. T.; YAZGAN, S. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 118, p. 113-121, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.021>>.

CARVALHO, E. D. O. T. D.; COSTA, D. L. P.; VIEIRA, I. C. D. O.; FERREIRA, B. G.; NUNES, H. G. G. C.; SOUZA, P. J. D. O. P. D. Crop water stress index of cowpea under different water availability levels in Castanhal-PA. **Revista Caatinga**, v. 35, p. 711-721, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n322rc>>.

CHAI, Y.; LIU, H.; YU, Y.; YANG, Q.; ZHANG, X.; ZHAO, W.; GUO, L.; YETEMEN, O. Strategies of parameter optimization and soil moisture sensor deployment for accurate estimation of evapotranspiration through a data-driven method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 331, p. 109354, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109354>>.

CHANG, A.; JUNG, J.; YEOM, J.; MAEDA, M. M.; LANDIVAR, J. A.; ENCISO, J. M.; AVILA, C. A.; ANCISO, J. R. Unmanned aircraft system- (UAS-) based high-throughput phenotyping (HTP) for tomato yield estimation. **Journal of Sensors**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2021/8875606>>.

CHENG, M.; JIAO, X.; LIU, Y.; SHAO, M.; YU, X.; BAI, Y.; WANG, Z.; WANG, S.; TUOHUTI, N.; LIU, S.; SHI, L.; YIN, D.; HUANG, X.; NIE, C.; JIN, X. Estimation of soil moisture content under high maize canopy coverage from UAV multimodal data and machine learning. **Agricultural Water Management**, v. 264, p. 107530, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107530>>.

COMAS, L. H.; TROUT, T. J.; DEJONGE, K. C.; ZHANG, H.; GLEASON, S. M. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. **Agricultural Water Management**, v. 212, p. 433-440, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.015>>.

CORREIA-FILHO, W. L. F.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SANTIAGO, D. B.; ABDO, H. G.; ALMOHAMAD, H.; AL DUGHAILRI, A. A.; SILVA JUNIOR, C. A. The assessment of climatic, environmental, and socioeconomic aspects of the Brazilian Cerrado. **Ecological Processes**, v. 12, n. 1, p. 19, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s13717-023-00433-0>>.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R.

B. UAV-based thermal imaging in the assessment of water status of soybean plants. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 9, p. 3243-3265, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s13717-023-00433-0>>.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; SUN, L.; FOLONI, J. S. S.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Yield prediction in soybean crop grown under different levels of water availability using reflectance spectroscopy and partial least squares regression. **Remote Sensing**, v. 13, p. 977, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs13050977>>

CUI, Y.; NING, S.; JIN, J.; JIANG, S.; ZHOU, Y.; WU, C. Quantitative lasting effects of drought stress at a growth stage on soybean evapotranspiration and aboveground biomass. **Water**, v. 13, n. 1, p. 18, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w13010018>>.

DA SILVA, E. E.; BAILO, F. H. R.; TEODORO, L. P. R.; DA SILVA JUNIOR, C. A.; BORGES, R. S.; TEODORO, P. E. UAV-multispectral and vegetation indices in soybean grain yield prediction based on in situ observation. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 100318, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100318>>.

DA SILVA, E. H.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A.; JÚNIOR, I. M. F.; SOBENKO, L. R.; MARIN, F. R. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1-7, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.003>>.

DAS, S.; CHAPMAN, S.; CHRISTOPHER, J.; ROY CHOUDHURY, M.; MENZIES, N. W.; APAN, A.; DANG, Y. P. UAV-thermal imaging: A technological breakthrough for monitoring and quantifying crop abiotic stress to help sustain productivity on sodic soils—A case review on wheat. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100583, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100583>>.

DE LARA, A.; LONGCHAMPS, L.; KHOSLA, R. Soil water content and high-resolution imagery for precision irrigation: Maize yield. **Agronomy**, v. 9, n. 4, p. 174, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy9040174>>.

DONG, S.; JIANG, Y.; DONG, Y.; WANG, L.; WANG, W.; MA, Z.; YAN, C.; MA, C.; LIU, L. A study on soybean responses to drought stress and rehydration. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, p. 2006–2017, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.08.005>>.

DU, X.; GAO, Z.; SUN, X.; BIAN, D.; REN, J.; YAN, P.; CUI, Y. Increasing temperature during early spring increases winter wheat grain yield by advancing phenology and mitigating leaf senescence. **Science of the Total Environment**, v. 812, p. 152557, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152557>>.

DUBBERSTEIN, D.; LIDON, F. C.; RODRIGUES, A. P.; SEMEDO, J. N.; MARQUES, I.; RODRIGUES, W. P.; GOUVEIA, D.; ARMENGAUD, J.; SEMEDO, M. C.; MARTINS, S.; SIMÕES-COSTA, M. C.; MOURA, I.; PAIS, I. P.; SCOTTI-CAMPOS, P.; PARTELLI, F. L.; CAMPOSTRINI, E.; RIBEIRO-BARROS, A. I.; DA MATTA, F. M.; RAMALHO, J. C. Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of Coffea spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01049>>.

DZIKITI, S.; VERREYNNE, J. S.; STUCKENS, J.; STREVER, A.; VERSTRAETEN, W. W.; SWENNEN, R.; COPPIN, P. Determining the water status of Satsuma mandarin trees [Citrus Unshiu Marcovitch] using spectral indices and by combining hyperspectral and physiological data.

**Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 369-379, 2010. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.12.005>>.

EGEA, G.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; MARTINEZ-GUANTER, J.; FERNÁNDEZ, J. E.; PÉREZ-RUIZ, M. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards. **Agricultural Water Management**, v. 187, p. 210-221, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.030>>.

EKINZOG, E. K.; SCHLERF, M.; KRAFT, M.; WERNER, F.; RIEDEL, A.; ROCK, G.; MALLICK, K. Revisiting crop water stress index based on potato field experiments in Northern Germany. **Agricultural Water Management**, v. 269, p. 107664, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107664>>.

ELSALAHY, H. H.; RECKLING, M. Soybean resilience to drought is supported by partial recovery of photosynthetic traits. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 971893, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.971893>>.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2011. 230p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT: FAO Statistical Databases**, 2023. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

FAOSTAT. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: junho 20, 2024.

FARIAS, D. B. D. S.; RODRIGUES, L. N.; ALEMAN, C. C.; CECON, P. R. Estimation of soybean crop water deficit sensitivity index. **Scientia Agricola**, v. 81, p. e20230103, 2024. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2023-0103>>.

FATEMA, M. K.; MAMUN, M. A. A.; SARKER, U.; HOSSAIN, M. S.; MIA, M. A. B.; ROYCHOWDHURY, R.; KARIM, M. A. Assessing morpho-physiological and biochemical markers of soybean for drought tolerance potential. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1427, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/su15021427>>.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E.; BURMOOD, D. T.; PENNINGTON, J. S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine Max (L.) Merrill*. **Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 929-931, 1971. Disponível em: < <https://doi.org/10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x>>.

FELISBERTO, G.; SCHWERZ, F.; UMBURANAS, R. C.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDT, K. Physiological and yield responses of soybean under water deficit. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 26, n. 1, p. 27-37, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s12892-022-00157-1>>.

FERREIRA, D. P.; SOUSA, D. P.; NUNES, H. G. G. C.; PINTO, J. V. N.; FARIAS, V. D. S.; COSTA, D. L. P.; MOURA, V. B.; TEIXEIRA, E.; SOUSA, A. M. L.; PINHEIRO, H. A.; SOUZA, P. J. de O. P. Cowpea Ecophysiological Responses to Accumulated Water Deficiency during the Reproductive Phase in Northeastern Pará, Brazil. **Horticulturae**, v. 7, p. 1-14, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/horticulturae7050116>>.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; RIBEIRO, R. B.; VENANCIO, L. P.; SANTOS, R. A. Dynamics of actual crop evapotranspiration based in the comparative analysis of SEBAL and METRIC-EEFlux. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 72-80, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v1n1p72-80>>.

FORKEL, M.; SCHMIDT, L.; ZOTTA, R.-M.; DORIGO, W.; YEBRA, M. Estimating leaf moisture content at global scale from passive microwave satellite observations of vegetation optical depth. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 27, n. 1, p. 39-68, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.5194/hess-27-39-2023>>.

GAUTAM, D.; OSTENDORF, B.; PAGAY, V. Estimation of grapevine crop coefficient using a multispectral camera on an unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing**, v. 13, n. 13, p. 2639, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/rs13132639>>.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 289-298, 1996. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)>.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 22, p. 247-252, 1994. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](https://doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4)>.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; CIGANDA, V.; RUNDQUIST, D. C.; ARKEBAUER, T. J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, p. 1-4, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>>.

GONEN, E.; KARA, O. Determination of the effects of different tillage methods and irrigation levels on soybean yield and yield components. **The Journal of Agricultural Science**, v. 160, n. 1-2, p. 76-85, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1017/S0021859622000144>>.

GONZALEZ-DUGO, V.; LOPEZ-LOPEZ, M.; ESPADAFOR, M.; ORGAZ, F.; TESTI, L.; ZARCO-TEJADA, P.; LORITE, I. J.; FERERES, E. Transpiration from canopy temperature: Implications for the assessment of crop yield in almond orchards. **European Journal of Agronomy**, v. 105, p. 78-85, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.010>>.

GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; INTRIGLIOLO, D. S.; RAMÍREZ-CUESTA, J.-M. Normalization of the crop water stress index to assess the within-field spatial variability of water stress sensitivity. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 964-983, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09768-6>>.

GOUEL, C.; GUIMBARD, H. Nutrition Transition and the Structure of Global Food Demand. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 101, n. 2, p. 383-403, 19 jun. 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1093/ajae/aay030>>.

HAN, M.; ZHANG, H.; DEJONGE, K. C.; COMAS, L. H.; TROUT, T. J. Estimating maize water stress by standard deviation of canopy temperature in thermal imagery. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 400-409, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.031>>.

HE, Y.; WANG, Z.; SUN, S.; ZHU, L.; LI, Y.; WANG, X.; ZHOU, Z. Using crop intercepted solar radiation and vegetation index to estimate dry matter yield of Choy Sum. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1208404, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1208404>>.

HELMAN, D.; BONFIL, D. J.; LENSKY, I. M. Crop RS-Met: A biophysical evapotranspiration and root-zone soil water content model for crops based on proximal sensing and meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 211, p. 210-219, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.043>>.

HUANG, X.; LIU, J.; ZHU, W.; ATZBERGER, C.; LIU, Q. The optimal threshold and vegetation index time series for retrieving crop phenology based on a modified dynamic threshold method. **Remote Sensing**, v. 11, p. 2725, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11232725>.

HUYNH, H. T.; HUFNAGEL, J.; WURBS, A.; BELLINGRATH-KIMURA, S. D. Influences of soil tillage, irrigation and crop rotation on maize biomass yield in a 9-year field study in Müncheberg, Germany. **Field Crops Research**, v. 241, p. 107565, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107565>.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v. 24, p. 45-55, 1981. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7).

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 163, p. 104860, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860>.

IPAD – International Production Assessment Division. 2024. Disponível em: [https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2222000&sel\\_year=2023&rankby=Exports](https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2222000&sel_year=2023&rankby=Exports). Acesso em: junho 20, 2024.

IQBAL, N.; HUSSAIN, S.; RAZA, M. A.; YANG, C.-Q.; SAFDAR, M. E.; BRESTIC, M.; AZIZ, A.; HAYYAT, M. S.; ASGHAR, M. A.; WANG, X. C.; ZHANG, J.; YANG, W.; LIU, J. Drought tolerance of soybean (*Glycine max* L. Merr.) by improved photosynthetic characteristics and an efficient antioxidant enzyme activities under a split-root system. **Frontiers in Physiology**, v. 10, 2019 Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00786>.

ISMANOV, M.; FRANCIS, P.; HENRY, C.; ESPINOZA, L. Relations among sap flow, soil moisture, weather, and soybean plant parameters in high water demand and final growth stages. **Agricultural Sciences**, v. 10, p. 371–385, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/as.2019.103030>.

JAFARI, M.; KESHAVARZ, A. Improving CERES-Wheat yield forecasts by assimilating dynamic landsat-based leaf area index: A case study in Iran. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 50, n. 2, p. 285-298, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01359-w>.

JAMSHIDI, S.; ZAND-PARSA, S.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.; SHAHSAVAR, A. R.; NIYOGI, D. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 227, p. 105838, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105838>.

JAYBHAY, S. A.; VARGHESE, P.; TAWARE, S. P.; IDHOL, B. D.; WAGHMARE, B. N.; SALUNKHE, D. H. Response of Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] to Irrigation at Different Growth Stages. **Agricultural Science Digest**, v. 39, p. 132–135, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.18805/ag.D-4932>.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>.

JOHANSEN, K.; MORTON, M. J. L.; MALBETEAU, Y. M.; ARAGON, B.; AL-MASH-HARAWI, S. K.; ZILIANI, M. G.; ANGEL, Y.; FIENE, G. M.; NEGRÃO, S. S. C.; MOUSA, M. A. A.; TESTER, M. A.; MCCABE, M. F. Unmanned aerial vehicle-based phenotyping using morphometric and spectral analysis can quantify responses of wild tomato plants to salinity stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 370, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00370>>.

JUMRANI, K.; BHATIA, V. S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, p. 37–50, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12298-017-0480-5>>.

KING, B. A.; SHELLIE, K. C.; TARKALSON, D. D.; LEVIN, A. D.; SHARMA, V.; BJORNEBERG, D. L. Data-driven models for canopy temperature-based irrigation scheduling. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 5, p. 1579-1592, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.13031/trans.13901>>.

KIRNAK, H.; IRIK, H. A.; UNLUKARA, A. Potential use of crop water stress index (CWSI) in irrigation scheduling of drip-irrigated seed pumpkin plants with different irrigation levels. **Scientia Horticulturae**, v. 256, p. 108608, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108608>>.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Mexico, DF: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478p.

KULLBERG, E. G.; DEJONGE, K. C.; CHÁVEZ, J. L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 64-73, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.007>>.

KUMAR, N.; ADELOYE, A. J.; SHANKAR, V.; RUSTUM, R. Neural computing modeling of the crop water stress index. **Agricultural Water Management**, v. 239, p. 106259, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106259>>.

KUMAR, N.; RUSTUM, R.; SHANKAR, V.; ADELOYE, A. J. Self-organizing map estimator for the crop water stress index. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 187, p. 106232, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106232>>.

KUME, A. Importance of the green color, absorption gradient, and spectral absorption of chloroplasts for the radiative energy balance of leaves. **Journal of Plant Research**, v. 130, p. 501-514, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10265-017-0910-z>>.

LAMPTEY, S.; LI, L. L.; XIE, J. H.; COULTER, J. A. Tillage system affects soil water and photosynthesis of plastic-mulched maize on the semiarid Loess Plateau of China. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104479, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104479>>.

LENA, B. P.; ORTIZ, B. V.; JIMÉNEZ-LÓPE, A. F.; SANZ-SÁEZ, Á.; O'SHAUGHNESSY, S. A.; DURSTOCK, M. K.; PATE, G. Evaluation of infrared canopy temperature data in relation to soil water-based irrigation scheduling in a humid subtropical climate. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 5, p. 1217-1231, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.13031/trans.13912>>.

LI, Z.; LIU, H.; ZHAO, W.; YANG, Q.; YANG, R.; LIU, J. Quantification of soil water balance components based on continuous soil moisture measurement and the Richards equation in an irrigated agricultural field of a desert oasis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 11, p. 4685-4706, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-23-4685-2019>>.

LIU, M.; WU, X.; YANG, H. Evapotranspiration characteristics and soil water balance of alfalfa grasslands under regulated deficit irrigation in the inland arid area of Midwestern China. **Agricultural Water Management**, v. 260, p. 107316, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107316>>.

LIU, Y.; FENG, H.; YUE, J.; FAN, Y.; JIN, X.; SONG, X.; YANG, G. Estimation of potato above-ground biomass based on vegetation indices and green-edge parameters obtained from UAVs. **Remote Sensing**, v. 14, n. 21, p. 5323, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs14215323>>.

LOPES, J. D.; RODRIGUES, L. N.; IMBUZEIRO, H. M. A.; PRUSKI, F. F. Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 18, p. 6930-6947, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1597304>>.

MA, B. L.; DWYER, L. M.; COSTA, C.; COBER, E. R.; MORRISON, M. J. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 6, p. 1227-1234, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.2134/agronj2001.1227>>.

MAGALHÃES, I. B.; PEREIRA, A. S. A. de; CALIJURI, M. L.; ALVES, S. do C.; SANTOS, V. J. dos; LORENTZ, J. F. Brazilian Cerrado and Soy moratorium: Effects on biome preservation and consequences on grain production. **Land Use Policy**, v. 99, p. 105030, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105030>>.

MAGNEY, T. S.; VIERLING, L. A.; EITEL, J. U.; HUGGINS, D. R.; GARRITY, S. R. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to environmental conditions in wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 173, p. 84-97, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.013>>.

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Brasília: **MDIC**, 2023. Disponível em: <[https://balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes\\_dados\\_consolidados/pg.html#produtos](https://balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes_dados_consolidados/pg.html#produtos)>. Acesso em: jul. 2024.

MEEKS, C. D.; SNIDER, J. L.; BABB-HARTMAN, M. E.; BARNES, T. L. Evaluating the Mechanisms of Photosynthetic Inhibition under Growth-Limiting, Early-Season Water Deficit Stress in Cotton. **Crop Science**, v. 59, n. 3, p. 1144-1154, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.2135/cropsci2018.07.0432>>.

MEMON, S. A.; SHEIKH, I. A.; TALPUR, M. A.; MANGRIO, M. A. Impact of deficit irrigation strategies on winter wheat in semi-arid climate of Sindh. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106389, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106389>>.

MEZA, K.; TORRES-RUA, A. F.; HIPPS, L.; KUSTAS, W. P.; GAO, R.; CHRISTIANSEN, L.; GOWING, I. Spatial estimation of actual evapotranspiration over irrigated turfgrass using sUAS thermal and multispectral imagery and TSEB model. **Irrigation Science**, p. 1-24, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00271-023-00899-y>>.

MICASENSE. **How to process MicaSense sensor data in Pix4D**. 2020. Disponível em: <<https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/115000831714-How-to-Process-MicaSense-Sensor-Data-in-Pix4D>>. Acesso em: julho 17, 2022.

MOKARI, E.; SAMANI, Z.; HEEREMA, R.; DEHGHAN-NIRI, E.; DUBOIS, D.; WARD, F.; PIERCE, C. Development of a new UAV-thermal imaging based model for estimating pecan evapotranspiration. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 194, p. 106752, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106752>>.

MOORE, C. E.; MEACHAM-HENSOLD, K.; LEMONNIER, P.; SLATTERY, R. A.; BENJAMIN, C.; BERNACCHI, C. J.; et al. The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, p. 2822–2844, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erab090>>.

MORALES-SANTOS, A.; GARCÍA-VILA, M.; NOLZ, R. Assessment of the impact of irrigation management on soybean yield and water productivity in a subhumid environment. **Agricultural Water Management**, v. 284, p. 108356, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108356>>.

MWINUKA, P. R.; MBILINYI, B. P.; MBUNGU, W. B.; MOURICE, S. K.; MAHOO, H. F.; SCHMITTER, P. The feasibility of hand-held thermal and UAV-based multispectral imaging for canopy water status assessment and yield prediction of irrigated African eggplant (*Solanum aethiopicum* L.). **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106584, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106584>>.

NIU, Y.; ZHANG, H.; HAN, W.; ZHANG, L.; CHEN, H. A fixed-threshold method for estimating fractional vegetation cover of maize under different levels of water stress. **Remote Sensing**, v. 13, n. 5, p. 1009, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs13051009>>.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 77, n. 3-4, p. 263-293, 1995. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)>.

NOURAKI, A.; AKHAVAN, S.; REZAEI, Y.; FUENTES, S. Assessment of sunflower water stress using infrared thermometry and computer vision analysis. **Water Supply**, v. 21, p. 1228-1242, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/ws.2020.382>>.

ORTA, A.H.; KUYUMCU, S. Evapotranspiration and the response of cool-season and warm-season turfgrass species to deficit irrigation under a sprinkler irrigation method. **Irrigation Science**, v. 41, p. 81-91, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00271-022-00833-8>>.

PAULA, A. C. P. D.; SILVA, C. L.; RODRIGUES, L. N.; SCHERER-WARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, p. 1-11, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00739>>.

PEDDINTI, S. R.; KISEKKA, I. Estimation of Turbulent Fluxes over Almond Orchards Using High-Resolution Aerial Imagery with One and Two-Source Energy Balance Models. **Agricultural Water Management**, v. 269, p. 107671, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107671>>.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>>.

PINNAMANENI, S. R.; ANAPALLI, S. S.; BELLALLOUI, N.; REDDY, K. N. Effects of irrigation and planting geometry on soybean (*Glycine max* L.) seed nutrition in humid climates. **International Journal of Agronomy**, p. 9, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2021/6625919>>.

PIÑÓN-VILLARREAL, A. R.; SAMANI, Z. A.; BAWAZIR, A. S.; BLEIWEISS, M. P. Correcting the edge effect for sensor spatial response in evapotranspiration estimation through

remote sensing. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 7, p. 06020004, 2020. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001480](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001480)>.

PIPATSITEE, P.; TISARUM, R.; TAOTA, K.; SAMPHUMPHUANG, T.; EIUMNOH, A.; SINGH, H. P.; CHA-UM, S. Effectiveness of vegetation indices and UAV-multispectral imageries in assessing the response of hybrid maize (*Zea mays* L.) to water deficit stress under field environment. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 1, p. 128, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10661-022-10766-6>>.

PIX4D. Step 4 - Processing. 2020. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-GettingStarted-and-Manual-pdf>>. Acesso em: maio 15, 2022.

PÔÇAS, I.; CALERA, A.; CAMPOS, I.; CUNHA, M. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 106081, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106081>>.

POKHREL, A.; VIRK, S.; SNIDER, J. L.; VELLIDIS, G.; HAND, L. C.; SINTIM, H. Y.; BYERS, C. Estimating yield-contributing physiological parameters of cotton using UAV-based imagery. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1248152, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1248152>>.

POUDEL, S.; VENNAM, R. R.; SHRESTHA, A.; REDDY, K. R.; WIJEWARDANE, N. K.; REDDY, K. N.; BHEEMANAHALLI, R. Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 1277, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-023-28354-0>>.

QIAO, L.; ZHAO, R.; TANG, W.; AN, L.; SUN, H.; LI, M.; LIU, G. Estimating maize LAI by exploring deep features of vegetation index map from UAV multispectral images. **Field Crops Research**, v. 289, p. 108739, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108739>>.

QIN, A.; NING, D.; LIU, Z.; LI, S.; ZHAO, B.; DUAN, A. Determining threshold values for a crop water stress index-based center pivot irrigation with optimum grain yield. **Agriculture**, v. 11, p. 958, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agriculture11100958>>.

QIU, R. C.; WEI, S.; ZHANG, M.; SUN, H.; LI, H.; LIU, G.; LI, M. Sensors for measuring plant phenotyping: A review. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, p. 1–17, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.2696>>.

RAMÍREZ-CUESTA, J. M.; ORTUÑO, M. F.; GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P. J.; PARRA, M.; RUBIO-ASENSIO, J. S.; INTRIGLIOLO, D. S. Assessment of peach trees water status and leaf gas exchange using on-the-ground versus airborne-based thermal imagery. **Agricultural Water Management**, v. 267, p. 107628, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107628>>.

RAPER, T. B.; VARCO, J. J. Canopy-scale wavelength and vegetative index sensitivities to cotton growth parameters and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 16, p. 62-76, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-014-9383-4>>.

RAUSCH, L. L.; GIBBS, H. K.; SCHELLY, I.; BRANDÃO JR, A.; MORTON, D. C.; CARNEIRO FILHO, A.; STRASSBURG, B.; WALKER, N.; NOOJIPADY, P.; BARRETO, P.; MEYER, D. Soy expansion in Brazil's Cerrado. **Conservation Letters**, v. 12, n. 6, p. e12671, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/conl.12671>>.

RAZA, M. A.; GUL, H.; YANG, F.; AHMED, M.; YANG, W. Growth rate, dry matter accumulation, and partitioning in soybean (*Glycine max* L.) in response to defoliation under high-

rainfall conditions. **Plants**, v. 10, n. 8, p. 1497, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/plants10081497>>.

ROMA, E.; CATANIA, P. Precision oliviculture: research topics, challenges, and opportunities—a review. **Remote Sensing**, v. 14, n. 7, p. 1668, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs14071668>>.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)>.

ROUJEAU, J. L.; BREON, F. M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 375-384, 1995. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)>.

ROUSE, J. W. J.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Special Publication**, p. 351, 1974. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>>.

RU, C.; HU, X.; WANG, W.; RAN, H.; SONG, T.; GUO, Y. Evaluation of the Crop Water Stress Index as an Indicator for the Diagnosis of Grapevine Water Deficiency in Greenhouses. **Horticulturae**, v. 6, p. 86, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/horticulturae6040086>>.

SAGAN, V.; MAIMAITIJIANG, M.; SIDIKE, P.; MAIMAITIYIMING, M.; ERKBOL, H.; HARTLING, S.; PETERSON, K. T.; PETERSON, J.; BURKEN, J.; FRITSCHI, F. UAV/satellite multiscale data fusion for crop monitoring and early stress detection. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives)**, v. 42, n. 2/W13, p. 715-722, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-715-2019>>.

SAH, R. P.; CHAKRABORTY, M.; PRASAD, K.; PANDIT, M.; TUDU, V. K.; CHAKRAVARTY, M. K.; NARAYAN, S. C.; RANA, M.; MOHARANA, D. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 2944, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>>.

SAKAMOTO, T. Incorporating environmental variables into a MODIS-based crop yield estimation method for United States corn and soybeans through the use of a random forest regression algorithm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 160, p. 208–228, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.12.012>>.

SAKODA, K.; TANIYOSHI, K.; YAMORI, W.; TANAKA, Y. Drought stress reduces crop carbon gain due to delayed photosynthetic induction under fluctuating light conditions. **Physiologia Plantarum**, p. e13603, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ppl.13603>>.

SALEEM, A.; APER, J.; MUYLLE, H.; BORRA-SERRANO, I.; QUATAERT, P.; LOOTENS, P.; et al. Response of a diverse European soybean collection to “Short duration” and “Long duration” drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 818766, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.818766>>.

SANDHU, R.; IRMAK, S. Effects of subsurface drip-irrigated soybean seeding rates on grain yield, evapotranspiration and water productivity under limited and full irrigation and rainfed conditions. **Agricultural Water Management**, v. 267, p. 107614, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107614>>.

SAPKOTA, S.; PAUDYAL, D. R. Growth monitoring and yield estimation of maize plant using unmanned aerial vehicle (UAV) in a hilly region. **Sensors**, v. 23, n. 12, p. 5432, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s23125432>>.

SENAY, G. B. Satellite psychrometric formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model for quantifying and mapping evapotranspiration. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 34, p. 555-566, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.13031/aea.12614>>.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/jawr.12057>>.

SENAY, G. B.; BUDDE, M. E.; VERDIN, J. P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) Approach for Estimating Landscape ET: Validation with the METRIC Model. **Agricultural Water Management**, v. 9, p. 606-618, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.014>>.

SENAY, G. B.; FRIEDRICHS, M.; MORTON, C.; PARRISH, G. E. L.; SCHAUER, M.; KHAND, K.; KAGONE, S.; BOIKO, O.; HUNTINGTON, J. Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model. **Remote Sensing of Environment**, v. 275, p. 113011, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113011>>.

SENAY, G. B.; FRIEDRICHS, M.; SINGH, R. K.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 171-185, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.043>>.

SENAY, G. B.; GOWDA, P. H.; BOHMS, S.; HOWELL, T. A.; FRIEDRICHS, M.; MAREK, T. H.; VERDIN, J. P. Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with Landsat data using lysimetric observations in the semi-arid Texas High Plains. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 11, n. 1, p. 723-756, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hessd-11-723-2014>>.

SENAY, G. B.; SCHAUER, M.; FRIEDRICHS, M.; VELPURI, N. M.; SINGH, R. K. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984-2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 98-112, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.005>>.

SERNA, L. Maize stomatal responses against the climate change. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 952146, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.952146>>.

SHRESTHA, A.; BHEEMANAHALLI, R.; ADELI, A.; SAMIAPPAN, S.; CZARNECKI, J. M. P.; MCCRANE, C. D.; MOORHEAD, R. Phenological stage and vegetation index for predicting corn yield under rainfed environments. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1168732, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1168732>>.

SIDIKE, P.; SAGAN, V.; QUMSIYEH, M.; MAIMAITIJIANG, M.; ESSA, A.; ASARI, V. Adaptive trigonometric transformation function with image contrast and color enhancement: application to unmanned aerial system imagery. **Geoscience and Remote Sensing Letters (IEEE)**, v. 15, n. 3, p. 404-408, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2790899>>.

SIJPESTIJN, G.F.; WEZEL, A.; CHRIKI, S. Can agroecology help in meeting our 2050 protein requirements? **Livestock Science**, v. 256, p. 104822, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104822>>.

SILVA JUNIOR, C. A.; NANNI, M. R.; SHAKIR, M.; TEODORO, P. E.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; CEZAR, E.; SHIRATSUCHI, L. S. Soybean varieties discrimination using nonimaging hyperspectral sensor. **Infrared Physics & Technology**, v. 89, p. 338–350, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.027>>.

SILVA, A. do N.; RAMOS, M. L. G.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; SILVA, P. C. da; SOARES, G. F.; CASARI, R. A. das C. N.; SOUSA, C. A. F. de; LIMA, C. A. de; SANTANA, C. C.; SILVA, A. M. M.; VINSON, C. C. Use of thermography to evaluate alternative crops for off-season in the cerrado region. **Plants**, v. 12, n. 11, p. 2081, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/plants12112081>>.

SILVA, C. D. O. F.; MANZIONE, R. L.; CALDAS, M. M. Net water flux and land use shifts across the Brazilian Cerrado between 2000 and 2019. **Regional Environmental Change**, v. 23, n. 4, p. 151, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10113-023-02127-x>>.

SILVA, F. A. M. da.; EVANGELISTA, B. A.; MALAQUIAS, J. V.; OLIVEIRA, A. D. de.; MULLER, A. G. **Análise temporal de variáveis climáticas monitoradas entre 1974 a 2013 na Estação Principal da Embrapa Cerrados. Planaltina, DF.** Embrapa Cerrados, 2017. 121p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 340).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação.** Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2004. 416 p.

SRIPADA, R. P.; HEINIGER, R. W.; WHITE, J. G.; MEIJER, A. D. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 968-977, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.2134/agronj2005.0200>>.

STANIAK, M.; SZPUNAR-KROK, E.; KOCIRA, A. Responses of soybean to selected abiotic stresses—Photoperiod, temperature and water. **Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 146, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agriculture13010146>>.

SUMNER, Z.; VARCO, J. J.; DHILLON, J. S.; FOX, A. A. A.; CZARNECKI, J.; HENRY, W. B. Ground versus aerial canopy reflectance of corn: Red-edge and non-red edge vegetation indices. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 2782-2797, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/agj2.20657>>.

TAGLIAPIETRA, E. L.; ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; et al. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 1–13, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/agj2.20586>>.

TAHERI, M.; MOHAMMADIAN, A.; GANJI, F.; BIGDELI, M.; NASSERI, M. Energy-based approaches in estimating actual evapotranspiration focusing on land surface temperature: A review of methods, concepts, and challenges. **Energies**, v. 15, n. 4, p. 1264, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15041264>>.

TONG, X.; DUAN, L.; LIU, T.; YANG, Z.; WANG, Y.; SINGH, V. P. Estimation of grassland aboveground biomass combining optimal derivative and raw reflectance vegetation indices at peak productive growth stage. **Geocarto International**, v. 38, n. 1, p. 2186497, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2186497>>.

TROUT, T. J.; DEJONGE, K. C. Evapotranspiration and water stress coefficient for deficit-irrigated maize. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 147, n. 10, p. 04021044, 2021. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001600](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001600)>.

UMBURANAS, R. C.; KAWAKAMI, J.; AINSWORTH, E. A.; FAVARIN, J. L.; ANDERLE, L. Z.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDT, K. Changes in soybean cultivars released over the past 50 years in southern Brazil. **Scientific Reports**, v. 12, n. 508, p. 1–14, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-04043-8>>.

USAMENTIAGA, R.; VENEGAS, P.; GUEREDIAGA, J.; VEGA, L.; MOLLEDA, J.; BULNES, F. G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. **Sensors**, v. 14, n. 7, p. 12305-12348, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s140712305>>.

VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F. da; SANTOS, R. A. dos; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, E. C. Mapping within field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. **Plos One**, v. 15, n. 7, p. e0235620, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235620>>.

VEYSI, S.; NASERI, A. A.; HAMZEH, S.; BARTHOLOMEUS, H. A satellite-based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 70-86, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.016>>.

WAN, L.; CEN, H.; ZHU, J.; ZHANG, J.; ZHU, Y.; SUN, D.; DU, X.; ZHAI, L.; WENG, H.; LI, Y.; LI, X.; BAO, Y.; SHOU, J.; HE, Y. Grain yield prediction of rice using multi-temporal UAV-based RGB and multispectral images and model transfer—a case study of small farmlands in the South of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 291, p. 108096, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108096>>.

WANG, T.; LIU, Y.; WANG, M.; FAN, Q.; TIAN, H.; QIAO, X.; et al. Applications of UAS in crop biomass monitoring: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1-16, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616689>>.

WANG, W.; WANG, C.; PAN, D.; ZHANG, Y.; LUO, B.; JI, J. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence images of soybean (*Glycine max*) seedlings. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, p. 196–201, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3390>>.

WANG, X.; CAI, H.; LI, L.; WANG, X. Estimating soil water content and evapotranspiration of winter wheat under deficit irrigation based on SWAP model. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9451, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su12229451>>.

WANG, X.; WU, Z.; ZHOU, Q.; WANG, X.; SONG, S.; DONG, S. Physiological response of soybean plants to water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 809692, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.809692>>.

WANG, X.; YAN, S.; WANG, W.; LIUBING, Y.; LI, M.; YU, Z.; HOU, F. Monitoring leaf area index of the sown mixture pasture through UAV multispectral image and texture characteristics. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 214, p. 108333, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108333>>.

WANG, X.; ZHAO, C.; GUO, N.; LI, Y.; JIAN, S.; YU, K. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in loess plateau semiarid regions.

**Spectroscopy Letters**, v. 48, p. 492–498, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00387010.2014.909495>>.

WEI, Y. Q.; JIN, J. L.; JIANG, S. M.; NING, S. W.; LIU, L. Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei Plain, China. **Agronomy**, v. 8, p. 97, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy8070097>>.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–317, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>>.

WIJEWARDANA, C.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, L. J.; GOLDEN, B.; HENRY, W. B.; REDDY, K. R. Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **Journal of Plant Interactions**, v. 14, n. 1, p. 533–543, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1662499>>.

XUE, H.; XU, X.; ZHU, Q.; MENG, Y.; LONG, H.; LI, H.; JIANG, X. Rice yield and quality estimation coupling hierarchical linear model with remote sensing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 218, p. 108731, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108731>>.

YANG, L.; DENG, S.; ZHANG, Z. New spectral model for estimating leaf area index based on gene expression programming. **Computers & Electrical Engineering**, v. 83, p. 106604, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106604>>.

YETIK, A.K.; CANDOĞAN, B.N. Chlorophyll response to water stress and the potential of using crop water stress index in sugar beet farming. **Sugar Tech**, v. 25, n. 1, p. 57–68, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12355-022-01184-6>>.

YIN, L.; WANG, X.; FENG, X.; FU, B.; CHEN, Y. A comparison of SSEBop-Model-Based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River Basin, China. **Remote Sensing**, v. 12, p. 2528, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs12162528>>.

ZHANG, F.; ZHOU, G. Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: A comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize. **BMC Ecology**, v. 19, p. 1–12, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s12898-019-0233-0>>.

ZHANG, J.; GUAN, K.; PENG, B.; PAN, M.; ZHOU, W.; JIANG, C.; KIMM, H.; FRANZ, T. E.; GRANT, R. F.; YANG, Y.; RUDNICK, D. R.; HEEREN, D. M.; SUYKER, A. E.; BAUERLE, W. L.; MINER, G. L. Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. **Nature Communications**, v. 12, p. 5549, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41467-021-25254-7>>.

ZHANG, K. F.; ZHANG, Z.; ZHANG, Y. H.; LI, H. Experimental study of single-rotor UAV on droplet deposition distribution in soybean field. **Applied Ecology & Environmental Research**, v. 17, n. 6, p. 12781–12796, 2019. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1706\\_1383313844](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1706_1383313844)>.

ZHANG, M.; ABRAHAO, G.; COHN, A.; CAMPOLO, J.; THOMPSON, S. A MODIS-based scalable remote sensing method to estimate sowing and harvest dates of soybean crops in Mato Grosso, Brazil. **Heliyon**, v. 7, n. 7, e07500, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07436>>.

ZHOU, H.; ZHOU, G.; SONG, X.; HE, Q. Dynamic characteristics of canopy and vegetation water content during an entire maize growing season in relation to spectral-based indices. **Remote Sensing**, v. 14, n. 3, p. 584, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs14030584>>.

ZHOU, S.; DUURSMA, R. A.; MEDLYN, B. E.; KELLY, J. W. G.; PRENTICE, I. C. How should we model plant responses to drought? An analysis of stomatal and non-stomatal responses to water stress. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182, p. 204-214, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.009>>.