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

O efeito da deficiência hídrica em plantas de soja

Leandro Fellet Lourenço

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2020**

Leandro Fellet Lourenço
Engenheiro Agrônomo

O efeito da deficiência hídrica em plantas de soja

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2020

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

Lourenço, Leandro Fellet

O efeito da deficiência hídrica em plantas de soja / Leandro Fellet Lourenço. -
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - Piracicaba, 2020.

84 p.

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

1. Irrigação 2. *Glycine max* 3. Estresse hídrico 4. Produtividade 5. Lisímetro
inteligente I. Título

DEDICATÓRIA

Para todos os interessados em tornar o agronegócio um sistema racional, visando atender a demanda por alimentos em equilíbrio com a conservação ambiental, como eu. Espero que as ideias aqui expostas ajudem a responder suas perguntas.

AGRADECIMENTOS

Esta tese de Doutorado teve a colaboração de muitas pessoas e a para não cometer injustiças, prefiro expressar minha satisfação com as instituições que me ajudaram na elaboração deste projeto.

A única exceção é em especial para meu orientador **Durval Dourado Neto**, pelos ensinamentos, conselhos, amizade e principalmente pela confiança em mim depositada.

Agradeço à **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, que me acolheu em 1997 dando a oportunidade de me tornar Engenheiro Agrônomo e após 23 anos ao **Curso de Pós-graduação em Fitotecnia do Departamento de Produção Vegetal** pela oportunidade de realização do Curso de Doutorado.

Ao **Laboratório Multiusuários em Produção Vegetal**, por todo o apoio e pelas amizades.

À **República Pau-a-Pique**, pelas amizades, acolhimento e por se tornar minha segunda casa.

Meu agradecimento especial à **ESALQTec**, pela oportunidade de aplicar os conhecimentos aqui desenvolvidos.

E à minha família, pelo apoio incondicional.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	13
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Importância econômica.....	21
2.2. Produção de soja no Brasil e no mundo.....	21
2.3. Sistema radicular.....	22
2.4. A importância da água na produção de soja	22
2.5. Melhoramento genético	24
2.6. Ambientes de produção	25
2.7. Deficiência hídrica	27
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1. Experimentos.....	31
3.2. Localização da área experimental	31
3.3. Clima	32
3.4. Espécie e cultivar	32
3.5. Época de semeadura.....	32
3.6. Parcela experimental.....	32
3.7. Descrição dos tratamentos	32
3.8. Observações experimentais efetuadas.....	34
3.9. Casa-de-vegetação e bancadas.....	35
3.10. Condução do experimento	35
3.11. Sistema automático de irrigação.....	36
3.12. Evapotranspiração potencial da cultura.....	36
3.13. Controle do teor de água no solo.....	37
3.14. Solos.....	38
3.15. Produtividade.....	39
3.16. Análise estatística	39
3.17. Determinação da área foliar	40
3.18. Dados meteorológicos	40

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Solos.....	43
4.2. Uniformidade de distribuição da água aplicada pelo sistema de irrigação.....	44
4.3. Evolução do desenvolvimento das plantas de soja durante o período experimental	45
4.4. Dados climáticos ao longo do período experimental	48
4.5. Área foliar	51
4.6. Evapotranspiração, deficiência hídrica e produtividade de grãos.....	52
4.7. Componentes de produção e produtividade.....	59
4.8. Correlação entre a evapotranspiração e a produtividade de soja em diferentes condições edafoclimáticas	66
4.9 Condicionamento climático da produtividade de soja	68
4.10. Caracterização do consumo de água ao longo do dia em soja.....	71
4.11. Considerações finais	77
5. CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS.....	81

RESUMO

O efeito da deficiência hídrica em plantas de soja

A soja se tornou a principal cultura do agronegócio brasileiro em função das adequações agronômicas realizadas nos últimos anos, contribuindo significativamente para o aumento na produtividade. Porém, tem seu desempenho relacionado às condições abióticas, e quando submetida a influência da deficiência hídrica (DH) tem seu potencial prejudicado. Quando ocorre em escala regional nos principais estados produtores, impacta de forma significativa no preço desta *commodity* em nível mundial. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da deficiência hídrica na cultura de soja, através da indução da DH ao longo dos seguintes períodos: (i) entre os estádios fenológicos V_3 e V_8 (fase vegetativa), (ii) entre os estádios fenológicos R_1 e R_3 (florescimento e início da formação de vagens - fase reprodutiva) e (iii) entre os estádios fenológicos R_4 e R_8 (formação de vagens e enchimento de grãos - fase reprodutiva). Os experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação no Departamento de Produção Vegetal na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” em Piracicaba - SP, Brasil. A soja de ciclo precoce foi semeada em vasos e a disponibilidade hídrica foi controlada através de micro lisímetro inteligente, que enviava dados em tempo real da evapotranspiração da cultura (ET_c) e controlava de forma autônoma o sistema de irrigação, responsável pela aplicação dos seguintes tratamentos de DH: 100, 75, 50 e 25% de reposição da ET_c . Em função dos resultados obtidos, conclui-se que: a produção de soja tem forte correlação com a DH, a medida que a DH aumenta, a produtividade da cultura foi reduzida independente da época que ocorreu: estágio vegetativo (V_3 a V_8), a redução de produção é de: 26, 55 e 82%, no estágio reprodutivo (R_1 a R_3) em 30, 63 e 85% e no estágio de enchimento de grãos (R_4 a R_8) 17, 39 e 60% em relação a testemunha, quando a DH foi de 25, 50 e 75% da ET_c . Estes resultados evidenciaram a importância de quando a DH ocorre no estágio fenológico vegetativo (V_3 a V_8) em variedade precoce de soja, representando importância similar ao estágio reprodutivo (R_1 a R_3), observação esta que se destacou em relação aos trabalhos encontrados. O estágio fenológico de enchimento de grãos (R_4 a R_8), tem menor peso na contribuição da produtividade final, porém neste trabalho não foi avaliado a influência da DH na qualidade de sementes, objetivo este que poderia ser avaliado em trabalhos futuros. A maior parte da evapotranspiração da planta (57%) foi durante o período da manhã, antes dos horários mais quentes do dia e, entre as 10:00 e 11:00 h, foi observado um pico na evapotranspiração. A eficiência do uso de água (EUA) quando ocorreu DH, foi menor, conforme observado a EUA foi de 630, 830, 1.260 e 2.340 L kg⁻¹, respectivamente nos tratamentos 100, 75, 50 e 25% da reposição da ET_c , evidenciando que o efeito agrônomo da produção agrícola em soja precoce de alta produtividade, quando a água se torna limitante é o principal agente que influencia a produção, indicando que a utilização da irrigação com fornecimento complementar de água, pode ser uma ferramenta eficaz para potencializar o desempenho da cultura, minimizando a influência do clima no preço da *commodity*.

Palavras-chave: Irrigação, *Glycine max*, Estresse hídrico, Produtividade, Lisímetro inteligente

ABSTRACT

The effect of water deficit on the soybean plants

Soybean has become the main crop in Brazilian agribusiness due to the agronomic adjustments made in recent years, contributing significantly to the increase in productivity. However, its performance is related to abiotic conditions, and when subjected to the influence of water deficit (WD), its potential is impaired. When it occurs on a regional scale in the main producing states, it has a significant impact on the price of this commodity worldwide. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of water difficulties on soybean crops, through the induction of WD along the following period: from V_3 to V_8 (vegetative phase), from R_1 to R_3 (flowering and initial period of pods development - reproductive phase) and from R_4 to R_8 (pods development and filling of grains period - reproductive phase). The experiments were conducted in a greenhouse at the Crop Science Department at Luiz de Queiroz College of Agriculture in Piracicaba, São Paulo state, Brazil. The early cycle soybean was sown in pots and water availability was controlled using an intelligent micro lysimeter, which sent real-time data on crop evapotranspiration (ETc) and autonomously controlled the irrigation system, responsible for applying the following treatments of WD: 100, 75, 50 and 25% replacement of ETc. In function of the obtained results, it is concluded that: the soybean production has strong correlation with the WD, as the WD increases, the productivity of the culture was reduced regardless of the time that occurred: vegetative stage (V_3 to V_8), the production reduction is: 26, 55 and 82%, in the reproductive stage (R_1 to R_3) in 30, 63 and 85% and in the grain filling stage (R_4 to R_8) 17, 39 and 60% in relation to the witness, when the WD was 25, 50 and 75% of the ETc. These results showed the importance of when WD occurs in the vegetative phenological stage (V_3 to V_8) in an early soybean variety, representing similar importance to the reproductive stage (R_1 to R_3), an observation that stood out in relation to the studies found. The phenological stage of grain filling (R_4 to R_8), has less weight in the contribution of the final productivity, however in this work the influence of WD on the seed quality was not evaluated, an objective that could be evaluated in future works. Most of the plant's evapotranspiration (57%) was during the morning, before the hottest times of the day and, between 10:00 and 11:00 h (a.m.), a peak in evapotranspiration was observed. The water use efficiency (WUE) when WD occurred, was lower, as observed in the WUE was 630, 830, 1260 and 2340 L kg⁻¹, respectively in treatments 100, 75, 50 and 25% of ETc replacement, showing that the agronomic effect of agricultural production on high-yielding early soybean, when water becomes limiting is the main agent that influences production, indicating that the use of irrigation with complementary water supply, can be an effective tool to enhance the performance of the crop, minimizing the influence of the climate on the price of the commodity.

Keywords: Irrigation, *Glycine max*, Water stress, Productivity, Smart lysimeter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de soja no Brasil nas safras 2010/2011 (ano típico) (A) e 2012/2013 (ano influenciado pela La Niña) (B) (BATTISTI, 2016).....	27
Figura 2 - Localização da área experimental. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.....	31
Figura 3 - Fases da cultura de soja que foram aplicados os tratamentos de irrigação com duração de 25 dias: (Período 1) V ₃ a V ₈ - terceiro nó ao sexto nó (fase vegetativa), (Período 2) R ₁ a R ₃ - início do florescimento à formação de vagens e (Período 3) R ₄ a R ₈ - enchimento de grãos à maturação. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.	33
Figura 4 - Croqui da casa-de-vegetação e bancadas. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.....	35
Figura 5 - Esquema de funcionamento do sistema de irrigação. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.....	36
Figura 6 - Curva de retenção de água do solo. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.....	44
Figura 7 - Avaliação da uniformidade de distribuição da água aplicada pelo sistema de irrigação. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.....	44
Figura 8 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) durante o período experimental. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.....	45
Figura 9 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) com deficiência hídrica durante o período experimental. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.....	46
Figura 10 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) durante no estágio fenológico V ₃ . Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.....	47

Figura 11 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) durante no estágio fenológico R₁. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 48

Figura 12 - Dados climáticos coletados por estação meteorológica automática durante o período experimental: temperatura média do ar (T, °C) [A] e umidade relativa do ar (UR, %) [B]. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 49

Figura 13 - Dados climáticos coletados por estação meteorológica automática durante o período experimental: radiação global (Q_g, W m⁻²) [A] e precipitação coletados fora da casa-de-vegetação (P, mm) [B]. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 50

Figura 14 - Evolução da área foliar (A_F, cm² planta⁻¹) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) submetidas a tratamentos de DH: (A) reposição de 100% da ET_c, (B) reposição de 75% da ET_c, (C) reposição de 50% da ET_c, e (D) reposição de 25% da ET_c no período entre os estádios fenológicos V₃ e V₈. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 52

Figura 15 - Evapotranspiração de referência calculada pelo método Penman-Monteith (ET_o, mm dia⁻¹), evapotranspiração real (ET_r, mm dia⁻¹) e coeficiente de cultura (K_c, adimensional) ao longo do ciclo de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 53

Figura 16 - Evapotranspiração real (ET_r, mL vaso⁻¹) da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função do número de dias após a semeadura (DAS) (A) estresse hídrico em V₃, (B) estresse hídrico em R₁ e (C) estresse hídrico no estágio fenológico R₃. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 55

Figura 17 - Produtividade de grãos (P_G, g planta⁻¹) de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da evapotranspiração real (ET_r, mL planta⁻¹). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1. 57

Figura 18 - Produtividade relativa de grãos (P_R, %) de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da evapotranspiração real relativa (ET_r/ET_c). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1. 57

Figura 19 - Produtividade de grãos (P_G, g planta⁻¹) de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da evapotranspiração real relativa (ET_r ET_c⁻¹, %). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1. 59

Figura 20 - Evapotranspiração real (E_{Tr} , mL vaso⁻¹) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da produtividade de grãos (P_G , g vaso⁻¹). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 59

Figura 21 – Componentes de produção de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função dos estádio fenológicos: (A) massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG} , g planta⁻¹); (B) número de vagens (N_V , vagens planta⁻¹); (C) massa de grãos (M_G , g planta⁻¹); (D) número de grãos (N_G , grãos planta⁻¹); e (E) massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 62

Figura 22 – Modelo quadrático referente à variação dos componentes de produção de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da disponibilidade de água no solo (25, 50, 75 e 100% da E_{Tc}): (A) massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG} , g planta⁻¹); (B) número de vagens (N_V , vagens planta⁻¹); (C) massa de grãos (M_G , g planta⁻¹); (D) número de grãos (N_G , grãos planta⁻¹); e (E) massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 63

Figura 23 - Modelo quadrático referente à variação dos componentes de produção de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da disponibilidade de água no solo (25, 50, 75 e 100% da E_{Tc}): (A) massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG} , g planta⁻¹); (B) número de vagens (N_V , vagens planta⁻¹); (C) massa de grãos (M_G , g planta⁻¹); (D) número de grãos (N_G , grãos planta⁻¹); e (E) massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 2..... 65

Figura 24 - Correlação entre a evapotranspiração real (E_{Tr} , mm) e a produtividade de soja (P , t ha⁻¹) em diferentes condições edafoclimáticas (IRMAK et al., 2014; GAVA, 2014; LOURENÇO, 2020 - Comparação efetuado neste trabalho, SHARDA et al., 2019; ÁVILA, 2016; ADEBOYE, 2013; BATISTA, 2017). 67

Figura 25 - Correlação entre produtividade (P , t ha⁻¹) e evapotranspiração real (E_{Tr} , mm) de plantas de soja em diferentes condições edafoclimáticas (IRMAK et al., 2014; GAVA, 2014; LOURENÇO, 2020 - Comparação efetuado neste trabalho, SHARDA et al., 2019; ÁVILA, 2016; ADEBOYE, 2013; BATISTA, 2017). 67

Figura 26 - Correlação entre a queda relativa de produtividade ($1-PR$ PP⁻¹) e deficiência hídrica relativa de evapotranspiração ($1-E_{Tr}/E_{Tc}$) para plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1. 70

Figura 27 - Valores de evapotranspiração real (E_{Tr} , mm h⁻¹) e evapotranspiração real acumulada (E_{Tr}^* , mm) até à t-ésima hora [i], temperatura do ar (T , °C) e umidade relativa (UR , %) [ii], e radiação global (Q_g , W m⁻²) [iii] durante o dia aos 13 [a], 22 [b] e 60 [c] dias após a semeadura. Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1. 72

Figura 28 - Valores de evapotranspiração real (E_{Tr} , mm h^{-1}) e evapotranspiração real acumulada (E_{Tr}^* , mm) até à t-ésima hora [i], temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (UR , %) [ii], e radiação global (Q_g , W m^{-2}) [iii] durante o dia aos 65 [a], 72 [b] e 82 [c] dias após a semeadura. Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1. 73

Figura 29 - Valores de evapotranspiração real (E_{Tr} , mm h^{-1}) e evapotranspiração real acumulada (E_{Tr}^* , mm) até à t-ésima hora [i], temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (UR , %) [ii], e radiação global (Q_g , W m^{-2}) [iii] durante o dia aos 92 [a], 95 [b] e 109 [c] dias após a semeadura. Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1. 74

Figura 30 - Valores médios de evapotranspiração real relativa (E_{Tr} , %) e de evapotranspiração real relativa acumulada (E_{Tr}^* , %) em função do tempo (t , hora do dia) durante o dia médio do ciclo de plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1. 75

Figura 31 - Valores médios de evapotranspiração real relativa (E_{Tr} , %) e de radiação global (Q_g , W m^{-2}) em função do tempo (t , hora do dia) durante o dia médio do ciclo de plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1. 75

Figura 32 - Evapotranspiração relativa (β , %) em função do número de dias após a semeadura (t , d) das plantas de soja: (β_7) evapotranspiração relativa durante as 3,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 7 horas (das 8 h 30 min às 15 h 30 min), e evapotranspiração relativa mediana e média durante o mesmo período ao longo do ciclo de plantas de Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1. 76

Figura 33 - Evapotranspiração relativa (β , %) em função do número de dias após a semeadura (t , d) das plantas de soja: (β_7) durante as 3,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 7 horas (das 8 h 30 min às 15 h 30 min), (β_5) durante as 2,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 5 horas (das 9 h 30 min às 14 h 30 min) e (β_3) durante as 1,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 3 horas (das 10 h 30 min às 13 h 30 min) ao longo do ciclo de plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1. 76

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Informações de trabalhos científicos relacionando autor, local, unidade experimental (UE) (C - campo, CV - casa-de-vegetação, e CM – cobertura móvel), latitude (Lt), longitude (Lg), altitude (A, m), safra, cultivar, valores mínimos (N) e máximos (X) de evapotranspiração real (ET_r, mm ciclo⁻¹) e produtividade (P, t ha⁻¹) de soja em diferentes condições edafoclimáticas..... 26
- Tabela 2 - Descrição dos tratamentos (T) de irrigação e seus respectivos códigos e significados. 34
- Tabela 3 - Dados obtidos em laboratório para a curva de retenção de água no solo.. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.39
- Tabela 4 - Análise química do solo na camada 0,00 a 0,15 m, discriminado pH (em água), teor de matéria orgânica (MO, g dm⁻³), fósforo (P, mg kg⁻¹), potássio (K, cmol_c kg⁻¹), cálcio (Ca, cmol_c kg⁻¹), magnésio (Mg, cmol_c kg⁻¹), alumínio (Al, cmol_c kg⁻¹), hidrogênio + alumínio (H+Al, cmol_c kg⁻¹), soma de base (SB, cmol_c kg⁻¹) e capacidade de troca catiônica (T, cmol_c kg⁻¹), porcentagem saturação por bases (V, %) e porcentagem saturação por alumínio (m, %).. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2. 43
- Tabela 5 - Análise granulométrica discriminando o teor de areia (Ar, %), silte (St, %) e argila (Ag, %), massa específica (δ , g cm⁻³) e classe textural do solo. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2. 43
- Tabela 6 - Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) ajustados para o solo utilizado: teor de água correspondente à saturação (Θ_s , cm³ cm⁻³), umidade residual (Θ_r , cm³ cm⁻³), α (cm⁻¹), m e n. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2..... 43
- Tabela 7 - Período (estádio fenológico inicial e final de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R²) e parâmetros empíricos (a, b, c, d) correspondentes ao modelo cúbico ($y = a.x^3 + b.x^2 + c.x + d$) referente à variação da área foliar (A_F, cm² planta⁻¹) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 52
- Tabela 8 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação) e subperíodo (estádio fenológico inicial e final) corresponde à quantificação das variáveis. Descrição do controle de água aplicada nos tratamentos de irrigação: reposição de água (R, mL), evapotranspiração real (ET_r, mm), porcentagem do consumo de água (C, %), consumo relativo de água (CR, %), deficiência hídrica ao longo do ciclo (DH, mm) e relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração potencial da cultura (r/c , adimensional) de soja. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 54
- Tabela 9 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação),

tratamento (I), código, evapotranspiração real (ETr, mL planta⁻¹), uso relativo (%), produtividade de grãos (P_G, g planta⁻¹), produtividade relativa de grãos (P_R, %), eficiência de uso de água (EUA, L kg⁻¹), evapotranspiração real relativa (ETr/ETc, mL mL⁻¹) e deficiência hídrica (DH, mL planta⁻¹). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 56

Tabela 10 - Parâmetros empíricos (a, b, [c]) correspondentes ao modelo quadrático ($y = a.x^2 + b.x + c$) e ao modelo linear ($y = a.x + b$) e coeficiente de determinação (R^2) para as regressões entre Produtividade (P) e evapotranspiração real (ETr), produtividade relativa (Pr) e relação ETr/ETc, Produtividade (P) e relação ETr/ETc e eficiência do uso da água (EUA) e relação ETr/ETc. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 58

Tabela 11 - Tratamento (I), período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação) e código. Análise de variância. Soja. Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG}, g planta⁻¹), número de vagens (N_V, vagens planta⁻¹), massa de grãos (M_G, g planta⁻¹), número de grãos (N_G, grãos planta⁻¹) e massa de mil sementes (M₁₀₀₀, g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1..... 60

Tabela 12 - Tratamento (I), período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação) e código. Análise de variância. Soja. Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG}, g planta⁻¹), número de vagens (N_V, vagens planta⁻¹), massa de grãos (M_G, g planta⁻¹), número de grãos (N_G, grãos planta⁻¹) e massa de mil sementes (M₁₀₀₀, g) Safra 2019/2020. Experimento 2. 61

Tabela 13 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R^2) e parâmetros empíricos (a, b, c) correspondentes ao modelo quadrático ($y = a.x^2 + b.x + c$) referente à variação dos componentes de produção (y) de plantas de soja em função da disponibilidade de água no solo (x): Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG}, g planta⁻¹), número de vagens (N_V, vagens planta⁻¹), massa de grãos (M_G, g planta⁻¹), número de grãos (N_G, grãos planta⁻¹), e massa de mil sementes (M₁₀₀₀, g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1. 64

Tabela 14 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R^2) e parâmetros empíricos (a, b, c) correspondentes ao modelo quadrático ($y = a.x^2 + b.x + c$) referente à variação dos componentes de produção (y) de plantas de soja em função da disponibilidade de água no solo (x): Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG}, g planta⁻¹), número de vagens (N_V, vagens planta⁻¹), massa de grãos (M_G, g planta⁻¹), número de grãos (N_G, grãos planta⁻¹), e massa de mil sementes (M₁₀₀₀, g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 2. 66

Tabela 15 - Correlação entre produtividade (P, t ha⁻¹) e evapotranspiração real (ETr, mm) da cultura de soja em diferentes condições edafoclimáticas (IRMAK et al., 2014; GAVA, 2014; LOURENÇO, 2020, SHARDA et al., 2019; ÁVILA, 2016; ADEBOYE, 2013; BATISTA, 2017)..... 68

Tabela 16 - Coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica (k_y) para diferentes fases de desenvolvimento conforme grupos de maturação de soja (BATISTTI, 2013). 69

Tabela 17 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R^2) e parâmetros empíricos (a, b) correspondentes ao modelo linear ($y = a.x + b$) referente à variação da queda relativa de produtividade ($1-PR/PP$) em função da deficiência hídrica relativa de evapotranspiração ($1-E'Tr/ETc$) para plantas de soja. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1. 70

1. INTRODUÇÃO

A soja é uma das principais *commodities* mundiais, pois tem a capacidade de produzir 40% de seu conteúdo em proteína, 30% de carboidrato e 20% de óleo, fazendo parte da constituição de uma grande variedade de alimentos, consumidos diretamente. Faz parte da constituição da ração de engorda de animais a serem consumidos como proteína animal, ou é fonte de energia consumida através do biodiesel.

A origem genética da soja é a China, mas foi agronomicamente adaptada no continente americano, onde é largamente produzida. Brasil, Estados Unidos da América e Argentina são responsáveis por 80% da produção mundial.

Após a tropicalização da soja realizada pela EMBRAPA na década de 1980, tornou-se possível cultivar soja no Brasil em todo seu território, possibilitando nas últimas décadas, que se tornasse uma das grandes responsáveis pelo aproveitamento de áreas inexploradas, principalmente nos Cerrados, contribuindo como a cultura protagonista e responsável pela modernização da agricultura brasileira. Atualmente 5 milhões de produtores brasileiros são responsáveis pela produção de 40% da safra mundial de soja, que alimentam um bilhão e meio de habitantes do planeta, produzem quase 25% do PIB brasileiro e metade das exportações do país.

A tropicalização da soja, vem possibilitando adaptações agrônômicas e evolução na capacidade produtiva, que praticamente dobrou na última década. Porém, nas regiões produtoras na América, o clima é o principal responsável por oscilações na produtividade. Nas safras em que se observa a ocorrência de deficiência hídrica (DH), pode causar redução de até 60% quando comparado com o teto produtivo da cultura.

A evapotranspiração potencial da soja ao longo de seu ciclo para alcançar teto produtivo oscila entre 400 e 600 mm, variando de acordo com o manejo cultural, cultivar e condições climáticas. Embora seja cultivada entre a primavera e o verão, a somatória de chuva durante este período, normalmente é superior as necessidades hídricas. A ocorrência de DH durante alguns dias consecutivos, provoca diminuição da atividade fotossintética, reduzindo a fixação de carbono e a taxa de crescimento da planta, tendo como consequência frustração na colheita.

A produção média brasileira é de 52 sacos por hectare (3.120 kg ha^{-1}), porém com a seleção de um pacote tecnológico bem ajustado, o teto produtivo da soja pode chegar a 100 sacos por hectare (equivalente 6.000 kg ha^{-1}), com a expectativa de ser superada na próxima década, e consequentemente, alguns manejos agrônômicos deverão ser recalibrados para atingir e manter esta produtividade.

A medida que os pacotes tecnológicos vão sendo desenvolvidos, o custo de produção e o valor agregado no cultivo de soja vão estar mais vulneráveis a DH. Desta forma o monitoramento do ambiente correlacionando a interação entre o solo, planta e atmosfera serão necessários para auxiliar o produtor rural na tomada de decisão sobre os ajustes tecnológicos a serem adotado no cultivo, conforme o desempenho das plantas e sua interação com o meio ambiente.

Tradicionalmente a soja nas regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil, o período de plantio mais adequado de semeadura compreende os meses de outubro a novembro, concentrando a colheita entre fevereiro e março. Porém, apesar do risco de antecipar o plantio, a tendência com o advento de variedades de soja precoce ou superprecoce (ciclo de 95 a 105 dias), possibilitou a semeadura de soja logo após o vazio sanitário a partir de 15 de setembro, antecipando também o período de colheita para janeiro, com o objetivo de ser realizado a segunda safra com milho ou algodão. Aproveitando o regime hídrico dos meses de fevereiro a abril, otimizando a área produtiva. Neste caso, a semeadura ocorre no mês de setembro, que historicamente tem grande variação do regime pluviométrico, ocasionando na probabilidade maior de DH logo no início do ciclo.

A utilização de modelos agrometeorológicos para expressar o efeito da produtividade agrícola dá possibilidades aos agricultores realizar simulações de desempenho cultural em função de diversos cenários que poderão ocorrer a medida que as plantas são implantadas no campo, possibilitando a gestão das tecnologias agronômicas disponíveis para ser colhido o melhor resultado possível, desta forma, o ajuste dos modelos matemáticos que representem o efeito entre o ambiente e o desempenho agrícola, agregam valor para dispositivos que colem informações no campo expressarem em tempo real o efeito ambiental no desempenho das plantas, se tornando cada vez mais uma importante ferramenta ao produtor rural na gestão de suas atividades.

Diante do exposto, a hipótese deste trabalho é de que os coeficientes de ajustes dos modelos matemáticos subestimam a influência da DH na fase inicial do cultivo de soja e, a intensidade da evapotranspiração desta cultura é normalmente concentrada nas horas que antecedem o meio dia e, diante do conhecimento destes fatores, novas tecnologias podem ser desenvolvidas, para contribuir para o aumento da produtividade.

Sendo assim, o presente trabalho teve os seguintes objetivos de caracterização: (i) quantificar o efeito da deficiência hídrica na produtividade de plantas de soja nas fases vegetativa e reprodutiva quando a deficiência hídrica relativa foi de 25, 50 e 75% da ET_c (nos tratamentos de 75, 50 e 25% da reposição da ET_c), em relação à testemunha (sem deficiência hídrica - no tratamento de 100% da reposição da ET_c), (ii) quantificar a evapotranspiração real relativa de plantas de soja durante o período de 7 horas (entre 8:30 h e 15:30 h), sem deficiência hídrica, através da utilização de micro lisímetros de pesagem automático e (iii) quantificar a influência da deficiência hídrica na eficiência de uso de água pelas plantas de soja.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância econômica

A soja é uma cultura de grande importância econômica mundial e fonte na alimentação direta ou indireta de milhões de pessoas no planeta Terra. Apesar de sua origem genética ser no nordeste da China, na América esta cultura passou por extensos programas de melhoramento genético, viabilizando a adequação de condições agronômicas ideais para seu cultivo durante o período do verão. Semeada no Hemisfério Norte (Estados Unidos da América) entre os meses de abril a agosto e com colheita concentrada em setembro e outubro. Semeada no Hemisfério Sul (Brasil e Argentina) nos meses de outubro e novembro com colheita concentrada nos meses de fevereiro e março.

O consumo mundial de soja é de aproximadamente 350 milhões de toneladas: China (29,3 %), Estados Unidos (17,8 %), Argentina (14,8 %) e Brasil (13,2 %) consomem juntos 75 % da safra e o comércio mundial é de aproximadamente 150 milhões de toneladas onde o Brasil (51 %) e Estados Unidos (32 %) são responsáveis por 83% do total exportado (FIESP, 2020). Em função da oferta estável ao longo do ano, essa cultura se tornou o principal insumo na constituição da alimentação de aves, suínos e bovinos para produção de proteína animal em todo o mundo.

2.2. Produção de soja no Brasil e no mundo

A produção está concentrada em três países da América: Brasil, Estados Unidos e Argentina. Juntos são responsáveis por mais de 80% da safra mundial (FIESP, 2020).

O complexo soja tem grande importância econômica para o Brasil, sendo a principal cultura do agronegócio brasileiro, ocupando aproximadamente 50% da área plantada e apresentando o maior crescimento na produção nas últimas três décadas (CONAB, 2012), contribuindo significativamente para a economia do país.

A safra de 2011/2012 foi fortemente influenciada pelo fenômeno climático “La Niña”, provocando diminuição da precipitação pluvial histórica durante o período de cultivo de soja, causando redução no rendimento na ordem de 44, 29 e 10% respectivamente nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso do Sul (CONAB, 2012).

O cultivo de soja no Brasil é realizado desde o Rio Grande do Sul até o estado do Maranhão, passando pelos estados do Paraná, Goiás e Mato Grosso, que juntos são responsáveis por cerca de 70% do total produzido pelo Brasil de 123 milhões de toneladas na safra 2019/2020 (FIESP, 2020), sendo responsável por aproximadamente 36% da safra mundial.

Com a crescente demanda mundial por alimentos e o potencial de expansão de novas áreas agrícolas sendo minimizadas, é necessário a utilização de tecnologias que contribuam para o aumento da produtividade das áreas já existentes.

2.3. Sistema radicular

A expansão do sistema radicular é influenciada pelas propriedades físicas do solo relacionadas à disponibilidade hídrica. Como planta do tipo C_3 , a soja requer grandes quantidades de água para a produção, sendo que para cada quilograma de matéria seca produzida por intermédio da fotossíntese, a soja necessita transpirar cerca de 580 L de água (CÂMARA, 2009).

Sá (2018) observou a presença do sistema radicular ativo de soja a 1,0 m de profundidade em solos sem impedimento físico e químico ao sistema radicular, porém durante as fases iniciais, o sistema radicular se encontra em desenvolvimento e caso ocorra DH, a produtividade da soja pode ser afetada de forma significativa.

2.4. A importância da água na produção de soja

A água é responsável por 90 % do peso da planta, além de ter a função de solvente de nutrientes e gases, está presente, direta ou indiretamente, em todos os processos fisiológicos e bioquímicos da planta como balanço energético, fotossíntese, respiração, turgescência e, meio de transporte de gametas. Bem como a regulação térmica da planta através do resfriamento e na distribuição do calor (TAIZ; ZEIGUER, 2006).

As moléculas de água encontradas na atmosfera são decorrentes da evaporação direta da superfície do solo ou de mares e lagos e da água liberada na transpiração das plantas. Como não existe a possibilidade da diferenciação da origem da água na atmosfera, evaporada e transpirada, surgiu o conceito de evapotranspiração. A água utilizada por uma área vegetada extensa com grama, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrições hídricas é definida como evapotranspiração de referência (ET_o). A evapotranspiração real (ET_r) é a perda de água que ocorre em uma determinada superfície vegetada, sem imposição de qualquer condição de contorno como o porte da vegetação e o teor de água no solo (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é a demanda de água a ser reposta ao solo para manter a produtividade da cultura em condições ideais, e depende dos estádios fenológicos da cultura. A abordagem do coeficiente de cultura (K_c) é universalmente adotada para agendar e quantificar o manejo da água e, recentemente, sua relação com a demanda da atmosfera evaporativa foi incluída nessa abordagem para melhorar a tomada de decisão no manejo da irrigação. A falta

de informações básicas sobre as necessidades de água das culturas em condições tropicais é uma das causas do uso ineficiente da água e do manejo inadequado da irrigação.

A evapotranspiração é um dos principais fatores da relação solo, planta água e atmosfera, pois o padrão de água utilizado pela cultura é diretamente relacionado ao desenvolvimento de estresse nas plantas.

Dentre os fatores que interferem no desenvolvimento e produção de soja, a disponibilidade hídrica tem sido considerada o fator climático de maior efeito sobre a produtividade agrícola, sendo o fator que rege a distribuição das espécies nas diferentes zonas climáticas.

O ciclo da cultura tem duração de 90 a 140 dias, variando conforme a variedade e o local de semeadura, que é realizada durante a primavera/verão período de maior concentração das chuvas, variando entre 1.100 a 1.800 mm (cerca de 60 a 70 % do volume total pluviométrico coincide com o cultivo da cultura).

A evapotranspiração potencial da cultura de soja (E_{Tc}) vem sendo estudada nos mais diversos climas do país sendo de extrema importância seu estudo para amenizar o efeito de *deficit* hídrico nas regiões produtoras, em pesquisa realizada por Berlato e Bergamashi (1978) no período de três anos de estudo.

Fietz e Rangel (2008), estudando a época mais adequada de semeadura de soja para a região de Dourados (MS), com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo, observaram a menor deficiência hídrica nas semeaduras de novembro e, principalmente, dezembro deve-se aos estádios da fase reprodutiva de soja, com maior exigência hídrica, ocorrerem em fevereiro e março, meses de menor demanda de água para o processo de transpiração que dezembro e janeiro.

A soja pode ter sua produção afetada tanto com a falta, como pelo excesso. O excesso de chuvas prejudica a produção em função da aeração do solo, dificultando a ação de microrganismos, como o rizóbio que tem papel fundamental nesta cultura pela conversão do nitrogênio do ar em nitrato que é absorvido pela planta. Favorece o ataque de pragas e doenças, principalmente fúngicas, como a ferrugem asiática que é a principal doença da cultura e a concentração de vários dias nublados podem diminuir a incidência de radiação solar, dificultando a colheita e diminuindo a taxa fotossintética da cultura.

A soja atinge a máxima exigência hídrica na floração e enchimento dos grãos (7 a 8 mm dia⁻¹ ou mais). O estresse hídrico neste período pode ocasionar problemas fisiológicos graves que ocasionam queda prematura de folhas e, conseqüentemente, redução de produtividade.

A necessidade de água durante todo o ciclo, para produtividade máxima da cultura, varia entre 450 e 800 mm, dependendo principalmente do clima, manejo da cultura e da variedade empregada.

A disponibilidade de água no solo é um fator determinante para o seu correto desenvolvimento, principalmente nos períodos entre a semeadura e a emergência (fase de germinação) e do florescimento ao enchimento de grãos (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

De acordo com a Conab (2012), o longo período de estiagem causou perdas significativas no cultivo de soja nos estados produtores, sobretudo no Rio Grande do Sul, com perdas de 43,8% (5,09 milhões de toneladas), seguido do Paraná com redução de 30,0% (4,63 milhões de toneladas) e de Mato Grosso do Sul.

Também houve impactos com menores efeitos nos estados da região Centro-Oeste, com perda de 10,4% (539,9 mil toneladas). Tal queda na produção de soja no Brasil se deve à ocorrência de *deficits* hídricos (ISODA, 2005; EMBRAPA, 2008).

Sendo assim, quaisquer distribuições de chuvas abaixo das expectativas geram prejuízos financeiros aos produtores que investiram em grandes áreas de semeadura. Sentelhas et al. (2015), avaliando um período climático histórico de 32 anos (1980-2011), observaram que a maior parte das perdas de produção de soja foi causada por deficiência hídrica.

Dentro do exposto, observa-se que devem ser realizadas pesquisas, integrando estudos sobre várias áreas da agricultura, desde o manejo da irrigação até o melhoramento genético de plantas, no intuito de disponibilizar cultivares mais resistentes à falta de água.

Com isto, pode-se amenizar as perdas de produtores rurais que investiram em grandes áreas agrícolas que estão sempre sujeitas às instabilidades do clima. No presente texto, procurou-se revisar os trabalhos que, direta e indiretamente, abordaram o efeito da deficiência hídrica na cultura de soja, no intuito de contribuir para a organização das informações até então geradas.

2.5. Melhoramento genético

A tropicalização da produção agrícola de soja foi realizada pela Embrapa e aperfeiçoada por empresas da iniciativa privada, utilizando condições ambientais recorrentes na região com luz, dióxido de carbono, água e sais minerais, além de temperatura, e umidade em quantidades suficientes e nas épocas adequadas, bem como interações harmoniosas entre fatores internos e externos do vegetal, para a garantir condições agrônômicas ideais e a cultura desempenhar boa produção (CARVALHO et al., 2013).

Um dos principais fatores relacionados à produtividade de soja é a limitação ocasionada por fatores ambientais, como por exemplo, a restrição hídrica durante o período do seu desenvolvimento, prejudicando a germinação de sementes, o desenvolvimento vegetativo e

reprodutivo da planta, da mesma forma que no período de final a chuva precisa diminuir para garantir a colheita da produção (CARVALHO et al., 2013).

A Manchúria, que fica no nordeste da China, é a região do centro de origem genética de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) que é uma planta herbácea e pertence à família Fabaceae (Leguminosae) com mecanismo de fixação de carbono do tipo C_3 (SEDIYAMA; TEIXEIRA; BARROS, 2009).

As primeiras variedades introduzidas no Brasil foram oriundas dos Estados Unidos e eram adaptadas às condições de alta latitude, semelhantes ao Rio Grande do Sul e a obtenção de novos cultivares oriundos de programas de melhoramento genético realizados por instituições de pesquisas privadas e governamentais, gerenciados pela Embrapa.

Salienta-se que tropicalizaram os cultivares de soja que foram introduzidos no Brasil no ano de 1914, possibilitando seu cultivo em praticamente em todo território nacional.

2.6. Ambientes de produção

Na Tabela 1, podem ser observadas algumas informações de ambientes edafoclimáticos de estudos relacionando o *deficit* hídrico com a produtividade de soja. Nesta revisão foram comparados trabalhos em diferentes ambientes edafoclimáticos no Brasil, Estados Unidos da América e África, em diferentes anos com diferentes cultivares. Consequentemente, durante o ciclo, a evapotranspiração real (ET_r) máxima variou entre 350 e 600 mm, e a evapotranspiração real mínima variou entre 154 e 473 mm.

Tabela 1 - Informações de trabalhos científicos relacionando autor, local, unidade experimental (UE) (C - campo, CV - casa-de-vegetação, e CM – cobertura móvel), latitude (Lt), longitude (Lg), altitude (A, m), safra, cultivar, valores mínimos (N) e máximos (X) de evapotranspiração real (ETr, mm ciclo⁻¹) e produtividade (P, t ha⁻¹) de soja em diferentes condições edafoclimáticas.

Autor	Local	UE	Lt	Lg	A	Safra	Cultivar	N	X
Evapotranspiração real (ETr, mm ciclo ⁻¹)									
Ávila (2016)	Santa Maria, RS	CM	-29°41'24"	53°48'42"	100	2014/15	Pioneer-95R51	224	351
Gava (2014)	Piracicaba, SP	CV	-22°44'64"	47°37'76"	548	2011/13	BRS-316RR	207	552
Imak et al. (2014)	Lincoln, NE ²	C	40°32'00"	98°8'00"	552	2007	Pioneer-93M11	473	601
Sharda et al. (2019)	Bushland, TX ²	C	35°11'00"	102°06'00"	1170	2003/04	Pioneer-94B73RR	154	440
Lourenço ¹ (2020)	Piracicaba, SP	CV	-22°44'64"	47°37'76"	551	2018/20	Monsoy-5917-Ipro	269	370
Adeboye (2015)	Ile-Ife, Nigéria	C	7°28'00"	4°34'00"	271	2013	TGX-1448	364	563
Batista (2017)	Planaltina, DF	C	-15°35'30"	47°42'00"	1014	2014	BRS 7380RR	174	421
Produtividade (P, t ha ⁻¹)									
Ávila (2016)	Santa Maria, RS	CM	-29°41'24"	53°48'42"	100	2014/15	Pioneer-95R51	2,98	5,15
Gava (2014)	Piracicaba, SP	CV	-22°44'64"	47°37'76"	548	2011/13	BRS-316RR	1,71	2,99
Imak et al. (2014)	Lincoln, NE ²	C	40°32'00"	98°8'00"	552	2007	Pioneer-93M11	4,55	4,97
Sharda et al. (2019)	Bushland, TX ²	C	35°11'00"	102°06'00"	1170	2003/04	Pioneer-94B73RR	3,80	5,20
Lourenço ¹ (2020)	Piracicaba, SP	CV	-22°44'64"	47°37'76"	551	2018/20	Monsoy-5917-Ipro	1,85	4,61
Adeboye (2015)	Ile-Ife, Nigéria	C	7°28'00"	4°34'00"	271	2013	TGX-1448	0,70	3,11
Batista (2017)	Planaltina, DF	C	-15°35'30"	47°42'00"	1014	2014	BRS 7380RR	0,49	2,37

¹ Comparação efetuada neste trabalho. ² Estados Unidos da América.

Condições adversas de clima são recorrentes nos países produtores e podem afetar significativamente as cotações para a *commodity* soja, como ocorrido nos anos de 2005, 2012 e 2019 (Figura 1), onde foram observadas perdas na produtividade devido à ocorrência de *deficit* hídrico durante o cultivo da cultura de soja, influenciando diretamente no comércio mundial, implicando em preços recordes (CONAB, 2012).

O sucesso que a soja está fazendo entre os produtores brasileiros vem transformando algumas regiões no interior do Brasil em importantes polos econômicos e, se deve principalmente à lucratividade que a cultura de soja vem alcançando nos últimos anos, pois é considerada uma *commodity* por ser plantada em larga escala, ter seus preços controlados pelo mercado mundial e ser comercializada em Dólares.

Desta forma, o desenvolvimento de soja para a agricultura tropical nas condições de cultivo do cerrado brasileiro e a evolução tecnológica ocorrida nas últimas décadas, proveu aumento considerável da produtividade e consequentemente na lucratividade da cultura, tornando o Brasil um grande exportador mundial com os menores investimentos para sua produção.

Figura 1 - Produção de soja no Brasil nas safras 2010/2011 (ano típico) (A) e 2012/2013 (ano influenciado pela La Niña) (B) (BATTISTI, 2016).

2.7. Deficiência hídrica

Em função da grande importância da cultura para o âmbito regional e mundial, torna-se imprescindível avaliar e caracterizar o efeito da deficiência hídrica na cultura de soja e iniciar a discussão sobre algumas propostas para amenizar o seu efeito através de práticas agronômicas para atenuar o efeito causado na produtividade, pois as regiões de cultivo de soja dos dois principais países produtores, Brasil e Estados Unidos da América, estão em áreas que podem ocorrer grande variabilidade climática, caso algumas projeções na mudança climática venha realmente a se concretizar.

A produção agrícola em ambientes com pouca disponibilidade hídrica é afetada de maneira direta, sendo os prejuízos minimizados por características das plantas que permitem uma manutenção do *status* hídrico durante a redução da umidade do solo, onde está caracterizada como a resistência que a cultura tende a resistir à seca (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

Dentre as medidas para se determinar o *deficit* hídrico nas plantas, destaca-se o potencial químico da água que é uma medida importante e sensível do estado hídrico da planta em que varia de valores próximos de zero nas plantas sem estresse, até valores bem abaixo de zero ou igual ao potencial osmótico, em plantas com estresse severo. Devido a variações ao longo do dia, existem *deficits* de curto prazo até mesmo em plantas irrigadas, ocasionadas pelas altas temperaturas em alguns horários do dia. Devido a isso, o potencial total de água na folha tem sido utilizado como ferramenta em estudos das relações hídricas dos vegetais (HSIAO, 1973).

Na presença de *deficit* hídrico, existem estratégias das plantas para diminuir os efeitos da seca, utilizando mecanismos de tolerância, como o ajuste osmótico, para que a célula absorva água e mantenha o potencial de pressão em níveis adequados. Uma destas estratégias é a diminuição do potencial osmótico, em resposta à deficiência hídrica, resultando em uma concentração passiva de solutos, consequência da desidratação da célula, ou da acumulação ativa de solutos, sendo esta considerada como ajuste osmótico. Existe considerável variação, entre diferentes culturas, na

capacidade de ajuste osmótico e isso deve ser considerado ao medir a habilidade da cultura em suportar a seca. Atualmente, tem sido observada alta capacidade de ajuste osmótico em espécies como o sorgo e o algodão; ajustes mais moderados são observados em girassol, enquanto o trigo e a soja normalmente apresentam baixa capacidade de ajuste (OOSTERHUIS; WULLSCHLEGER, 1988).

Porém, mesmo em regiões com boa incidência de chuvas na época de cultivo de soja, podem ocorrer deficiências hídricas em fases específicas que comprometem a produção. No caso de soja, um curto período de *deficit* hídrico de 7 dias, já pode comprometer a produção, dependendo da fase em que a cultura se encontra, sendo assim a utilização da irrigação uma importante ferramenta principalmente em áreas de alta produção, podendo salvar a produção em situações de pequeno ou grande período de estiagem.

A resistência à seca é expressa nas plantas através de genes que promovem maior adaptação a condições climáticas adversas como a falta de água. Algumas das primeiras respostas ao estresse podem ser medidas predominantemente por acontecimentos biofísicos ou por alterações de reações químicas causadas pela desidratação (TAIZ; ZEIGER, 2006).

Um dos processos biofísicos visíveis devido ao estresse das plantas é a redução no crescimento. A medida que o conteúdo de água diminui, a célula encolhe cada vez mais e as paredes relaxam, os solutos ficam cada vez mais concentrados e a membrana plasmática torna-se mais espessa, uma vez que cobre uma área menor. Como a perda de turgidez é o primeiro efeito biofísico da carência hídrica, as atividades relacionadas com a turgidez são as mais sensíveis ao *deficit* hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2006; FAGERIA; BALIGAR; CLARK, 1984).

A maioria dos estudos relacionados à resistência a seca na cultura de soja tem sido feito através da comparação de genótipos das plantas submetidas a *deficit* hídrico em condições igualitárias.

Fioreze et al. (2011), estudando o desempenho de genótipos de soja submetidos a *deficit* hídrico intenso em casa-de-vegetação, observaram diferenciação no comportamento de genótipos de soja sendo os valores produtivos dos diferentes genótipos afetados de maneira variável tendo respostas diferentes entre si.

Outra característica apresentada por plantas submetidas a *deficit* hídrico é a redução na área foliar total onde as mesmas não permanecem constantes depois da maturação das folhas. Se as plantas sofrerem estresse por carência hídrica após um grande desenvolvimento das folhas, então estas entram em senescência e finalmente caem. Este ajustamento da área foliar é uma mudança de longo termo que melhora muito a aptidão das plantas para sobreviverem num ambiente com uma limitação hídrica (FIOREZE et al., 2011).

Alteração na abertura dos estômatos é um dos mecanismos de adaptação a falta de água nas plantas. Após o desenvolvimento da área foliar antes do início do estresse as plantas fecham os estômatos de maneira a reduzir a perda de água para o ambiente. Na literatura estudos sobre as condições fisiológicas da cultura de soja submetidas a *deficit* hídrico mostram que há aumento da condutância estomática e diminuição da transpiração das plantas de acordo com o nível de restrição hídrica.

Firmano, Kuwara e Souza (2009), em estudos sobre a relação hídrica e a adubação fosfatada na cultura de soja, observaram os efeitos fisiológicos provocados pela falta de água nas plantas e decréscimo na produção de soja além da diminuição da eficiência do uso da água.

Salinet (2009), em estudos sobre a cultura de soja em Londrina (Paraná), observou que a deficiência hídrica diminui a condutância estomática da cultura, apresentando o fechamento dos estômatos nos tratamentos mais críticos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Experimentos

Foram conduzidos dois experimentos em casa-de-vegetação utilizando plantas de soja.

O primeiro experimento foi realizado no período de outubro de 2018 a março de 2019 (Safrá 2018/2019).

O segundo experimento foi realizado na Safrá 2019/2020.

3.2. Localização da área experimental

Os experimentos (experimentos 1 e 2) foram conduzidos na área experimental do Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq), Universidade de São Paulo (USP), no município de Piracicaba, no estado de São Paulo, com as seguintes coordenadas geográficas: (i) latitude sul: $22^{\circ}44'64''$, (ii) longitude oeste: $47^{\circ}37'76''$, e (iii) altitude de 551 m (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área experimental. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

3.3. Clima

O clima da região é subtropical úmido (Cwa). De acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por verão chuvoso e inverno seco.

3.4. Espécie e cultivar

O cultivar utilizado de soja, *Glycine max* (L) Merrill (espécie), foi o Monsoy-5917-Ipro, o qual apresenta hábito de crescimento indeterminado.

Este cultivar é classificado como Superprecoce com ciclo de 105 a 110 dias. O mesmo é indicado para os estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul.

3.5. Época de semeadura

As semeaduras dos experimentos foram realizadas nas seguintes datas: (experimento 1) 25 de outubro de 2018 (Safrá 2018/2019), e (experimento 2) 20 de outubro de 2019 (Safrá 2019/2020).

Em cada vaso, foram semeadas 8 sementes de soja e após a germinação, foram raleadas, deixando 4 plântulas por vaso.

3.6. Parcela experimental

A parcela experimental foi composta por um vaso de polietileno (4,0 litros) com quatro plantas de soja.

Os vasos foram preenchidos com aproximadamente 4 dm³ de solo seco e adubado com 700 mg dm⁻³ de P₂O₅ (superfosfato simples), e 80 mg dm⁻³ de K₂O (Cloreto de potássio).

Antes da semeadura, as sementes foram tratadas com fungicida (metalaxyl-m) e inseticida (imidacloprid).

No momento da semeadura, as sementes receberam tratamento com cobalto e molibdênio e, em seguida, foram inoculadas com bactéria do gênero *Rhizobium*, a fim de estimular a formação de nódulos e a fixação biológica de nitrogênio.

3.7. Descrição dos tratamentos

Foram definidos os seguintes três períodos da cultura de soja para aplicação dos tratamentos de irrigação com duração de 25 dias: (Período 1) V₃ a V₈ - fase vegetativa, (Período 2) R₁ a R₃ - início do florescimento até a formação de vagens (fase reprodutiva) e (Período 3) R₄ a R₈ - enchimento de grãos à maturação (fase reprodutiva).

A Figura 3 ilustra a evolução do desenvolvimento da cultura de soja, especificando os estádios fenológicos de desenvolvimento definido as fases vegetativa e reprodutiva.

Figura 3 - Fases da cultura de soja que foram aplicados os tratamentos de irrigação com duração de 25 dias: (Período 1) V₃ a V₈ - terceiro nó ao sexto nó (fase vegetativa), (Período 2) R₁ a R₃ - início do florescimento à formação de vagens e (Período 3) R₄ a R₈ - enchimento de grãos à maturação. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

O suprimento de água às plantas foi realizado de modo a manter a teor de água do solo próximo à capacidade de campo, até o início do período do tratamento, quando a imposição da deficiência hídrica foi realizada.

Os tratamentos de irrigação constaram dos seguintes quatro critérios: (critério 1) Controle - a lâmina de irrigação corresponde a 100% da evapotranspiração potencial da cultura (ET_c , mm dia⁻¹), (critério 2) a lâmina de irrigação corresponde a 75% da evapotranspiração potencial da cultura, (critério 3) a lâmina de irrigação corresponde a 50% da evapotranspiração potencial da cultura, e (critério 4) a lâmina de irrigação corresponde a 25% da evapotranspiração potencial da cultura, variando 10 diferentes formas de ocorrência (Tabela 2).

Tabela 2 - Descrição dos tratamentos (T) de irrigação e seus respectivos códigos e significados.

T	Código	Significado
1	C100	Lâmina de irrigação corresponde a 100% da evapotranspiração potencial da cultura (ETc)
2	V _{3/8} /75	Lâmina de irrigação corresponde a 75% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos V ₃ e V ₈
3	V _{3/8} /50	Lâmina de irrigação corresponde a 50% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos V ₃ e V ₈
4	V _{3/8} /25	Lâmina de irrigação corresponde a 25% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos V ₃ e V ₈
5	R _{1/3} /75	Lâmina de irrigação corresponde a 75% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos R ₁ e R ₃
6	R _{1/3} /50	Lâmina de irrigação corresponde a 50% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos R ₁ e R ₃
7	R _{1/3} /25	Lâmina de irrigação corresponde a 25% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos R ₁ e R ₃
8	R _{4/8} /75	Lâmina de irrigação corresponde a 75% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos R ₄ e R ₈
9	R _{4/8} /50	Lâmina de irrigação corresponde a 50% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos R ₄ e R ₈
10	R _{4/8} /25	Lâmina de irrigação corresponde a 25% da evapotranspiração potencial da cultura no período entre os estádios fenológicos R ₄ e R ₈

3.8. Observações experimentais efetuadas

Durante o período do experimento, foram determinadas as variáveis biométricas: (i) área foliar, (ii) massa de matéria seca de folhas, (iii) caules (hastes) e pecíolos e (iv) estruturas reprodutivas.

No final do ciclo da cultura (estádio R₈), foram avaliados os componentes da produção: (i) número de grãos por planta, (ii) massa de grãos por planta, (iii) massa de mil grãos, e (iv) produtividade absoluta e relativa de grãos (corrigida para 11%).

3.9. Casa-de-vegetação e bancadas

A bancada experimental foi instalada em uma casa-de-vegetação, equipada com 2 bancadas de aço galvanizado com as seguintes dimensões: altura de 0,70 m, largura de 1,0 m e comprimento de 4,0m (Figura 4). As bancadas eram acessíveis por ambos os lados.

Cada bancada havia 4 fileiras de vasos com volume de 4 litros preenchidos com solo, totalizando 80 vasos por bancada. Os detalhes da montagem dos vasos e a disposição nas bancadas em ensaio podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 4 - Croqui da casa-de-vegetação e bancadas. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

3.10. Condução do experimento

O experimento foi conduzido em ambiente protegido para se ter pleno controle das lâminas de irrigação nos diferentes tratamentos para ocorrência da deficiência hídrica.

Porém, para minimizar os efeitos da casa-de-vegetação na cultura de soja, um sistema de *padfan* foi acionado quando a temperatura no interior da estufa era superior a 22°C. Sendo assim, o efeito de altas temperaturas no interior da casa-de-vegetação sobre as plantas de soja foi praticamente a cobertura.

A realocação do substrato (solo) nos vasos seguiu um processo cuidadoso quanto à sua colocação das camadas dos horizontes do solo coletado, bem com quanto à densidade, buscando sempre aproximar o máximo possível da condição de campo.

3.11. Sistema automático de irrigação

Embora o método de irrigação mais utilizado para soja é a irrigação por aspersão, com sistema pivô central, este experimento no interior de uma casa-de-vegetação foi conduzido através da irrigação por gotejamento, por possibilitar o controle rigoroso no volume de água conforme determinado nos tratamentos e possibilitar grande uniformidade de aplicação da água, assegurando que cada parcela quando irrigada individualmente receba o volume de água pré-estabelecido (Figura 5).

Além disso, foram utilizados gotejadores autocompensantes da marca Netafim (modelo PCJ) com um gotejador por vaso e um *manifold* duplo com microtubos e hastes gotejadoras para assegurar que os volumes de água pré-estabelecidos nos tratamentos sejam aplicados com precisão (Figura 5).

Figura 5 - Esquema de funcionamento do sistema de irrigação. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

3.12. Evapotranspiração potencial da cultura

A evapotranspiração potencial da cultura (ET_c) foi obtida de forma direta através de um lisímetros automático.

A lisimetria de pesagem consiste em medir a variação do peso de um bloco de solo, devido à entrada de água (irrigação e precipitação) e à sua saída (consumo de planta e drenagem), por meio de células de carga que monitoram a capacidade de água no solo (CAMPECHE et al., 2011).

A lisimetria de pesagem é um dos métodos mais precisos e confiáveis, quando os requisitos fundamentais de construção são atendidos (ALLEN et al., 2011).

Os lisímetros são considerados padrões para aferição de outros métodos de determinação ou estimativa de evapotranspiração (FARIA et al., 2006).

A calibração dos lisímetros foi realizada com pesos padronizados que são adicionais e retirados um a um dos lisímetros, anotando-se as leituras e correlacionando-as ao peso real acumulado por meio de um modelo de análise linear, que atinge alto valor de coeficiente de determinação, podendo chegar a 99,99% (CAMPECHE et al., 2011).

3.13. Controle do teor de água no solo

A correlação entre a leitura de massa dos lisímetros e o teor de água do solo foi realizado mediante o desenvolvimento de 7 passos, conforme descrito a seguir: (Passo 1) o vaso foi completado com uma camada de 0,03 m com brita e uma camada de manta transitória (Bidin) e o restante 0,18 m com o mesmo solo retirado do local da perfuração, onde será aferida a massa de substrato úmido do vaso (m_v , kg); (Passo 2) foi determinado o volume de armazenamento do vaso V (m^3); (Passo 3) foi retirada uma amostra deformada da terra utilizada para o preenchimento dos lisímetros e será adotado o método padrão da estufa para determinar o teor de água no solo (u , $kg\ kg^{-1}$), a base de massa:

$$u = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \quad (1)$$

em que u se refere ao teor de água no solo ($kg\ kg^{-1}$); M_1 à massa do solo úmido + tara do recipiente (g); M_2 à massa do solo seco após 24 h em estufa a $100^\circ C$ + tara do recipiente (g) e M_3 à tara do recipiente (g), (Passo 4) cálculo da massa específica do substrato utilizado no lisímetro:

$$\delta = \frac{m_v(1 - u)}{V} \quad (2)$$

em que δ se refere à massa específica do substrato utilizado no lisímetro ($kg\ m^{-3}$); u ao teor de água do substrato ($kg\ kg^{-1}$); V ao volume ocupado pelo substrato (m^3), (Passo 5) cálculo do teor de água no solo (θ , $m^3\ m^{-3}$):

$$\theta = \frac{\delta}{\delta_w} \cdot u \quad (3)$$

em que Θ se refere ao teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e δ_w se refere à massa específica da água (kg m^{-3}), (Passo 6) cálculo do volume de água disponível no solo:

$$Wd = V.(\theta - \theta_{pmp}) \quad (4)$$

$$Wd_{max} = V.(\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \quad (5)$$

em que Wd se refere ao volume (m^3) de água disponível em função do teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), (Passo 7) cálculo da água disponível:

$$AD = \frac{10^3 \cdot Wd}{A} \quad (6)$$

$$CAD = \frac{10^3 \cdot Wd_{max}}{A} \quad (7)$$

em que AD se refere à água disponível (L m^{-2} ou mm) e CAD à capacidade de água disponível (mm).

Os lisímetros foram construídos a partir de uma célula de carga que é um sensor eletrônico que correlaciona a variação do peso com a voltagem que passa por uma ponte de *wheatstone* através de extensômetros. Um conversor de sinal analógico/digital (ADC) foi utilizado para a conversão do sinal que foi armazenado em um microcontrolador ESP 32 com conexão WIFI. Para a automação do protótipo e a obtenção de medições precisas, rápidas e em tempo real dos sinais, desenvolveu-se um programa de computador na linguagem Python, visando controle, coleta, transferência e armazenamento dos dados em nuvem.

Um relê controlado pelo microcontrolador era acionado quando a umidade do solo do lisímetros ficava abaixo do valor estabelecido e uma válvula solenoide era acionado por um tempo controlado, pressurizando um sistema de irrigação por gotejamento, com gotejadores marca Netafim modelo PCJ autocompensantes com vazão de 8 litros por hora que faziam a irrigação dos vasos.

Nos tratamentos com irrigação plena, a água era repostada até a umidade do solo atingir a capacidade de campo e nos tratamentos sob *deficit* de 75%, 50% e 25% da ET_c , na mesma adutora pressurizada e com tempo controlado, foram instalados gotejadores com vazões equivalentes ao tratamento de 6, 4 e 2 litros por hora, respectivamente com o objetivo de aplicar água conforme pré-estabelecido nos tratamentos.

3.14. Solos

O solo utilizado para preenchimento dos vasos é classificado como Nitossolo vermelho distrófico latossólico, com relevo suavemente ondulado, formação Corumbataí, material de origem siltito com boa drenagem.

Para construção da curva de retenção de água no solo, foram utilizadas as seguintes tensões: 0, 10, 20, 40, 100, 300, 500, 800, 5.000 e 15.000 cm (Tabela 3).

Tabela 3 - Dados obtidos em laboratório para a curva de retenção de água no solo.. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

Tensão (cm)									
0	10	20	40	100	300	500	800	5000	15000
Teor de água (cm ³ cm ⁻³)									
0,508	0,473	0,353	0,311	0,225	0,217	0,186	0,132	0,129	0,107

Para caracterização da curva de retenção da água no solo, foi utilizado o modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \left\{ \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m} \right\} \quad (8)$$

3.15. Produtividade

Foi realizada a colheita manual e a pesagem da matéria seca dos grãos. Os dados obtidos foram referentes à colheita de quatro plantas em cada unidade experimental.

Para obter a produtividade em kg ha⁻¹, foi considerado o valor médio das quatro plantas, extrapolando para área referente a 1 ha de acordo com a Equação 9.

$$P = \left(\frac{LL \cdot EP \cdot Ma}{LL} \right) \left(\frac{1000}{Ep} \right) \quad (9)$$

em que P se refere à produtividade (kg ha⁻¹), LL ao comprimento da linha amostrada (m), Ep ao espaçamento entre linhas (m), e Ma à massa da amostra (kg).

3.16. Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento experimental inteiramente casualizado com quatro repetições em diferentes fases da cultura.

Os tratamentos foram compostos pela combinação de quatro teores de água do solo: correspondentes aos tratamentos utilizados de 100, 75, 50 e 25% da reposição da ET_c, em três fases do desenvolvimento da soja: V₃ a V₈, R₁ a R₃ (florescimento) e R₄ a R₈ (enchimento de grãos).

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando detectadas diferenças significativas. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Os valores observados de evapotranspiração real (E_{Tr}), eficiência do uso da água (EUA) e produtividade de grãos de soja foram submetidos ao teste de correlação de Pearson.

3.17. Determinação da área foliar

Segundo Francisco et al. (2007), o valor do IAF varia de acordo com o clima, o estágio de desenvolvimento fenológico da planta e a época do ano, sendo maior para maiores intensidades luminosas e quando a proporção de radiação direta na radiação incidente aumenta, além de ser dependente da arquitetura e composição botânica/morfológica da planta.

De início, o índice de área foliar da soja tem um crescimento exponencial, até que as reservas da semente sejam consumidas e o recurso energético para crescimento seja oriundo só da fotossíntese. Em seguida ocorre um aumento linear até o início do florescimento mas não há falta de disponibilidade dos fatores de crescimento; este processo é proporcional ao acúmulo de graus-dia, ou seja, a instalação da área foliar depende do acúmulo dos graus-dia; a este período corresponde o primeiro segmento do modelo de simulação do IAF.

Com o início da fase reprodutiva em R₁, acontece redução na velocidade de crescimento do índice de área foliar, pois a planta começa a utilizar os seus fotoassimilados para a formação de novos componentes, as vagens e os grãos; este período corresponde ao segundo segmento do modelo.

Os valores de IAF no início da formação de grãos, em R₅, tendem a se estabilizar ou se manterem constantes até o começo da maturação fisiológica da planta no estágio reprodutivo R₇; cujo período corresponde ao terceiro segmento do modelo.

Após a maturação fisiológica ocorre a rápida senescência das folhas e caules (hastes), proporcionando a redução nos valores do índice de área foliar (IAF, m² m⁻²).

3.18. Dados meteorológicos

Para o monitoramento climático da área experimental, foi utilizada uma estação automatizada da marca Davis, modelo Vantage Pro 2. Essa estação meteorológica consiste em um *datalogger* com memória não volátil, com conexão à internet para envio dos dados para a nuvem.

Os dados coletados pela estação meteorológica são enviados ao console que fica dentro das instalações da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq), Universidade de São Paulo (USP), por intermédio de comunicação sem fio.

Para a utilização dos dados coletados, foi necessário fazer a transferência destes para um computador, por meio de um software próprio que é fornecido pelo fabricante. Este software é responsável por fazer interface entre o computador e o console que armazena os dados.

Para caracterização das condições ambientais, os sensores contidos na estação meteorológica automática foram utilizados para coleta dos seguintes elementos do clima: temperatura, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade do vento e chuva (pluviômetro). A estação meteorológica foi instalada na parte externa da casa-de-vegetação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Solos

Nas Tabelas 4 e 5 podem ser observadas a análise química e granulométrica das amostras de solo.

Tabela 4 - Análise química do solo na camada 0,00 a 0,15 m, discriminado pH (em água), teor de matéria orgânica (MO, g dm⁻³), fósforo (P, mg kg⁻¹), potássio (K, cmol_c kg⁻¹), cálcio (Ca, cmol_c kg⁻¹), magnésio (Mg, cmol_c kg⁻¹), alumínio (Al, cmol_c kg⁻¹), hidrogênio + alumínio (H+Al, cmol_c kg⁻¹), soma de base (SB, cmol_c kg⁻¹) e capacidade de troca catiônica (T, cmol_c kg⁻¹), porcentagem saturação por bases (V, %) e porcentagem saturação por alumínio (m, %).. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	m
5,42	38	12	0,17	1,65	0,95	1,83	7,20	2,61	9,81	27	34,59

Tabela 5 - Análise granulométrica discriminando o teor de areia (Ar, %), silte (St, %) e argila (Ag, %), massa específica (δ , g cm⁻³) e classe textural do solo. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

Ar	St	Ag	δ	Classe textura
37,00	10,80	52,20	1,21	Argilosa

Aplicando os valores obtidos para o solo coletado nos vasos após sua estabilização, e ajustados os parâmetros apresentados na Tabela 6, temos então a equação 10, que é a equação que descreve a relação funcional entre o teor de água no solo (θ , cm³ cm⁻³) e a tensão (h, cm) (módulo do potencial mátrico), ou curva de retenção da água no solo (Figura 6).

$$\theta = 0,100 + \left\{ \frac{0,398}{[1 + (0,079 \cdot h)^{1,476}]^{0,297}} \right\} \quad (10)$$

Tabela 6 - Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) ajustados para o solo utilizado: teor de água correspondente à saturação (θ_s , cm³ cm⁻³), umidade residual (θ_r , cm³ cm⁻³), α (cm⁻¹), m e n. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

θ_s	θ_r	α	n	m
0,498	0,100	0,079	1,476	0,297

Figura 6 - Curva de retenção de água do solo. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

4.2. Uniformidade de distribuição da água aplicada pelo sistema de irrigação

Como o principal objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta da cultura de soja em relação a deficiência hídrica, foi realizado a avaliação da uniformidade de aplicação do sistema de irrigação por gotejamento, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Avaliação da uniformidade de distribuição da água aplicada pelo sistema de irrigação. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safras 2018/2019 e 2019/2020. Experimentos 1 e 2.

O desvio padrão foi de 3,86% em relação à média, o coeficiente de variação foi de 2,41% e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi de 0,97, considerado excelente como critério de avaliação de um sistema de irrigação por gotejamento (BERNARDO, 1995).

4.3. Evolução do desenvolvimento das plantas de soja durante o período experimental

A Figura 8 ilustra a evolução do desenvolvimento da cultura de soja durante o período experimental.

Figura 8 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) durante o período experimental. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Figura 9 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) com deficiência hídrica durante o período experimental. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

No período de desenvolvimento até a fase fenológica V_3 , Figura 8D, todos os tratamentos receberam a mesma quantidade de água, conforme a ET_c determinada pelo microlisímetros de pesagem automática Figura 8F. Após atingir a fase fenológica conforme os tratamentos pré-estabelecidos, os tratamentos de deficiência hídrica foram iniciados, como pode ser observado na Figura 8G, durante a aplicação da DH na fase R_1 , as plantas apresentaram forte murchamento da área foliar, demonstrando que os tratamentos estavam sendo eficazes. Após o período DH, os tratamentos de irrigação foram reestabelecidos até senescência das folhas (Figura 8H) e, desligamento do sistema automático de irrigação, para secamento do solo e colheita das plantas para avaliações biométricas.

Na Figura 9 (Figura 9A, 9B e 9C) podem ser observados as plantas durante o período de DH em V₃, em que no tratamento com reposição de 25% da ET_c, foi observado a morte de 24% das plantas cultivadas. Como o sistema radicular das plantas ainda não estava totalmente desenvolvido, indicando que DH com grande intensidade podem ser responsáveis por uma grande diminuição da produtividade das áreas de soja, pois cerca de ¼ do estande de plantas será reduzido, após o reestabelecimento das irrigações, houve a recuperação das plantas, porém com grande prejuízo na produção das plantas.

Quando a DH foi induzida nas fases finais, as plantas apresentavam grande desenvolvimento do dossel e 4 dias após a redução do volume de irrigação conforme os tratamentos, observou-se a escaldadura das folhas do terço superior das plantas (Figura 9H), provocando o abortamento de todas as vagens, que estavam se desenvolvendo neste local da planta, ou seja, 37% das vagens foram abortadas.

Na Figura 10 (Figura 10A, 10B e 10C), podem ser observadas a evolução da escaldadura no ápice das plantas durante a Fase fenológica V₄. À medida que a DH foi evoluindo, 24% das plantas morreram e não conseguiram se recuperar.

Figura 10 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) durante no estágio fenológico V₃. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Na Figura 11, pode ser observado o efeito da DH após 4 dias do início da aplicação dos tratamentos durante o estágio fenológico V₃. Observa-se também o efeito dos tratamentos durante este período de desenvolvimento das plantas de soja.

Figura 11 - Evolução do desenvolvimento da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) durante no estágio fenológico R₁. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

4.4. Dados climáticos ao longo do período experimental

Os dados climáticos coletados durante o período experimental podem ser observados nas Figuras 12 e 13. Os dados de precipitação foram coletados fora da casa-de-vegetação.

Figura 12 - Dados climáticos coletados por estação meteorológica automática durante o período experimental: temperatura média do ar (T , °C) [A] e umidade relativa do ar (UR, %) [B]. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Figura 13 - Dados climáticos coletados por estação meteorológica automática durante o período experimental: radiação global (Q_g , $W m^{-2}$) [A] e precipitação coletados fora da casa-de-vegetação (P , mm) [B]. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

4.5. Área foliar

Na Figura 14 pode ser observado a variação temporal da área foliar (AF) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) com a deficiência hídrica iniciada no estágio fenológico V₃.

Com base na duração do dia crítico estimado neste trabalho, se estimaram os acúmulos de dias fototermais ocorridos entre a emergência das plântulas e o início dos estádios fenológicos R₁, R₅ e R₇, para todas as datas de semeadura adotadas.

O período que apresentou maior coeficiente de variação foi o da emergência até R₅ e R₇, como previsto, haja vista que suas fases finais são de identificação mais difícil, incluindo-se um erro neste procedimento.

Porém, os valores de coeficiente de variação foram baixos e os valores mais baixos obtidos na última semeadura do primeiro ano de experimento não são estatisticamente discrepantes dos demais. A média aritmética entre os acúmulos de dias fototermais apresentados nos tratamentos dos dois experimentos definiu a constante fototérmica para atingir os estádios fenológicos encontrando-se, para R₁, R₅ e R₇, os respectivos valores: 16,48; 24,24 e 36,26.

Na Tabela 7 podem ser observados os parâmetros de ajustes da equação de regressão que explica o comportamento do IAF em função da DH. A redução no incremento do IAF está associada, usualmente, à pequena redução no tamanho das folhas individuais ou à menor produção de folhas em situações de *deficit* hídrico (SANTOS; CARLESSO, 1998).

Além disso, deficiências hídricas expressivas em campo provocam alterações fisiológicas nas plantas como o fechamento estomático e o enrolamento dos folíolos devido à desidratação dos tecidos. Este comportamento de redução da transpiração pode ter como consequência a queda prematura de folhas (KUSS, 2006).

Segundo Confalone e Navaro (1999), a deficiência hídrica na soja provoca a diminuição do índice de área foliar (IAF), o que afeta a captura de radiação. Quando é exposta ao estresse hídrico leve, a soja tende a maximizar a eficiência de utilização da radiação e a diminuir a eficiência de interceptação da radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA). O *deficit* hídrico severo, no entanto, reduz a eficiência de utilização da radiação.

A deficiência hídrica produz um efeito diferencial sobre o crescimento e produção de biomassa na cultura da soja, segundo o momento e a severidade do estresse. Porém, segundo Salinas et al. (1998), trabalhando com deficiência de irrigação no feijão, concluíram que a deficiência hídrica apenas no estágio vegetativo não reduziu a produtividade, permitindo uma economia de água de 30%.

Figura 14 - Evolução da área foliar (A_F , $\text{cm}^2 \text{planta}^{-1}$) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) submetidas a tratamentos de DH: (A) reposição de 100% da ET_c , (B) reposição de 75% da ET_c , (C) reposição de 50% da ET_c , e (D) reposição de 25% da ET_c no período entre os estádios fenológicos V_3 e V_8 . Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Tabela 7 - Período (estádio fenológico inicial e final de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R^2) e parâmetros empíricos (a, b, c, d) correspondentes ao modelo cúbico ($y = a.x^3 + b.x^2 + c.x + d$) referente à variação da área foliar (A_F , $\text{cm}^2 \text{planta}^{-1}$) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Código	Parâmetro empíricos do modelo cúbico				R^2
	a	b	c	d	
C100 (controle)	0,0042	-548,48	$2,0 \cdot 10^7$	$-3,0 \cdot 10^{11}$	0,94
$V_{3/8}/75$	0,0033	-435,96	$2,0 \cdot 10^7$	$-3,0 \cdot 10^{11}$	0,77
$V_{3/8}/50$	0,0026	-344,37	$2,0 \cdot 10^7$	$-3,0 \cdot 10^{11}$	0,92
$V_{3/8}/25$	0,0017	-218,23	$2,0 \cdot 10^7$	$-1,0 \cdot 10^{11}$	0,82

4.6. Evapotranspiração, deficiência hídrica e produtividade de grãos

A evapotranspiração real (E_{Tr}) aferida através dos microlisímetros automático ao longo do ciclo da cultura de soja no tratamento C100 (Figura 14), no início a E_{Tr} foi de 1 mm dia^{-1} , crescente até média de 5 mm dia^{-1} entre 70 e 80 dias após a semeadura (DAS) e reduzido para $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$ na fase de senescência com 110 DAS.

A Tabela 7 ilustra a marcha de absorção de água nos tratamentos de irrigação (Figura 16A) aos 20 DAS no estágio fenológico V₃. A diferenciação dos tratamentos foi iniciada e o consumo final de água foi de 370, 349, 264 e 179 mm ao longo de todo o ciclo para os tratamentos C100, V_{3/8}/75, V_{3/8}/50 e V_{3/8}/25.

A diferenciação dos tratamentos foi iniciada aos 50 DAS no estágio fenológico R₁ e o consumo final de água foi de 370, 339, 274 e 210 mm ao longo de todo o ciclo para os tratamentos C100, R_{1/3}/75, R_{1/3}/50 e R_{1/3}/25 (Figura 14B).

A diferenciação dos tratamentos foi iniciada aos 75 DAS no estágio fenológico R₄ e o consumo final de água foi de 370, 336, 303 e 270 mm ao longo de todo o ciclo para os tratamentos C100, R_{4/8}/75, R_{4/8}/50 e R_{4/8}/25 (Figura 14C).

A Figura 15 ilustra a variação temporal, ao longo do ciclo de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro), da evapotranspiração de referência (ET_o, mm dia⁻¹), da evapotranspiração real (ET_r, mm dia⁻¹) e do coeficiente de cultura (K_c).

Figura 15 - Evapotranspiração de referência calculada pelo método Penman-Monteith (ET_o, mm dia⁻¹), evapotranspiração real (ET_r, mm dia⁻¹) e coeficiente de cultura (K_c, adimensional) ao longo do ciclo de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Na Tabela 8, podem ser observados os volumes de água utilizados nos tratamentos de irrigação ao longo do ciclo de plantas de soja.

Tabela 8 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação) e subperíodo (estádio fenológico inicial e final) corresponde à quantificação das variáveis. Descrição do controle de água aplicada nos tratamentos de irrigação: reposição de água (R, mL), evapotranspiração real (ET_r, mm), porcentagem do consumo de água (C, %), consumo relativo de água (CR, %), deficiência hídrica ao longo do ciclo (DH, mm) e relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração potencial da cultura (r/c, adimensional) de soja. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Período	Subperíodo	Reposição de 100% da ET _r				Reposição de 75% da ET _r				DH	r/c	Reposição de 50% da ET _r				DH	r/c	Reposição de 25% da ET _r				DH	r/c
		R	ET _r	C	CR	R	ET _r	C	CR			R	ET _r	C	CR			R	ET _r	C	CR		
V ₃ a V ₈	VE a V ₃	939,2	29,9	8,1	8,1	939,2	29,9	8,6	8,1	0,0	1,0	939,2	29,9	11,3	8,1	0,0	1,00	939,2	29,9	16,7	8,1	0,0	1,00
	V ₃ a V ₈	2605,5	82,9	22,4	22,4	1954,2	62,2	17,8	16,8	20,7	0,8	1302,8	41,5	15,7	11,2	41,5	0,50	651,4	20,7	11,6	5,6	62,2	0,25
	R ₁ a R ₃	3879,4	123,5	33,4	33,4	3879,4	123,5	35,4	33,4	0,0	1,0	2909,5	92,6	35,1	25,0	30,9	0,75	1939,7	61,7	34,5	16,7	61,7	0,50
	R ₄ a R ₈	4195,0	133,5	36,1	36,1	4195,0	133,5	38,2	36,1	0,0	1,0	3146,3	100,1	37,9	27,1	33,4	0,75	2097,5	66,8	37,3	18,1	66,8	0,50
	Total	11619,2	369,9	100,0	100,0	10967,8	349,1	100,0	94,4	20,7	0,9	8297,8	264,1	100,0	71,4	105,7	0,71	5627,8	179,1	48,4	48,4	190,7	0,48
R ₁ a R ₃	VE a V ₃					939,2	29,9	8,8	8,1	0,0	1,0	939,2	29,9	10,9	8,1	0,0	1,00	939,2	29,9	14,2	8,1	0,0	1,00
	V ₃ a V ₈					2605,5	82,9	24,5	22,4	0,0	1,0	2605,5	82,9	30,2	22,4	0,0	1,00	2605,5	82,9	39,4	22,4	0,0	1,00
	R ₁ a R ₃					2909,5	92,6	27,3	25,0	30,9	0,8	1939,7	61,7	22,5	16,7	61,7	0,50	969,8	30,9	14,7	8,3	92,6	0,25
	R ₄ a R ₈					4195,0	133,5	39,4	36,1	0,0	1,0	3146,3	100,1	36,5	27,1	33,4	0,75	2097,5	66,8	31,7	18,1	66,8	0,50
	Total					10649,3	339,0	100,0	91,7	30,9	0,9	8630,7	274,7	100,0	74,3	95,1	0,74	6612,1	210,5	100,0	56,9	159,4	0,57
R ₄ a R ₈	VE a V ₃					939,2	29,9	8,9	8,1	0,0	1,0	939,2	29,9	9,9	8,1	0,0	1,00	939,2	29,9	11,1	8,1	0,0	1,00
	V ₃ a V ₈					2605,5	82,9	24,6	22,4	0,0	1,0	2605,5	82,9	27,4	22,4	0,0	1,00	2605,5	82,9	30,8	22,4	0,0	1,00
	R ₁ a R ₃					3879,4	123,5	36,7	33,4	0,0	1,0	3879,4	123,5	40,7	33,4	0,0	1,00	3879,4	123,5	45,8	33,4	0,0	1,00
	R ₄ a R ₈					3146,3	100,1	29,8	27,1	33,4	0,8	2097,5	66,8	22,0	18,1	66,8	0,50	1048,8	33,4	12,4	9,0	100,1	0,25
	Total					10570,4	336,5	100,0	91,0	33,4	0,9	9521,7	303,1	100,0	81,9	66,8	0,82	8472,9	269,7	100,0	72,9	100,1	0,73

Figura 16 - Evapotranspiração real (ET_r , mL vaso⁻¹) da cultura de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função do número de dias após a semeadura (DAS) (A) estresse hídrico em V_3 , (B) estresse hídrico em R_1 e (C) estresse hídrico no estágio fenológico R_3 . Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Ao longo do ciclo da cultura, a DH observada foi de 20,7; 105,7 e 190,7 mm, respectivamente nos tratamentos 75, 50 e 25 ao longo da fase fenológica V₃, 30,9; 95,1 e 159,5 mm, respectivamente nos tratamentos 75, 50 e 25 ao longo da fase fenológica R₁ e 33,4; 66,8 e 100,1, respectivamente nos tratamentos 75, 50 e 25 ao longo da fase fenológica R₃ (Figura 16).

Quando a DH ocorreu no estágio fenológico V₃, nas seguintes intensidades: 20,7, 41,5 e 62,2 mm, para os tratamentos 75, 50 e 25% (Tabela 9), em função da redução significativa da área foliar das plantas a redução da ET foi de 20,7, 105,7 e 190,7 mm (Tabela 10) e consequentemente houve redução significativa na produção de soja na ordem de 25,9, 54,8 e 82,3% (Tabela 10).

Quando a DH ocorreu no estágio fenológico R₁, nas seguintes intensidades: 30,9, 61,7 e 92,6, para os tratamentos 75, 50 e 25 (Tabela 9), em função da redução significativa da área foliar das plantas a redução da ET foi de 30,9, 95,1 e 159,4 mm (Tabela 10) e consequentemente houve redução significativa na produção de soja na ordem de 30,3, 62,8 e 84,7% (Tabela 10).

Quando a DH ocorreu no estágio fenológico R₃, nas seguintes intensidades: 33,4, 66,8 e 100,1, para os tratamentos 75, 50 e 25 (Tabela 9), apesar da área foliar das plantas ter sido reduzida a ETr final das plantas foi a mesma e consequentemente houve redução significativa na produção de soja na ordem de 17,1, 38,8 e 59,7% (Tabela 10).

Tabela 9 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), tratamento (T), código, evapotranspiração real (ETr, mL planta⁻¹), uso relativo (%), produtividade de grãos (P_G, g planta⁻¹), produtividade relativa de grãos (P_R, %), eficiência de uso de água (EUA, L kg⁻¹), evapotranspiração real relativa (ETr/ETc, mL mL⁻¹) e deficiência hídrica (DH, mL planta⁻¹). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Período	T	Código	ETr	Uso	P _G	P _R	EUA	ETr/ETc	DH
V ₃ a V ₈	1	C100 ¹	11.619,2	100,0	18,45	100,0	629,8	1,00	0,0
	2	V _{3/8} /75	10.967,8	94,4	13,68	74,1	801,7	0,94	20,7
	3	V _{3/8} /50	8.297,8	71,4	8,34	45,2	994,9	0,71	105,7
	4	V _{3/8} /25	5.627,8	48,4	3,26	17,7	1726,3	0,48	190,7
R ₁ a R ₃	1	C100	11.619,2	100,0	18,45	100,0	629,8	1,00	0,0
	5	R _{1/3} /75	10.649,3	91,7	12,86	69,7	828,1	0,92	30,9
	6	R _{1/3} /50	8.630,7	74,3	6,87	37,2	1256,3	0,74	95,1
	7	R _{1/3} /25	6.612,1	56,9	2,82	15,3	2344,7	0,57	159,4
R ₄ a R ₈	1	C100	11.619,2	100,0	18,45	100,0	629,8	1,00	0,0
	8	R _{4/8} /75	10.570,4	91,0	15,3	82,9	690,9	0,91	33,4
	9	R _{4/8} /50	9.521,7	81,9	11,29	61,2	843,4	0,82	66,8
	10	R _{4/8} /25	8.472,9	72,9	7,43	40,3	1140,4	0,73	100,1

¹ Controle.

Em função dos dados coletados, quando a DH ocorre nas fases iniciais, as perdas de produtividade são na ordem de 80% quando a DH for acima de 60 mm, já quando ocorre na fase

final, as perdas são menores (cerca de 60%). Porém, a qualidade da semente provavelmente deve ter sido comprometida, objetivo este que não foi avaliado neste trabalho. Esta é uma informação complementar importante, principalmente quando o objetivo na produção de soja é para semente.

Figura 17 - Produtividade de grãos (P_g , g planta⁻¹) de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da evapotranspiração real (ET_r , mL planta⁻¹). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Figura 18 - Produtividade relativa de grãos (P_r , %) de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da evapotranspiração real relativa (ET_r/ET_c). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

A Figura 17 ilustra a relação entre a produção e o consumo de água, ou seja, para áreas de alta produtividade, a presença da DH pode ocasionar diminuição significativa na produtividade de soja, conforme o ajuste da equação nas Figuras 17 e 18, para queda de cada 10 pontos na relação entre ET_r e ET_c , a produtividade das plantas de soja foi afetada na ordem de 20%, independente que quanto ocorrer a DH.

Com relação a eficiência do uso da água (Figura 19), a DH tem relação direta com a EUA, quando ETr é próximo da ETc , a EUA é maior, quando a relação ETr/ETc^{-1} é menor, a eficiência na produção de grãos é menor, ou seja a planta utiliza água na produção de biomassa, mas em função da falta de água nos momentos ideais, a planta perde eficiência no uso da água, ou seja, em áreas onde pode ocorrer DH ao longo do ciclo das plantas de soja, a irrigação, complementando o requerimento de água necessário para o desenvolvimento da cultura, é uma ferramenta importante na EUA.

Outro fator de grande importância, é a água disponível as plantas, quanto maior a profundidade do sistema radicular, maior será o volume de solo disponível a ser explorado e consequentemente maior volume de água para a planta utilizar no período da seca, indicando que técnicas agrônômicas elementares de manejo da fertilidade no perfil do solo tem grande influência na resposta da cultura quando for submetida a deficiência hídrica, indicando que a taxa de acúmulo de assimilados, bem com a manutenção da área foliar, é característica importante para a manutenção do potencial produtivo de plantas em condições de deficiência hídrica, apresentando variabilidade entre diferentes genótipos.

Tabela 10 - Parâmetros empíricos (a, b, [c]) correspondentes ao modelo quadrático ($y = a.x^2 + b.x + c$) e ao modelo linear ($y = a.x + b$) e coeficiente de determinação (R^2) para as regressões entre Produtividade (P) e evapotranspiração real (ETr), produtividade relativa (Pr) e relação ETr/ETc , Produtividade (P) e relação ETr/ETc e eficiência do uso da água (EUA) e relação ETr/ETc . Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Variáveis	Parâmetros do modelo			Modelo	R^2
	a	b	c		
P x ETr	0,0000007	0,0025	7,6027	Quadrático	0,97
Pr x ETr/ETc	171,96	-78,889	-	Linear	0,93
P x ETr/ETc	31,727	-14,554	-	Linear	0,93
EUA x ETr/ETc	7,8348	-254,23	2692,3	Quadrático	0,93

A Figura 20 ilustra a relação funcional entre a evapotranspiração real (ETr) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da produtividade de grãos (P_G).

Figura 19 - Produtividade de grãos (P_G , g planta⁻¹) de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da evapotranspiração real relativa (ETr , ETc^{-1} , %). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Figura 20 - Evapotranspiração real (ETr , mL vaso⁻¹) de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da produtividade de grãos (P_G , g vaso⁻¹). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

4.7. Componentes de produção e produtividade

Nas Tabelas 11 e 12 estão apresentados os dados da análise estatística das cinco variáveis estudadas, com seus respectivos coeficientes de variação e resultados do teste F de Fisher-Snedecor. Médias com letras diferentes na vertical indicam diferenças significativas entre os tratamentos.

Tabela 11 - Tratamento (T), período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação) e código. Análise de variância. Soja. Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG} , g planta⁻¹), número de vagens (N_V , vagens planta⁻¹), massa de grãos (M_G , g planta⁻¹), número de grãos (N_G , grãos planta⁻¹) e massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

T	Período	Código	M_{VG}		N_V		M_G		N_G		M_{1000}	
1	V ₃ a V ₈	C100 ¹	30,9	Ba	63,4	Ca	14,7	Ba	111,1	Ba	132,9	Ba
2		V _{3/8} /75	25,2	Bb	47,3	Bb	13,7	Bb	113,8	Ba	120,2	Bab
3		V _{3/8} /50	14,5	Bc	32,9	Bc	8,3	Bc	68,7	Bb	122,5	Bab
4		V _{3/8} /25	5,6	Cd	14,7	Bd	3,3	Bd	26,3	Bc	124,0	Ab
1	R ₁ a R ₃	C100 ¹	30,9	Ba	75,4	Ba	17,8	Aa	110,2	Ba	161,5	Aa
5		R _{1/3} /75	21,3	Cb	47,0	Bb	12,9	Bb	94,1	Cb	136,9	Ad
6		R _{1/3} /50	10,7	Cc	24,8	Cc	6,9	Cc	47,6	Cc	145,0	Abc
7		R _{1/3} /25	7,4	Bd	10,9	Cd	2,8	Bb	21,9	Bd	129,8	Ac
1	R ₄ a R ₈	C100 ¹	33,2	Aa	90,0	Aa	18,5	Aa	127,4	Aa	115,7	Ca
8		R _{4/8} /75	29,0	Ab	66,8	Ab	15,3	Ab	138,4	Ab	110,6	Bab
9		R _{4/8} /50	22,6	Ac	60,0	Ac	11,3	Ac	125,4	Ab	101,3	Bbc
10		R _{4/8} /25	15,6	Ad	35,7	Ad	7,7	Ad	75,7	Ac	101,3	Bc

¹ Controle.

Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de LSD.

Foi observado menor número total de sementes nos tratamentos de maior intensidade da DH (Figura 21). Tal fato pode ter sido resultado do abortamento de flores e de vagens que pode ocorrer em função de seca acentuada durante a fase final de floração e formação das vagens (EMBRAPA SOJA, 2013). Assim, o estresse hídrico imposto durante o período de floração é considerado o principal fator de aumento do abortamento. Estudos indicaram que o *deficit* de água na pré-antese afeta negativamente a fecundação dos óvulos, ocasionando maior abortamento de flores (BRANCHI et al., 2006).

Esta diminuição pode ter sido em função do estresse hídrico poder levar à redução no peso do grão durante o período de enchimento de grãos da soja (DESCLAUX et al., 2000). Tal fato se deve ao decréscimo do suprimento de fotoassimilados pela planta e/ou inibição do metabolismo do grão (SALINAS et al., 1996). Pode ocorrer também redução no rendimento pela menor atividade fotossintética da folha e menor remobilização de C e N para o grão (SOUZA et al., 1997).

A ocorrência de deficiência hídrica severa durante o ciclo total das plantas de soja influenciou significativamente no crescimento e quantidade de grãos por planta (GAVA, 2014), o que resultou queda de produtividade, corroborando com dados publicados por Confalone et al. (1998).

Tabela 12 - Tratamento (T), período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação) e código. Análise de variância. Soja. Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG} , g planta⁻¹), número de vagens (N_V , vagens planta⁻¹), massa de grãos (M_G , g planta⁻¹), número de grãos (N_G , grãos planta⁻¹) e massa de mil sementes (M_{1000} , g) Safra 2019/2020. Experimento 2.

T	Período	Código	Trat	M_{VG}		N_V		M_G		N_G		M_{1000}	
1		C100 ¹	100	40,6	Aa	110,4	Aa	19,6	Aa	177,4	Aa	110,6	Bb
2	V ₃ a V ₈	V _{3/8} /75	75	31,6	Ab	94,4	Ab	16,5	Ab	148,4	Ab	111,3	Bb
3		V _{3/8} /50	50	24,2	Bc	63,4	Ac	11,5	Bc	107,1	Cc	121,4	Ba
4		V _{3/8} /25	25	22,8	Ad	53,4	Ad	11,5	Bd	149,0	Cd	124,3	Ba
1		C100 ¹	100	34,5	Ba	93,4	Ba	18,3	Ba	149,0	Ca	123,3	Ab
5	R ₁ a R ₃	R _{1/3} /75	75	28,9	Bb	63,4	Bb	16,1	Ab	122,0	Cb	132,1	Ab
6		R _{1/3} /50	50	25,9	Ac	55,4	Cc	14,9	Ac	112,0	Bc	132,7	Ab
7		R _{1/3} /25	25	21,9	Ad	49,4	Dd	13,3	Ad	93,0	Ad	143,2	Aa
1		C100 ¹	100	34,5	Ba	89,4	Ca	18,5	Ba	159,0	Ba	116,2	Aba
8	R ₄ a R ₈	R _{4/8} /75	75	25,9	Ab	59,4	Bb	13,3	Bb	125,0	Ab	110,9	Bab
9		R _{4/8} /50	50	25,9	Ac	59,4	Bc	13,3	Bc	125,0	Ac	106,3	Cbc
10		R _{4/8} /25	25	21,9	Ad	35,4	Cd	7,4	Cd	75,0	Bd	99,3	Cc

¹ Controle.

Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de LSD.

A deficiência severa aplicada na fase de enchimento de grãos (tratamento R₄/25) resultou grãos de menor qualidade e mais leves como pode ser observado nas Tabelas 13 e 14.

Gava (2014) observou que os danos à produção de vagens foram maiores quando os *deficits* foram aplicados no ciclo total, porém, a ocorrência de *deficit* severo apenas no subperíodo do florescimento tem o mesmo efeito, que pode ser explicado pelo abortamento de flores nessa fase, assim como encontrado por Cunha et al. (2013), que concluíram que o efeito significativo do manejo diferenciado sobre o número de grãos por vagem pode ser explicado pela ocorrência de *deficit* hídrico na floração, em tratamentos que receberam 60 e 40% menos água. Para Jadoski et al. (2003), a redução na produtividade de grãos do feijoeiro pela ocorrência de deficiência hídrica durante o período reprodutivo é ocasionada pela alta taxa de abortamento de óvulos o que, sem dúvida, reduz o número de grãos por vagem.

O número de vagens por planta foi prejudicado pela ocorrência de *deficit* hídrico (Figura 21B), corroborando com Casagrande (2001) que concluiu que os dois períodos mais sensíveis da soja à DH são germinação e enchimento de grãos, porque envolvem diretamente a formação dos componentes de produtividade.

Figura 21 – Componentes de produção de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função dos estádio fenológicos: (A) massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG} , g planta⁻¹); (B) número de vagens (N_V , vagens planta⁻¹); (C) massa de grãos (M_G , g planta⁻¹); (D) número de grãos (N_G , grãos planta⁻¹); e (E) massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

As Figuras 22 e 23 ilustram a relação funcional quadrática ($y = a.x^2 + b.x + c$) entre os componentes de produção (massa de matéria seca com vagens e grãos, número de vagens, massa de grãos, número de grãos e massa de mil sementes) (variável dependente y) em plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) e a disponibilidade de água no solo (variável independente x - (tratamentos de 25, 50, 75 e 100% da reposição da ETc), respectivamente, nas Safras 2018/2019 (experimento 1) e 2019/2020 (experimento 2).

Figura 22 – Modelo quadrático referente à variação dos componentes de produção de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da disponibilidade de água no solo (25, 50, 75 e 100% da ETc): (A) massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG}, g planta⁻¹); (B) número de vagens (N_V, vagens planta⁻¹); (C) massa de grãos (M_G, g planta⁻¹); (D) número de grãos (N_G, grãos planta⁻¹); e (E) massa de mil sementes (M₁₀₀₀, g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Tabela 13 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R^2) e parâmetros empíricos (a, b, c) correspondentes ao modelo quadrático ($y = a.x^2 + b.x + c$) referente à variação dos componentes de produção (y) de plantas de soja em função da disponibilidade de água no solo (x): Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{vg} , g planta⁻¹), número de vagens (N_v , vagens planta⁻¹), massa de grãos (MG , g planta⁻¹), número de grãos (NG , grãos planta⁻¹), e massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Período	Parâmetros empíricos do modelo quadrático			R ²
	a	b	c	
M _{vg}				
V ₃ a V ₆	-0,0013	0,3982	6,0400	0,99
R ₁ a R ₃	0,0025	0,0101	5,1238	0,99
R ₄ a R ₈	-0,0013	0,5100	-6,7126	0,98
N _v				
V ₃ a V ₆	-0,0008	0,7487	-3,25	0,99
R ₁ a R ₃	0,0058	0,1358	3,75	0,99
R ₄ a R ₈	-0,0003	0,7140	20,028	0,96
MG				
V ₃ a V ₆	-0,0016	0,3599	-4,9629	0,98
R ₁ a R ₃	-0,0004	0,1585	-1,5177	0,99
R ₄ a R ₈	-0,0003	0,1838	2,9625	0,99
NG				
V ₃ a V ₆	-0,018	3,4478	-51,139	0,97
R ₁ a R ₃	-0,0038	1,724	-21389	0,97
R ₄ a R ₈	-0,0244	3,726	-1,8056	0,99
M ₁₀₀₀				
V ₃ a V ₆	0,0059	-0,6379	136,62	0,92
R ₁ a R ₃	0,0038	-0,1096	132,02	0,73
R ₄ a R ₈	0,0171	-1,4994	124,52	0,99

Figura 23 - Modelo quadrático referente à variação dos componentes de produção de plantas de soja (cultivar Monsoy-5917-Ipro) em função da disponibilidade de água no solo (25, 50, 75 e 100% da ETc): (A) massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{VG} , g planta⁻¹); (B) número de vagens (N_v , vagens planta⁻¹); (C) massa de grãos (MG , g planta⁻¹); (D) número de grãos (NG , grãos planta⁻¹); e (E) massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 2.

Tabela 14 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R^2) e parâmetros empíricos (a, b, c) correspondentes ao modelo quadrático ($y = a.x^2 + b.x + c$) referente à variação dos componentes de produção (y) de plantas de soja em função da disponibilidade de água no solo (x): Massa de matéria seca com vagens e grãos (M_{vg} , g planta⁻¹), número de vagens (N_v , vagens planta⁻¹), massa de grãos (MG , g planta⁻¹), número de grãos (NG , grãos planta⁻¹), e massa de mil sementes (M_{1000} , g). Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 2.

Período	Parâmetros empíricos do modelo quadrático			R ²
	a	b	c	
M _{vg}				
V ₃ a V ₆	0,0022	0,0545	22,519	0,99
R ₁ a R ₃	0,0006	0,0825	19,62	0,99
R ₄ a R ₈	-0,0029	0,5822	3,040	0,97
N _v				
V ₃ a V ₆	0,0018	0,5724	36,5	0,98
R ₁ a R ₃	0,0096	-0,64	60,444	0,98
R ₄ a R ₈	-0,0004	0,726	19,194	0,96
MG				
V ₃ a V ₆	0,0016	0,685	12,295	0,99
R ₁ a R ₃	0,0002	0,0351	12,305	0,99
R ₄ a R ₈	-0,0011	0,2758	1,4625	0,98
NG				
V ₃ a V ₆	0,0046	0,6344	71,75	0,98
R ₁ a R ₃	0,0032	0,312	84,50	0,98
R ₄ a R ₈	-0,0116	2,510	21,75	0,97
M ₁₀₀₀				
V ₃ a V ₆	0,0076	-1,0666	148,25	0,62
R ₁ a R ₃	0,0003	-0,2833	148,66	0,92
R ₄ a R ₈	-0,0008	0,3261	91,601	0,99

4.8. Correlação entre a evapotranspiração e a produtividade de soja em diferentes condições edafoclimáticas

Na Figura 24, pode ser observada a correção entre ETr e produtividade de grãos de soja e apesar de existir a tendência da correlação entre o consumo de água real de soja e sua produtividade, a dispersão dos dados é muito grande ($R^2 = 0,402$). Comparando-se os dados com uma ETr de 400 mm, a produtividade variou entre 2,5 e 5,2 t ha⁻¹), indicando que não apenas a

disponibilidade de água foi responsável por esta variabilidade, devido a outros fatores, como por exemplo disponibilidade de nutrientes, controle de pragas e doenças, adaptabilidade do cultivar a região e até mesmo o efeito do ambiente de condução dos experimentos, pois alguns foram conduzidos a campo e outros em ambiente protegido, para possibilitar maior controle da disponibilidade hídrica.

Figura 24 - Correlação entre a evapotranspiração real (ETr, mm) e a produtividade de soja (P, t ha⁻¹) em diferentes condições edafoclimáticas (IRMAK et al., 2014; GAVA, 2014; LOURENÇO, 2020 - Comparação efetuado neste trabalho, SHARDA et al., 2019; ÁVILA, 2016; ADEBOYE, 2013; BATISTA, 2017).

Na Figura 25, pode ser observada a correlação dos trabalhos individualmente, onde as plantas de soja foi submetida à mesma condição edafoclimática.

Figura 25 - Correlação entre produtividade (P, t ha⁻¹) e evapotranspiração real (ETr, mm) de plantas de soja em diferentes condições edafoclimáticas (IRMAK et al., 2014; GAVA, 2014; LOURENÇO, 2020 - Comparação efetuado neste trabalho, SHARDA et al., 2019; ÁVILA, 2016; ADEBOYE, 2013; BATISTA, 2017).

A Tabela 15 apresenta a correlação entre produtividade (P , $t\ ha^{-1}$) e evapotranspiração real (E_{Tr} , mm) das plantas de soja em diferentes condições edafoclimáticas (IRMAK et al., 2014; GAVA, 2014; LOURENÇO, 2020, SHARDA et al., 2019; ÁVILA, 2016; ADEBOYE, 2013; BATISTA, 2017).

Tabela 15 - Correlação entre produtividade (P , $t\ ha^{-1}$) e evapotranspiração real (E_{Tr} , mm) da cultura de soja em diferentes condições edafoclimáticas (IRMAK et al., 2014; GAVA, 2014; LOURENÇO, 2020, SHARDA et al., 2019; ÁVILA, 2016; ADEBOYE, 2013; BATISTA, 2017).

Autor	Parâmetros da equação de regressão			R^2
	a	b	c	
Irmak et al. (2014)	-0,00010	0,1118	-25,181	0,81
Gava (2014)	-0,00001	0,0111	-0,2173	0,95
Lourenço ¹ (2020)	0,00007	-0,0197	1,9000	0,97
Sharda et al. (2019)	-0,00002	0,0177	1,6100	0,99
Ávila (2016)	0,00009	-0,0343	6,0800	0,97
Adeboye (2013)	0,00002	0,0065	0,3236	0,68
Batista (2017)	0,00005	-0,0009	0,4595	0,91

¹ Comparação efetuada neste trabalho.

4.9 Condicionamento climático da produtividade de soja

A utilização de modelos matemáticos para a estimativa da produção de soja é amplamente utilizado, pois apresenta boa confiabilidade, para diferentes condições edafoclimáticas, por meio de relações que expressa a eficiência da cultura em converter energia solar em produção de matéria seca e em produção comercializável, permitindo a quantificação de potencial produtivo de diferentes áreas, indicando as mais apropriadas para a produção de determinada cultura, servindo também para estimativa da produtividade real e da quebra de produtividade (MARIN et al., 2000).

Doorenbos e Kassam (1994) descreveram a metodologia conhecida por zona agroecológica, para estimativa do rendimento máximo (produtividade potencial) de uma cultura. Entende-se por rendimento máximo como sendo aquele obtido por uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao ambiente de crescimento, em condições sem limitações impostas nem por falta de água e de nutrientes e nem por ocorrência de pragas e doenças.

Quando uma cultura é submetida a deficiência hídrica, ocorre o fechamento parcial ou total dos estômatos, reduzindo a taxa fotossintética, o que afeta o crescimento e a produtividade de uma cultura. Em geral, as culturas são mais sensíveis ao *deficit* hídrico durante a emergência, a floração e a fase inicial de frutificação, do que no período de crescimento vegetativo e a maturação.

Para evidenciar estas características é utilizado o fator de resposta da cultura (K_y) como fator corretivo para ocorrência de deficiência hídrica em épocas distintas (PEREIRA et al., 1997).

O modelo proposto por Doorembos e Kassam (1994) (Equação 10), relaciona a queda relativa de rendimento ($1-PR/PP$) com *deficit* relativo de evapotranspiração ($1-ET_r/ET_c$), sendo PR a produtividade real a ser estimada. Na cultura de soja, o K_y descrito por Doorembos e Kassam (1994) é de 0,20; 0,80 e 1,00 respectivamente para as fases de desenvolvimento vegetativo, floração e frutificação.

$$\left(1 - \frac{PR}{PP}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_c}\right) \quad (10)$$

Battisti (2013) observou que a fase de floração/enchimento de grãos para a cultura de soja, apresenta maior peso na penalização da produtividade com a ocorrência de *deficit* hídrico em relação as demais fases e também foi a que apresentou maior variação entre as variedades estudadas e, sugeriu que o K_y em soja seja separado em 4 grupos de maturação de soja (Superprecoce, precoce, média e tardia) (Tabela 16).

Tabela 16 - Coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica (K_y) para diferentes fases de desenvolvimento conforme grupos de maturação de soja (BATTISTI, 2013).

Grupo	Ciclo	K_y				
		S-V ₂	V ₂ -R ₁	R ₁ -R ₅	R ₆ -R ₈	S-R ₈
1	Superprecoce	0,05	0,20	1,00	0,05	1,25
2	Precoce	0,05	0,15	0,90	0,05	1,20
3	Médio	0,05	0,15	0,85	0,15	1,15
4	Tardio	0,05	0,30	0,75	0,15	1,05

Na Figura 26 é ilustrado o efeito do DH sobre o rendimento da soja Monsoy-5917-Ipro para três fases fenológicas desenvolvimento vegetativo, floração e frutificação, conforme o modelo descrito por Doorembos e Kassam (1994). Como pode ser observado na Figura 26, não houve diferença no coeficiente de inclinação da correlação entre $1-PR/PP^{-1}$ e $1-ET_r/ET_c^{-1}$, indicando que nesta variedade que é classificada como uma variedades de ciclo Superprecoce e precoce, o K_y proposto por Doorembos e Kassam (1994) e Battisti (2013) podem não estar relacionando a DH que ocorre no início do ciclo com a resposta da produtividade da cultura de soja, ou seja, na fase de desenvolvimento vegetativo (V₂-R₁), o K_y recomendado varia entre 0,15 e 0,20, porém em função deste trabalho (Tabela 17), principalmente referente ao fato de que as variedades de soja estão evoluindo a produtividade de forma significativa nos últimos anos e caso ocorra DH no início do desenvolvimento de soja, o índice de área foliar é prejudicado, comprometendo a produtividade,

recomendando-se elevar o k_y para 0,6 nesta fase, permanecendo inalterado os das fases seguintes, mesmo porque, cada vez mais está sendo estimulado o manejo profundo da fertilidade dos solos, proporcionando a soja explorar uma camada maior de solo, aumentando a água disponível, porém este efeito não ocorre no início do desenvolvimento da cultura, em que o sistema radicular da soja não se encontra totalmente desenvolvido.

Bianco et al. (2013), avaliando dois cultivares de soja em condições de deficiência hídrica, observaram que o estresse hídrico, tanto no período vegetativo quanto no reprodutivo resultou de maneira geral em menor número e massa seca total de sementes, bem como menor número e massa seca de vagens com sementes em R_8 .

Figura 26 - Correlação entre a queda relativa de produtividade ($1-PR/PP$) e deficiência hídrica relativa de evapotranspiração ($1-ETr/ETc$) para plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Tabela 17 - Período (estádio fenológico inicial e final de plantas de soja - cultivar Monsoy-5917-Ipro - de imposição dos tratamentos de deficiência hídrica utilizando diferentes lâminas de irrigação), coeficiente de determinação (R^2) e parâmetros empíricos (a, b) correspondentes ao modelo linear ($y = a.x + b$) referente à variação da queda relativa de produtividade ($1-PR/PP$) em função da deficiência hídrica relativa de evapotranspiração ($1-ETr/ETc$) para plantas de soja. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2018/2019. Experimento 1.

Período	Parâmetros empíricos do modelo linear		R^2
	a	b	
V_3 a V_6	1,475	0,0911	0,954
R_1 a R_3	1,899	0,0781	0,959
R_4 a R_8	2,226	-0,0124	0,997

4.10. Caracterização do consumo de água ao longo do dia em soja

A expectativa quando este trabalho foi iniciado era de que o comportamento do consumo de água das plantas de soja fosse apresentasse resposta semelhante ao comportamento da disponibilidade de radiação solar. A medida que a disponibilidade de radiação aumenta, a evapotranspiração das plantas teria um comportamento espelhado. Nas Figuras 27, 28 e 29, pode ser observado a variação da evapotranspiração momentânea e acumulada ao longo do dia, temperatura e radiação solar ao longo de 9 dias não consecutivos, escolhidos aleatoriamente durante o ciclo de desenvolvimento da soja. Foi observado que entre as 10 e 11 h, ocorre o descolamento do comportamento da evapotranspiração em relação a radiação solar e as 12 h, uma diminuição abrupta da evapotranspiração, diminuindo de forma significativamente após este pico. Como a irrigação era realizada de forma autônoma, através dos lisímetros inteligentes, não houve falta de água durante este horário.

A Figura 30 ilustra a média da evapotranspiração horária e a somatória da evapotranspiração ao longo do dia nas plantas de soja e, pode ser observado efeito citado anteriormente, com o pico da evapotranspiração ocorrendo entre 10 e 11 h da manhã e nos horários seguintes até o pôr do sol, diminuição de forma linear, não acompanhando o comportamento espelhado em relação a radiação solar (Figura 31).

Para ilustrar este comportamento, na Figura 32 é apresentada a porcentagem da quantidade de evapotranspiração diária (β_7) que ocorre antes do meio dia (AM) e, apesar de variar ao longo do tempo, a % média da evapotranspiração que ocorreu AM foi de 56%, indicando que ocorre o descolamento da evapotranspiração da cultura da soja em relação a quantidade de radiação solar, por volta das 11 h da manhã e a planta não aproveita de forma potencial toda disponibilidade de radiação solar. Este efeito pode estar associado ao fato da origem genética da soja de uma região do sudoeste da China de elevadas altitudes, com temperaturas amenas ao longo do dia. Porém indica que existe um potencial que não é explorado pelas variedades hoje existentes, mas que poderia ser explorado no futuro com variedades mais adaptadas, que tenham melhor aproveitamento da radiação solar existente e potencialize ainda mais a produção desta *commodity* de grande importância para a economia mundial.

Porém, vale lembrar que esta observação foi realizada em condições experimentais em um tratamento onde a oferta de água era irrestrita, e a necessidade de água da planta era atendida de forma autônoma pelo sistema de irrigação e, caso novas variedades de soja sejam selecionadas e disponibilizadas, o uso de irrigação e técnicas que amenizem o efeito da deficiência hídrica nas plantas de soja, deverá ser adotada para potencializar sua produtividade.

Figura 27 - Valores de evapotranspiração real (ET_r , mm h⁻¹) e evapotranspiração real acumulada (ET_r^* , mm) até à t-ésima hora [i], temperatura do ar (T , °C) e umidade relativa (UR, %) [ii], e radiação global (Q_g , W m⁻²) [iii] durante o dia aos 13 [a], 22 [b] e 60 [c] dias após a semeadura. Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1.

Figura 28 - Valores de evapotranspiração real (ET_r, mm h⁻¹) e evapotranspiração real acumulada (ET_r^{*}, mm) até à t-ésima hora [i], temperatura do ar (T, °C) e umidade relativa (UR, %) [ii], e radiação global (Q_g, W m⁻²) [iii] durante o dia aos 65 [a], 72 [b] e 82 [c] dias após a semeadura. Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1.

Figura 29 - Valores de evapotranspiração real (ET_r , mm h⁻¹) e evapotranspiração real acumulada (ET_r^* , mm) até à t-ésima hora [i], temperatura do ar (T , °C) e umidade relativa (UR, %) [ii], e radiação global (Q_g , W m⁻²) [iii] durante o dia aos 92 [a], 95 [b] e 109 [c] dias após a semeadura. Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1.

Figura 30 - Valores médios de evapotranspiração real relativa (ETr, %) e de evapotranspiração real relativa acumulada (ETr*, %) em função do tempo (t, hora do dia) durante o dia médio do ciclo de plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1.

Figura 31 - Valores médios de evapotranspiração real relativa (ETr, %) e de radiação global (Qg, W m⁻²) em função do tempo (t, hora do dia) durante o dia médio do ciclo de plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1.

A Figura 33 ilustra a evapotranspiração relativa em função do número de dias após a semeadura das plantas de soja.

Figura 32 - Evapotranspiração relativa (β , %) em função do número de dias após a semeadura (t , d) das plantas de soja: (β_7) evapotranspiração relativa durante as 3,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 7 horas (das 8 h 30 min às 15 h 30 min), e evapotranspiração relativa mediana e média durante o mesmo período ao longo do ciclo de plantas de Soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1.

Figura 33 - Evapotranspiração relativa (β , %) em função do número de dias após a semeadura (t , d) das plantas de soja: (β_7) durante as 3,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 7 horas (das 8 h 30 min às 15 h 30 min), (β_5) durante as 2,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 5 horas (das 9 h 30 min às 14 h 30 min) e (β_3) durante as 1,5 primeiras horas (antes do meio-dia) do período de 3 horas (das 10 h 30 min às 13 h 30 min) ao longo do ciclo de plantas de soja, cultivar Monsoy-5917-Ipro. Casa-de-vegetação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq). Universidade de São Paulo (USP). Safra 2019/2020. Experimento 1.

4.11. Considerações finais

Estes resultados evidenciaram a importância de quando a DH ocorre no período entre os estádios fenológicos V_3 e V_8 (fase vegetativa) em variedade precoce de soja, representando importância similar ao período entre os estádios fenológicos R_1 e R_3 (fase reprodutiva), observação essa que se destacou em relação aos trabalhos encontrados.

O período entre os estádios fenológicos R_4 a R_8 (fase reprodutiva), onde ocorre predominantemente a formação de vagens e o enchimento de grãos, apresentou neste estudo menor contribuição na produtividade final. Porém, salienta-se ainda que neste trabalho não foi avaliada a influência da DH na qualidade de sementes.

O efeito da deficiência hídrica na produção agrícola de soja precoce de alta produtividade é o principal fator que influencia a produtividade, indicando que a utilização da irrigação com fornecimento complementar de água é uma ferramenta eficaz para potencializar o desempenho da cultura, otimizando o uso da água e minimizando a influência do clima no preço da *commodity*.

5. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, conclui-se que:

(i) A deficiência hídrica reduz a produtividade de soja nas fases vegetativa e reprodutiva:

À medida que a deficiência hídrica aumenta, a produtividade de soja diminui, tanto na fase vegetativa quanto na fase reprodutiva. Em relação à testemunha (sem deficiência hídrica) (T_1), quando a deficiência hídrica relativa foi de 25 (T_2), 50 (T_3) e 75% (T_4) da ET_c , a redução da produtividade de soja foi, respectivamente, de: (a) 26, 55 e 82% (período de ocorrência da deficiência hídrica: entre os estádios fenológicos V_3 e V_8 - fase vegetativa), (b) 17, 39 e 60% (período de ocorrência da deficiência hídrica: entre os estádios fenológicos R_1 e R_6 - florescimento e formação das vagens - fase reprodutiva), e (c) 30, 63 e 85% (período de ocorrência da deficiência hídrica: entre os estádios fenológicos R_4 e R_8 - enchimento de grãos - fase reprodutiva);

(ii) A maior parte da evapotranspiração real de plantas de soja ocorre entre 8:30 h e 12:00 h

Dentro do período considerado de 7 horas (entre 8:30 h e 15:30 h), 57% da evapotranspiração real de plantas de soja ocorreu durante o período da manhã (entre 8:30 h e 12:00 h), antes dos horários mais quentes do dia. Salienta-se que foi observado um pico na evapotranspiração real entre as 10:00 h e 11:00 h; e

(iii) O aumento da deficiência hídrica diminui a eficiência do uso de água

A eficiência do uso de água (EUA) foi menor à medida que a deficiência hídrica aumentou. Foram observados os valores de EUA de 630, 830, 1.260 e 2.340 L kg⁻¹, respectivamente, nos tratamentos de 100, 75, 50 e 25% da reposição da ET_c , correspondentes à deficiência hídrica relativa de 0 (T_1), 25 (T_2), 50 (T_3) e 75% (T_4) da ET_c .

REFERÊNCIAS

- ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, BART.; ADEKALU, KENNETH K. O.; PRASAD, K. Crop water productivity and economic evaluation of drip-irrigated soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.). **Agriculture and Food Security**, v. 4, p. 10, 2015.
- ALLEN, G. R.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, p. 300. 1998
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 899-920, 2011.
- ÁVILA, V. S. Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deficitária no sul do Brasil. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- BATISTA, F. P. S. Potencial de tolerância à seca de genótipos de trigo e soja em condição de cerrado. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 180 p. 2017.
- BATTISTI, R. Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, Brazil. 188 p. 2016.
- BATTISTI, R. Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil. 2013. 261 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2013.
- BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Consumo de soja: I. Evapotranspiração estacional e ótimas condições de disponibilidade de água no solo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1., 1978, Londrina. Anais. Londrina, PR: EMBRAPA-CNPSo, p. 5358.
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657 p.
- BIANCO, L. F.; TREVIZAN, F. H.; NICOLINO FILHO, C. J.; OLIVEIRA, T. B. M.; NEIVERTH, W.; CRUSIOL, L. G. T.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Algumas características das cultivares de soja Embrapa 48 e BR 16 em diferentes regimes hídricos. JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 8, Londrina. p. 137-141. 2013.
- BRANCHI, I. H.; ROSA, A. S.; BLOCHTEIN, B. Estresse hídrico e taxa de abortos em flores de soja no Rio Grande do Sul. In: XVIII Salão de Iniciação Científica - Ciências Agrárias, 2006, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS, 2006. p. 142.
- CÂMARA, G. M. S. Fisiologia da produção de soja. In: _____. Soja & Cia. Piracicaba: EdUSP, 2009, p. 150-177.
- CAMPECHE, L. F. S. M. Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da cultura da lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia* Tan). 2002. 67 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CARVALHO, D. F.; ROCHA, H. S.; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2013.

CASAGRANDE, E. C.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; OYA, T.; PEDROSO, J.; MARTINS, P. K.; BRETON, M. C.; NEPOMUCENO, A. L. Expressão gênica diferencial durante *deficit* hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 168-184, 2001.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Oitavo levantamento da safra de grãos 2011/2012. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_05_10_08_49_52_boletim_maio_2012.pdf. Acesso em: 10 ago. 2012.

CONFALONE, A. E.; COSTA, L. C.; PEREIRA, C. R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 165-169, 1998.

CONFALONE, A.; NAVARO, M. D. Influência do “deficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.

CUNHA, G. R.; BARNI, N. A.; HAAS, J. C.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M.; PIRES, J. L. F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001. (n. Especial: Zoneamento Agrícola).

DESCLAUX, D.; HUYNH, T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 3, p. 716-722, 2000.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande, UFPB, 306 p. il. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33), 1994.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. FAO, Rome, FAO Irrigation and Drainage, Paper n. 24. 1977.

EMBRAPA SOJA. Sistemas de produção, nº1. Tecnologias de Produção de Soja. Região Central do Brasil 2004. Disponível em: www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/retencao.htm. Acesso: 23 fev. 2020.

EMBRAPA. Tecnologias de Produções de Soja - Região Central do Brasil, 2008. Londrina: Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 208 p. (Embrapa Soja, Sistema de Produções, 12).

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Physiology of crop production. New York: The Haworth Press Inc., 1984. 345 p.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília: INMET, 2009, p. 263-277.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, p. 261-278, 2009.

FIESP, 2020. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. 9º Levantamento USDA da safra 2019/20. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-soja/attachment/file-20200115141404-boletimsojajaneiro2020>: Acesso em: 20 fev. 2020.

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura de soja para a região de Dourados - MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 666-672, 2008.

FIGUEIREDO, S. L.; PIVETTA, L. G.; FANO, A.; MACHADO, F. R.; GUIMARÃES, V. F. Comportamento de genótipos de soja submetidos a déficit hídrico intenso em casa-de-vegetação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 3, p. 342-349, 2011.

FIRMANO, R. S.; KUWARA, F. A.; SOUZA, G. M. Relação entre adubação fosfatada e deficiência hídrica em soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 1967-1973, 2009.

FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, G. M. S.; SEGATELLI, C. R. Estado nutricional e produção do capim pé-de-galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, v. 66, p. 259-266, 2007.

GAVA, R. Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill.) Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. **Annual Reviews Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 519-570, 1973.

IRMAK, S.; SPECHT, J. E.; ODHIAMBO, L. O.; REES, J. M.; CASSMAN, K. G. Soybean yield, evapotranspiration, water productivity, and soil water extraction response to subsurface drip irrigation and fertirrigation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 57, n. 3, p. 729-748, 2014.

ISODA, A. Adaptive responses of soybean and cotton to water stress I. Transpiration changes in relation to stomatal area and stomatal conductance. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 8, p. 16-26, 2005.

KUSS, R. C. R. Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja. 2006. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 1-6, 2000.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E. R. (Ed.). Estresses em soja. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 45-65.

OOSTERHUIS, D.; WULLSCHLEGER, S. D. Drought tolerance and osmotic adjustment of various crops in response to water stress. **Arkansas Farm Research**, Arkansas, p. 12, 1988.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

SÁ, J. P. D.; Perfil de extração de água do solo pela cultura de soja de alta e baixa produtividade de grãos. Dissertação (Mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 59 p. 2018.

SALINAS, A. R.; ZELENER, N.; CRAVIOTTO, R. M.; BISARO, V. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica en el suelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 5, p. 331-338, 1996.

SALINET, L. Avaliação fisiológica e agrônômica de soja geneticamente modificada para maior tolerância à seca. 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; BARROS, H. B. Origem, evolução e importância econômica. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). Tecnologias de produção e usos de soja. Londrina: Mecenass, 2009.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil-magnitude, causes and possible solutions for a sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1394-1411, 2015.

SHARDA, V.; GOWDA, P. H.; MAREK, G.; KISEKKA, I.; RAY, C.; ADHIKARI, P. Simulating the impacts of irrigation levels on soybean production in Texas high plains to manage diminishing groundwater levels. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 55, n. 1, 2019.

SOUZA, P. I.; EGLI, D. B.; BRUENING, W. Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 5, p. 807-812, 1997.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia do estresse. In: _____. Fisiologia vegetal. Trad. SANTARÉM et al. São Paulo: Artmed, p. 613-641, 2006.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892- 898, 1980.