



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL



CONSTANTINO ANTÔNIO CAVALCANTE JÚNIOR

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E RENDIMENTO DE SOJA IRRIGADA E
MODELAGEM COM O AQUACROP® FAO**

Rio Largo, AL

2023

CONSTANTINO ANTÔNIO CAVALCANTE JÚNIOR

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E RENDIMENTO DE SOJA IRRIGADA E
MODELAGEM COM O AQUACROP® FAO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do *Campus* de Engenharia e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal

Orientadores:

Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra – UFRRJ

Prof. Dr. Iêdo Teodoro - UFAL

Rio Largo, AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

T693r Cavalcante Júnior, Constantino Antônio
Aspectos fisiológicos e rendimento de soja irrigada e modelagem com o AquaCrop® FAO. / Constantino Antônio Cavalcante Júnior – 2023.
153 f.; il.

Tese (Doutorado em Agronomia: Produção vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Rio Largo, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra
Coorientação: Prof. Dr. Iêdo Teodoro

Inclui bibliografia

1. Soja. 2. Irrigação. 3. Colheita – produtividade. I. Título.

CDU: 633.61

TERMO DE APROVAÇÃO

CONSTANTINO ANTÔNIO CAVALCANTE JÚNIOR

(Matrícula 2019105889)

“ASPECTOS FISIOLÓGICOS E RENDIMENTO DE SOJA IRRIGADA E MODELAGEM COM O AQUACROP® FAO”

Tese apresentada e avaliada pela banca examinadora em 22 de setembro de 2023, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) do Campus de Engenharia e Ciências Agrárias da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.



Documento assinado digitalmente
GUSTAVO BASTOS LYRA
Data: 23/04/2024 15:05:23-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra

Presidente – Orientador



Documento assinado digitalmente
IEDO TEODORO
Data: 23/04/2024 12:46:20-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Iêdo Teodoro

Coorientador



Documento assinado digitalmente
GUILHERME BASTOS LYRA
Data: 24/04/2024 13:45:56-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra

Membro Interno



Documento assinado digitalmente
IVOMBERG DOURADO MAGALHÃES
Data: 23/04/2024 22:00:41-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Ivomberg Dourado Magalhães

Membro Externo



Documento assinado digitalmente
SAMUEL SILVA
Data: 24/04/2024 11:49:07-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Samuel Silva

Membro Externo

Rio Largo, AL
Setembro de 2023

Dedico esse trabalho a Deus, por ter me concebido a vida, aos meus pais Constantino Antônio da Silva Filho e Eliane Viana Cavalcante Silva, ao meu irmão Aristides Constantino Cavalcante e minha esposa Fernanda Emanuelle Mendonça de Morais pelo amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me guiar em todos os momentos, me concedendo força, sabedoria e discernimento;

Ao meu pai, Constantino Antônio da Silva Filho por ser o exemplo de homem, a ser seguido com sua educação, humildade, honestidade, amizade e caráter. A minha mãe Eliane Viana Cavalcante Silva pelo seu incansável esforço em colaborar com o processo de formação intelectual e humano com carinho, amor e paciência;

Aos meus familiares, que sempre acreditaram em meu esforço;

Ao meu irmão Aristides Constantino Cavalcante, à minha sobrinha Melinda e ao meu sobrinho João Miguel;

A minha esposa Fernanda Emanuelle Mendonça de Moraes pelos conselhos, carinho, amor e estímulo durante toda a caminhada, nos dias mais difíceis;

Aos meus avós;

A todos que contribuíram e contribuem com a minha formação, colegas amigos e orientadores.

DEDICO!

AGRADECIMENTO

Primeiramente, a Deus, por me guiar em todos os momentos, me concedendo força, sabedoria e discernimento;

Aos meus pais Constantino Antônio da Silva Filho e Eliane Viana Cavalcante Silva, pelo carinho, amor e incentivo com o qual me educaram.

Ao meu irmão Aristides Constantino Cavalcante e a minha esposa Fernanda Emanuelle Mendonça de Moraes, pelo apoio e companheirismo.

Aos meus orientadores, professor Dr. Gustavo Bastos Lyra e professor Dr. Iêdo Teodoro, pelos ensinamentos, amizade, respeito, confiança, orientações e incentivos durante toda a graduação; ao professor Dr. Guilherme Bastos Lyra e Ricardo Araújo Ferreira Júnior, pela amizade, ensinamentos e conselhos;

Em especial ao professor Dr. José Leonaldo de Souza, pelo exemplo de docente a ser seguido, pela amizade e ensinamentos compartilhados;

Aos membros da Banca Dr. Ivomberg Dourado e Dr. Samuel Silva, pela confiança empreendida;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – PPGA, pelos conselhos e ensinamentos;

Ao secretário do PPGA, Gustavo Nepomuceno, por toda competência e disponibilidade em ajudar;

Aos colegas de laboratório e amigos: Wemerson Saulo, José Wanderson, Iêdo Peroba, Jair Quintela, Joyce Lopes, Marcos Moraes, Antônio Costa, Jonathan, Ricardo Barros, Thiago, Juliana Catonio e Jhulyanne Christiny pela convivência, amizade, contribuição e ajuda;

A todos os meus colegas e amigos de turma pela amizade, ajuda e convivência.

A CAPES, pela concessão de bolsa.

A todos os que acreditaram em mim e me ajudaram.

AGRADEÇO!

EPÍGRAFE

“Aprendemos quando resolvemos nossas dúvidas, superamos nossas incertezas,
satisfazemos nossa curiosidade”

Maria Teresa Mantoan

“ASPECTOS FISIOLÓGICOS E RENDIMENTO DE SOJA IRRIGADA E MODELAGEM COM O AQUACROP® FAO”

RESUMO

A soja é uma cultura agrícola com grande importância econômica e social para o Brasil. O presente trabalho teve por objetivo, avaliar o crescimento e produtividade da soja cultivada sob diferentes lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL e ajustar o modelo AquaCrop® FAO para estimativa de componentes de produção como: acúmulo de fitomassa total, rendimento de grãos e aspectos fisiológicos. O experimento foi conduzido entre 28 de outubro de 2020 e 01 de março de 2021 (124 dias), em uma área de 2.660 m², as sementes foram inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio, com semeadura manual e população de plantas final para cultivar M₈₆₄₄ (C₁) e M₈₃₄₉ (C₂) de 200.000 e 300.000 plantas por hectare, respectivamente. O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de frações da evapotranspiração da cultura (35, 70, 105, 140, 175 e 210% e duas cultivares de soja). As seis lâminas de irrigação constituíram as parcelas e as duas cultivares as subparcelas. Para avaliar o modelo AquaCrop® FAO foram utilizados os dados provenientes do experimento conduzido em Rio Largo com diferentes lâminas de irrigação. As variáveis de crescimento coletadas quinzenalmente foram utilizadas para ajustar os modelos: logístico de crescimento, sigmoidal, de 3 parâmetros e pico log normal, além da regressão múltipla para estimativa de fitomassa seca total e rendimento de grãos da soja. A condutância estomática média (gs) teve ajuste quadrático, com boa capacidade preditiva ($R^2 = 0,98$ e $0,96$) para as duas cultivares analisadas (M₈₆₄₄ - C₁ e M₈₃₄₉ - C₂), respectivamente. Os diferentes tratamentos em função da evapotranspiração da cultura (ETc) promoveram diferenças estatísticas significativas para: taxa de fotossíntese líquida, potencial hídrico foliar, rendimento quântico do fotossistema II, eficiência quântica efetiva e índice SPAD. O estresse hídrico provocado por excesso ou déficit resultaram em redução na condutância estomática, transpiração, fotossíntese e clorofila total das duas cultivares de soja. O modelo AquaCrop® FAO apresentou boa performance entre valores observados e simulados de umidade do solo, acúmulo de fitomassa total e rendimento de grãos, sendo indicado para auxiliar na tomada de decisão de manejo de irrigação e estratégias de cultivo da soja.

Palavras-chave: evapotranspiração; índice SPAD; fotossíntese líquida; umidade do solo.

“PHYSIOLOGICAL ASPECTS AND YIELD OF IRRIGATED SOYBEAN AND MODELING WITH AQUACROP® FAO”

ABSTRACT

Soybean is an agricultural crop with great economic and social importance for Brazil. The aim of this work was to evaluate the growth and productivity of soybean cultivated under different irrigation levels, in the region of Rio Largo, AL, and to adjust the AquaCrop® FAO model to estimate production components such as: accumulation of total phytomass, yield of grains and physiological aspects. The experiment was conducted between October 28, 2020, and March 1, 2021 (124 days), in an area of 2,660 m², the seeds were inoculated with nitrogen-fixing bacteria, with manual sowing and final plant population to cultivate M₈₆₄₄ (C₁) and M₈₃₄₉ (C₂) of 200,000 and 300,000 plants per hectare, respectively. The design used was randomized blocks with split plots and four replications. The treatments consisted of crop evapotranspiration fractions (35, 70, 105, 140, 175 and 210% and two soybean cultivars). The six irrigation levels were in the plots and the two cultivars in the subplots. To evaluate the AquaCrop® FAO model, data from the experiment carried out in Rio Largo with different levels of irrigation were used. The growth variables collected fortnightly were used to fit the models: growth logistic, sigmoidal, 3-parameter and peak log normal, in addition to multiple regression to estimate total dry matter and soybean grain yield. The average stomatal conductance (gs) had a quadratic adjustment, with good predictive capacity ($R^2 = 0.98$ and 0.96) for the two proven cultivars (M₈₆₄₄ - C₁ and M₈₃₄₉ - C₂), respectively. The different treatments as a function of crop evapotranspiration (ET_c) promoted a statistically significant difference for: net photosynthesis rate, leaf water potential, photosystem II quantum yield, effective quantum efficiency and SPAD index. Water stress caused by excess or deficit resulted in a reduction in stomatal conductance, transpiration, photosynthesis, and total chlorophyll of both soybean cultivars. The AquaCrop® FAO model showed good performance between observed and simulated values of soil moisture, total phytomass accumulation and grain yield, being indicated to assist in decision making regarding irrigation management and soybean cultivation strategies.

Keywords: evapotranspiration; SPAD index; net photosynthesis; soil moisture.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	14
LISTA DE TABELAS.....	17
APÊNDICES.....	20
SIGLAS E SÍMBOLOS.....	21
INTRODUÇÃO.....	24
OBJETIVOS.....	26
Objetivo Geral.....	26
Objetivos Específicos	26
CAPÍTULO I.....	27
1.1. REVISÃO DE LITERATURA	27
1.1.1. Aspectos Gerais e Socioeconômicos	27
1.1.2. Irrigação e Demanda Hídrica	29
1.1.2.1. Manejo de irrigação.....	30
1.1.2.2. Balanço hídrico	31
1.1.2.3. Eficiência do uso da água.....	32
1.1.3. Radiação Solar	33
1.1.4. Função de Produção.....	35
1.1.5. Ecofisiologia da soja.....	36
1.1.6. Desenvolvimento, Crescimento e Componentes de Produção da Cultura da Soja	39
1.1.7. Modelagem na Agricultura	42
1.1.7.1. AquaCrop®	44
1.2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
CAPÍTULO II.....	66
ASPECTOS FISIOLÓGICOS E PRODUTIVOS DE CULTIVARES DE SOJA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO	66
RESUMO	66

ABSTRACT	67
2.1. INTRODUÇÃO.....	68
2.2. MATERIAL E MÉTODO	70
2.2.1. Descrição da Área Experimental	70
2.2.2. Delineamento Estatístico, Tratamentos e Plantio	71
2.2.3. Manejo da Irrigação	72
2.2.4. Estimativa da Água no Solo.....	73
2.2.5. Componentes de Produção.....	73
2.2.6. Avaliações Fisiológicas	74
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
2.3.1. Variáveis Meteorológicas	77
2.3.2. Variáveis Fisiológicas.....	77
2.3.3. Componentes de Produção.....	86
2.4. CONCLUSÕES	90
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
CAPÍTULO III	96
MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE SOJA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO.....	96
RESUMO	96
ABSTRACT	97
3.1. INTRODUÇÃO.....	98
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	99
3.2.1. Características da Área Experimental.....	99
3.2.2. Delineamento Experimental, Tratamentos e Plantio	100
3.2.3. Manejo dos Lâminas de irrigação	101
3.2.4. Medida da Umidade do Solo com o TDR.....	102
3.2.5. Modelagem e Dados Biométricos.....	103

3.2.6. Análise dos Dados Simulados.....	105
3.2.7. Indicadores de Produção.....	107
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
3.4. CONCLUSÕES.....	123
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
CAPÍTULO IV	128
DESEMPENHO DO MODELO <i>AQUACROP</i> [®] FAO PARA CULTIVO DE SOJA EM ALAGOAS.....	128
RESUMO	128
ABSTRACT	129
4.1. INTRODUÇÃO.....	130
4.2. MATERIAL E MÉTODO.....	132
4.2.1. Experimento para Avaliação do Modelo <i>AquaCrop</i> [®]	132
4.2.1.1. Descrição da área experimental.....	132
4.2.1.2. Delineamento experimental e Manejo agrícola.....	132
4.2.2. Avaliação do Modelo <i>AquaCrop</i> [®]	134
4.2.3. Descrição do Modelo <i>AquaCrop</i> [®]	135
4.2.3.1. Parâmetros climáticos	135
4.2.3.2. Parâmetros de solo	135
4.2.4. Parâmetros Fenológicos e de Crescimento da Cultura	137
4.2.5. Performance do Modelo <i>AquaCrop</i> [®]	139
4.2.5.1. Análise dos dados modelados	139
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	142
4.4. CONCLUSÃO.....	148
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.1.** Análise de crescimento em função da quantidade de radiação interceptada por uma cultura.....34
- Figura 1.2.** Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera.....46

CAPÍTULO II

- Figura 2.1.** Curva de resposta à luz em cultivares de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro a março de 2021..... 75
- Figura 2.2.** Variação da temperatura do ar mínima - Tn, média - Tm e máxima - Tx (°C) durante o cultivo de soja, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.....77
- Figura 2.3.** a) Condutância estomática (gs), b) transpiração (E), c) fotossíntese (A) e d) Clorofila *total* (Chl *total*), de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....81
- Figura 2.4.** a) Potencial hídrico da folha ao amanhecer ($\Psi_{w4:30}$) e b) ao meio-dia ($\Psi_{w12:00}$) de cultivares de soja submetida a diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....83
- Figura 2.5.** a) Rendimento quântico potencial do fotossistema II (Fv/Fm), b) eficiência quântica do fotossistema II (ϕ_{PSII}) e c) conteúdo estimado de clorofila (SPAD) de cultivares de soja submetida a diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....85
- Figura 2.6.** a) Número de vagem por planta (NVP), b) número de grãos por planta (NGP) e c) massa seca de grãos por planta (MSGP) de cultivares de soja sob diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL de outubro 2020 a março de 2021.....88
- Figura 2.7.** a) Massa seca de mil grãos (MSMG) e b) rendimento de grãos (RG) de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....90

CAPÍTULO III

- Figura 3.1.** Variação da temperatura do ar mínima - Tn, °C; média - Tm, °C; máxima - Tx, °C (a) e Umidade média relativa do ar - URmed, °C; Precipitação pluvial - P, mm; Lâminas

de irrigação - LI, mm; e Evapotranspiração da cultura - ET _c , mm, durante o cultivo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	109
Figura 3.2. Balanço hídrico para cultura da soja, com ênfase para a Capacidade de água disponível - CAD, mm; Água facilmente disponível - AFD, mm; Armazenamento de água no solo - ARM, mm, Precipitação pluvial – P, mm; e Irrigação – I, mm. Com lâminas de reposição de água em função da evapotranspiração da cultura, 35% da ET _c (190,5 mm), 70% da ET _c (287,7), 105% da ET _c (390,7), 140% da ET _c (496,5), 175% da ET _c (603,3), 210% da ET _c (709,8). V _c Folhas cotiledonares; V ₆ sexta folha trifoliada; R ₂ Florescimento pleno; R ₄ vagem desenvolvida; R ₆ Grão verde ou vagem cheia; R ₈ Maturação plena. Em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	111
Figura 3.3. Comprimento de planta – CP, m.; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, L ₁ (a), L ₂ (b), L ₃ (c), L ₄ (d), L ₅ (e), L ₆ (f), em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	113
Figura 3.4. Índice de área foliar – IAF, adm.; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, L ₁ (a), L ₂ (b), L ₃ (c), L ₄ (d), L ₅ (e), L ₆ (f), em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	116
Figura 3.5. Fitomassa seca total – FST, t ha ⁻¹ ; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, L ₁ (a), L ₂ (b), L ₃ (c), L ₄ (d), L ₅ (e), L ₆ (f), em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	118
Figura 3.6. Rendimento de grãos – RG, t ha ⁻¹ (a) e Eficiência no uso da água – EUA, mm kg ha ⁻¹ (b) de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	121
Figura 3.7. Índice de colheita – IC, adm. (a) e Fitomassa seca total – FST, t ha ⁻¹ (b) de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.....	122

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Localização da área experimental de soja submetida a diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.....	133
Figura 4.2. Conteúdo de água do solo na zona da raiz (W, mm), observado e simulado na camada de 0,0-0,40 m, Disponibilidade total de água do solo – DTA, mm cm ⁻¹ , Disponibilidade real de água do solo – DRA, mm cm ⁻¹ e Capacidade total de água no solo –	

CTA, mm na cultivar M₈₆₄₄ de soja submetida aos diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.....142

Figura 4.3. Conteúdo de água do solo na zona da raiz (W, mm), observado e simulado na camada de 0,0-0,40 m, Disponibilidade total de água do solo – DTA, mm cm⁻¹, Disponibilidade real de água do solo – DRA, mm cm⁻¹ e Capacidade total de água no solo – CTA, mm na cultivar M₈₃₄₉ de soja submetida aos diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.....144

Figura 4.4. Dados observados e simulados de fitomassa (t ha⁻¹) para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....145

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1. Fases e estádios de desenvolvimento da soja.....	28
Tabela 1.2. Comparação das principais diferenças de modelos de pesquisa e modelos aplicados.....	43

CAPÍTULO II

Tabela 2.1. Resultados da análise química do solo da área experimental, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.....	70
Tabela 2.2. Características físico-hídricas e granulométricas do solo da área experimental.	71
Tabela 2.3. Frações da Evapotranspiração da Cultura (ET_c , %) e lâminas totais de água aplicadas (precipitação pluvial total + irrigação, mm) durante o ciclo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	73
Tabela 2.4. Análise de variância das variáveis fisiológicas: Condutância estomática – g_s , Transpiração – E , Taxa de fotossíntese líquida – A , Déficit de pressão de vapor folha-ar - $DPV_{\text{folha-ar}}$ e Temperatura foliar - T_f e durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.....	78
Tabela 2.5. Análise de variância das variáveis fisiológicas: Potencial hídrico da folha ao amanhecer - $\Psi_{W4:30}$, Potencial hídrico da folha ao meio-dia - $\Psi_{W12:00}$, Rendimento quântico potencial do fotossistema II - F_v/F_m , Eficiência quântica do fotossistema II – Φ_{PSII} e <i>Soil Plant Analysis Development Section</i> – SPAD durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.....	78
Tabela 2.6. Análise de variância das variáveis fisiológicas: Teores de pigmentos fotossintéticos: Clorofila a - $Chl\ a$, Clorofila b - $Chl\ b$, Clorofila total - $Chl\ tot.$ e Carotenoides - $Carot.$, durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.....	79
Tabela 2.7. Análise de variância dos componentes de produção: Massa seca de mil grãos – MSMG, Número de vagens por planta – NVP, Número de grãos por planta – NGP, Massa seca de grãos por planta - MSGP e Rendimento de grãos - RG, durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.....	86

CAPÍTULO III

Tabela 3.1. Resultados da análise química do solo da área experimental, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.....	99
Tabela 3.2. Características físico-hídricas e granulométricas do solo da área experimental.....	100
Tabela 3.3. Frações da Evapotranspiração da Cultura (ET_c , %) e lâminas totais de água aplicadas (irrigação + precipitação pluvial, mm) durante o ciclo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	102
Tabela 3.4. Índice de confiança (c) e critérios de desempenho.....	106
Tabela 3.5. Precipitação pluvial total - P_{total} , mm; Lâminas de irrigação brutas totais aplicadas - Irrigação total - IT, m; Precipitação pluvial total mais irrigação - LT, mm; Déficit e Excesso hídrico, mm; durante o ciclo de cultivo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	110
Tabela 3.6. Comprimento de planta - CP, m; estimado pelo modelo Logístico, 3 parâmetros, para as cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	112
Tabela 3.7. Avaliação estatística de simulações (modelo Logístico, 3 parâmetros) e observações de Comprimento de planta - CP, cm; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, de outubro 2020 a março de 2021.....	114
Tabela 3.8. Índice de área foliar - IAF, adm.; estimado pelo modelo Pic Log Normal, para as cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	115
Tabela 3.9. Avaliação estatística de simulações (modelo Pic Log Normal) e observações de Índice de área foliar - IAF, adm.; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.....	116
Tabela 3.10. Fitomassa seca total - FST, $t\ ha^{-1}$; estimada pelo modelo Sigmoidal de 3 parâmetros, para as cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	117
Tabela 3.11. Avaliação estatística de simulações (modelo Sigmoidal de 3 parâmetros) e observações de Fitomassa seca total - FST, $t\ ha^{-1}$; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	119

Tabela 3.12. Análise de variância para Produtividade agrícola - PA, t ha ⁻¹ ; Índice de colheita - IC, adm.; e Eficiência no uso da água - EUA, mm; durante o cultivo de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	119
---	-----

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1. Variáveis de entrada conservativas para cultura da Soja no <i>AquaCrop</i> [®]	134
Tabela 4.2. Parâmetros físicos hídrico do solo das áreas experimentais em Rio Largo e Atalaia - AL, Ponto de murcha permanente – (PWP); Capacidade de campo – (FC); Conteúdo de água na saturação – (SAT).....	137
Tabela 4.3. Observações fenológicas e variáveis específicas para o modelo <i>AquaCrop</i> [®] com a cultura da Soja, cultivada em Rio Largo, Alagoas durante a avaliação do modelo.....	138
Tabela 4.4. Índice de confiança (c) e critérios de desempenho.....	140
Tabela 4.5. Avaliação estatística de simulações e observações da fitomassa seca pelo modelo <i>AquaCrop/FAO</i> [®] , utilizando os índices de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	146
Tabela 4.6. Avaliação estatística de simulações e observações do conteúdo de água na zona radicular pelo modelo <i>AquaCrop/FAO</i> [®] , utilizando os índices de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.....	147

APÊNDICES

Apêndice 1. Croqui do experimento.	153
--	-----

SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
A/E	Eficiência instantânea do uso da água ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$)
AFD	Água facilmente disponível
AL	Alagoas (estado brasileiro)
AP	Altura de plantas (m)
AF	Área foliar
BT	Produtividade de biomassa total (t ha^{-1})
CTC	Capacidade de troca de cátions
CC	Comprimento do caule (cm)
CECA	<i>Campus de Engenharia e Ciências Agrárias</i>
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
Ci	Concentração interna de CO_2 ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
CO ₂	Dióxido de carbono
CV	Coefficiente de variação
DAP	Dias após o plantio
DBC	Delineamento em blocos casualizados
DC	Diâmetro do caule (mm)
DEF	Déficit hídrico
DPV	Déficit de pressão de vapor
E	Taxa transpiratória ($\mu\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
ET ₀	Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})
ETC	Evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1})
E _{Tr}	Evapotranspiração real (mm dia^{-1})
EXC	Excesso hídrico
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
F _v /F _m	Rendimento quântico potencial do fotossistema II
GL	Graus de liberdade

Gs	Condutância estomática ($\mu\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
ha	Hectare (10.000 m ²)
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de colheita
IRGA	<i>Infrared gas analyzer</i>
Kc	Coeficiente da cultura
L	Nível de irrigação (% ET _C)
LIA	Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia
MO	Matéria orgânica (%)
NF	Número de folhas
NRC	Número de raízes comerciais
mm	Milímetro
PC	Produtividade de caule (t ha ⁻¹)
PEP	Fosfoenolpiruvato carboxilase
PF	Produtividade de folhas (t ha ⁻¹)
Pi	Preço da tonelada de raízes de mandioca (R\$)
PMSC	Produtividade de matéria seca do caule (t ha ⁻¹)
PMSF	Produtividade de matéria seca das folhas (t ha ⁻¹)
PMSR	Produtividade de matéria seca das raízes (t ha ⁻¹)
PMEE	Produtividade de máxima eficiência econômica (t ha ⁻¹)
PMST	Produtividade de matéria seca total (t ha ⁻¹)
PR	Produtividade de raízes (t ha ⁻¹)
PSII	Fotossistema II
PTOTAL	Precipitação pluvial total (mm)
r	Coeficiente de correlação (%)
R ²	Coeficiente de determinação (%)
RID	<i>Royal Irrigation Department</i>
SB	Soma de bases

SPAD	<i>Soil Plant Analysis Development</i>
T	Toneladas
t ha ⁻¹	Toneladas por hectare
T _f	Temperatura foliar (°C)
T _m	Temperatura do ar média (°C)
T _n	Temperatura do ar mínima (°C)
T _x	Temperatura do ar máxima (°C)
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UR	Umidade relativa do ar (%)
UR _{med}	Umidade relativa do ar média (%)
V	Saturação por bases (%)
W	Quantidade de insumo que proporciona a PMEE (mm)
X _{MÁX}	Quantidade de insumo que proporciona a produtividade máxima (mm)
Y _{MÁX}	Produtividade física máxima (t ha ⁻¹)
ΦPSII	Eficiência quântica efetiva do fotossistema II

ASPECTOS FISIOLÓGICOS E RENDIMENTO DE SOJA IRRIGADA E MODELAGEM COM O AQUACROP® FAO

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das principais culturas agrícolas de elevada importância econômica no mundo, sendo utilizada na alimentação humana e animal, fonte de bioenergia, além de ser matéria-prima industrial (BATTISTI et al., 2017; KHOJELY et al., 2018; MBANGIWA et al., 2019). Devido aos múltiplos usos, a soja é a quarta cultura mais cultivada e produzida no mundo, com 127,842 milhões de hectares e produção de 369,029 milhões de toneladas na safra 2022/23 (USDA, 2023).

No *ranking* dos países produtores de soja, o Brasil é o maior produtor mundial do grão, com produção de 154,56 milhões de toneladas colhidos em 44,06 milhões de hectares em 2023. Os maiores produtores nacionais dessa cultura são os estados de Mato Grosso (45,60 milhões de toneladas), Paraná (22,38 milhões de toneladas) e Rio Grande do Sul (13,01 milhões de toneladas), com áreas plantadas de 12,08; 5,79 e 6,55 milhões de hectares, respectivamente (CONAB, 2023). Em relação a produção de soja no Estado de Alagoas, os dados evidenciam que a introdução dessa cultura ainda é incipiente, sendo produzidas, em 2022, apenas 4.640 toneladas em 1.224 hectares cultivados (CONAB, 2022).

O crescimento exponencial da cultura da soja no Brasil está diretamente associado aos avanços científicos e tecnológicos do setor produtivo, como por exemplo, o desenvolvimento de cultivares altamente produtivas e adaptadas às diversas regiões edafoclimáticas, aos manejos de solo, irrigação, adubação, calagem, pragas e doenças, que são fatores primordiais para o avanço na produção nacional desse grão (PEREIRA et al., 2011; BORGES et al., 2015; BATTISTI et al., 2017).

Em relação às variáveis agrometeorológicas, a chuva é um dos fatores mais limitantes para a produção de soja nas diversas regiões produtoras do Brasil, visto que tanto o déficit quanto o excesso hídrico afetam diretamente o desenvolvimento e a produtividade dessa cultura agrícola (FARIAS et al., 2001). Desse modo, é de suma importância o uso de tecnologias e ferramentas adequadas para melhorar a eficiência do uso da água na agricultura, para viabilizar a produção e o aumento da produtividade (MEKONNEN et al., 2020; ADEBOYE et al., 2021). Portanto, é necessário a realização de mais pesquisas voltadas para a reposição da água evapotranspirada pela cultura e buscas para identificar o nível ideal de irrigação durante cada ciclo da cultura, assim como a escolha de cultivares

adaptadas às condições edafoclimáticas de cada região de cultivo (AAMAAS; PETERS, 2017).

A quantidade de água evapotranspirada por cada cultura agrícola pode ser obtida por medições (em campo) ou estimada por meio de modelos empíricos. A medição em campo é um método trabalhoso. Portanto, comumente é realizado a estimativa da evapotranspiração por meio de modelos matemáticos, que utilizam dados climáticos, propriedades do solo e características da cultura (PAREDES et al., 2015; ARAJI et al., 2018; ADEBOYE et al., 2019). Com isso, além de quantificar a evapotranspiração, os modelos também podem auxiliar na mitigação dos impactos da escassez hídrica sobre o rendimento das culturas e no desenvolvimento de manejos de irrigação mais eficazes (HOMAYOUNFAR et al., 2014; KUMAR et al., 2014).

Dentre os modelos matemáticos utilizados na agropecuária, o AquaCrop é eficaz para simular a produtividade de culturas em regiões com déficit hídrico (LU et al., 2021). Esse modelo foi desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2021) e baseia-se na simulação da biomassa atingível e no rendimento da cultura em função da disponibilidade de água para as plantas (BATTISTI et al., 2017; ADEBOYE et al., 2021). Diante desses aspectos, cabe ressaltar que até o momento não existem estudos finalizados para avaliar os efeitos das lâminas de reposição hídrica e o desempenho do modelo AquaCrop no manejo da irrigação para a cultura da soja no Estado de Alagoas.

Diante do exposto, o presente estudo foi organizado para conhecer como as lâminas de irrigação interferem na produtividade de cultivares de soja, estruturado nos seguintes tópicos:

- Objetivos;
- Capítulo I – Revisão de Literatura;
- Capítulo II - Aspectos fisiológicos e produtivos de cultivares de soja sob diferentes lâminas irrigação;
- Capítulo III - Modelagem semiempírica do crescimento e produtividade de cultivares de soja sob diferentes lâminas de irrigação;
- Capítulo IV - Desempenho do modelo *AquaCrop*[®] FAO para cultivo de soja em Alagoas.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Avaliar o crescimento e a produtividade da soja cultivada sob diferentes lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL e ajustar o modelo AquaCrop® FAO para estimativa do acúmulo de fitomassa total, rendimento de grãos, conteúdo de água no solo na zona radicular e aspectos fisiológicos das plantas.

Objetivos Específicos

- Quantificar as trocas gasosas: condutância estomática, transpiração, taxa de fotossíntese líquida, déficit de pressão de vapor, na relação folha e ar, temperatura foliar, potencial hídrico da folha ao amanhecer e ao meio-dia;
- Mensurar o Rendimento quântico potencial do fotossistema II e a eficiência quântica do fotossistema II da soja em função de diferentes lâminas de irrigação;
- Obter e interpretar o índice SPAD da soja submetida a lâminas de irrigação;
- Quantificar os teores de pigmentos fotossintéticos;
- Identificar os valores potenciais do índice de área foliar, comprimento da planta, fitomassa seca total e rendimento de grãos de cultivares de soja submetidas a diferentes lâminas de irrigação;
- Elaborar o balanço hídrico da cultura da soja para caracterizar o déficit e o excesso hídrico durante o ciclo de cultivo;
- Obter o índice de colheita e eficiência no uso da água da soja sob lâminas crescentes de irrigação;
- Comparar os resultados gerados através do modelo AquaCrop® FAO com os observados em campo, para duas cultivares de soja sob diferentes lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL.

ASPECTOS FISIOLÓGICOS E RENDIMENTO DE SOJA IRRIGADA E MODELAGEM COM O AQUACROP® FAO

CAPÍTULO I

1.1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1.1. Aspectos Gerais e Socioeconômicos

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) pertence à ordem *Fabales*, família *Fabaceae* (*Leguminosae*), subfamília *Faboideae* (*Papilionoideae*), gênero *Glycine* e espécie *Glycine max* (SEDIYAMA, 2009). As características anatômicas da planta de soja são: sistema radicular composto por raízes pivotante e secundárias ramificadas, formato axial. Os tipos de crescimento podem ser: indeterminado (sem racemo terminal), determinado (com racemo terminal) ou semideterminado (com racemo intermediário). O caule é do tipo herbáceo, ereto, revestido de pelos, com altura variando de 5 a 150 cm. As folhas podem ser cotiledonares, simples ou trifolioladas, porém, geralmente, são do tipo alternadas, com pecíolos grandes, variando entre 7 e 15 cm de comprimento. As flores apresentam fecundação autógama, de cores branca, roxa ou intermediária. As plantas de soja produzem vagens contendo de uma a cinco sementes lisas, elípticas ou globosas (ZANON et al., 2016).

O ciclo anual das variedades de soja adaptadas às condições edafoclimáticas das diferentes regiões do Brasil varia entre 90 e 150 dias (SEDIYAMA, 2009). De acordo com Allen et al. (1998), a soja apresenta quatro fases de crescimento: (I) fase inicial, começando no plantio até atingir cerca de 10% da cobertura do solo; (II) fase de desenvolvimento, até o início da floração; (III) fase média, que corresponde até o início da maturação (enchimento dos grãos) e (IV) fase final, que vai até a colheita. No entanto, a descrição das fases de desenvolvimento mais utilizada no mundo é a proposta por Fehr e Caviness (1977) que classificam as fases de crescimento da soja em estádios. Assim como para os estádios vegetativos ($V_E, V_C, V_1, V_2... V_n$), Fehr e Caviness (1977) também classificaram em estádios reprodutivos ($R_1, R_2... R_8$) da soja (Tabela 1.1). Observa-se que o ponto de maturação fisiológica da soja corresponde ao estágio reprodutivo R_7 . Nesse sentido, Ritchie et al. (1982), elaboram uma nova classificação fenológica baseada no proposto por Fehr e Caviness (1977).

Tabela 1.1. Fases e estádios de desenvolvimento da soja.

Fase	Estádio	Definição	Descrição de cada estágio
Vegetativa	V _E	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
	V _C	Cotilédone	Cotilédones completamente abertos
	V ₁	Primeiro nó	Folhas unifolioladas, desenvolvidas
	V ₂	Segundo nó	Primeira folha trifoliolada, desenvolvida
	V ₃	Terceiro nó	Segunda folha trifoliolada, desenvolvida
	V _n	Enésimo nó	Enésima folha trifoliolada, desenvolvida
Reprodutiva	R ₁	Início: florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó da haste
	R ₂	Florescimento pleno	Uma flor aberta nos últimos nós da haste
	R ₃	Início: formação vagem	Início da formação de vagens
	R ₄	Vagem desenvolvida	Plena formação das vagens
	R ₅	Início: enchimento grão	Início do enchimento dos grãos
	R ₆	Grão verde vagem cheia	Uma vagem contendo grãos verdes
	R ₇	Início: maturação	Vagem na haste principal (cor amarela)
	R ₈	Maturação plena	95% das vagens maduras

Fonte: Adaptado de Fehr e Caviness (1977).

A soja é a oleaginosa mais produzida e consumida no mundo, descoberta há aproximadamente 5.000 anos na costa leste da Ásia (FARIAS et al., 2007), até o final do século XIX, a produção de soja em larga escala ocorria apenas na China e Japão. Em seguida, houve a expansão para diversas regiões do planeta. Na Europa, a soja foi introduzida por volta de 1739 e nos Estados Unidos em 1765, inicialmente como forragem para a alimentação animal e, posteriormente, usada em estudos científicos. No entanto, só a partir do início do século XX, foi que começou o cultivo comercial dessa cultura, com rápida expansão na produção (DALL "AGNOL et al., 2007).

No Brasil, a soja foi introduzida em 1882, primeiramente no estado da Bahia, posteriormente, em 1891, foi implantada em São Paulo e por volta de 1914 no estado do Rio Grande do Sul. Porém, apenas no final da década de 1960 é que foram realizados os primeiros plantios comerciais, inicialmente na região Sul do país como alternativa para cultura de verão em sucessão ao trigo (BROWN et al., 2005).

As condições edafoclimáticas da região Sul do Brasil favoreceram o desenvolvimento da soja, onde rapidamente se tornou um dos principais cultivos da região (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). No entanto, devido aos múltiplos usos da soja, houve aumento gradual nos investimentos por parte do governo brasileiro em pesquisas e programas de políticas públicas para melhorar geneticamente a soja, visando sua adaptação as condições climáticas das demais regiões do Brasil (BROWN et al., 2005; DALL"AGNOL et al., 2007).

Como falado anteriormente, devido a rápida adaptabilidade da soja aos diversos climas das regiões brasileiras e sua grande importância econômica para o país, os rendimentos e a expansão de terras cultivadas, principalmente nos biomas Amazônia e Cerrado, aumentaram exponencialmente nas últimas décadas no Brasil, tornando o país um dos maiores produtores mundiais de soja (MORTON et al., 2016; BATTISTI et al., 2017). Ressalta-se também que, no mercado de grãos, a soja é a *commodity* com maior lucro agregado, sendo uma das principais fontes de receitas e geração de empregos direto e indiretamente no Brasil (ARAÚJO; FERNANDES, 2017). Portanto, a produção e exportação da cultura da soja, possui expressiva participação para o agronegócio brasileiro (CONAB, 2021).

1.1.2. Irrigação e Demanda Hídrica

A soja apresenta sensibilidade ao estresse hídrico (déficit ou excesso), causa principal de redução de produtividade desse grão, visto que a água constitui cerca de 90% do peso da cultura de soja (SILVA et al., 2020). Nesse sentido, um estudo desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013), constatou que tanto o excesso quanto a deficiência de água durante a fase de germinação-emergência da soja prejudicam a uniformidade de população de plantas, e conseqüentemente, a produção e produtividade.

O conhecimento da demanda hídrica da soja em cada estágio de crescimento são fundamentais para compreender melhor os efeitos da deficiência hídrica sobre a cultura, que permitirá reduzir os danos causados pela restrição de água nos estádios mais críticos para a produção (FARIAS et al., 2001). Durante a fase de plantio da soja, para que ocorra uma boa germinação, a semente precisa absorver a quantidade mínima equivalente a 50% do seu peso em água. Portanto, o nível de água no solo deve ficar entre 50 e 85% do total de água disponível (RUVIARO et al., 2011).

A medida em que a planta de soja se desenvolve a necessidade hídrica aumenta, até atingir o máximo de 7 - 8 mm ao dia, durante as fases de floração e enchimento dos grãos e decresce após estas fases (EMBRAPA, 2013). A deficiência hídrica associada a temperaturas elevadas, causa a antecipação do florescimento e abortamento de flores, que conseqüentemente reduz substancialmente a produtividade da cultura (SARTORI et al., 2015).

Nas fases de floração e enchimento dos grãos da soja, o déficit hídrico provoca alterações na fisiologia da planta, ocasionando a perda prematura de folhas e flores, assim como o abortamento de vagens (SARTORI et al., 2016). Durante o ciclo da cultura, para que

a soja apresente desenvolvimento e rendimento máximos, a quantidade de água necessária varia entre 450 e 850 mm dependendo da variedade e das condições climáticas da região de cultivo (FRANKE; DORFMAN, 2000).

O estresse hídrico prolongado na fase de desenvolvimento da soja, pode comprometer a germinação de sementes, fechamento de folíolos, folhas pequenas, entrenós curtos, diminuição do número de vagens, vagens vazias, redução acentuada na fixação simbiótica de nitrogênio atmosférico e baixa produção de fitomassa, com reflexo na produção e produtividade de grãos (FARIAS et al., 2001, 2007; RUVIARO et al., 2011; SARTORI et al., 2015; SILVA et al., 2020).

1.1.2.1. Manejo de irrigação

Nas regiões que não ocorrem irregularidades na distribuição e volume de chuvas, a produtividade da soja é mais uniforme e não ocorrem perdas significativas entre as safras (FARIAS et al., 2007). Farias et al. (2001) realizaram a caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil e esses autores delimitaram as regiões com os menores e maiores riscos de fracasso de produção, em função da ocorrência de deficiência hídrica nas fases mais críticas do cultivo de soja.

Nesse contexto, o manejo da irrigação surge como uma das principais tecnologias para assegurar a produção de soja e/ou o aumento da produtividade desse grão nas regiões com déficit hídrico (SILVA et al., 2020). Porém, o mal planejamento do manejo da irrigação tem sido um grande problema ambiental e econômico, porque pode consumir água e energia em excesso durante os cultivos (LIANG et al., 2016).

A irrigação deve ser usada para atender à demanda hídrica das culturas de forma planejada e sustentável, sendo que nas regiões que possuem volume significativo de chuvas, o processo de planejamento para o uso da irrigação deve levar em consideração o período das chuvas e a quantidade em cada fase da cultura, além de analisar séries históricas de dados climáticos, como por exemplo, temperatura e umidade para ter ideia do potencial agrometeorológico da localidade (BATTISTI et al., 2018).

A soja consegue se recuperar melhor do que outras culturas quando a deficiência hídrica acontece nas primeiras fases de desenvolvimento vegetativo, em função do sistema radicular profundo e período de florescimento mais tardio (DOSS; THURLOW, 1974; FARIAS et al., 2001). Porém, todo e qualquer atraso no desenvolvimento causa perdas de produtividade agrícola. Dessa forma, nos grandes centros produtores desse grão, apesar da

quantidade de chuva ser suficiente para assegurar a produção, a irrigação vem sendo adotada para evitar perdas de produtividade, utilizando irrigação suplementar nas fases mais críticas da cultura, assim como nos períodos que ocorrem a deficiência hídrica, provocada pelos veranicos (JUSTINO et al., 2019).

Sartori et al. (2016) constataram que a irrigação suplementar com 55 mm aplicada durante a fase de desenvolvimento V₄ (segunda folha trifoliolada, desenvolvida), das plantas de soja, resultou em aumento da área superficial e do volume de raízes, quando a umidade do solo, sem irrigação, atinge valores abaixo de 60% da capacidade de campo.

Em outro estudo, Sartori et al. (2015) no Estado do Rio Grande do Sul, na região de Santa Maria e Formigueiro, avaliaram o rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície e observaram que a irrigação suplementar realizada quando o solo apresenta umidade abaixo de 60% da capacidade de campo aumenta o rendimento de grãos em 10%. Similarmente, Silva et al. (2020) estimaram a produtividade de soja em sequeiro e usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado e confirmaram que a irrigação promoveu aumento de produtividade dos grãos em todas as áreas avaliadas, com incremento de 20,03%, 32,09%, 84,67% e 21,60%, nos municípios de Rio Verde - GO, Cristalina – GO, Barreiras – BA e Peixe – TO, respectivamente.

1.1.2.2. Balanço hídrico

O conhecimento da utilização de água no solo pelas plantas por meio do balanço hídrico, representa uma estratégia eficaz para aumentar a eficiência de uso da água do solo (FEITOSA et al., 2010). O balanço hídrico calcula a entrada de água no solo, por meio das chuvas ou irrigação, e as saídas, pela drenagem, evapotranspiração, escoamento superficial etc. em determinado período (SILVA et al., 2020). Desse modo, durante o período avaliado se a entrada de água for superior a saída, o saldo será positivo (excesso hídrico), se ocorrer o inverso, o saldo será negativo (déficit hídrico) (MEDEIROS et al., 2015).

Portanto, a definição do balanço hídrico de uma determinada cultura agrícola ou para uma região de cultivo é de fundamental importância. Para a cultura da soja, a disponibilidade hídrica pode causar tanto altas como baixas produtividades de grãos, dependendo do fornecimento adequado de água ao longo das diferentes fases de desenvolvimento da cultura (CUNHA et al., 1998). Nesse sentido, Farias et al. (2001) relatam que para a produtividade, o período de absorção de água pela planta, sobretudo, após o florescimento da soja, é mais crítico do que toda a quantidade absorvida durante o desenvolvimento vegetativo da cultura.

A cultura da soja apresenta duas fases críticas quanto a deficiência de água, que é da semente até emergência e durante o enchimento dos grãos. Na fase de germinação, o excesso e a falta de água causam danos negativos para o estabelecimento da cultura, sendo que nessa fase, o excesso de água causa mais limitações que o déficit (FARIAS et al., 2001). Na fase de enchimento dos grãos, a deficiência hídrica prejudica mais do que na fase de floração (DOSS; THURLOW, 1974; FARIAS et al., 2001). A fase de desenvolvimento da cultura e a demanda evaporativa da atmosfera influenciam o consumo de água pela soja. Portanto, o valor absoluto varia conforme as condições climáticas da região de cultivo e da época de semente em cada região produtora (FARIAS et al., 2007; BATTISTI et al., 2018).

Berlato et al. (1986) avaliaram a evapotranspiração da soja na região de Taquari, Rio Grande do Sul, e observaram o total de 827 mm em todo ciclo da cultura, com valor médio de 6 mm dia⁻¹, sendo o menor valor (2,7 mm dia⁻¹) no início do ciclo (fase vegetativa) e o maior (7,5 mm dia⁻¹) entre o início da floração e enchimento de grãos. Farias et al. (2001) estudaram o risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil e constataram que o total evapotranspirado varia de 550 a 800 mm para as regiões produtoras do estado do Paraná. Silva et al. (2020), no bioma Cerrado, verificaram variação de 668 a 723 mm durante todo ciclo da cultura. Na Argentina, Curto et al. (2019) observaram os maiores valores de evapotranspiração de 5,0 e 5,7 mm dia⁻¹ na fase reprodutiva da soja.

1.1.2.3. Eficiência do uso da água

A eficiência do uso da água é obtida pela relação entre ganho de produtividade (no caso da soja produção de grãos) com a lâmina de irrigação aplicada (SILVA et al., 2020). No entanto, para o uso eficiente da água pela cultura da soja, é de suma importância identificar a necessidade hídrica da planta, em cada região de cultivo, que resulta na produção máxima de grãos (FARIAS et al., 2007), visto que o consumo de água pela soja durante seu ciclo varia de 450 a 850 mm (FRANKE; DORFMAN, 2000; FARIAS et al., 2001). Porém, para os cultivos de sequeiros, pode ocorrer distribuição irregular e redução dos volumes de chuvas durante a fase vegetativa e/ou reprodutiva da soja, causando prejuízos, como redução da produtividade.

Dessa forma, mesmo em regiões com elevado índice de chuva, caso dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, que apresenta volumes totais anuais variando de 800 a 1800 mm, chuva mais que suficientes para a produção desta leguminosa, cerca de 70% do total ocorre

entre os meses de abril a agosto (SOUZA et al., 2004), sendo recomendado o plantio nessa região, durante a estação chuvosa, no entanto, ainda é indicado o uso da irrigação, pois é comum a ocorrência de veranicos. Haja vista que as principais variedades de soja, produzidas no Brasil, apresentam ciclo máximo de 150 dias (SEDIYAMA, 2009).

A melhoria na eficiência no uso da água pode contribuir para diminuir os problemas causados pela escassez hídrica em algumas regiões e garantir a produção agrícola. No entanto, aumentar essa eficiência não é uma tarefa fácil, visto que requer conhecimentos interdisciplinares (SILVA et al., 2020). Porém, o aumento dessa eficiência passa por melhorias nas estruturas de irrigação já existentes, assim como gerir melhor os recursos hídricos, melhorar os métodos de irrigação e desenvolver técnicas mais eficientes de irrigação (BATTISTI et al., 2018). Pois, conforme Coelho et al. (2005), a melhoria de apenas 1% na eficiência do uso da água de irrigação em regiões de clima árido ou semiárido, representaria redução de 200 mil litros de água, por hectare ao ano.

Silva et al. (2020) verificaram aumento de 3,1% na produtividade de soja com o uso de irrigação no período reprodutivo, e a eficiência no uso da água variou de 11,7 a 14,6 kg por mm^{-1} . Esses autores ainda relatam que o aumento da eficiência do uso da água para a cultura da soja também depende de outros fatores como data de semeadura e manejo adequado da irrigação nas diferentes regiões de cultivo.

1.1.3. Radiação Solar

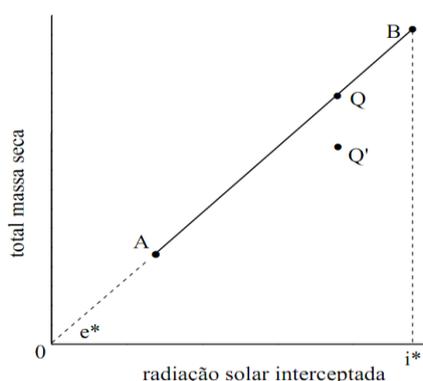
A radiação solar é a energia emitida pelo sol na forma de radiação (ondas eletromagnéticas), sendo a principal fonte de energia para o planeta, além de ser responsável pelo seu aquecimento. De acordo com Monteith (1973), a radiação solar é um fator importante para determinar o crescimento das plantas. Mas a análise de crescimento em função do tempo gera avaliações confusas devido as diferentes condições meteorológicas (SINCLAIR; MUCHOW, 1999; FERREIRA JUNIOR et al., 2014).

Costa et al. (2006), ratificam que a radiação interceptada é determinada pela radiação incidente cumulativa e pela fração interceptada. Ying et al. (1998) relatam que a radiação incidente cumulativa está relacionada à duração do crescimento, enquanto a fração interceptada depende das características morfológicas do dossel, como área foliar, ângulo e orientação das folhas. Alguns pesquisadores acreditam que aumentos adicionais na produção de soja podem ser impulsionados pelo aumento da eficiência no uso da radiação (EUA) em

vez da maior radiação interceptada (SOLTANI; SINCLAIR, 2012), mas essa hipótese não foi confirmada em programas de melhoramento de soja.

A produção de matéria seca em função da quantidade de radiação solar interceptada por um cultivo é interpretada na Figura 1.1. A menor eficiência é influenciada pela alteração da taxa fotossintética das folhas, sendo os fatores que mais atuam nesse processo: a temperatura do ar, o estresse hídrico, a concentração de nitrogênio foliar e a concentração de CO₂ atmosférico (SOLTANI; SINCLAIR, 2012; FERREIRA JUNIOR et al., 2014).

Figura 1.1. Análise de crescimento em função da quantidade de radiação interceptada por uma cultura.



Fonte: Monteith (1977).

O rendimento da colheita é calculado como o produto da biomassa e o índice de colheita (IC), e a produção de biomassa é calculada como o produto da radiação interceptada pelo dossel da colheita e eficiência no uso da radiação (EUA). Se a contribuição da fotossíntese para o crescimento da raiz for ignorada, o rendimento pode ser descrito como o produto da radiação interceptada, EUA e IC. Portanto, um aumento simultâneo na radiação interceptada e EUA pode aumentar ainda mais o rendimento (LIU et al., 2020).

Para Van Oort et al. (2020), uma maior eficiência do uso de radiação pode explicar a superprodução de algumas espécies produtoras de grãos. Gou et al. (2017), estudando o consórcio de trigo e milho verificou que a eficiência do uso de radiação do trigo foi significativamente aumentada em comparação com seu estande puro, mas esse aumento foi compensado por uma redução na EUA do milho (GOU et al., 2017). A mistura de espécies pode alterar a interceptação da radiação e a eficiência do uso da radiação das espécies componentes (VAN OORT et al., 2020). A maior ou menor adaptação das espécies às diferentes condições de radiação solar depende do ajuste de seu aparelho fotossintético, de

modo a garantir maior eficiência de uso da radiação na produção de foto assimilados, refletindo em maior produtividade de grãos (VILELA; RAVETTA, 2000).

1.1.4. Função de Produção

O conceito de produção é muito utilizado e importante para a teoria econômica em geral. A produção pode ser definida de várias formas, sendo vista normalmente como a atividade de combinação, transformação e utilização de fatores produtivos. Esses fatores produtivos são tradicionalmente: terra, mão de obra, capital e capacidade empresarial (MENDES, 2019). Conforme Alves et al. (2017), terra, trabalho e tecnologia são os fatores de produção que determinam a agricultura brasileira, e/ou mundial, sendo que fatores de produção podem ser de existência física ou não física. Dentre os fatores de existência física, podem-se citar a terra, os trabalhadores e certos tipos de tecnologias, como maquinários agrícolas, cultivares de alto rendimento, defensivos, fertilizantes e uso de irrigação. Já como fator de existência não física, tem-se o conhecimento. Porém, nos sistemas de produção, os agricultores tomam decisões baseadas no conhecimento acumulado, assim como a escolha do melhor modelo de produção e a combinação de fatores. (DUARTE; ALVES, 2016).

Na maioria dos estudos e teorias econômicas, e muitas vezes por uma questão de simplificação de análise, o conjunto dos fatores de produção é normalmente reduzido a dois de caráter genérico: Capital (que engloba, entre outros, o conjunto dos equipamentos e das máquinas utilizadas), designado por K , e Trabalho (que respeita à intervenção na produção da vertente humana), designado por L . Nesse contexto, a função de produção não é mais do que a relação que descreve a forma como os fatores produtivos são conjugados no sentido de possibilitar a produção de um determinado produto. Uma função de produção pode ser traduzida numa equação matemática que relacione a quantidade produzida (normalmente designada por Q) e as variáveis K e L (TOLEDO, 2020).

De acordo com Lyra (2007), a viabilidade de um sistema de produção baseia-se, cada vez mais, na otimização dos processos de produção. Nesse sentido, a agricultura irrigada apresenta-se como alternativa de modernização tecnológica. O autor ainda relata que essa otimização proporciona melhores produtividades e viabiliza a produção em áreas nas quais as condições pluviométricas são adversas à exploração agrícola. Almeida (2000) reforça que a utilização de um sistema de irrigação não se baseia apenas na aplicação de água, mas de um pacote tecnológico, com a inclusão de variedades apropriadas, utilização de insumos

(adubo, inseticidas, herbicida etc.) condições fitossanitárias e outras. Isso pode elevar os custos de produção, mas pode resultar em altas produtividades e retorno econômico.

A água e os fertilizantes são os fatores de produção que mais limitam os rendimentos das culturas agrícolas. Sendo assim, o controle da irrigação e da fertilidade do solo constitui o critério principal para o êxito da agricultura. A utilização de funções de produção permite encontrar soluções úteis na otimização do uso da água e dos fertilizantes na agricultura ou na previsão de rendimento das safras (FRIZZONE, 1986).

O conhecimento das funções de produção e as superfícies de resposta são os instrumentos ideais de análise porque permitem determinar as interações entre os fatores e escolher as soluções mais condizentes com a realidade local para o manejo racional da irrigação em bases técnicas e economicamente viáveis (LYRA, 2007). Para Martins (1998), na agricultura irrigada, o fator água pode ser maximizado e permitir, também, a otimização dos demais fatores de produção e obtenção de maiores produtividades.

Vivan et al. (2013) estudando o rendimento relativo da cultura da soja em função da irrigação, encontrou reduções de rendimento em função do percentual de lâmina aplicada variaram entre 25 e 45% em relação potencial máximo produtivo da cultura. Os autores ainda afirmaram que o modelo WINISAREG, desenvolvido por Teixeira e Pereira (1992), se apresentou como ferramenta promissora para a simulação do crescimento da cultura da soja, quando adequadamente alimentado pelas variáveis referentes ao sistema solo-planta-atmosfera.

1.1.5. Ecofisiologia da soja

Três fatores são essenciais para que as culturas atinjam a máxima produtividade: genético, fisiológico e ambiental. Os fatores genéticos são aqueles ligados à hereditariedade que a planta recebe de seus ancestrais, ou pela mutação (TONATTO, 2020). Os fatores fisiológicos são influenciados por fatores ambientais, como também, pela influência das condições químicas, físicas e biológicas do solo (PEIXOTO, 2011). Com tudo, Paiva et al. (2005) afirmam que o rendimento de uma cultura depende das relações solo-planta-atmosfera. Os mesmos autores ainda afirmam que a resposta mais comum das plantas às condições limitantes, como exemplo do “déficit hídrico”, é o fechamento estomático. Essas informações são ratificadas por Taiz (2017), ao acrescentar que, em decorrência do fechamento estomático ocorre a queda de folhas e abortamento de estruturas reprodutivas, ocasionando reduções significativas na produção. Para Biamchi et al. (2007) a resistência

estomática reflete bem as condições hídricas das plantas e está, diretamente, relacionada à disponibilidade de água no solo.

O decréscimo na disponibilidade de água no solo acarreta queda no potencial da água na folha, diminuindo a turgidez celular, a condutância estomática (SHALHEVET, 1993) e a transpiração (RAY; SINCLAIR, 1997; TAIZ, 2017). A redução na taxa de assimilação de CO₂ durante o déficit hídrico é imposta, em grande parte, pela diminuição da abertura estomática em resposta à redução da disponibilidade de água no solo (ROSA et al., 1991). Porém, quando o estresse é severo, a desidratação de células do mesófilo inibe a fotossíntese, o metabolismo do mesófilo é prejudicado e a eficiência do uso da água decresce (TAIZ; ZEIGER, 2013). Chaves (1991) observou que, dependendo da espécie e da intensidade da desidratação, a assimilação de carbono pode diminuir a valores próximos de zero. Por outro lado, em plantas sem restrição hídrica, a condutância estomática pode aumentar com a diminuição do potencial de água na folha, resultando de uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática aumenta (JONES, 1992; BRITO et al., 2013).

Sentelhas e Monteiro (2009) afirmam que é praticamente impossível se distinguir o vapor d'água proveniente da evaporação da água no solo e da transpiração das plantas. A evapotranspiração, que pode ser definida como um processo de perda de água para a atmosfera por meio da evaporação do solo e a transpiração das plantas simultaneamente, sendo uma variável climatológica fundamental correspondente ao processo oposto da chuva. A transpiração é aumentada de acordo com o desenvolvimento da cultura, atingindo valores máximos na fase de floração, quando as plantas cobrem totalmente o solo; a evapotranspiração apresenta comportamento semelhante, pois a transpiração é seu componente mais importante, uma vez que a evaporação do solo diminui com o desenvolvimento da cultura (SANTANA, 2007).

O conhecimento dos aspectos da Ecofisiologia e da fenologia da soja é extremamente importante para a condução da cultura em um sistema de produção. O conhecimento dos estádios fenológicos das plantas tem permitido otimizar a utilização de fertilizantes, defensivos agrícolas e especialmente do manejo da irrigação (água) (FERRAZ et al., 2012).

De acordo com Tonatto (2020), a condição climática influencia diretamente a escolha da época de semeadura (fotoperíodo, temperatura, precipitação e radiação). Quando a condição é favorável, com boa distribuição de precipitação pluvial, alta insolação, e temperaturas ótimas para o desenvolvimento da cultura, há possibilidade de obtenção de produtividades elevadas. A soja é considerada uma planta de dia curto, sendo uma das

espécies cultivadas mais sensíveis ao fotoperíodo, com implicação direta na indução floral. Para Hicks (1978), o fotoperíodo e a radiação solar absorvida têm grande influência na morfologia e no acúmulo de biomassa da cultura da soja, podendo causar uma redução no período entre a emergência das mudas e o início da floração. Quando cultivadas em áreas de baixa latitude, onde o fotoperíodo é relativamente curto, ou com semeadura tardia, ocorre floração precoce e formação de plantas baixas, com redução da área foliar e menor rendimento de grãos (FARIAS, 2011). Para que a soja apresente desenvolvimento adequado, com período de semeadura-maturação que não deprecie o rendimento de grãos, é preciso utilizar cultivares com grupo de maturação adequados para cada região de cultivo (HEATHERLY; SMITH, 2004).

A demanda hídrica da soja está na faixa de 450 a 850 mm ao longo do ciclo, sendo a emergência e o enchimento dos grãos, considerados os mais críticos. Para um bom desempenho, além do volume de água adequado, a cultura necessita de boa distribuição da chuva ao longo do ciclo produtivo (PARDO et al., 2015), dada sua baixa eficiência no uso da água (SALVESTRO et al., 2014; TEWARI; ARORA, 2016). Quando sujeita a severo déficit hídrico, principalmente durante a fase de enchimento do grão, a soja apresenta diminuição do teor de óleo e ácido oleico e aumento do teor de ácido esteárico (BELLALLOUI et al., 2013), que prejudica a qualidade das sementes.

O uso de sementes com qualidade fisiológica elevada é essencial para obtenção de produtividades elevadas (CANTARELLI et al., 2015). Pereira et al. (2015) explicam que embora as sementes atinjam a qualidade fisiológica máxima no estágio de maturação fisiológica (R₇), a colheita nessa fase é inviável em grande escala devido à alta umidade dos grãos. Em estudo realizado por Strucker et al. (2019), os autores observaram incremento de 20% no rendimento de grãos devido ao uso de sementes com potencial fisiológico elevado, independente do genótipo de soja utilizado. Para Sedyama (2015) esse incremento é ainda maior (50%), no rendimento potencial de lavouras comerciais.

A cultura da soja também é bastante sensível à temperatura e apresenta melhor desenvolvimento entre 15 e 22 °C na emergência, 20 a 25 °C na floração, e 15 a 22 °C na maturação (LIU et al., 2008). As temperaturas extremas (baixas e altas) são prejudiciais ao desenvolvimento das plantas porque afetam sua arquitetura, ciclo e rendimento de grãos (SINCLAIR et al., 2014). Hoque et al. (2015) observaram que temperaturas baixas e altas reduzem em até 50 e 55% o rendimento de grãos, respectivamente, em comparação com cultivos em temperatura adequada.

Para uma produtividade satisfatória da cultura da soja, é necessário cultivá-la em solo que apresente alta qualidade física, química e biológica. Em estudo realizado por Benjamin e Nielsen (2006), foi observado que 97% das raízes de soja estavam distribuídas nos primeiros 23 cm de solo, independentemente do sistema de cultivo utilizado (irrigado ou sequeiro) e em condição de ausência de impedimento físico. Dessa forma, isso é um indicativo de que os nutrientes exigidos pela cultura devem ser fornecidos preferivelmente nessa faixa de profundidade. Os principais macronutrientes orgânicos constituintes das plantas são carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), obtidos através das trocas gasosas e absorção de água. Já os macronutrientes minerais são nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) e são absorvidos pelas raízes, através da solução do solo. A demanda por esses nutrientes é elevada, e constituem aproximadamente 99,5% da matéria seca das plantas (NPCT, 2020; EMBRAPA, 2013).

Desse modo, quando a cultura da soja é submetida a condições ideais de fornecimento de água e nutrientes em quantidades adequadas que minimizam qualquer tipo de estresse, sejam eles bióticos ou abióticos, dentro das limitações existentes (radiação e temperatura), isenta de danos provocados por pragas, doenças e plantas daninhas, esse ambiente irá proporcionar todas as condições para que as cultivares expressem o seu potencial de rendimento, possibilitando quantificá-lo.

1.1.6. Desenvolvimento, Crescimento e Componentes de Produção da Cultura da Soja

O conhecimento sobre a fenologia da soja é importante, principalmente no tocante à abordagem entre os fatores climáticos, as mudanças sazonais e o ciclo de desenvolvimento da planta (VENTURA et al., 2009). Para Mundstock (2005), o desenvolvimento da soja pode ser dividido em dois períodos: vegetativo (designado pela letra V), que vai da sementeira à floração e reprodutiva (R), que compreende o período entre a floração e a maturação fisiológica. As letras correspondentes a cada estágio são acompanhadas por índices numéricos, que identificam estádios específicos de desenvolvimento, exceto no V_E (emergência) e estádios V_C (cotilédone). Portanto, o nó é o caule parcelado para a determinação dos estádios vegetativos, sendo o primeiro nó válido, o das folhas com um folíolo.

Quanto ao hábito de crescimento, as cultivares de soja são classificadas como: determinado, semideterminado ou indeterminado. O tipo de crescimento da cultivar é classificada conforme a presença e a posição da inflorescência racemosa (TIAN et al. 2010).

Sediyama et al. (2009) afirmam que as plantas de crescimento determinado completam seu ciclo vegetativo pouco antes da floração, assim pode-se ter uma colheita mais uniforme em relação à maturação fisiológica dos grãos.

As folhas das plantas são responsáveis pela fotossíntese e pela formação de carboidratos, alocados nos órgãos vegetativos e reprodutivos. Por isso, é imprescindível o estudo de desenvolvimento foliar para a avaliação do crescimento e do desenvolvimento das plantas (BASTOS et al., 2012).

A fotossíntese é um processo que está diretamente relacionado com a área foliar de uma planta, pois o rendimento de uma cultura será maior, quanto o mais rápido a planta atingir o índice máximo de área foliar e, sobretudo se a área foliar permanecer ativa. Desse modo, a área foliar aumenta até um nível máximo, depois se mantém constante por um tempo, e em seguida decresce, devido a um processo denominado de senescência que é a morte natural das folhas devido à idade (MAGALHÃES, 2017).

A interceptação da radiação solar está relacionada com o índice de área foliar (IAF), por funções exponenciais. O IAF é uma variável importante para o acompanhamento do crescimento das plantas, já que as folhas absorverem a radiação solar, porém as folhas próximas ao solo ficam sombreadas pelas folhas superiores e entram em senescência e caem (BOARD; HARVILLE, 1992). Com a presença de déficit hídrico durante o crescimento vegetativo, ocorre diminuição do IAF, o qual está relacionado com a redução da expansão celular. Com isso, existe uma baixa translocação de foto assimilados na planta em função da redução da fotossíntese que resulta em plantas com folhas pequenas, diâmetro do caule reduzido e plantas com baixa estatura (SEDIYAMA et al., 2015).

Floss (2004) relatam que cerca de 90% da produção biológica das plantas ocorre em resposta à atividade fotossintética. O aumento na resistência difusiva estomática pode ocasionar diminuição na fotossíntese líquida (AMARAL et al. 2006). Desse modo, a aferição das trocas gasosas constitui-se uma importante ferramenta na determinação de adaptação e estabilidade de plantas a determinados ecossistemas, devido à redução no crescimento (e a consequente diminuição na produtividade) das plantas que pode estar relacionada à redução da atividade fotossintética, limitada por fatores abióticos intrínsecos ao local de cultivo (PEIXOTO et al. 2002; PAIVA et al. 2005).

Souza (2019) estudando a influência da irrigação suplementar no desenvolvimento e produtividade de cultivares de soja em Cachoeira do Sul verificou IAF de 7,0 em tratamentos irrigados e 5,7 em tratamentos não irrigado. O IAF obtido no regime hídrico irrigado é um

indicador de alto rendimento da cultura, pois de acordo com Zanon et al. (2018), para a soja atingir altas produtividades é necessário um IAF maior que 6,3.

Soratto et al. (2006) e Urchei et al. (2000) concluíram, em seus estudos, que existe uma correlação significativa e positiva entre o acúmulo de massa seca na planta e a produção de grãos, ou seja, quanto menor for a planta, conseqüentemente, menor é sua parte aérea e menor será a sua produtividade. Sendo assim, a altura das plantas constitui uma importante variável de crescimento da cultura (ARF et al., 2004).

De acordo com Werner et al. (2016), a maioria das cultivares de soja existentes no Brasil apresentam tipo de crescimento indeterminado e com menor ramificações. A altura de 60 cm é o mínimo que a soja deve atingir na época de colheita, visto que valores inferiores, dificultam a colheita mecanizada, para não aumentar as perdas de grãos. Souza (2019) verificou altura média de plantas de soja de 62,5 cm nas cultivares NA 5909 e NS 4823 em condições irrigadas. Rocha et al. (2012) explicam que variações na altura das plantas podem ser influenciadas por época de semeadura, espaçamento entre e dentro das fileiras, suprimento de umidade, temperatura, fertilidade do solo, resposta foto periódica da cultivar e outras condições ambientais.

A relação do déficit hídrico com o desenvolvimento da soja é visualizada na lavoura com a presença de plantas de porte baixo, diâmetro do caule pequeno, folhas murchas e pequenas, entrenós curtos, redução da taxa de crescimento e da área foliar, atividade fotossintética reduzida e impactos na fixação de nitrogênio nas raízes. No período de pós-florescimento, a presença de déficit hídrico causa grandes reduções no rendimento de grãos, devido ao abortamento de flores e legumes, menor número de grãos por vagem, menor período de enchimento de grãos, diminuição da qualidade de grãos e aumento da senescência foliar (GAVA, 2015).

A perda de produtividade de grãos em função da deficiência hídrica depende diretamente da fase fenológica, duração e intensidade da escassez de água, sendo os períodos de floração e enchimento de grãos os mais exigentes em termos de necessidade hídrica, com exigência de 7 a 8 mm dia⁻¹ (GAVA, 2015). Pesquisas apontam que a formação da vagem é a fase mais sensível ao déficit hídrico na cultura da soja, acarretando perdas significativas de rendimento quando o estresse de umidade do solo se inicia na fase de formação da vagem (R₃-R₄) e na fase de enchimento de grãos (R₅-R₆) (BROWN et al., 2005; WIJewardana et al., 2018).

Battisti et al. (2018) ratifica em seu trabalho que a falta de água é um dos principais fatores para a perda de produtividade da soja no Brasil, principalmente na região Nordeste. Comparando a média geral das cultivares sob irrigação 5.280 kg ha⁻¹ (88 sacas de 60 kg) com as de sequeiro 3.000 kg ha⁻¹ (50 sacas) redução na ordem de 43%. Portanto, o fornecimento de água em quantidade adequada é fundamental para proporcionar ganhos em produtividade (TEWARI; ARORA, 2016). ZHANG et al. (2016) observaram que entre as fases reprodutivas R₂ e R₇ há uma maior demanda hídrica da soja, e utilizar irrigação nesse período pode agregar em mais de 3.000 kg ha⁻¹ no rendimento final do cultivo.

Procópio et al. (2018) avaliaram o rendimento de grãos de 8 cultivares de soja, em diferentes populações de plantas nas regiões de Sergipe, Alagoas e Bahia, e verificaram médias de: 2.370 (BRS-GISELE) e 2.203 kg ha⁻¹ (BRS-270) em São Miguel dos Campos, AL; 3.958 kg ha⁻¹ (BRSGO-8661) e 4.332 kg ha⁻¹ (BRS-9280) em Jundiá, AL; 1.783 (BRSGO-8660) e 2.169 kg ha⁻¹ (BRSGO-9160) em Campo Alegre, AL; e os maiores rendimentos de grãos foi em Frei Paulo, SE de 3.876 (BRS-279) e 3.536 kg ha⁻¹ (BRS-8781).

Cruz et al. (2009) avaliaram 3 cultivares de soja na região dos Tabuleiros Costeiros no estado de Alagoas e observaram rendimento de grãos variando de 2.620 a 3.069 kg ha⁻¹ (44 a 51 sacas ha⁻¹). Viana et al. (2013) avaliaram 5 cultivares de soja no Agreste Meridional Pernambucano e obtiveram rendimentos de grãos de 606,30 a 1.617 kg ha⁻¹. Rocha et al. (2012) estudaram 13 genótipos de soja em condições de baixa latitude em Teresina, Piauí e produziram de 1.485 a 3.585 kg ha⁻¹.

Souza (2019) verificou rendimento de grãos de 4.493 kg ha⁻¹ em cultivos irrigado e 4.158 kg ha⁻¹ em sequeiro. Montoya et al. (2017) observaram que o déficit hídrico durante as fases de aumento de vagem e enchimento de sementes afetava negativamente o rendimento final e seus componentes de produção.

É importante estudar os componentes de produção e principalmente suas relações com a produção de grãos porque esse conhecimento permite prever alterações desses componentes ao longo dos ciclos de seleção e é possível afirmar que tais componentes determinam o rendimento de grãos (OLIVEIRA et al., 2003).

1.1.7. Modelagem na Agricultura

O uso de modelos esteve presente desde os primeiros cultivos da história, sendo uma ferramenta fundamental para dar suporte a tomadas de decisões nas práticas agrícolas. Nesse período, os lavradores entendiam que ao plantar uma cultura em determinada época e modo,

seu desenvolvimento ocorreria de maneira que a colheita seria diferente das plantadas em outras épocas e modos. E isso foi sendo aprimorado pelos agricultores um modelo mental (conceitual) com o passar dos tempos, baseado nas suas próprias experiências (empírico) (CORRÊA et al., 2011).

Wit (1982) explica que modelo é a representação simplificada de um sistema, enquanto a simulação é a arte de construir modelos. Thornley e Johnson (2000) afirmam que modelos podem ser classificados de várias formas e, didaticamente divididos em modelos empíricos e mecanísticos (Tabela 1.2). Marin & Jones (2014) esclarece que modelos empíricos são relações matemáticas descritas a partir da observação do sistema, por informações biológicas ou por qualquer conhecimento da estrutura do sistema estudado. Já os modelos mecanísticos são relativamente mais complexos. Entretanto, seus conteúdos normalmente aplicam-se a uma maior gama de fenômenos e são baseados na física e nos processos fisiológicos envolvidos no crescimento da cultura. Por esse motivo oferecem respostas mais consistentes.

Tabela 1.2. Comparação das principais diferenças de modelos de pesquisa e modelos aplicados.

Características	Pesquisa	Aplicação Prática
Hipóteses	Especulativa	Bem aceito
Conexões com dados observados	Tênue (geralmente)	Bom
Precisão das previsões	Variável	Bom
Escopo/Alcance	Ampla	Limitado
Complexidade	Complexo	Simples
Modelo	Mecanístico	Empírico

Fonte: Adaptado de Thornley & Johnson, 2000

Whisler et al. (1986) ordenaram, em três categorias básicas, as razões para construção de modelos: (a) como auxílio na interpretação de resultados experimentais; (b) como ferramenta para pesquisa agrônômica e (c) como ferramenta de desenvolvimento agrônômico. De acordo com os mesmos autores, muitos modelos de cultivo ou parte deles foram construídos para ajudar o pesquisador a entender a operação do sistema agrônômico, como o fluxo de água no solo, controle de abertura e fechamento dos estômatos, movimento de nutrientes no solo e o crescimento e desenvolvimento de uma cultura.

Diversos modelos para previsão de safra das principais culturas agrícolas foram desenvolvidos baseados em processos fisiológicos e estatísticos (FRANCE; THORNLEY, 1984; COSTA, 1988; COSTA et al., 2001). Esses modelos simulam o crescimento e desenvolvimento das plantas, usando como parâmetro a fotossíntese, respiração, produção

de biomassa, produtividade de grãos e outras variáveis. Em seguida, modelos minuciosos e mais avançados foram desenvolvidos, alguns deles mais voltados à escala de plantas individuais, como CERES (JONES; KINIRY, 1986) e outros ao nível de copa, como EPIC (WILLIAMS et al., 1989), sua derivação ALMANAQUE (KINIRY et al., 1992) e o CropSyst (STOCKLE et al., 2003), que servem como ferramenta de gestão para auxiliar em tomadas de decisões.

Paredes et al. (2015), ratificam que a utilização de previsões meteorológicas em modelos de produção localmente adaptados e testados permite explorar diferentes opções de gestão, como datas de semeadura, calendarização da rega, fertilizações ou data de colheita, numa ampla faixa de condições climáticas. Porém, Choi et al. (2015) advertem que, distintas alternativas de gestão estão associadas a riscos que se refletem no rendimento da exploração agrícola. Os modelos são utilizados em diversas pesquisas para apoio à gestão e decisões, como o CERES incluído no DSSAT, utilizado por D'orgeval et al. (2010); o modelo STICS utilizado por Dumont et al. (2015); o EPIC usado por Balkovic et al. (2013); o WOFOST empregado por Cantelaube e Terres (2005), Marletto et al. (2007) e Bussay et al. (2015) e o AquaCrop® utilizado por Zinyengere et al. (2011) para previsões de safras.

Battisti et al. (2017) estudando a Inter comparação de desempenho de modelos de simulação de safra de soja e seu conjunto no Sul do Brasil, afirmam que apesar de sua abordagem simples, modelos de cultura complexos consideram mais detalhes na descrição de todos os processos de cultura, o que aumenta seus possíveis usos para avaliar o desenvolvimento e a produtividade agrícola, como o modelo CROPGRO, que integra os balanços de carbono, nitrogênio e água nos processos de crescimento para estimar a produtividade da soja (BOOTE et al., 2003). Além da FAO e CROPGRO, os modelos AQUACROP (RAES et al., 2011), APSIM (KEATING et al., 2003) e MONICA (NENDEL et al., 2011) também se destacam como modelos primários para simular crescimento, desenvolvimento e rendimentos de diferentes culturas agrícolas, incluindo soja.

1.1.7.1. AquaCrop®

O AquaCrop® (RAES et al., 2009), incorpora os conhecimentos atuais das respostas fisiológicas das culturas em uma ferramenta que pode prever a biomassa e a produtividade possível das plantas cultiváveis em resposta a água disponível. Esse modelo é destinado a uma ampla variedade de culturas herbáceas, incluindo forrageiras, hortaliças de folhas, grãos, frutas, raízes e tubérculos. De acordo com Magalhães et al. (2019), o AquaCrop® é

ideal para simulação devido a sua facilidade de calibração e poucos requisitos de entrada, mantendo um equilíbrio entre simplicidade, precisão e robustez, em comparação com outros modelos. Hsiao et al. (2009) ratificam as vantagens e amplo uso do modelo AquaCrop[®] por especialistas em extensão, gestores de recursos hídricos, economistas e especialistas em políticas públicas, por serem modelos simples empregados para planejamento e análises de cenários.

O modelo AquaCrop[®] é voltado principalmente para a simulação da biomassa e a produtividade das plantas cultivadas em resposta à água disponível (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009; ABEDINPOUR et al., 2012). Como em outros modelos, as estruturas do AquaCrop[®] no continuum solo-planta-atmosfera, apresentam o solo com o balanço hídrico, a planta com seu crescimento, desenvolvimento e processos de produção e atmosfera (chuvas, demanda evaporativa e concentração de dióxido de carbono). Além disso, alguns aspectos de manejo são explícitos, com ênfase na irrigação, níveis de fertilidade do solo afetando o desenvolvimento das culturas, produtividade de biomassa em relação ao uso da água, ajustes das culturas ao estresse hídrico e, portanto, o rendimento final. Pragas e doenças não são consideradas.

O AquaCrop[®] possui características específicas que o diferenciam de outros modelos, como por exemplo: a) a escala de tempo, na qual ela se dá para medidas de tempo diária, um período próximo para se aproximar da escala de tempo da resposta da cultura ao déficit hídrico, b) não há separação de biomassa entre os vários órgãos da planta. E, essa distinção evita lidar com a complexidade e as incertezas associadas aos processos de separação, que permanecem entre os menos entendidos e mais difíceis de modelar, c) o desenvolvimento da folhagem da cultura é expressa através da cobertura do dossel (CD) e não através do índice de área foliar (IAF), ela introduz uma simplificação significativa na simulação, consolidando o crescimento expansivo da folha, ângulo e distribuição para uma função de crescimento global, permitindo que o usuário insira os valores reais da CD; e d) o uso da produtividade de biomassa padronizada em relação ao uso da água (WP) para demanda evaporativa atmosférica e concentração de CO₂, que conferem ao modelo uma extensa capacidade de extrapolação, para diversas localidades, estações e clima, incluindo cenários climáticos futuros (STEDUTO et al., 2009).

No AquaCrop[®], a evapotranspiração da cultura (ET_c) é separada em transpiração da cultura (Tr) e evaporação da água do solo (E) para evitar confundir o efeito do uso improdutivo do consumo de água pela evaporação. A evaporação é especialmente

importante quando a cobertura do solo é incompleta e torna-se o componente principal da evapotranspiração na fase inicial do ciclo da cultura. A separação desses dois tipos de efeitos, que se diferem fundamentalmente, torna possível a introdução de ligações funcionais com base em processos fisiológicos subjacentes. A produção de biomassa é obtida diretamente a partir da transpiração da cultura real por meio de um parâmetro de produtividade da água. As equações 1 e 2 são equações principais do modelo de crescimento AquaCrop®:

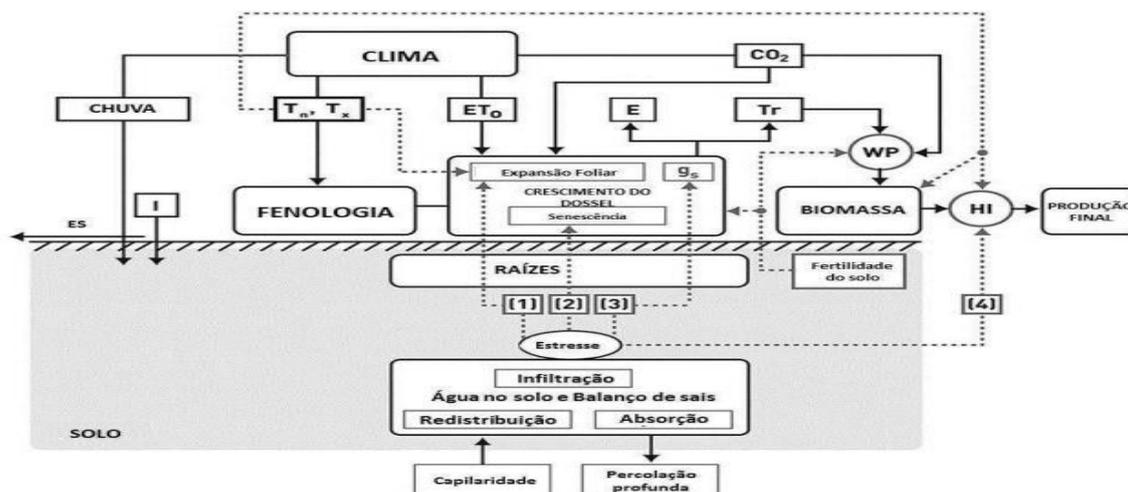
$$B = WP \times \Sigma Tr \quad (1)$$

$$Y = B \times HI \quad (2)$$

em que: WP - Produtividade da água ($\text{kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$); Tr – Transpiração da cultura (mm); B – Biomassa seca da parte aérea (kg ha^{-1}); Y – Produtividade (kg ha^{-1}); e HI – Índice de colheita (percentagem).

O modelo compreende o solo, com o balanço de água no solo, a planta, com o seu crescimento, desenvolvimento e processos de produção; e a atmosfera, com o seu regime térmico, as chuvas, a demanda evaporativa exercida pela atmosfera e a concentração de dióxido de carbono. No item manejo, o modelo enfatiza a irrigação, mas também considera a fertilidade do solo, principalmente nitrogênio e os aspectos relacionados à água, tais como disponibilidade da mesma e presença de cobertura, além de como esses fatores afetam o balanço hídrico do solo, desenvolvimento e crescimento das plantas. As relações funcionais entre os diferentes componentes do modelo são apresentadas no fluxograma da Figura 1.2.

Figura 1.2. Fluxograma do modelo AquaCrop®, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera.



De acordo com Ahmadi et al. (2015), desde que o modelo AquaCrop[®] foi lançado em janeiro de 2009, foram relatadas fortes habilidades para simular o rendimento e a biomassa de diferentes culturas em condições de campo e o balanço de água do solo em diversas condições ambientais e regimes de rega, como: trigo (ANDARZIAN et al., 2011; TOUMI et al., 2016), milho (PAREDES et al., 2014; AKUMAGA et al., 2017), arroz (MANIRUZZAMAN et al., 2015); soja (PAREDES et al., 2015; ADEBOYE et al., 2019); sorgo (ARAYA et al., 2010) e algodão (FARAHANI et al., 2008).

1.2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAMAAS, B.; PETERS, G. P. The climate impact of Norwegians' travel behavior. **Travel Behaviour and Society**, v.6, n.1, p.10-18, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2016.04.001>.

ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; MAN, S.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v.110, p.55-66, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>.

ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEBOYE, A. P.; ADEKALU, K. O.; OSUNBITAN, J. A. Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. **Information Processing in Agriculture**, v.8, p.419-436, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.002>.

ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural Water Management**, v.213, p.1130-1146, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.006>.

AHMADI, S. H.; MOSALLAEPOUR, E.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.; SEPASKHAH, A. R. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. **Water Resources Management**, v.29, n.8, p.2837-2853, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>.

AKUMAGA, A. U.; TARHULEA, A.; YUSUF, A. A. Validation, and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, n. 2017, p. 225–234, 2017.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma, Itália: FAO. Irrigation and Drainage Paper, v.56, 297p. 1998.

ALMEIDA, F. T. Respostas do mamoeiro (*Carica papaya* L.) “do grupo solo” a diferentes lâminas de irrigação no Norte Fluminense. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos do Goytacazes, RJ, 2000.

ALVES, E.; SOUZA, G. S.; MARRA, R. Uma viagem pelas regiões e estados guiados pelo Censo Agropecuário 2006. **Revista de Política Agrícola**, v.26, n.1, p.113-150, 2017.

AMARAL, J. A. T.; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e suas relações com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.3, p.377-384, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000300002>.

ANDARZIAN, B.; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M. E.; BARATI, M.A.; RAH-NAMA, A. Validation, and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v.100, p.1-8, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>.

ARAJI, H. A.; WAYAYOK, A.; BAVANI, A. M.; AMIRI, E.; ABDULLAHA, A. F.; DANESHIANE, J.; TEH, C. B. S. Impacts of climate change on soybean production under different treatments of field experiments considering the uncertainty of general circulation models. **Agricultural Water Management**, v.205, p.63-71, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.023>.

ARAÚJO, T. L.; FERNANDES, L. D. Avaliação sistêmica dos impactos sociais da produção da soja para biocombustíveis em Porto Nacional - TO. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v.12, n.1, p.141, 2017. <https://doi.org/10.15675/gepros.v12i1.1613>.

ARAYA, A., SOLOMON, H., KIROS, M.H., AFEWERK, K., TADDESE, D. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). **Agricultural Water Management**, v.97, p.1838-1846, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.021>

ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F.; SÁ, M. E.; BUZETTI S.; NASCIMENTO, V. Manejo do solo, água e nitrogênio no cultivo de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.131-138, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000200005>.

BALKOVIČ, J., VAN DER VELDE, M., SCHMID, E., SKALSKÝ, R., KHABAROV, N., OBERSTEINER, M., et al. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation. *Agricultural Systems*, 120, 61–75. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.05.008>

BASTOS, E. A.; RAMOS, H. M. M.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; NASCIMENTO, F. N.; CARDOSO, M. J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob déficit hídrico. *Water Resources and Irrigation Management*, v.1, p.31-37, 2012.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation model and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v.200, p.28-37, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.004>.

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

BELLALLOUI, N.; MENGISTU, A., KASSEM, M. A. Effects of genetics and environment on fatty acid stability in soybean seed. **Food and Nutrition Sciences**, v.4, p.165-175, 2013. <https://doi.org/10.4236/fns.2013.49A1024>.

BENJAMIN JG & NIELSEN DC. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Research* 97: 248-253, 2006.

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sul-rio-grandense**, v.22, n.2, p.243-259, 1986.

BIANCHI, C. A. M.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Condutância da folha em milho cultivado em plantio direto e convencional em diferentes disponibilidades hídricas. **Ciência Rural**, v.37, n.2, p.315-322, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000200004>.

BOARD, J. E.; HARVILLE, B. G. Explanations for greater light interception in narrow vs. wide-row soybean. **Crop Science**, v.32, n.1, p.198-202, 1992. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200010041x>.

BOOTE, K. J., JONES, J. W., HOOGENBOOM, G., BATCHELOR, W. D., PORTER, C. H. CROPGRO. Plant growth and partitioning model. In: Jones, J.W., Hoogen-boom, G., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Tsuji, G.Y. (Eds.), *Decision Support System for*

Agrotechnology Transfer Version 4. 0. Volume 4. DSSAT v4: Crop Model Documentation. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, pp. 1–102. 2003.

BORGES, W. L. B.; FREITAS, R. S.; MATEUS, G. P.; SÁ, M. E.; ALVES, M. C. Produção de soja e milho cultivados sobre diferentes coberturas. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, n.1, p.89-98, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902015000100011>.

BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D.; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S.; COSTA, F. B.; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v.29, n.5, p.1244-1254, 2013.

BROWN, J. C.; KOEPPE, M.; COLES, B.; PRICE, K. P. Soybean production and conversion of tropical forest in the Brazilian Amazon: the case of Vilhena, Rondônia. **AMBIO**, v.34, p.462-469, 2005.

BUSSAY, A.; van der VELDE, M.; FUMAGALLI, D.; SEGUINI, L. Improving operational maize yield forecasting in Hungary. **Agricultural Systems**, v.141, n.1, p.94-106, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.10.001>.

CANTARELLI, L. D.; SCHUCH, L. O. B.; RUFINO, C. A.; TAVARES, L. C.; VIEIRA, J. F. Physiological seeds quality: spatial distribution and variability among soybean plant population. **Bioscience Journal**, v.31, n.2, p.344-351, 2015. <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n2a2015-22274>.

CANTELAUBE, P. J.; TERRES M. Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 57 (3), p. 476-487, 2005.

CHAVES, M. M. Effects of water deficits on carbon assimilation. **Journal of Experimental Botany**, v.42, n.234, p.1-16, 1991. <https://doi.org/10.1093/jxb/42.1.1>.

CHOI, H. S.; SCHNEIDER, U. A.; RASCHE, L.; CUI, J.; SCHMID, E.; HELD, H. Potential effects of perfect seasonal climate forecasting on agricultural markets, welfare, and land use: A case study of Spain. **Agricultural Systems**, v.133, n.1, p.177-189, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.10.007>.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, v.7, n.1, p.57-60, 2005.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra Brasileira de Grãos**. 2023. 6 levantamento de Grãos. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>.

CORRÊA, S. T. R.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; SCARPARE, F. V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E. T. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura: Revisão. **Revista de Agricultura**, v.86, n.1, p.1-13, 2011. <https://doi.org/10.37856/bja.v86i1.75>.

COSTA, L. C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

COSTA, L. C.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p.75-82, 2001.

COSTA, W. A. J. M.; WEERAKOON, W. M. W.; HERATH, H. M. L. K.; AMARATUNGA, K. S. P.; ABEYWARDENA, R. M. I. Physiology of yield determination of rice under elevated carbon dioxide at high temperature in a subhumid tropical climate. **Field Crops Research**, v.96, p.336-347, 2006.

CRUZ, S. J. S.; OLIVEIRA, S. S. C.; CRUZ, S. S. C.; MADALENA, J. M. S.; CUNHA, J. L. X. L. Desempenho de três variedades de soja na região dos Tabuleiros Costeiros no Estado Alagoas. **Revista Caatinga**, v.22, p.195-199, 2009.

CUNHA, G. R.; HAAS, J. C.; DALMAGO, G. A.; PASINATO, A. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.1, p.111-119, 1998.

CURTO, L; COVI, M. GASSMANN, M. I. Actual evapotranspiration, and the pattern of soil water extraction of a soybean (*Glycine max*) crop. **Revista de la Facultad de Ciências Agrarias**, v.51, n.2, p.125-141, 2019.

D'ORGEVAL, T.; BOULANGER, J. P.; CAPALBO, M. J.; GUEVARA, E.; PENALBA, O.; MEIRA, S. Yield estimation and sowing date optimization based on seasonal climate information in the three CLARIS sites. **Climatic Change**, v.98, n.3, p.565-580, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9746-4>.

DALL'AGNOL, A.; ROSSEING, A. C.; LAZZAROTTO, J. J.; HIRAKURI, M. H.; OLIVEIRA, A. B. **O complexo agroindustrial da soja brasileira**. Circular Técnica, Londrina, n. 3, p. 1-12, 2007.

DOSS, B. D.; THURLOW, D. L. Irrigation, row width and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. **Agronomy Journal**, v.65, n.5, p.620-623, 1974. <https://doi.org/10.2134/agronj1974.00021962006600050006x>.

DUARTE, J.; ALVES, E. O elemento invisível no progresso tecnológico. **Revista de Política Agrícola**, v.25, n.1, p.122-124, 2016.

DUMONT, B.; BASSO, B.; LEEMANS, V.; BODSON, B.; DESTAIN, J. P.; DESTAIN, M. F. A comparison of within-season yields prediction algorithms based on crop model behaviour analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.204, n.1, p.10-21, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.01.014>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 265p. 2013. Disponível em: < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/95489/1/SP-16-online.pdf>>. Acesso em 12 de outubro de 2021.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265p. (Sistemas de Produção / Embrapa Soja, ISSN 2176- 2902; n.16).

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crops and livestock products**. 2021. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em 07 de outubro de 2021.

FARAHANI, H. J.; OWEIS, T. Y.; IZZI, G. Crop coefficient for drip-irrigated cotton in a Mediterranean environment. *Irrigation Science*. v. 26, p. 375–383, 2008.

FARIAS, J. R. B. Limitações climáticas obtenção de rendimentos máximos de soja. Embrapa Soja, 2011.

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização do risco de

déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3, p.415-421, 2001.

FARIAS, J. R.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Circular Técnica 48. Londrina, PR, 2007.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, Cooperative Extension Service, 12p. 1977.

FEITOSA, H. O.; GONÇALVES, F. M.; MESQUITA, J. B. R.; ALBUQUERQUE, A. H. P.; NASCIMENTO, A. H. C.; COSTA, R. N. T. Balanço hídrico na cultura da soja, sob recarga natural em um solo Podzólico Vermelho-Amarelo. **Agropecuária Técnica**, v.31, n.1, p.58-61, 2010.

FERRAZ, R. L. S.; MELO, A. S.; SUASSUNA, J. F.; BRITO, M. E. B; FERNANDES, P. D.; NUNES JÚNIOR, E. S. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.181-188, 2012.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA J. L.; ESCOBEDO J. F.; TEODORO I.; LYRA G. B.; ARAÚJO NETO, R. A. Cana de açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.798-804, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n08p798-804>.

FLOSS, E. L. Fisiologia das plantas cultivadas. Passo Fundo: Ed. da UPF, 2004.

FRANCE, C.; THORNLEY, J. H. M. **Matematic models in agriculture. The quantitative approach to problems in agriculture and related sciences**. London: Butterworth, 1984.

FRANKE, A. E.; DORFMAN, R. Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.8, p.1675-1683, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000800022>.

FRIZZONE, J. A. Função de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâminas de irrigação. Tese (Doutorado em Solos e nutrição de plantas) – Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 1986.

GAVA, R. FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSE, J. V.; FRAGA JUNIOR, E. F.; PERBONI. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.9, n.6, p.349-359, 2015. <http://dx.doi.org/10.7127/RBAI.V9N600368>.

GOU, F.; van ITTERSUM, M. K.; SIMON, E.; LEFFELAAR, P. A.; van der PUTTEN, P. E. L.; ZHANG, L. Z.; van der WERF, W. Intercropping wheat and maize increases total radiation interception and wheat RUE but lowers maize RUE. **European Journal of Agronomy**, v.84, p.125-139, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.014>.

HEATHERLY, L. G.; SMITH, J. R. Effect of soybean stem growth habit on height and node number after beginning bloom in the mid southern USA. **Crop Science**, v.44, p.1855-1859, 2004.

HICKS, D. R. **Growth, and development**. In: NORMAN, A. G (ed). Soybean physiology, Agronomy, 1978.

HOMAYOUNFAR M.; LAI S. H.; ZOMORODIAN M.; SEPASKHAH A. R.; GANJI A. Optimal crop water allocation in case of drought occurrence, imposing deficit irrigation with proportional cutback constraint. **Water Resources Management**, v.28 p.3207-3225, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0669-0>.

HOQUE, A. A. B. M.; HASSAN, M. M.; KHAN, M. M. K.; KHATUN, R.; BATEN, M. A. Effect of temperature on flower and pod abscission and yield of three soybean genotypes. **Journal of Environmental Science and Natural Resources**, v.8, n.2, p.89-92, 2015. <https://doi.org/10.3329/jesnr.v8i2.26872>.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v.101, n.3, p.448-459, 2009. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. 2020. < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612#resultado>>. Acesso em 07 de outubro de 2021.

JONES, H. G. **Plant and Microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2.ed. Cambridge: University Press, Cambridge, 1992. 428p.

JONES, J. W.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development**. Texas A&M Univ. Press, College Station, 1986.

JUSTINO, L. F.; ALVES JÚNIOR, J.; BATTISTI, R.; HEINEMANN, A. B.; LEITE, C. V.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Assessment of economic returns by using a central pivot system to irrigate common beans during the rainfed season in Central Brazil. **Agricultural Water Management**, v.224, p.1-7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105749>.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems I: development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, v.48, p.27-36, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00167-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00167-1).

KHOJELY, D. M.; IBRAHIM, S. E.; SAPEY, E.; HAN, T. History, status, and prospects of soybean production and research in sub-Saharan Africa. **The Crop Journal**, v.6, p.226-235, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2018.03.006>.

KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R.; GASSMAN, P. W.; DEBAEKE, P. **A general, process-oriented model for two competing plant species**. Trans. ASAE 35, p. 801-810, 1992.

KUMAR P.; SARANGI A.; SINGH D. K.; PARIHAR S. S. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. **Irrigation and Drainage**, v.63, p.474-487, 2014. <https://doi.org/10.1002/ird.1841>.

LIANG, X.; LIAKOS, V.; WENDROTH, O.; VELLIDIS, G. Scheduling irrigation using an approach based on the van Genuchten model. **Agricultural Water Management**, v.176, p.170-179, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.030>.

LIU, K.; YANG, R.; DENG, J.; HUANG, L.; WEI, Z.; MA, G.; ZHANG, Y. High radiation use efficiency improves yield in the recently developed elite hybrid rice Y-liang you 900. **Field Crops Research**, v.253, 107804, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107804>.

LIU, X.; JIN, J.; WANG, G.; HERBERT, S. J. Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in Northeast China. **Field Crops Research**, v.105, n.3, p.157-171, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.09.003>.

LU, Y.; CHIBARABADA, T. P.; MCCABE, M. F.; DE LANNOY, G. J. M.; SHEFFIELD, J. Global sensitivity analysis of crop yield and transpiration from the FAO-AquaCrop model for dryland environments. **Field Crops Research**, v.269, p.1-15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108182>.

LYRA, G. B. **Estimativa dos níveis ótimos econômicos de irrigação e de adubação nitrogenada nos mamoeiros (Carica papaya L.) cultivar Golden e do híbrido UENF Caliman 01**. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.

MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. DE; TEODORO, I.; ROCHA, A. E. Q. DE; CAVALCANTE JÚNIOR, C. A.; LYRA, G. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; CARVALHO, A. L. DE; FERRAZ, R. L. DE S. Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.7, p.1188–1196, 2019.

MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; CAVALCANTE, C. A.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, R. C. Physiology, and grain yield of common beans under evapotranspired water reposition levels. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, v.6, p.183-290, 2017. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000183>.

MANIRUZZAMAN, M.; TALUKDER, M. S. U.; KHAN, M. H.; BISWAS, J. C.; NEMES, A. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, v. 159, p. 331-340, 2015.

MARIN, F. R. & JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Agrometeorology, Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)**, 71 (1). Feb 2014 <https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000100001>.

MARLETTO V, VENTURA V, FONTANA G, TOMEI F. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agric. Forest Meteorol.* 147:71-9, 2007.

MARTINS, D. P. **Resposta do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sims var. *flavicarpa* Deg.) a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio e potássio**. Tese (Doutorado em produção vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 1998.

MBANGIWA, N. C.; SAVAGE, M. J.; MABHAUDHI, T. Modelling and measurement of water productivity and total evaporation in a dryland soybean crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.266-267, p.65-72, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.005>.

MEDEIROS, R. M.; MATOS, R. M.; OLIVEIRA, R. C. S.; SILVA, P. F.; SABOYA, L. M. F. Balanço hídrico climatológico e classificação climática de cultivo de banana em Lagoa Seca – PB. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.10, n.1, p.223-228, 2015. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v10i1.2945>.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y.; NEALE, C. M. U.; RAY, C.; YANG, H. S. Water productivity benchmarks: The case of maize and soybean in Nebraska. **Agricultural Water Management**, v.234, p.1-9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106122>.

MENDES, T. F. **Produtividade de cultivares de soja em função da variação da densidade de Plantas**. Dissertação (Mestrado em Bioenergia e grãos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, GO, 2019.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v.281, p.277-294, 1977. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>.

MONTEITH, J. L. **Principles of Environmental Physics**. Edward Arnold, London, 1973, 291p.

MONTOYA, F.; GARCÍA, C.; PINTOS, F.; OTERO, A. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v.193, p.30-45, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.001>.

MORTON, D. C.; NOOJIPADY, P.; MACEDO, M. M.; GIBBS, H.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Re-evaluating suitability estimates based on dynamics of cropland expansion in the Brazilian Amazon. **Global Environmental Change**, v.37, p.92-101, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.02.001>.

MUNDSTOCK, C.; THOMAS, A. L. **Soja: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Evan Graf. 31p. 2005.

NENDEL, C.; BERG M.; KERSEBAUM K. C.; MIRSCHEL W.; SPECKA X.; WEGEHENKEL M.; WENKEL K. O.; WIELAND R. The MONICA model: testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecol Mod* 222:1614–1625, 2011.

NPCT. Nutrição para Plantas Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<<https://www.npct.com.br/>>>, acesso em: 23 jul. 2020.

OLIVEIRA, P. M. **Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2003.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO, J. E. P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetidos a diferentes regimes de irrigação. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.1, p.161-169, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000100018>.

PARDO, E. M.; VELLICCE, G. R.; AGUIRREZABAL, L.; IRUJO, G. P.; ROCHA, C. M. L.; GARCÍA, M. G.; ANGUEIRA, S. P.; WELIN, B.; SANCHEZ, J.; LEDESMA, F.; CASTAGNARO, A. P. Drought tolerance screening under controlled conditions predicts ranking of water limited yield of field-grown soybean genotypes. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.201, p.95-104, 2015. <https://doi.org/10.1111/jac.12106>.

PAREDES, P.; MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, v.144, p.81-97, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.002>.

PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; XU, D.; XIN, Y.; ZHANG, B.; PEREIRA, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v.152, p.57-71, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.12.007>.

PEIXOTO, C. P. **Curso de Fisiologia Vegetal**. Cruz das Almas: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2011. 177 p.

PEIXOTO, P. H. P.; MATTA, F. M.; CAMBRAIA, J. Responses of the photosynthetic apparatus to aluminum stress in two sorghum cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v.25, n.4, p.821-832, 2002. <https://doi.org/10.1081/PLN-120002962>.

PEREIRA, R. G.; ALBUQUERQUE, A. W.; SOUZA, R. O.; SILVA, A. D.; SANTOS, J. P. A.; BARROS, E. S.; MEDEIROS, P. V. Q. Sistemas de manejo do solo: soja [*Glycine max* (L.)] consorciada com *Brachiaria decumbens* (STAPF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, n.1, p.44-51, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.6981>.

PEREIRA, T.; COELHO, C. M. M.; SOBIECKI, M.; SOUZA, C. A. Physiological quality of soybean seeds depending on the preharvest desiccation. **Planta daninha**, v.33, n.3, p.441-450, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582015000300007>.

PROCÓPIO, S. O.; SANTIAGO, A. D.; CARVALHO H. W. L. **Estudos de população de plantas de soja na região do SEALBA**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2018 24 p. (Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1961; 134).

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v.101, n.3, p.438-447, 2009. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Reference Manual: Chapter 1: FAO crop water productivity model to simulate yield response to water. Version 3.1 plus. Rome, FAO, 19p., 2011.

RAY, J.D. & SINCLAIR, T.R. Stomatal conductance of maize hybrids in response to drying soil. *Crop Sci.*, 37:803-807, 1997.

RITCHIE, S.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 53p. 1982.

ROCHA, R. S.; SILVA, J. A. L.; NEVES, J. A.; SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C. Desempenho agrônômico de variedades e linhagens de soja em condições de baixa latitude em Teresina - PI. **Revista Ciência Agrônômica**, v.43, n.1, p.154-162, 2012.

ROSA, L. M.; DILLENBURG, L. R.; FORSETH, I. N. Responses of soybean leaf angle, photosynthesis, and stomatal conductance to leaf and soil potential. **Annals of Botany**, v.67, p.51-58, 1991.

RUVIARO, C.; DORNELES, J. G. L.; SILVA, A. M.; BEN, C. A. V. Comportamento da soja submetida a diferentes regimes hídricos e viabilidade da irrigação suplementar na região do Vale do Jaguari - RS. **Perspectiva**, v.35, n.131, p.79-90, 2011.

SALVESTRO, A. C.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; DEL QUIQUI, E. M.; ARIEIRA, C. R. D.; JUNIOR, J. C.; SILVA, MAGNUN R.; ABE, V. H. F.; MENDES, M. A. Hydric and physiological monitoring of soybean in oxisol and oxisol incorporated with biodegradable waste residue. **Journal of Food, Agriculture & Environmentn**, v.12, n.3-4, p.265-268, 2014.

SANTANA, M. J. **Resposta do feijoeiro comum a lâminas e épocas de suspensão da irrigação**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola - Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2007.

SARTORI, G. M. S.; MARCHESAN, E.; DE DAVID, R.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; DONATO, G.; CARGNELUTTI FILHO, A.; SILVA, M. F. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planos solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.12, p.1139-1149, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200003>.

SARTORI, G. M. S.; MARCHESAN, E.; DE DAVID, R.; NICOLOSO, F. T.; SCHORR, M. R. W.; CARGNELUTTI FILHO, A.; DONATO, G. Growth, and development of soybean roots according to planting management systems and irrigation in lowland áreas. **Ciência Rural**, v.46, n.9, p.1572-1578, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20151579>.

SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenias, 314p. 2009.

SEDIYAMA, T.; GLASENAPP, J. S.; MATSUO, E. Estresse abiótico. In: SEDIYAMA, T. **Melhoramento Genético da Soja**. Londrina: Mecenias, p.103-126, 2015.

SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos cultivos: informações para uma agricultura sustentável. **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, p. 3-12, 2009.

SHALHEVET, J. Plants under salt and stress. In: FOWDEN, L.; MANSFIELD, T.; STODDART, J. **Plant adaptation to environmental stress**. London: Chapman & Hall, 7, p.133-154, 1993.

SILVA, L. P.; BATTISTI, R.; KNAPP, F. M.; SANTOS, T. G.; ALVES JUNIOR, J. Estimativa da produtividade de soja usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado. **Agrometeoros**, v.28, p.1-10, 2020. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v28.e026702>.

SINCLAIR, T. R.; MARROU, H.; SOLTANI, A.; VADEZ, V.; CHANDOLU, K. C. Soybean production potential in Africa. **Global Food Security**, v.3, n.1, p.31-40, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2013.12.001>.

SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. **Radiation use efficiency**. Advances Agronomy, New York, v.65, p.215-265, 1999.

SOLTANI, A.; SINCLAIR, T. R. **Modeling physiology of crop development, growth, and yield**. Walling ford, CABI, 2012. 322p

SORATTO, R. P.; CARVALHO, M. A. C.; ARF, O. Nitrogênio em cobertura no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.2, p.259-266, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000200007>.

SOUZA, I. J. **Influência da irrigação suplementar no desenvolvimento e Produtividade de cultivares de soja em Cachoeira do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, 2019.

SOUZA, J. L.; MOURA FILHO, G.; LYRA, R. F. F., TEODORO, I.; SANTOS, E. A.; SILVA, J. L.; AMORIM, E. C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, p.131-141, 2004.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v.101, n.3, p.426-437, 2009. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. Crop Syst, a cropping systems simulation model. **European Journal Agronomy**, v.18, p.289-307, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0).

STRUKER, S.; CARVALHO, I. R.; SZARESKI, V. J.; BARBOSA, M. H.; SOUZA, V. Q.; CONTE, G. G.; MARTINS, A. B. N.; CAVALCANTE, J. A.; KOCH, F.; SCHUCH, L. O. B.; AUMONDE, T. Z.; VILLELA, F. A.; PEDÓ, T. Influência do vigor de sementes nos atributos de produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v.42, n.3, p.111-120, 2019. <https://doi.org/10.19084/rca.16389>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Art med, 2013. 954 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Art med, 2017. 888 p.

TEIXEIRA, J. L., PEREIRA, L. S. ISAREG- An irrigation scheduling model. **ICID Bulletin**, New Delhi, v.41, n.2, 1992, p.29-48.

TEWARI, S.; ARORA, N. K. Soybean Production Under Flooding Stress and Its Mitigation Using Plant Growth-Promoting Microbes. **Environmental Stresses in Soybean Production**, v.2, p.23-40, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801535-3.00002-4>.

THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. **Plant, and crop modelling**. New Jersey: Blackburn Press. p.669, 2000.

TIAN, Z.; WANG, X.; LEE, R.; LI, Y.; SPECHT, J. E.; NELSON, R. L.; MCCLEAN, P. E.; QIU, L.; MA, J. Artificial selection for determinate growth habit in soybean. **Proceedings of the National Academy Sciences**, v.107, p.8563-8568, 2010. <https://doi.org/10.1073/pnas.1000088107>.

TONATTO, M. **Potencial de rendimento de cultivares modernas de soja na região sudoeste do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2020.

TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 219-235, 2016.

URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.3, p.497-506, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000300004>.

USDA - United States Department of Agriculture. **Soybean**. Disponível em: <www.fas.usda.gov>. Acesso em 07 de outubro de 2021.

van OORT, P. A. J.; GOU, F.; STOMPH, T. J.; van der WERF, W. Effects of strip width on yields in relay-strip intercropping: a simulation study. *European Journal of Agronomy*, v.112, p.1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125936>.

VENTURA, F. et al. Validation of development models for winter cereals and maize with independent agrophenological observations in the BBCH scale. *Italian Journal of Agrometeorology*. v. 3, p. 17-26, 2009.

VIANA, J. S., GONÇALVES, E. P., SILVA, A. C. & MATOS, V. P. Climatic conditions, and production of soybean in northeastern Brazil. In: Board, J. E. A Comprehensive Survey of International Soybean Research - Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships, 2013. 18, 377-392. 10.5772/52184.

VILELA, A. E.; RAVETTA, D. A. The effect of radiation on seedling growth and physiology in four species of *Proposis* L. (Mimosaceae). **Journal of Arid Environmental**, v.44, p.415-423, 2000. <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0604>.

VIVAN, G. A.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; BARBOZA, F. S.; BUSKE, T. C. Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga**, v.18, n.2, p.282-292, 2013. <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n2p282>.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FERREIRA, A. S.; AGUIAR E SILVA, M. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soybean growth affected by seeding rate and mineral nitrogen. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.8, p.734-738, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p734-738>.

WHISLER, F. D.; ACOCK, B.; BAKER, D. N.; FYE, R. E.; HODGES, H. F.; LAMBERT, J. R.; LEMMON, H. E.; Mc KINION, J. M.; REDDY, V. R. Crop simulation models in

agronomic systems. **Advances in Agronomy**, v.40, p.141-208, 1986.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60282-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60282-5).

WIJewardana, C.; Reddy, K. R.; AlsaJri, F. A.; Irby, J. T.; Krutz, J.; Golden, B. Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. **Irrigation Science**, v.36, p.241-255, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s00271-018-0580-1>.

Williams, J. R.; Jones, C. A.; Dyke, P. T. **A modeling approach to determining the relationships between erosion and soil productivity**. Transactions of the ASAE 27, 1984.

Wit, C. T. Simulation of living systems. In: Penning de Vries, F.W.T.; Van Laar, H.H (ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen, Pudoc, p.3-8, 1982.

Ying, J.; Peng, S.; He, Q.; Yang, H.; Yang, C.; Visperas, R. M.; Cassman, K. G. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments: I. determinants of grain and dry matter yields. **Field Crops Research**, v.57, p.71-78, 1998.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00077-X).

Zanon, A. J.; Silva, M. R.; Tagliapietra, E. L.; Cera, J. C. **Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades**. Santa Maria, RS: Palloti, 136p., 2018.

Zanon, A. J.; Streck, N. A.; Rocha, T. S. M.; Alberto, C. M.; Bartz, A. C.; De Paula, G. M.; Tomiozzo, R.; Costa, L. C.; Fensterseifer, C. A.; Tagliapietra, E. L.; Cardoso, Â. P.; Weber, P. S.; Bexaira, K. P. Efeito do tipo de crescimento no desenvolvimento de cultivares modernas de soja após o início do florescimento no Rio Grande do Sul. **Bragantia**, v.75, n.4, p.446-458, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.535>.

Zhang, B.; Feng, G.; Kong, X.; Lal, R.; Ouyang, Y.; Adeli, A.; Jenkins, J. N. Simulating yield potential by irrigation and yield gap of rainfed soybean using APEX model in a humid region. **Agricultural Water Management**, v.177, p.440-453, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.022>.

Zinyengere, N.; Mhizha, T.; Mashonjowa, E.; Chipindu, B.; Geerts, S.; Raes, D. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, n.12, p.1792-1799, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.015>.

CAPÍTULO II

ASPECTOS FISIOLÓGICOS E PRODUTIVOS DE CULTIVARES DE SOJA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO

RESUMO: Objetivou-se com esse trabalho avaliar as trocas gasosas, a eficiência fotoquímica e o rendimento de grãos de duas cultivares de soja (Monsoy 8644 e 8349) cultivadas sob diferentes lâminas de irrigação no Estado de Alagoas. O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de frações da evapotranspiração da cultura (35, 70, 105, 140, 175 e 210% e duas cultivares de soja). As seis lâminas de irrigação foram aplicadas nas parcelas e as duas cultivares nas subparcelas. As trocas gasosas foram determinadas a partir da concentração interna de CO₂, transpiração, condutância estomática, taxa fotossintética, eficiência instantânea de uso da água e eficiência instantânea de carboxilação. As avaliações da fluorescência da clorofila *a* foram determinadas por meio do rendimento quântico potencial e efetivo do fotossistema II. Foi aferido de forma indireta o teor de clorofila. Quanto aos componentes de produção, foram avaliados: número de vagens por planta, número de grãos por vagens, massa de 1000 grãos e o rendimento de grãos. A variação da aplicação de água (% da ETc) promoveu diferença estatística significativa para trocas gasosas, o que ocasionou redução na eficiência fotoquímica potencial e efetiva da soja. O aumento da aplicação das lâminas de irrigação influenciou de forma direta o índice *Soil Plant Analysis Development* - SPAD e as componentes de produção: número de vagens por planta e rendimento de grãos, obtendo valores significativos com a irrigação igual a 125% da ETc.

Palavras-chave: déficit hídrico; clorofila *a*; trocas gasosas.

CAPÍTULO II

PHYSIOLOGICAL AND PRODUCTIVE ASPECTS OF SOYBEAN CULTIVARS UNDER DIFFERENT IRRIGATION LEVELS

ABSTRACT: The objective of this work was to evaluate gas exchange, photochemical efficiency, and grain yield of two soybean cultivars (Monsoy 8644 and 8349) cropped under different levels of irrigation in the State of Alagoas. The design used was randomized blocks with split plots and four replications. The treatments consisted of crop evapotranspiration fractions (35, 70, 105, 140, 175 and 210% and two soybean cultivars). The six irrigation levels were in the plots and the two cultivars in the subplots. Gas exchanges were determined from internal CO₂ concentration, transpiration, stomatal conductance, photosynthetic rate, instantaneous water use efficiency and instantaneous carboxylation efficiency. Chlorophyll fluorescence evaluations were determined using the potential and effective quantum yield of photosystem II. The chlorophyll content was indirectly measured. As for the production components, the following were evaluated: number of pods per plant, number of grains per pod, mass of 1000 grains and grain yield. The variation in water application (% of ET_c) promoted a significant difference for gas exchange, which caused a reduction in the potential and effective photochemical efficiency of soybean. The increase in the application of irrigation depths directly influenced the Soil Plant Analysis Development index - SPAD and the production components: number of pods per plant and grain yield, obtaining significant values with irrigation equal to 125% of ET_c.

Key words: water deficit; chlorophyll a; gas exchange.

2.1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma oleaginosa importante para o mundo, devido seu elevado teor de proteína (40%) e de óleo (20%), associado ao alto rendimento de grãos. A soja é a principal cultura agrícola produzida e exportada pelo Brasil, com produção de aproximadamente 154,57 milhões de toneladas de grãos, na safra 2022/2023, área plantada de 44,06 milhões de hectares e produtividade média de 3.508 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023).

O cultivo dessa oleaginosa tem obtido destaque em regiões do Nordeste brasileiro, como é o caso do Estado de Alagoas, com 2,7 mil hectares cultivados e produtividade média de 3.520 kg ha⁻¹, na safra 2021/2022. Porém, esses valores são inferiores ao de outras regiões produtoras do Nordeste brasileiro, como Maranhão, Piauí e Bahia com produção de 3,63; 3,76 e 6,22 milhões toneladas, respectivamente. Uma das principais causas dessa baixa produção é a limitação espacial e temporal da precipitação, característica de regiões semiáridas (SANTIAGO, 2019; CONAB, 2022).

Embora a soja seja considerada uma cultura versátil, devido a sua fácil adaptação aos mais diversos ambientes, a disponibilidade hídrica do solo é um fator limitante que pode trazer prejuízos para o seu crescimento, desenvolvimento e produtividade. Isso porque a água está presente em todos os processos bioquímicos e fisiológicos das plantas, representando, aproximadamente, 90% da massa total dos vegetais (FERRAZ et al., 2012). Assim, a irrigação surge como fator essencial para o melhor desempenho da cultura no campo, principalmente quando cultivada no período seco ou de ocorrência frequente de veranicos. A irrigação, quando manejada adequadamente, possibilita que as plantas consigam expressar melhor seus potenciais produtivos, além de reduzir os problemas ambiental (COSTA et al., 2016; MAGALHÃES et al., 2019).

A manutenção dos processos fisiológicos nas plantas é afetada, de forma direta, devido à redução da disponibilidade de água no solo. Essa redução, contribui principalmente, para alta resistência estomática, que diminui a perda de vapor d'água e reduz a absorção de dióxido de carbono (CO₂). A menor assimilação de CO₂ e transferência de vapor de água para a atmosfera, ocasionam diminuição na fotossíntese líquida e reflete na diminuição da produtividade justamente por limitar o processo fotossintético, além de reduzir a condutância estomática e, promover o fechamento dos estômatos, que por sua vez tem implicações, diretas, na transpiração, fotossíntese e temperatura das folhas (DUTRA et al., 2015; ROCHE et al., 2015). Desse modo, estudos de parâmetros fisiológicos da cultura da soja é uma

importante ferramenta para a seleção de cultivares adaptadas, aos fatores abióticos inerentes ao local de cultivo e que podem limitar a atividade fotossintética. Diante do exposto, o conhecimento das trocas gasosas e da eficiência fotoquímica das plantas é fundamental para o manejo de culturas agrícolas sob déficit hídrico, com vistas ao melhor desenvolvimento dos cultivos e, pode também ser determinante na adaptação e estabilidade da soja a determinados ecossistemas (FERRAZ et al., 2012; SILVA et al., 2020). Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho avaliar as trocas gasosas, a eficiência fotoquímica, os teores de pigmentos fotossintéticos e componentes de produção de duas cultivares de soja sob diferentes lâminas de irrigação na região de Rio Largo, Alagoas.

2.2. MATERIAL E MÉTODO

2.2.1. Descrição da Área Experimental

O experimento foi realizado na área do Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia – LIA, no *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias - CECA (09°28'02" S, 35°49'43" W e 127 m de altitude) da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, município de Rio Largo, Alagoas, Brasil. De acordo com a classificação de Thornthwaite e Mather (1955), o clima da região é caracterizado, como úmido, megatérmico (quente), com deficiência de água moderada no verão e excesso no inverno. A precipitação média anual é 1.800 mm, temperatura do ar média anual 25,4° C e umidade relativa do ar média mensal acima de 70% (SOUZA et al., 2004 FERREIRA JUNIOR et al., 2014). Os dados meteorológicos do período experimental (temperatura do ar - T, °C; umidade relativa do ar - U, %; velocidade do vento a 2 m de altura - u^2 , $m\ s^{-1}$; e precipitação pluvial - P, mm), foram obtidos por uma estação agrometeorológica automática (Micrologger – 21 XL, Campbell Scientific, Logan, Utah), distante 30 m da área experimental. O solo local foi classificado como Latossolo amarelo coeso argisólico de textura média/argilosa, com as características químicas e físico-hídricas que constam nas Tabelas 2.1 e 2.2, respectivamente.

Tabela 2.1. Resultados da análise química do solo da área experimental, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.

Determinações	Resultados das profundidades amostrais	
	0,00- 0,20 m	0,20- 0,40 m
pH (em água)	5,60	4,90
P (mg dm^{-3})	29,92	13,05
K (cmol _c dm^{-3})	0,11	0,06
Ca (cmol _c dm^{-3})	2,90	1,30
Mg (cmol _c dm^{-3})	1,00	0,40
Al (cmol _c dm^{-3})	0,00	0,70
H + Al (cmol _c dm^{-3})	4,29	4,46
S.B (Soma das Bases) (cmol _c dm^{-3})	4,03	1,77
C.T.C. (Cap. Troc. de Cátions - pH 7,0)	8,32	6,23
% V (Ind. de Sat. de Bases)	48,00	28,00
Mat. Org. Total (g Kg^{-1})	42,60	21,40

Nota¹:Metodologia Embrapa; Extratores: Água (pH); Mehlich (P, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn); KCl (Ca, Mg e Al); Oxidação (C); Acetato de Cálcio (H+Al); B (HCl); Sulfato de Cálcio (S); Cálculos: S.B=Ca+Mg+Na+K; CTC=S.B+(H+Al); V%=(S.B/CTC)*100. Nota²:Metodologia: IAC; Extratores: Resina (P).

Fonte: Autor (2023).

Tabela 2.2. Características físico-hídricas e granulométricas do solo da área experimental.

Características Físico-Hídricas	Valores nas profundidades amostrais (m)		
	0,00- 0,10	0,10- 0,20	0,20- 0,30
¹ Capacidade de Campo ($m^3 m^{-3}$)	0,212	0,230	0,247
¹ Ponto de Murcha Permanente ($m^3 m^{-3}$)	0,127	0,138	0,149
¹ Densidade Volumétrica ($Mg m^{-3}$)	1,389	1,452	1,531
² Porosidade Total ($m^3 m^{-3}$)	0,423		
³ Granulometria ($g kg^{-1}$)	0,00- 0,20		0,20- 0,40
Areia Total ($g Kg^{-1}$)	603		507
Silte ($g Kg^{-1}$)	71		39
Argila ($g Kg^{-1}$)	326		454
Classe Textural	Franco Argilo Arenosa		Argila Arenosa

Nota¹: Metodologia: Granulometria: método da pipeta, dispersão com hexametáfosfato de sódio. Umidade 1/3 e 15 BAR, extratores de Richards. Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa, 2017.

Nota²: Capacidade de campo em -10 kPa; Ponto de murcha em -1500 kPa

Fonte: ¹Carvalho (2003); ²Costa (2003); ³Autor (2023).

2.2.2. Delineamento Estatístico, Tratamentos e Plantio

O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram seis lâminas de irrigação: $L_1 = 35\%$, $L_2 = 70\%$, $L_3 = 105\%$, $L_4 = 140\%$, $L_5 = 175\%$ e $L_6 = 210\%$ da evapotranspiração da cultura (ET_c) e duas cultivares de soja $M_{8644} - C_1$ e $M_{8349} - C_2$. As seis lâminas de irrigação foram aplicadas nas parcelas e as duas cultivares nas subparcelas.

A área experimental foi de 70,0 m de comprimento por 38,0 m de largura, que totalizou 2.660 m^2 . Em cada bloco foram fixadas seis parcelas (lâminas de irrigação) composta por 20 linhas com 10,0 m de comprimento por 8,0 m de largura (80,0 m^2), e nas subparcelas (cultivares de soja) 10 linhas com 5,0 m de comprimento e 8,0 m de largura (40,0 m^2), totalizando 24 parcelas e 48 subparcelas experimentais. A área útil central de cada subparcela foi de 6,0 m^2 .

O experimento foi realizado no período de menor incidência de chuva, com semeadura no dia 28 de outubro de 2020 e colheita no dia 01 de março de 2021 (124 dias). As sementes foram inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio *Bradyrhizobium japonicum*, estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080, para a fixação biológica do nitrogênio (FBN), seguindo a dosagem recomendada pelo fabricante. Após inoculação a semeadura foi realizada manualmente, com espaçamento entre linhas de 0,50 m e população de plantas final para cultivar $M_{8644} - "C_1"$ (200.000 plantas ha^{-1}) e $M_{8349} - "C_2"$ (300.000 plantas ha^{-1}),

essas densidades foram adotadas considerando o Nordeste de Tocantins (Microrregião - 504) pela recomendação do fabricante, visto que não tem uma recomendação para a localidade do experimento.

A adubação de fundação foi realizada com base na análise química do solo, seguindo as recomendações do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA, 2008) para a cultura da soja, utilizando 333 e 100 kg ha⁻¹, de superfosfato simples (18% de P₂O₅) e cloreto de potássio (60% de K₂O), respectivamente.

O controle das plantas daninhas foi feito com herbicidas em pré-emergência e em pós-emergência, assim como o controle de pragas foi feito com a aplicação de inseticidas e o controle de doenças foi realizado com fungicidas (AGROFIT, 2019).

A colheita ocorreu no dia 01 de março de 2021 (124 DAS), após as plantas atingirem a fase de maturação fisiológica (R₈), vale salientar que esse estágio de desenvolvimento da cultura variou em função das cultivares, a M₈₆₄₄ - C₁ (123 DAS) e a M₈₃₄₉ - C₂ (117 DAS).

2.2.3. Manejo da Irrigação

Os dados da Evapotranspiração de Referência (ET₀), calculada pelo método de Penmann-Monteith, conforme o boletim FAO-56 (Allen et al., 1998), foram cedidos pelo Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia - LIA.

A irrigação foi realizada por micro aspersão, com espaçamento de 3,5 x 3,5 m, pressão de serviço de 30 m.c.a, vazão média de 0,1 m³ h⁻¹ e intensidade de aplicação de 5,8 mm h⁻¹. As lâminas de irrigação aplicadas durante o experimento, foram registradas diariamente por leituras de hidrômetros (Tabela 2.3), com turno de rega de dois dias. Nos 10 primeiros dias após o semeio as lâminas de irrigação foram constantes para todos os tratamentos, após esse período o manejo de irrigação foi determinado com base nos tratamentos e na evapotranspiração de referência diária média contabilizada na semana anterior, Equação 3. A suspensão da irrigação se deu a partir do dia 08 de fevereiro de 2021 no estágio fenológico R₆ (vagem cheia).

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (3)$$

em que: ET₀ é a Evapotranspiração de Referência (mm dia⁻¹); K_c é o coeficiente da cultura, em cada fase de desenvolvimento, cujos valores adotados foram: 1,0; 1,2 e 0,50, nas fases inicial, vegetativa e final, respectivamente, conforme o boletim FAO-56 (Allen et al., 1998).

Tabela 2.3. Frações da Evapotranspiração da Cultura (ET_c , %) e lâminas totais de água aplicadas (precipitação pluvial total + irrigação, mm) durante o ciclo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

ET_c (%)	35	70	105	140	175	210
Lâmina total (mm)	364,33	461,50	564,50	670,30	777,10	883,60

Fonte: Autor (2023).

2.2.4. Estimativa da Água no Solo

O armazenamento de água no solo (ARM em mm), foi determinado a partir do balanço hídrico pelo método de (Thorntwaite e Mather, 1955), adaptado por Lyra et al. (2010) para culturas agrícolas. Calculando a capacidade de água disponível no solo (CAD em mm), para as diferentes fases da cultura, conforme a (Equação 4). Considerou-se a profundidade efetiva do sistema radicular (z em m), de acordo com FEHR e CAVINESS (1977) variando de 0,1 a 0,4 m, entre a emergência e a senescência da cultura, respectivamente. Os valores da umidade do solo, na base úmida, em capacidade de campo e ponto de murcha permanente (θ em $m^3 m^{-3}$) foram quantificados por curva de retenção de água no solo.

$$CAD = 1.000 * (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * z \quad (4)$$

em que: umidade na capacidade de campo ($\theta_{cc} = 0,2297 m^3 m^{-3}$) e no ponto de murcha permanente ($\theta_{pmp} = 0,1380 m^3 m^{-3}$) obtida pela câmara de pressão de Richards.

Valores referentes à água facilmente disponível (AFD, mm) foram calculados conforme a Equação 5, que utiliza o fator de disponibilidade hídrica igual a 0,60 (Bernardo et al., 2019):

$$AFD = CAD * f \quad (5)$$

em que: f é a disponibilidade hídrica da cultura (0,60), calculado subtraindo-se a depleção de 40% da CAD.

2.2.5. Componentes de Produção

Os componentes de produção avaliados foram: Massa seca de mil grãos (MSMG, em g), Número de vagens por planta (NVP, em unid.), Número de grãos por planta (NGP, em unid.), Massa seca de grãos por planta (MSGP, em g) e Rendimento de grãos (RG, em $kg ha^{-1}$).

O NVP e NGP foram avaliados em 10 plantas por subparcela, escolhidas de forma aleatória. A MSMG (g), foi obtida por meio da pesagem de 1000 grãos, após 72 horas em estufa de ventilação forçada a 65°C, bem como MSGP (g).

O RG (kg ha⁻¹) foi calculado corrigindo-se a umidade para 13% (base úmida), determinada por meio do método de estufa a 105 °C por 24 h (BRASIL, 1992), coletadas na área útil de 6,0 m² de cada subparcela e posteriormente estimado, para um hectare, conforme a Equação 6.

$$RG = \left(\frac{M}{C * EL} \right) 10.000 \quad (6)$$

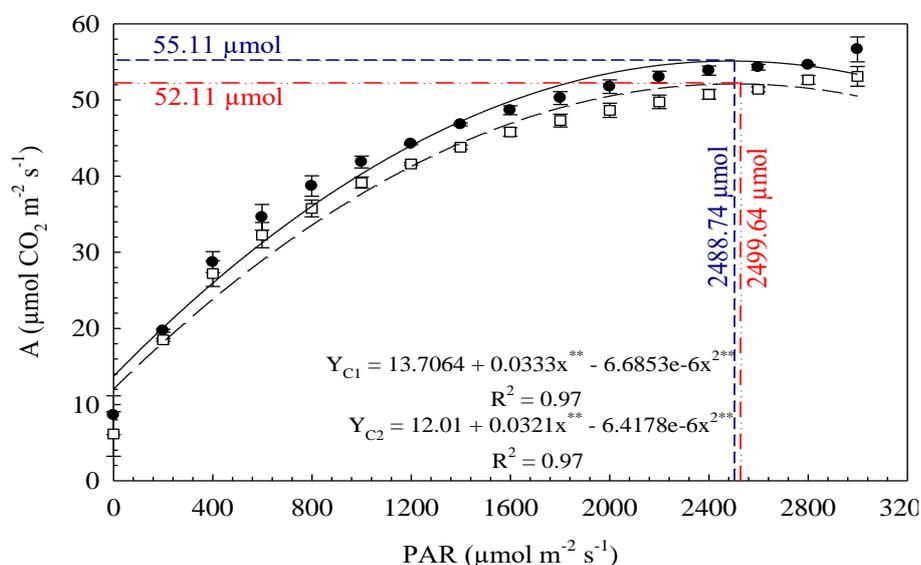
em que: Rendimento de grãos (RG, em kg ha⁻¹); Massa colhida na área amostrada (M, em kg); Comprimento das linhas de plantio amostrada (C, em m); Espaçamento entre as linhas (EL, em m).

2.2.6. Avaliações Fisiológicas

As medidas das variáveis fisiológicas: condutância estomática (gs, em mol H₂O m⁻² s⁻¹), taxa transpiratória (E, em mmol H₂O m⁻² s⁻¹), taxa fotossintética (A, em μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), temperatura foliar (°C), déficit de pressão do vapor d'água entre a folha e o ar (DPV_{folha-ar}, em kPa), foram feitas com um medidor de trocas gasosas com sistema aberto de fluxo de ar (IRGA- *Infrared Gas Analyzer*) modelo Li-6400 (*Li-Cor, Biosciences Inc., Nebraska, EUA*).

A determinação do fluxo fotossintético para cultura da soja a ser utilizado na câmara, foi realizada aplicando diferentes níveis de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) incidente na superfície foliar (0, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 μmol de fótons m⁻² s⁻¹), com o auxílio da *Light Curve* do Software do IRGA, calculou-se o fluxo fotossintético de 2500 μmol de fótons, em m⁻² s⁻¹, o qual foi utilizado para a avaliação fisiológica das plantas, Figura 2.1. As avaliações foram feitas aos 49 DAS, entre 8 e 11 h, na fase fenológica R₂, em três plantas úteis, entre a prefloração e a formação de vagens, na terceira folha totalmente expandida, contada a partir do ápice do ramo principal da planta.

Figura 2.1. Curva de resposta à luz em cultivares de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



**significativo a 1% de probabilidade pelo test " t ".

Fonte: Autor (2023).

Em paralelo, foram feitas avaliações da fluorescência da clorofila *a*, utilizando-se de fluorômetro portátil de luz modulada (*OptiSciences*, Inc, Hudson, NH, EUA), para obtenção das variáveis: rendimento quântico potencial do fotossistema II (F_v/F_m), após adaptar as folhas ao escuro por 30 minutos utilizando-se cliques foliares, ainda com o fluorômetro foi quantificado o *Yield*, para obtenção da eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Φ_{PSII}) determinado às 12:00 horas da manhã sob luz ambiente. Também foi realizada a determinação indireta do teor de clorofila, com uso de clorofilômetro SPAD-502 (*Soil Plant Analysis Development Section -502*, Minolta Câmera CO., Osaka, Japan), expresso por meio do índice SPAD.

O potencial hídrico foi medido na antemãnhã (Ψ_{am}), entre 4:00 e 5:30 h e às 12:00 h (potencial hídrico do xilema, Ψ_x), com o auxílio de uma bomba de pressão do tipo Scholander modelo 3000 (*Soil Moisture Equipment Corp.*, Santa Bárbara, Califórnia, USA). Para determinação do conteúdo de clorofila foi pesado 50 mg de matéria fresca dos trifólios da parte mediana da planta de soja para cada tratamento (lâminas de irrigação) e cultivares, em seguida, os folíolos selecionados foram cortados em formato de discos e colocados em tubos de ensaio com tampa; posteriormente foi adicionado 5 ml de acetona a 80% em cada tubo de ensaio. Os recipientes foram envolvidos com papel alumínio e mantidos por 24h em ambiente refrigerado para a extração dos pigmentos. Após extração completa dos pigmentos,

foram realizadas as leituras em 663, 645 e 480 nm, para a determinação das clorofilas *a*, *b* e carotenoides, respectivamente (LICHTENTHALER & WELBURN, 1983).

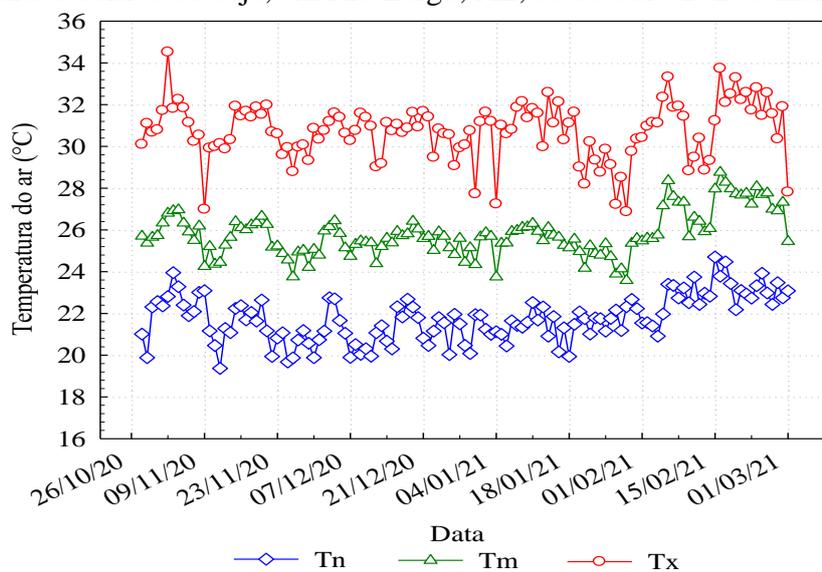
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade e, se significativos, foram submetidos a análise de regressão. Os coeficientes das regressões tiveram sua significância verificada pelo teste *t* a 5% de probabilidade. As variáveis significativas tiveram sua relação com rendimento de grãos verificada através do coeficiente de correlação de Pearson (*r*).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Variáveis Meteorológicas

Durante o período experimental (28/10/2020 a 01/03/2021) a temperatura do ar média foi 25,8 °C e a temperatura máxima absoluta foi 34,5 °C, enquanto a temperatura mínima absoluta foi 19,4 °C, registradas nos dias 02/11/2020 (6 dias após o semeio – DAS) e 12/11/2020 (16 DAS), respectivamente. Lopes e Lima, (2015) afirmam que a temperatura ótima para o cultivo da soja está entre 20 e 30 °C. Então as condições térmicas durante a condução da pesquisa foram ideais para o crescimento, desenvolvimento e produção da cultura da soja (Figura 2.2).

Figura 2.2. Variação da temperatura do ar mínima - Tn, média - Tm e máxima - Tx (°C) durante o cultivo de soja, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

2.3.2. Variáveis Fisiológicas

A interação dos tratamentos com diferentes lâminas de irrigação (Ni) e cultivares (C) de soja (Ni x C), resultou em diferenças significativas ($p < 0,01$) nas variáveis: condutância estomática (g_s), transpiração (E). As lâminas de irrigação influenciaram significativamente ($p < 0,05$) as variáveis: taxa de fotossíntese líquida (A), potencial hídrico foliar (Ψ_w 4:30 e 12:00 h), rendimento quântico potencial do fotossistema II (F_v / F_m), eficiência quântica efetiva (Φ_{PSII}) e índice SPAD. Não foram verificados efeitos significativos para déficit de pressão de vapor folha-ar ($DPV_{\text{folha-ar}}$), temperatura foliar (Tf), clorofila *a*, *b* e *total* (Chl *a*, *b* e *total*) e carotenoides. (Tabelas 2.4; 2.5 e 2.6).

Tabela 2.4. Análise de variância das variáveis fisiológicas: Condutância estomática – gs, Transpiração – E, Taxa de fotossíntese líquida – A, Déficit de pressão de vapor folha-ar - $DPV_{folha-ar}$ e Temperatura foliar - Tf e durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.

Quadrados médios						
Variáveis fisiológicas (48 DAS)						
Fonte variação	G.L.	gs	E	A	DPV_{folha-}	Tf
Níveis (Ni)	5	0,005973**	2,043965**	678,669792*	0,654 ^{ns}	7,065 ^{ns}
Bloco	3	0,000652 ^{ns}	0,448972*	99,102486*	0,217 ^{ns}	5,257 ^{ns}
Resíduo 1	15	0,000078	0,036884	10,308277	0,071	0,190
Cultivares (C)	1	0,000508 ^{ns}	0,046825 ^{ns}	3,727334 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,627 ^{ns}
Ni X C	5	0,000680**	0,328483**	4,046014 ^{ns}	0,098 ^{ns}	0,378 ^{ns}
Resíduo 2	18	0,000058	0,051588	6,675012	0,040	0,198
Total	47	-	-	-	-	-
R. Linear		0,006198**	2,342011 ^{ns}	1392,825328	0,914 ^{ns}	10,403 ^{ns}
R. Quadrática		0,023149**	7,653357**	1573,191290	2,095 ^{ns}	23,525 ^{ns}
C.V. 1 (%)		9,50	7,75	8,96	9,55	1,38
C.V. 2 (%)		8,18	9,16	7,21	7,15	1,40
Médias Observadas						
$M_{8644} - C_1$		0,089896a	2,448287a	35,549725a	2,780a	31,539a
$M_{8349} - C_2$		0,096404b	2,510754a	36,107050a	2,792a	31,767a
DMS		0,0046	0,1377	1,5669	0,121	0,269

G.L. – Graus de liberdade; C.V. – Coeficiente de variação; ** - Significativo a 1%; * - Significativo a 5%; ns - Não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 2.5. Análise de variância das variáveis fisiológicas: Potencial hídrico da folha ao amanhecer - $\Psi_{w4:30}$, Potencial hídrico da folha ao meio-dia - $\Psi_{w12:00}$, Rendimento quântico potencial do fotossistema II - Fv/Fm, Eficiência quântica do fotossistema II – $\Phi PSII$ e Soil Plant Analysis Development Section – SPAD durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.

Quadrados médios						
Variáveis fisiológicas (48 DAS)						
Fonte	G.L.	$\Psi_{w4:30}$	$\Psi_{w12:00}$	Fv/Fm	$\Phi PSII$	SPAD
Níveis (Ni)	5	2,095740**	14,762843*	0,012290	0,050261*	64,963799*
Bloco	3	0,048035 ^{ns}	0,920440 ^{ns}	0,002907	0,001457 ^{ns}	3,662474 ^{ns}
Resíduo 1	15	0,068799	0,504788	0,003819	0,001680	1,377588
Cultivares	1	14,911453 ^{ns}	0,486703 ^{ns}	0,000014	0,026292 ^{ns}	378,844219 ^{ns}
Ni X C	5	0,357686 ^{ns}	0,298354 ^{ns}	0,000102	0,002277 ^{ns}	7,317039 ^{ns}
Resíduo 2	18	0,028338	0,392589	0,001310	0,001535	2,241124
Total	47	-	-	-	-	-
R. Linear		8,572633*	72,888528*	0,001327	0,006141 ^{ns}	0,289380 ^{ns}
R.		0,001001*	0,771313 ^{ns}	0,058334	0,235179*	308,411551*

C.V. 1 (%)	-5,20	-5,48	8,81	8,31	3,70
C.V. 2 (%)	-3,34	-4,84	5,16	7,94	4,72
Médias Observadas					
M ₈₆₄₄ - C ₁	-5,598617a	-13,05558a	0,700708	0,469888a	28,920000a
M ₈₃₄₉ - C ₂	-4,483888b	-12,85416a	0,701792	0,516696b	34,538750b
DMS	0,1020	0,3800	0,0219	0,0237	0,9079

G.L. – Graus de liberdade; C.V. – Coeficiente de variação; ** - Significativo a 1%; * - Significativo a 5%; ns - Não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 2.6. Análise de variância das variáveis fisiológicas: Teores de pigmentos fotossintéticos: Clorofila a - Chl *a*, Clorofila b - Chl *b*, Clorofila total - Chl *tot.* e Carotenoides - Carot., durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.

Quadrados médios					
Variáveis fisiológicas (48 DAS)					
Fonte variação	G.L.	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl <i>tot.</i>	Carote.
Níveis (Ni)	5	0,163495 ^{ns}	0,009094 ^{ns}	0,238528*	0,017969 ^{ns}
Bloco	3	0,016309 ^{ns}	0,001326 ^{ns}	0,071444 ^{ns}	0,003741 ^{ns}
Resíduo 1	15	0,022521	0,002756	0,027862	0,005143
Cultivares (C)	1	0,077626 ^{ns}	0,010896 ^{ns}	0,147774 ^{ns}	0,014686 ^{ns}
Ni X C	5	0,008771 ^{ns}	0,002010 ^{ns}	0,005064 ^{ns}	0,003158 ^{ns}
Resíduo 2	18	0,006690	0,001113	0,012270	0,001214
Total	47	-	-	-	-
R. Linear		0,051931 ^{ns}	0,000053 ^{ns}	0,049559 ^{ns}	0,003131 ^{ns}
R. Quadrática		0,694504 ^{ns}	0,038698 ^{ns}	1,064642 ^{ns}	0,084697 ^{ns}
C.V. 1 (%)		11,36	12,49	9,59	13,81
C.V. 2 (%)		6,19	7,94	6,36	6,71
Médias Observadas					
M ₈₆₄₄ - C ₁		1,174375a	0,383800a	1,685371a	0,501875a
M ₈₃₄₉ - C ₂		1,284450a	0,397650a	1,796342b	0,536858b
DMS		0,1763	0,0639	0,0671	0,0211

G.L. – Graus de liberdade; C.V. – Coeficiente de variação; ** - Significativo a 1%; * - Significativo a 5%; ns - Não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor (2023).

A condutância estomática média (g_s) teve ajuste quadrático, com boa capacidade preditiva ($R^2 = 0,98$ e $0,96$) para as duas cultivares analisadas (M₈₆₄₄ - C₁ e M₈₃₄₉ - C₂), respectivamente (Figura 2.3a). O melhor resultado para g_s ($0,133 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi encontrado com precipitação total (chuva + irrigação) de 655,96 mm (135% da ET_c) para M₈₃₄₉. A cultivar M₈₆₄₄ obteve menor desempenho para g_s ($0,109 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) com 671,48 mm (140% da ET_c). Esses resultados são corroborados com os encontrados por Silva et al. (2020) e Machado Junior et al. (2017). Os primeiros autores obtiveram g_s a partir de

0,320 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ ao avaliar três cultivares de soja sob cinco tensões de água no solo, enquanto Machado Junior et al. (2017), ao estudar cultivares de soja submetidas a diferentes níveis de umidade do solo obtiveram valores de *g_s* superiores a 0,25 mol H₂O m⁻² s⁻¹. A *g_s* é um fator que está interligado ao efeito global do estresse hídrico sobre os parâmetros fisiológicos, respondendo pela maior parte dos fatores internos e externos da planta (MEDRANO et al., 2002; MAGALHÃES et al., 2017). Paiva et al. (2005) explicam que, quando o déficit de água no solo é irrelevante, as variações da *g_s* obedecem à mesma tendência das plantas sem restrição hídrica e isso ratifica a importância da *g_s* por participar diretamente no crescimento e desenvolvimento dos vegetais, desempenhando função reguladora nas trocas gasosas.

Para a taxa de transpiração (*E*), foi observado ajuste polinomial quadrático com o aumento do nível de irrigação para as duas cultivares analisadas (Figura 2.3b). A cultivar M₈₃₄₉ apresentou melhor desempenho de *E* igual a 3,21 mmol H₂O m⁻² s⁻¹, com precipitação total (chuva + irrigação) de 654,59 mm (137% da ET_c). Em comparação com a cultivar M₈₆₄₄ a taxa de transpiração foi de 2,77 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ com 685,85 mm (143% da ET_c). Dutra et al. (2015) ao avaliarem os índices fisiológicos de feijoeiro cultivado sob deficiência hídrica, encontraram valor de *E* próximo aos descritos (2,96 mmol m⁻² s⁻¹ com lâminas de 80% da ET₀). Magalhães et al. (2017) relatam que em condições de ótima disponibilidade hídrica, as plantas apresentam altas taxas transpiratórias. Mas, caso a água do solo diminua, a planta começa a reduzir a transpiração para reduzir a perda de água e economizar a disponível no solo. Shimazaki et al. (2007) elucidam que a perda de água pelas plantas é ajustada pela atividade das células-guarda. De acordo com Pimentel e Peres (2000), à incapacidade de alguns vegetais em absorver água suficiente para repor aquela consumida no processo transpiratório é devido à redução na transpiração das plantas que ocorrem no decorrer do dia.

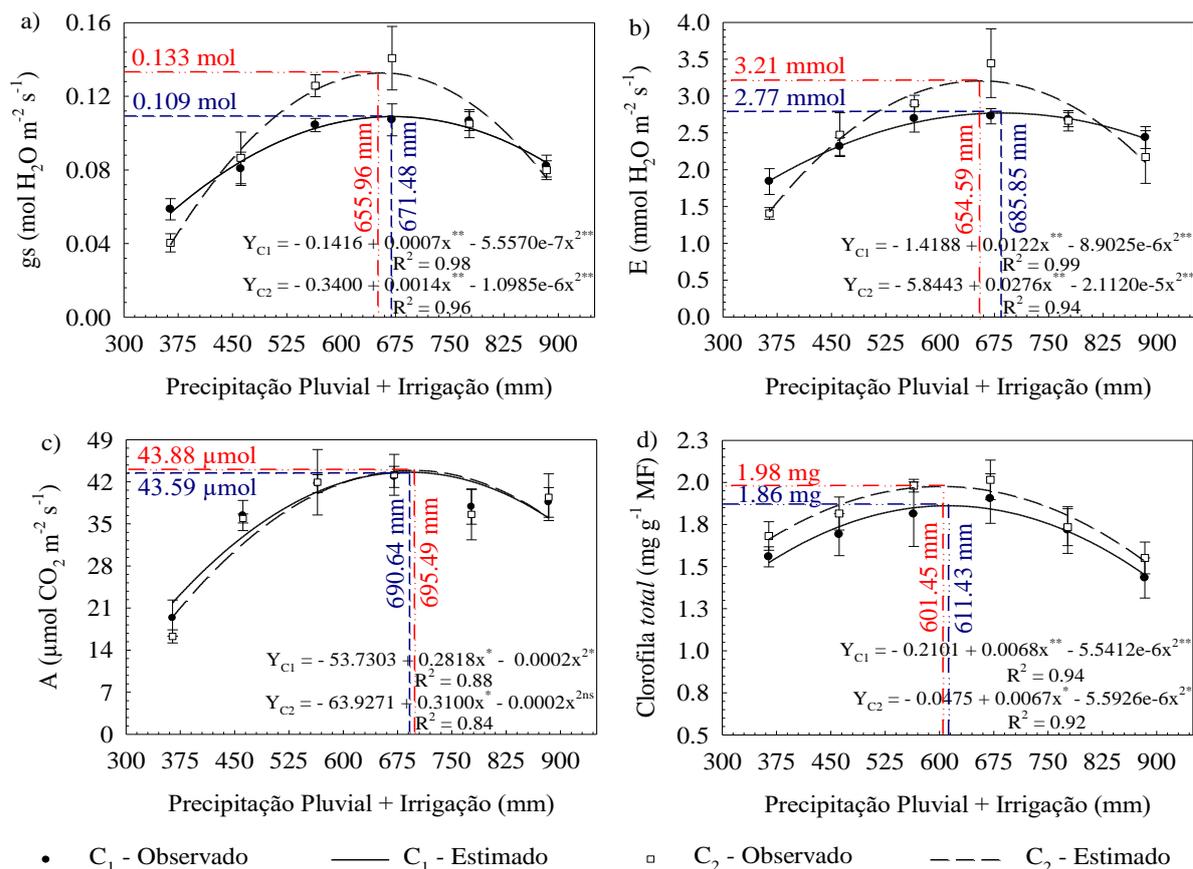
Em relação à taxa de fotossíntese líquida (*A*) das plantas de soja, não foram verificadas diferenças significativas entre as cultivares (Figura 2.3c). E, ambas se ajustaram ao modelo quadrático quando submetidas as diferentes lâminas de irrigação. A cultivar M₈₃₄₉ obteve valor máximo de *A* igual a 43,88 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹ com precipitação total (chuva + irrigação) de 695,49 mm (157 % da ET_c), enquanto a cultivar M₈₆₄₄ para a mesma variável alcançou 43,59 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹ com precipitação total de 690,64 mm (156 % da ET_c). Foram verificadas reduções na ordem de 126% e 99% de *A* para o tratamento de 365 mm (35% da ET_c) nas cultivares M₈₃₄₉ (19,44 μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹) e M₈₆₄₄ (21,86 μmol de CO₂

$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), respectivamente. Em condições de cultivo ideal, no presente trabalho, observou-se resultados superiores aos encontrados por Aliyev (2012), que encontrou taxas de assimilação de CO_2 variando de 25 e 35 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em cultivares de soja sob condições adequadas de suprimento hídrico, e 12,5 a 17,2 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em condições déficit hídrico. Silva et al. (2020) aferindo trocas gasosas e o crescimento de cultivares de soja submetidas a tensões de água, constataram reduções na ordem de 37% na taxa de fotossíntese líquida. De acordo com Silva et al. (2010), o elevado nível de água no solo provoca deficiência de oxigênio, causa fechamento estomático, danos no fotossistema II e redução da fotossíntese. Esses pesquisadores explicam o que o fechamento estomático não é a única causa de redução da taxa fotossintética, pois em condições de elevado nível de água no solo ocorre aumento na produção de ácido abscísico e redução na condutância estomática, que se soma à alta concentração de CO_2 encontrada nos espaços intercelulares do mesofilo.

Os teores de clorofila total de cultivares de soja foram afetadas pelas precipitações totais (chuva + irrigação), sendo observado resposta polinomial quadrática (Figura 2.3d). O maior valor de clorofila total na cultivar M_{8349} foi de 1,98 mg g^{-1} de matéria fresca (MF) com precipitação total de 601,45 mm, ocorrendo redução de 29,1% com a aplicação da lâmina máxima de água. Para a cultivar M_{8644} o maior valor foi de 1,86 mg g^{-1} MF com precipitação total de 611,43 mm, havendo redução de 28,3% com a reposição de 210% da ET_c . De acordo com Caires et al. (2010), a baixa disponibilidade hídrica, assim como o excesso afetam os teores de clorofila e sua fluorescência. Essas informações corroboram com os resultados obtidos nesse trabalho, visto que a menor lâmina de água aplicada nas duas cultivares de soja resultou em valores de clorofila total muito baixos, provavelmente, devido a danos causados nas estruturas fotossintéticas das plantas.

Os resultados do presente estudo denotam que a relação de clorofila na folha de cultivares de soja está diretamente associada ao estado hídrico da planta, resultando em alta síntese de clorofila e aumento da atividade fotossintética (CATUCHI et al., 2012). Além disso, os dados demonstram que os extremos de reposição hídrica restringiram o desempenho no processo fotossintético das plantas porque as clorofilas são responsáveis pela captação de energia luminosa para as reações fotoquímicas (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Figura 2.3. a) Condutância estomática (gs), b) transpiração (E), c) fotossíntese (A) e d) Clorofila *total* (Chl *total*), de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



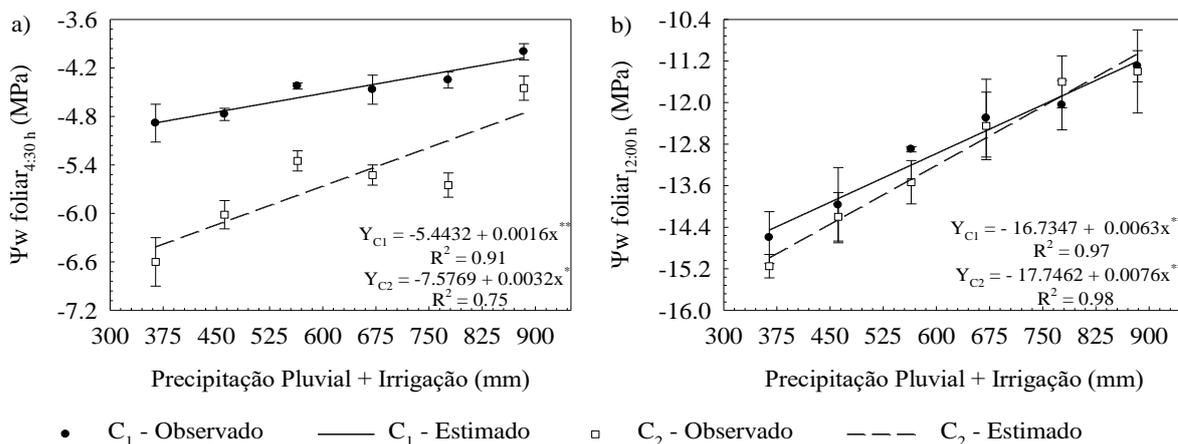
ns - não significativo, ** significativo a 1% e * significativo a 5% de probabilidade pelo test " t ".

Fonte: Autor (2023).

A variável potencial hídrico da folha (Ψ) ajustou-se ao modelo linear em função das precipitações totais (chuva + irrigação), para os dois horários de avaliação ($\Psi_{w4:30}$ e $12:00$), apesar de não haver diferença significativa entre as cultivares analisadas nessa pesquisa (Figura 2.4a e 2.4b). A cultivar M_{8644} tem reduções no potencial hídrico da folha de 18% e 23% para os dois horários analisados ($\Psi_{w4:30}$ e $12:00$, respectivamente) com o acréscimo das precipitações totais de 364,33 a 883,6 mm. A cultivar M_{8349} teve reduções no potencial hídrico da folha (Ψ_w) de 33% e 25% com acréscimo das precipitações totais de 364,33 a 883,6 mm, nos horários analisados 4:30 e 12:00, respectivamente. Esses resultados corroboram aos encontrados por Liu et al. (2005) e Catuchi et al. (2012), que encontraram reduções na ordem de 30 a 40%, respectivamente, com o aumento da aplicação de água na cultura da soja. Creelman et al. (1990) esclarecem que a partir do momento que a umidade do solo fica abaixo da capacidade de campo e o potencial hídrico foliar começa a decrescer e, à medida que fica mais negativo, a planta pode entrar em estado de estresse hídrico. Com aumento do estresse hídrico, tanto a taxa de crescimento como o potencial de água nos

tecidos diminuem, o que evidencia a importância de quantificar a falta de água através da medição do potencial de água na folha.

Figura 2.4. a) Potencial hídrico da folha ao amanhecer ($\Psi_{w4:30}$) e b) ao meio-dia ($\Psi_{w12:00}$) de cultivares de soja submetida a diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



ns - não significativo, ** significativo a 1% e * significativo a 5% de probabilidade pelo test " t ".

Fonte: Autor (2023).

As lâminas crescentes de irrigação afetaram o rendimento quântico potencial do fotossistema II (F_v/F_m) das cultivares de soja avaliadas, com bom ajuste polinomial quadrática (Figura 2.5a). Os maiores valores estimados da relação F_v/F_m foram de 0,75 na cultivar M₈₆₄₄ e de 0,74 na cultivar M₈₃₄₉, com precipitação total (chuva + irrigação) de 632,68 e 635,30 mm, ocorrendo decréscimo médios na ordem de 13,4% e 11,1% após esses níveis, de precipitação total, respectivamente. Esses resultados denotam que quando foi aplicada a lâmina de água ideal para cada cultivar de soja, as plantas obtiveram máxima eficiência no uso da radiação durante a assimilação de CO₂ e produção de energia (CATUCHI et al., 2012). Em contrapartida, as plantas submetidas a menor reposição de água (364,33 mm) apresentaram os menores valores dessa relação, 0,64 e 0,65 nas cultivares M₈₆₄₄ e M₈₃₄₉, respectivamente.

De acordo com Krause e Weiss (1991), em uma planta de soja saudável os valores da relação F_v/F_m variam de 0,73 a 0,83. Porém, existem maiores oscilações em plantas submetidas aos estresses bióticos e abióticos, devido a algum dano foto inibitório nos centros de reação do PSII, provocados pelo estresse (RUVIARO et al., 2011). Assim, os valores encontrados nas plantas sob ótima disponibilidade hídrica, neste estudo, estão dentro da faixa

ideal relatada. E, por isso a eficiência da relação Fv/Fm nas plantas sob estresse hídrico ficou abaixo do mínimo esperado para a cultura da soja.

A relação Fv/Fm representa o rendimento quântico máximo do PSII, e corresponde a dissipação fotoquímica de energia, ou seja, a eficiência de captura de energia pelos centros de reação do PSII (TSUMANUMA; LUNZ, 2008). Desse modo, nos tratamentos sob déficit hídrico, principalmente, na reposição de apenas 35% da ET_c , certamente ocorreram danos ao PSII, o que restringiram a produção de energia pelos centros de reações devido a irregularidade na dissipação da energia fotoquímica e redução da eficiência de captura da mesma (CHAVARRIA et al., 2015). Por outro lado, os danos aos centros de reação do PSII também podem ocorrer devido a saturação do solo, notadamente observada nesse estudo, pela redução da relação de Fv/Fm nos tratamentos sob reposição hídrica de 175% e 210% da ET_c . Vale ressaltar que essa redução foi similar as ocorridas nos tratamentos com deficiência hídrica (Figura 2.5a)

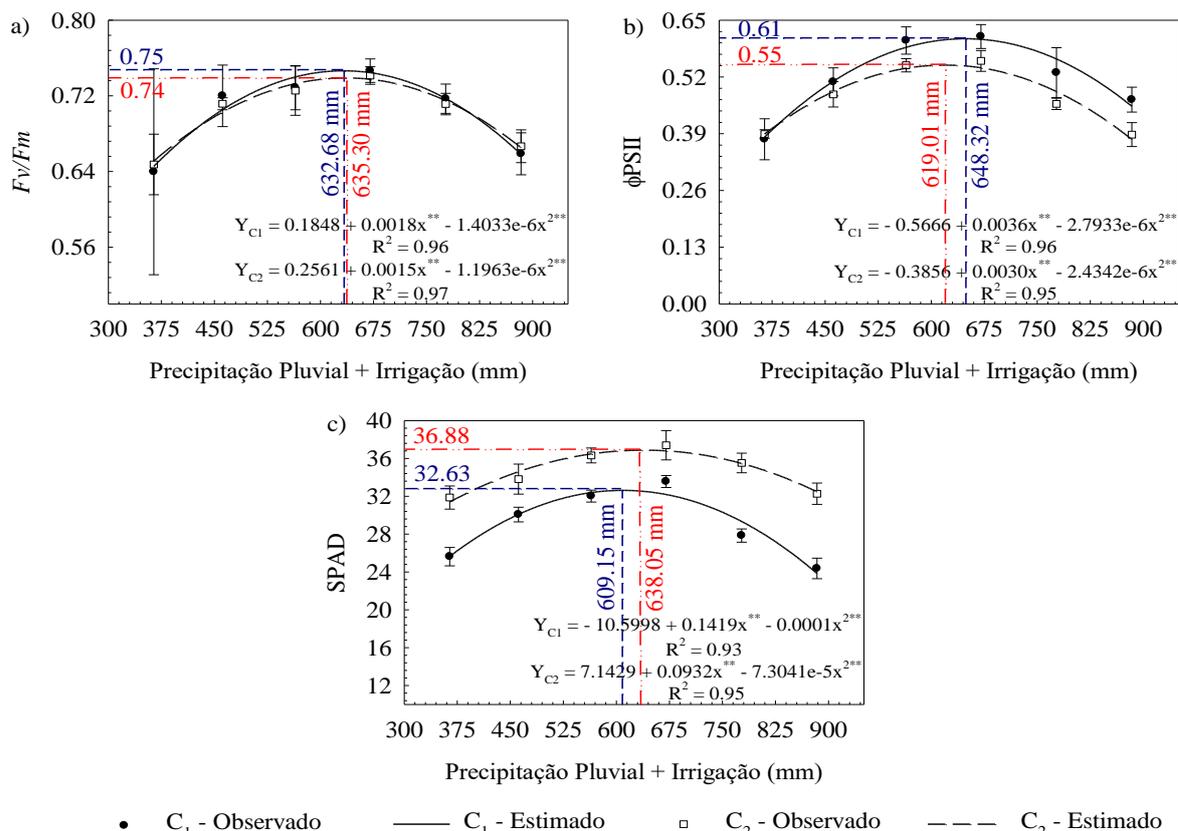
Com relação a eficiência quântica do fotossistema II (Φ_{PSII}) os resultados demonstram acréscimo em seu valor quando foi aumentada a precipitação total (chuva + irrigação) até 648,32 e 619,01 mm que correspondem a 135% e 129% da ET_c das cultivares M_{8644} e M_{8349} , respectivamente (Figura 2.5b). Ao derivar a equação, observou-se que os valores máximos dessa eficiência foram de 0,61 e 0,55 nas cultivares M_{8644} e M_{8349} , respectivamente, com as lâminas citadas anteriormente. Além disso, os menores valores da Φ_{PSII} de 0,38 e 0,45 para a M_{8644} foram obtidos com as lâminas de 35% e 210% da ET_c , respectivamente, enquanto para a M_{8349} o menor valor foi 0,39 e 0,38 com as lâminas de 35% e 210% da ET_c , respectivamente.

Para a cultivar M_{8644} , os valores da Φ_{PSII} tiveram incremento de 58,9% quando a lâmina variou de 35% para 135% da ET_c e redução de 34,1% quando foi aplicado 210% da ET_c em relação a lâmina ideal. De forma similar, a cultivar M_{8349} , os valores da eficiência quântica do fotossistema II aumentaram 40,6% quando a lâmina aplicada passou de 35% para 129% da ET_c e houve redução de 45,2% quando foi aplicado 210% da ET_c em relação ao nível ideal de água aplicado. Portanto, as aplicações dos níveis adequados de água nas duas cultivares de soja, causaram maior eficiência no transporte de elétrons, o que promoveu a máxima eficiência fotossintética nas plantas (CHAVARRIA et al., 2015).

Quanto ao índice *Soil Plant Analysis Development - SPAD*, os resultados apresentaram resposta de forma quadrática em função das lâminas de irrigação aplicadas (Figura 2.5c). Para a cultivar de soja M_{8644} , foi observado que os índices *SPAD* obtidos nas plantas

submetidas a diferentes lâminas de irrigação, aumentaram de 25,65 para 32,63 unidades *SPAD*, resultando em incremento de 27,2% quando a lâmina aumentou de 35% para 127% da ET_c , porém, ocorreu redução de 36,8% após esse nível até a aplicação de 210% da ET_c . Na cultivar M_{8349} , os resultados demonstram aumento de 31,41 para 36,88 unidades *SPAD*, ou seja, acréscimos de 17,4% quando aumentou a aplicação de água da menor lâmina de irrigação para o nível ótimo de 133% da ET_c , entretanto, foi observado diminuições de 13,6% após esse nível até a aplicação da reposição máxima da ET_c (210%). Portanto, tanto o déficit quanto o excesso hídrico causaram redução nos índices *SPAD*, nas duas cultivares de soja estudadas, o que corrobora com os resultados obtidos por Inamullah e Isoda (2005) em trabalhos com estresse hídrico na soja.

Figura 2.5. a) Rendimento quântico potencial do fotossistema II (F_v/F_m), b) eficiência quântica do fotossistema II (ϕ_{PSII}) e c) conteúdo estimado de clorofila (*SPAD*) de cultivares de soja submetida a diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



ns - não significativo, ** significativo a 1% e * significativo a 5% de probabilidade pelo test " t ".

Fonte: Autor (2023).

2.3.3. Componentes de Produção

A interação dos tratamentos com diferentes lâminas de irrigação (Ni) e cultivares (C) de soja (Ni x C), provocou diferenças significativas nas variáveis: massa seca de mil grãos (MSMG), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), massa seca de grãos por planta (MSGP) e rendimento de grãos (RG), com probabilidades inferiores a 5,0 % (Tabela 2.7).

Tabela 2.7. Análise de variância dos componentes de produção: Massa seca de mil grãos – MSMG, Número de vagens por planta – NVP, Número de grãos por planta – NGP, Massa seca de grãos por planta - MSGP e Rendimento de grãos - RG, durante o cultivo de soja submetida à diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.

Quadrados médios						
Componentes de produção (124 DAS)						
Fonte	G.L.	MSMG	NVP	NGP	MSGP	RG
Níveis	5	863,628515*	2814,0843**	22316,9637**	485,9621**	5773477,0520**
Bloco	3	39,744650 ^{ns}	5,2316 ^{ns}	37,8690 ^{ns}	1,6647 ^{ns}	37440,2052 ^{ns}
Resíduo 1	15	8,864325	11,7573	37,8690	1,8826	14143,0708
Cultivares	1	6087,606533*	10231,6800**	57858,7968**	409,7929**	5612309,0916**
Ni X C	5	19,181668 ^{ns}	495,6130**	2629,7253**	32,9737**	327950,8602**
Resíduo 2	18	10,070924	9,8102	2629,7253	1,8570	14119,9834
Total	47	-	-	-	-	-
R. Linear		830,286311*	3440,2571*	22439,8500*	480,2050*	15618544,7479*
R.		3327,354021*	10474,6125*	87739,4314*	1872,9052*	12204833,2034*
C.V. 1		2,36	6,35	7,86	7,72	5,56
C.V. 2		2,51	5,80	7,86	7,67	5,55
Médias Observadas						
M ₈₆₄₄ - C ₁		115,02083a	39,4166a	32,400000a	14,851667a	1797,6054a
M ₈₃₄₉ - C ₂		137,54417b	68,6166b	78,075000b	20,695417b	2481,4858b
DMS		1,9246	1,8995	16,4947	0,8264	72,0669

G.L. – Graus de liberdade; C.V. – Coeficiente de variação; ** - Significativo a 1%; * - Significativo a 5%; ns - Não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor (2023).

As lâminas de irrigação influenciaram significativamente o número de vagem por plantas (NVP) das cultivares de soja e os resultados se ajustaram de forma satisfatória com coeficiente de determinação de R^2 0,98 e 0,99 para M₈₆₄₄ e M₈₃₄₉, respectivamente. A curva polinomial quadrática (Figura 2.6a). Nessa pesquisa, foi constatado aumento significativo na cultivar M₈₆₄₄, com produção média de 95 vagens nas áreas irrigadas com 645,32 mm (135% da ET_c), enquanto o menor número de vagens produzidas, foi de 31 vagens, foram

observados nas parcelas com 364,33 mm (35% da ET_c), ou seja, houve aumento no NVP acima de 200% com a aplicação da lâmina ideal em relação a menor lâmina aplicada (Figura 6a). Na cultivar M_{8349} , a produção máxima foi de 52 vagens, com 718,08 mm (150% da ET_c). Em contrapartida, o menor número de vagens (14) foi encontrado com a menor precipitação total (chuva + irrigação) aplicada, 364,33 mm (35% da ET_c).

De acordo com Desclaux et al. (2000), a deficiência hídrica pode provocar, entre outros fatores, mudanças precoces dos estádios do desenvolvimento vegetativo para o reprodutivo, menores produção de nós, precocidade na formação de flores e vagens, além de diminuir a fase reprodutiva, o que conseqüentemente, reduz o período de enchimento de grãos. Os efeitos da deficiência hídrica são mais acentuados entre os estádios de florescimento e no início do enchimento de grãos, causando o abortamento de flores e por conseqüência, redução do NVP (MACHADO JÚNIOR et al., 2017). Os resultados observados nesse estudo são convergentes com Catuchi et al. (2012) que detectaram redução no NVP em função do déficit hídrico.

O número de grãos por planta (NGP) foi outro componente de produção afetado de forma significativa pelas lâminas totais (chuva + irrigação) e apresentou R^2 de 0,98 e 0,99 para M_{8644} e M_{8349} , respectivamente com a função polinomial quadrática (Figura 2.6b). Observou-se que na cultivar M_{8644} , a produção máxima total foi 245 grãos por planta com precipitação total estimada de 642,77 mm, que corresponde a 134% da ET_c , enquanto a menor quantidade de água disponibilizada (364,33 mm) produziu apenas 77 grãos por planta. Isso representa aumento de 219% na produção obtida com a lâmina ideal em comparação a menor lâmina aplicada. No entanto, também foi observado redução de 106% (119), quando foi aplicado a maior lâmina de água 210% da ET_c em relação ao nível ideal (Figura 2.6b). Na M_{8349} , a lâmina estimada de 696,45 mm (145% da ET_c) favoreceu à produção máxima de 145 grãos por planta, que representa aumentos de 398% em relação ao tratamento de 35% da ET_c (29 grãos por planta) e ao comparar o maior NGP com a maior precipitação total 883,60 mm (210% da ET_c) houve redução de 34% (108 grãos por planta).

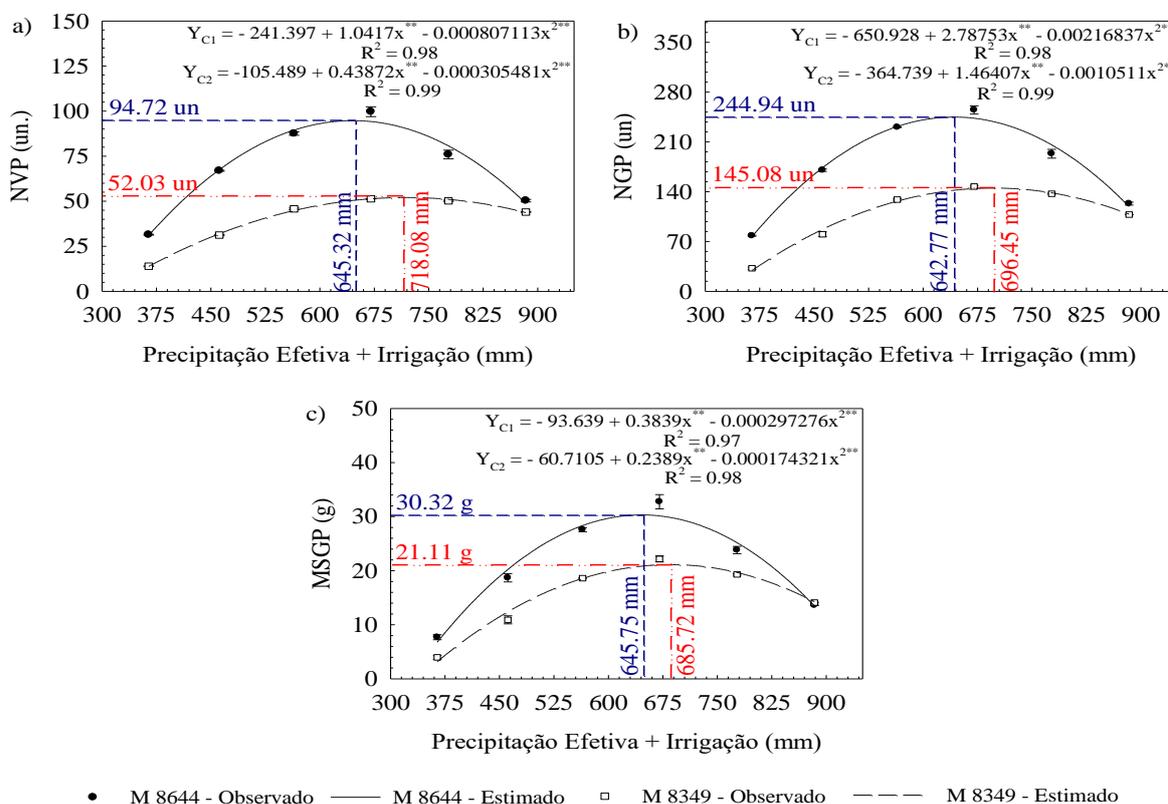
Esses resultados demonstram que as plantas sob baixa reposição hídrica, a quantidade de água disponível não era suficiente para o enchimento de grãos. Resultados semelhantes foram encontrados por Gava et al. (2016) quando estudaram estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja.

Semelhante ao que foi observado para o NVP e NGP, os resultados da massa seca de grãos por planta (MSGP), também indicam que houve diferença significativa entre as áreas

com diferentes níveis precipitação total (chuva + irrigação) e cultivares de soja, em que os valores da massa seca de grãos por planta tiveram boa correlação com as funções (Figura 2.6c). Na cultivar M₈₆₄₄, a massa seca de grãos por planta máxima foi 30 g, obtida com a lâmina de 645,75 mm (135% da ET_c), e a menor quantidade produzida foi 7 g sob reposição hídrica de penas 35% da ET_c, ou seja, a lâmina ideal de água gerou aumento da massa de grãos por planta acima de 347% em comparação a menor lâmina aplicada. Além disso, houve redução de 125% (13 g) quando foi aplicado lâminas de irrigação, de 883,60 mm – 210% da ET_c, acima do nível ideal (Figura 6.6c). A cultivar M₈₃₄₉, com aplicação de lâmina total de 685,72 mm, que corresponde a 143% da ET_c, teve a maior produção de massa seca de grãos por planta igual a 21 g, sendo observado aumentos superiores a 565% quando comparado com o menor nível de irrigação 364,33 mm (35% da ET_c), que produziu apenas 3 g planta⁻¹.

Esses resultados reforçam o efeito danoso que a deficiência e o excesso de água provocam na fisiologia e produção de grãos de soja, o que está de acordo com vários outros estudos com soja submetida ao estresse hídrico (CAIRES et al., 2010; CANDOGAN et al., 2013; GAVA et al., 2016; MACHADO JÚNIOR et al., 2017).

Figura 2.6. a) Número de vagem por planta (NVP), b) número de grãos por planta (NGP) e c) massa seca de grãos por planta (MSGP) de cultivares de soja sob diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL de outubro 2020 a março de 2021.



ns - não significativo, ** significativo a 1% e * significativo a 5% de probabilidade pelo test " t ".

Fonte: Autor (2023).

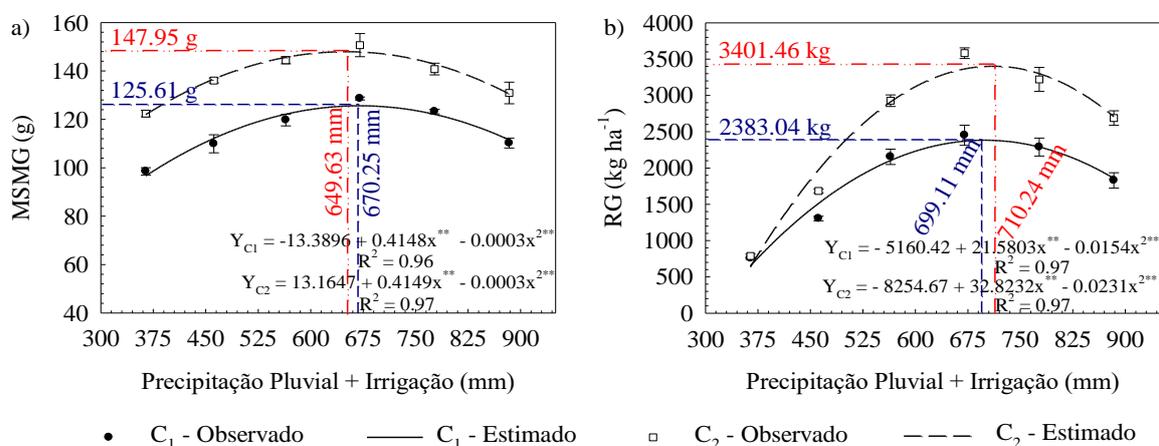
As lâminas de irrigação influenciaram de forma significativa a massa seca de mil grãos (MSMG), por planta, das cultivares de soja, sendo observado resposta polinomial quadrática (Figura 2.7a). Na cultivar M₈₆₄₄ foi observado massa média estimada de 125,61 g a cada 1.000 grãos com a aplicação de 670,25 mm (140% da ET_c), enquanto, nos tratamentos com 35% da ET_c (364,33 mm) a MSMG média foi 96,65 g, ou seja, quando a lâmina aplicada aumentou de 35% para 140% da ET_c houve incrementos de 29,9% na MSMG. Porém, lâminas acima desse nível causaram reduções médias de 12,6%. Na cultivar M₈₃₄₉ observou-se que a maior MSMG de 147,95 g foi obtida com a aplicação de 649,63 mm (136% da ET_c), havendo aumentos de 21,3% em relação às áreas irrigadas com a menor lâmina aplicada (35% da ET_c) que produziram 121,95 g de MSMG. E, nas parcelas irrigadas com lâminas acima do nível ótimo houve reduções médias de 13,4%.

O rendimento de grãos (RG), assim como as demais variáveis estudadas, apresentaram resultados com valores que tem boa correlação com funções quadráticas (Figura 2.7b), isso demonstra que na cultivar M₈₆₄₄ as plantas submetidas ao tratamento com o nível de irrigação de 130% da ET_c obtiveram a máxima produtividade estimada (2.383 kg ha⁻¹), representando aumentos de 265% quando comparado ao RG (653 kg ha⁻¹) obtido com a menor lâmina de irrigação aplicada (364,33 mm - 35% da ET_c), enquanto, níveis acima do ótimo 883,60 mm (210% da ET_c) causou reduções de 28%. Na cultivar M₈₃₄₉, o maior RG estimado (3.401 kg ha⁻¹) foi obtido com a lâmina de 710,24 mm (132% da ET_c), enquanto o menor valor (636,65 kg ha⁻¹) foi constatado nas plantas com menor lâmina aplicada (35% da ET_c). Porém, a maior lâmina aplicada (883,60 mm - 210% da ET_c) causou redução no RG (2.706 kg ha⁻¹) de 26% em relação ao RG obtido com a lâmina ótima (710,24 mm - 132% da ET_c). Esses resultados são convergentes com Sincik et al. (2008), que estudaram o rendimento da soja sob deficiência hídrica, na região do Sul de Marmara - Turquia, e observaram redução significativa de 45% quando comparado o ciclo com irrigação plena, 617 mm por ciclo e o tratamento sequeiro (com apenas um evento de irrigação de salvação 7,5 mm por ciclo). Similarmente, Rosadi et al. (2005) também constataram restrições significativas na produção e rendimento da soja submetida ao estresse hídrico, sendo observado os piores resultados quando intensificava o estresse.

Nesse sentido, estudos publicados na literatura indicam que a cultura da soja apresenta necessidade hídrica crescente em função do desenvolvimento da planta, atingindo valores

máximos, de 7,0 a 8,0 mm por dia⁻¹, durante as fases de floração e enchimento de grãos, com decréscimos a partir desse período (CANDOGAN et al., 2013). Para se obter o rendimento máximo, a quantidade de água requerida pela cultura da soja varia de 450 a 800 mm por ciclo (CATUCHI et al., 2012). Ressalta-se ainda que, os rendimentos máximos obtidos nas duas cultivares de soja, utilizadas nessa pesquisa, foram obtidos com lâminas de irrigação dentro da faixa sugerida como ideal (450 – 800 mm).

Figura 2.7. a) Massa seca de mil grãos (MSMG) e b) rendimento de grãos (RG) de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



ns - não significativo, ** significativo a 1% e * significativo a 5% de probabilidade pelo test " t ".

Fonte: Autor (2023).

2.4. CONCLUSÕES

A variação da aplicação de água em função da Evapotranspiração da Cultura (ET_c) promove diferença significativa para trocas gasosas e ocasiona redução na eficiência fotoquímica potencial e efetiva da soja.

O aumento da aplicação das lâminas de irrigação influência de forma diretamente proporcional o índice SPAD e as componentes de produção: número de vagens por planta e rendimento de grãos. E valores significativos são obtidos com a irrigação igual a 125% da ET_c.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROFIT. Sistemas de agrotóxicos fitossanitários. Disponível em: <http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 20 out. 2019.

ALIYEV, J.A. Peculiarities of CO₂ exchange in soybean genotypes contrasting in grain yield. **Adv. Biol. Chem.** 8. 2012.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma, Itália: FAO. Irrigation and Drainage Paper, v.56, 297p. 1998.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; DA SILVA, D. D. S., A. A.; Manual de Irrigação, 9ª Edição - Viçosa, MG: Ed. UFV, 545 p. 2019.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 398p.

CAIRES, A. R. L.; SCHERER, M. D.; SANTOS, T. S. B.; PONTIM, B. C. A.; GAVASSONI, W. L.; OLIVEIRA, S. L. Water stress response of conventional and transgenic soybean plants monitored by chlorophyll *a* fluorescence. **Journal of Fluorescence**, v.20, p.645-649, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10895-009-0594-4>.

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

CARVALHO, O.M.; Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo, cultivados com cana-de-açúcar. 2003. P.74 (Dissertação mestrado em agronomia– Rio Largo: Universidade Federal de Alagoas, 2003.

CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZI, K. A.; BARBOSA, A. M.; SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.519-527, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000400007>.

CAVALCANTI, F. J. de A. (Coord.). *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2a. aproximação*. 2 ed. rev. Recife: IPA. 212 p. il. 2008.

CHAVARRIA, G.; DURIGON, M. R.; KLEIN, V. A.; KLEBER, H. Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, v.45, n.8, p.1387-1393, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140705>.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra 2022/2023.

COSTA, G. A. **Avaliação da disponibilidade hídrica para o milho na região de Rio Largo – AL**. 21 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias, 2003.

COSTA, M. S.; MANTOVANI, E. C.; CUNHA, F. F.; ALEMAN, C. C. Avaliação dos níveis de lâmina de irrigação no desempenho do feijoeiro cultivado na região da zona da mata, MG. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. v. 10, nº.4, p. 799- 808, 2016.

CREELMAN, R. A.; MASON, H. S.; BENSON, R. J.; BOYER, J. S.; MULLET, J. E. Water deficit and abscisic acid cause differential inhibition of shoot versus root growth in soybean seedling. *Plant Physiol. Lewes*, v. 92, p. 205-214, 1990.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T.-H.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, v.40, p.716-722, 2000. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403716x>.

DUTRA, A. F.; MELO, A. S.; FILGUEIRAS, L. M. B.; SILVA, A. R. F.; OLIVEIRA, I. M.; BRITO, M. E. B. Parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão- caupi cultivado sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.2, p.189-197, 2015.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, Cooperative Extension Service, 12p. 1977.

FERRAZ, R. L. S.; MELO, A. S.; SUASSUNA, J. F.; BRITO, M. E. B.; FERNANDES, P. D.; NUNES JÚNIOR, E. S. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, n.2, p.181-188, 2012.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA J. L.; ESCOBEDO J. F.; TEODORO I.; LYRA G. B.; ARAÚJO NETO, R. A. Cana de açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.798-804, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n08p798-804>.

GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; ALMEIDA, B. M.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R. Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.10, n.3, p.305-315, 2016.

INAMULLAH, I.; ISODA, A. Adaptive responses of soybean and cotton to water stress. II. Changes in CO₂ assimilation rate, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in relation to leaf temperature. **Plant Production Science**, v.8, n.2, p.131-138, 2005. <https://doi.org/10.1626/pp.s.8.131>.

KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. **Annual Review of plant Physiology**, v.42, p.313-349, 1991. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.001525>.

LICHTENTHALER, H.K.; WELLBURN, A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, v.11, p.591-592, 1983.

LIU, F.; ANDERSEN, M. N.; JACOBSEN, S-E.; JENSEN, C. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. *Environmental and Experimental Botany*. Taastrup, Denmark, v. 54, p. 33-40, 2005.

LOPES, N. F.; LIMA, M. G. S. Fisiologia da produção, Viçosa, MG: **Ed. UFV**, 2015, 492 p.

LYRA, G. B; LYRA, G. B; SOUZA, J. L.; SANTOS, M. A. Balanço sequencial de água no solo para o manejo da irrigação de baixa frequência e alta intensidade na cana-de-açúcar. *STAB*, 28:22-25. 2010.

MACHADO JÚNIOR, C. S.; SILVA, C. R.; SANCHES, M. C.; OSVALDO TOSHIYUKI HAMAWAKI, O. T.; SOUSA, L. B. Physiologic parameters of soybean of determinate and indeterminate growth habit subjected to levels of soil moisture. **Pesquisa Agropecuária**

Brasileira, v.52, n.6, p.419-425, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600005>.

MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. DE; TEODORO, I.; ROCHA, A. E. Q. DE; CAVALCANTE JÚNIOR, C. A.; LYRA, G. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; CARVALHO, A. L. DE; FERRAZ, R. L. DE S. Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.7, p.1188–1196, 2019.

MAGALHAES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; CAVALCANTE, C. A.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, R. C. Physiology and Grain Yield of Common Beans under Evapotranspirated Water Reposition Levels. **Irrigat Drainage Sys Eng**, v. 6, n. 1, p. 2-8, 2017.

MEDRANO, H.; ESCALONA, J. M.; BOTA, J.; GULIAS, J.; FLEXAS, J. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. **Annals of Botany**, v.89, n.7, p.895-905, 2002.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO, J. E. P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetidos a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.161-169, 2005.

PIMENTEL, C.; PEREZ, A. J. de L. C. Estabelecimento de parâmetros para avaliação de tolerância à seca em genótipos de feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 35, n. 1, p. 31-39, 2000.

ROCHE, D. Stomatal conductance is Essential for higher yield potential of C₃ crops. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 34, n. 4, p. 429–453, 2015.

ROSADI, R. A. B.; AFANDI, M. S.; ITO, K.; ADOMAKO, J. T. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) under deficit irrigation. **Paddy Water Environmental**, v.3, p.219-223, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10333-005-0017-3>.

RUVIARO, C.; DORNELES, J. G. L.; SILVA, A. M. BEN, C. A. V. Comportamento da soja submetida a diferentes regimes hídricos e viabilidade da irrigação suplementar na região do Vale do Jaguari-RS. **PERSPECTIVA**, v.35, n.131, p.79-90, 2011.

SANTIAGO, A. D. PROCÓPIO, S. O.; CARVALHO H. W. L.; BRAZ, G. B. P. Desempenho de cultivares de soja em áreas com histórico de produção de cana-de-açúcar no Sealba. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. 30 p. (**Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros**, ISSN 1678-1961; 142).

SHIMAZAKI, K. I. et al. Light regulation of stomatal movement. *Annual Review of Plant Biology*, Gainesville, v. 58, n. 1, p. 219-247, 2007.

SILVA, C. D. S.; SANTOS, P. A. A.; LIRA, J. M. S.; SANTANA, M. C.; SILVA JÚNIOR, C. D. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas a deficiência hídrica. *Revista Caatinga*, v.23, n.4, p.7-13, 2010.

SILVA, J. A.; SANTOS, P. A. B.; CARVALHO, L.G.; MOURA, E. G.; ANDRADE, F.R. Gas exchanges and growth of soybean cultivars submitted to water deficiency. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**. 50, e58854. 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5058854>.

SINCIK, M.; CANDOGAN, B. N.; DEMIRTAS, C.; BÜYÜKCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GÖKSOY, A. T. Deficit irrigation of soya bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a sub-humid climate. **Journal of Agronomy & Crop Science**, v.194, p.200-205, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00307.x>.

SOUZA, J. L.; MOURA FILHO, G.; LYRA, R. F. F., TEODORO, I.; SANTOS, E. A.; SILVA, J. L.; AMORIM, E. C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, p.131-141, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. 5. ed, Porto Alegre: Art med, 2013, 918 p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1), 1955.

TSUMANUMA, G. M.; LUNZ, A. M. P. Feijoeiro. In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; SESTARI, I. **Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos**. Piracicaba: Ceres, 2008. p. 77-91.

CAPÍTULO III

MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE SOJA SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO

RESUMO: O uso de modelos semiempíricos para simulações de variáveis de crescimento e produção são largamente utilizados. Por isso, objetivou-se com este trabalho estimar o Comprimento de Planta pelo modelo Logístico, Índice de Área Foliar pelo modelo Pic Log Normal e Fitomassa Seca Total pelo modelo Sigmoidal para duas cultivares de soja sob diferentes níveis de reposição da água evapotranspirada, utilizando dados de campo obtido nas condições agrometeorológicas de Rio Largo – AL. O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de frações da evapotranspiração da cultura – ETc (35, 70, 105, 140, 175 e 210% e duas cultivares de soja). As seis lâminas de irrigação ficaram nas parcelas e as duas cultivares nas subparcelas. A acurácia do modelo foi avaliada com base na raiz do quadrado médio do erro (RMSE), índice de concordância (d) de Willmott (1981), o coeficiente de correlação (r) e o desvio percentual. Nos tratamentos com lâminas de irrigação de 140, 175 e 210% da ETc, não foi verificado déficit hídrico, na fase reprodutiva, pois o ARM ficou abaixo da AFD apenas nos últimos 15, 13 e 11 dias, respectivamente, do final do ciclo de cultivo para ambas as variedades, uma vez que durante todo o ciclo da cultura esteve acima da AFD, os coeficientes de determinação ajustado (R^2_{ajs}) para o comprimento de planta de soja variaram de 0,984 a 0,999, isso indicou que o modelo foi eficiente para explicar a maior parte da variabilidade do comprimento de planta. O coeficiente de correlação de Pearson variou de 0,906 a 0,986 e o índice de confiança máximo foi de 0,977, demonstraram ótimo ajuste do modelo aos dados de IAF. As lâminas de irrigação influenciaram de forma significativa a fitomassa seca total (FST) das cultivares de soja, sendo observada resposta polinomial quadrática. A cultivar C₁ apresentou FST de 8,82 t ha⁻¹ com a lâmina de irrigação de 138% da ETc, enquanto a cultivar C₂ alcançou 6,27 t ha⁻¹ com a lâmina de irrigação de 142% da ETc para essa variável. Diante do exposto, as lâminas de irrigação não influenciaram a capacidade dos modelos representar o crescimento e produtividade da cultura.

Key words: fitomassa seca total; IAF; déficit hídrico; modelagem agrícola.

CAPÍTULO III

MODELING OF THE GROWTH AND PRODUCTIVITY OF SOYBEAN CULTIVARS UNDER DIFFERENT IRRIGATION LEVELS

ABSTRACT: The use of semi-empirical models for simulations of growth and production variables are widely used. Thus, the aim of this work was to estimate Plant Length by the Logistic model, Leaf Area Index by the Pic Log Normal model, and Total Dry Phytomass by the Sigmoidal model for two soybean cultivars under different levels of evapotranspiration water replacement, using data from the field obtained in the agrometeorological conditions of Rio Largo – AL. The design used was randomized blocks with split plots and four replications. The treatments consisted of crop evapotranspiration fractions (35, 70, 105, 140, 175 and 210% and two soybean cultivars). The six irrigation levels were in the plots and the two cultivars in the subplots. The accuracy of the model was evaluated based on the root mean square error (RMSE), Willmott's (1981) concordance index (d), correlation coefficient (r) and percent deviation. In treatments with irrigation depths of 140%, 175% and 210% of ET_c, water deficit was not verified in the reproductive phase, since the ARM was below the AFD only in the last 15, 13 and 11 days, respectively, of the end of the crop cycle for both varieties, since during the entire crop cycle it was above the AFD, the adjusted determination coefficients (R^2_{ajs}) for the soybean plant length ranged from 0.984 to 0.999, which indicates that the model was efficient to explain most of the variability in plant length. Pearson's correlation coefficient ranged from 0.906 to 0.986 and the maximum confidence index was 0.977, demonstrating an excellent fit of the model to the IAF data. The irrigation depths significantly influenced the total dry matter (TSF) of the soybean cultivars, with a quadratic polynomial response being observed. Cultivar C₁ showed FST of 8.82 t ha⁻¹ with an irrigation depth of 138% of ET_c, while cultivar C₂ reached 6.27 t ha⁻¹ with an irrigation depth of 142% of ET_c for this variable. Given the above, the irrigation depths did not influence the capacity of the models to represent the growth and productivity of the crop.

Key words: total dry mass; IAF; water deficit; agricultural modeling.

3.1. INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma das principais culturas agrícolas do Brasil e se destaca no cenário econômico mundial como a maior fonte de óleo e proteína vegetal (SILVA, 2020). Em relação à produção de grãos, o maior produtor mundial é o Brasil, com 154,57 milhões de toneladas colhidos em 44,06 milhões de hectares em 2022/23 (CONAB, 2023).

No Nordeste brasileiro, os destaques da sojicultura são os Estados do Maranhão, Piauí e Bahia com produção de 3,53; 3,76 e 6,22 milhões de toneladas, respectivamente. Em Alagoas a produção dessa oleaginosa ainda é considerada baixa (4.640 toneladas em 1.224 hectares cultivados). Uma das principais causas dessa baixa produção é a limitação espacial e temporal da precipitação, o uso de cultivares de baixo potencial produtivo, associado ao manejo inadequado de recursos hídricos, como irrigação mal planejada (SANTIAGO, 2019; CONAB, 2022).

Nesse sentido, a escolha de cultivares de soja com características produtivas adaptadas a região e o uso da irrigação torna-se essencial para um bom desempenho da cultura no campo, principalmente quando cultivada em um período de baixa ocorrência de chuvas. A cultura da soja, quando bem manejada, consegue atingir o máximo crescimento e desenvolvimento e expressa seu potencial produtivo (TAGLIAPIETRA et al., 2018).

Outro fator que pode ajudar alavancar a produção dessa oleaginosa na região Nordeste é a utilização de modelos de cultura, auxiliando no planejamento da irrigação e manejo agrícola, além de assessorar estudos dos efeitos e interações das condições ambientais, e pode ainda, simular cenários sob diferentes condições hídricas, de solo e atmosfera (MAGALHÃES et al., 2019). Portanto, o uso de modelos calibrados e validados pode ser útil para gerar informações concernentes à cultura da soja voltadas para a reposição da água evapotranspirada pela cultura e escolha de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas de diferentes regiões de cultivo e cenários climáticos futuros.

Desse modo, é imprescindível à realização de mais pesquisas sobre modelos de cultura, que possam auxiliar o manejo para melhorar o desenvolvimento e rendimento da cultura da soja, além de melhorar a eficiência do uso da água para a cultura. Nesse sentido, objetivou-se com esse estudo avaliar o ajuste de modelos de crescimento e produtividade de cultivares de soja sob diferentes lâminas de irrigação.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Características da Área Experimental

O experimento foi realizado entre 28 de outubro de 2020 e 01 de março de 2021 (124 dias), em uma área de 2.660 m² no *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias - CECA (09°28'02" S, 35°49'43" W e 127 m de altitude) da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, município de Rio Largo, Alagoas, Brasil. De acordo com a classificação de Thornthwaite e Mather (1955), o clima da região é caracterizado, como úmido, megatérmico (quente), com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno. A precipitação média anual é 1.800 mm, temperatura do ar média anual 25,4° C e umidade relativa do ar média mensal acima de 70% (SOUZA et al., 2006 FERREIRA JUNIOR et al., 2014). Os dados meteorológicos do período experimental (temperatura do ar - T, °C; umidade relativa do ar - U, %; velocidade do vento a 2 m de altura - u₂, m s⁻¹; e precipitação pluvial - P, mm), foram obtidos por uma estação agrometeorológica automática (Micrologger – 21 XL, Campbell Scientific, Logan, Utah), distante 30 m da área experimental. O solo local foi classificado como Latossolo amarelo coeso argiloso de textura média/argilosa, com as características químicas apresentadas na Tabela 3.1 e físico-hídricas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1. Resultados da análise química do solo da área experimental, nas profundidades de 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.

Prof. cm	pH	P mg dm ⁻³	Ca	Mg	K	SB	Al	H+Al	CTC	V %	M.O g kg ⁻¹
		cmolc dm ⁻³								
00-20	5,6	29,92	2,9	1,3	0,11	4,03	0,0	4,29	8,32	48,0	42,6
20-40	4,9	13,05	1,3	0,4	0,06	1,77	0,7	4,46	6,23	28,0	21,4

Nota¹: Metodologia Embrapa; Extratores: Água (pH); Mehlich (P, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn); KCl (Ca, Mg e Al); Oxidação (C); Acetato de Cálcio (H+Al); B (HCl); Sulfato de Cálcio (S); Cálculos: S.B=Ca+Mg+Na+K; CTC=S.B+(H+Al); V%=(S.B/CTC)*100.

Nota²: Metodologia: IAC; Extratores: Resina (P).

Fonte: Autor (2023).

A adubação de fundação foi realizada com base na análise química do solo, seguindo as recomendações do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) (CAVALCANTI, 2008) para a cultura da soja, utilizando 333 e 100 kg ha⁻¹, de superfosfato simples (18% de P₂O₅) e cloreto de potássio (60% de K₂O), respectivamente.

Tabela 3.2. Características físico-hídricas e granulométricas do solo da área experimental.

Características Físico-Hídricas	Valores (m)		
	0,00- 0,10	0,10- 0,20	0,20- 0,30
¹ Capacidade de Campo ($m^3 m^{-3}$)	0,212	0,230	0,247
¹ Ponto de Murcha Permanente ($m^3 m^{-3}$)	0,127	0,138	0,149
¹ Densidade Volumétrica ($Mg m^{-3}$)	1,389	1,452	1,531
² Porosidade Total ($m^3 m^{-3}$)		0,423	
² Velocidade de Infiltração Básica ($mm h^{-1}$)		52,000	
³ Granulometria ($g kg^{-1}$)	0,00- 0,20		0,20- 0,40
Areia Total ($g Kg^{-1}$)	603		507
Silte ($g Kg^{-1}$)	71		39
Argila ($g Kg^{-1}$)	326		454
Classe Textural	Franco Argilo Arenosa		Argila Arenosa

Nota¹: Metodologia: Granulometria: método da pipeta, dispersão com hexametáfosfato de sódio. Umidade 1/3 e 15 BAR, extratores de Richards. Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa, 2017.

Nota²: Capacidade de campo em -10 kPa; Ponto de murcha em -1500 kPa

Fonte: ¹Carvalho (2003); ²Costa (2003); ³Autor (2023).

3.2.2. Delineamento Experimental, Tratamentos e Plantio

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram seis lâminas de irrigação: $L_1 = 35\%$ da ET_c , $L_2 = 70\%$ da ET_c , $L_3 = 105\%$ da ET_c , $L_4 = 140\%$ da ET_c , $L_5 = 175\%$ da ET_c , $L_6 = 210\%$ da ET_c , em função da evapotranspiração da cultura (ET_c) e duas cultivares de soja M_{8644} e M_{8349} . As seis lâminas de irrigação ficaram nas parcelas e as duas cultivares nas subparcelas.

O experimento foi realizado no período de menor incidência de chuva, com semeadura no dia 28 de outubro de 2020 e colheita no dia 01 de março de 2021. A área experimental foi de 70,0 m de comprimento por 38,0 m de largura, o que totalizou 2.660 m². Em cada bloco foram fixadas seis parcelas (lâminas de irrigação) composta por 20 linhas com 10,0 m de comprimento por 8,0 m de largura (80,0 m²), e nas subparcelas (cultivares de soja) 10 linhas com 5,0 m de comprimento e 8,0 m de largura (40,0 m²), totalizando 24 parcelas e 48 subparcelas experimentais.

As sementes foram inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio *Bradyrhizobium japonicum*, estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080, para a fixação biológica do nitrogênio (FBN) seguindo a dosagem recomendada pelo fabricante. Após inoculação a semeadura foi realizada manualmente, com espaçamento entre linhas de 0,50 m e população de plantas final para cultivar $M_{8644} - C_1$ (200.000 plantas ha⁻¹) e $M_{8349} - C_2$ (300.000 plantas

ha⁻¹), essas densidades foram adotadas considerando o Nordeste de Tocantins (Microrregião – 504) de acordo com recomendação do fabricante.

O controle das plantas daninhas foi realizado com herbicidas em pré-emergência e em pós-emergência, assim como o controle de pragas foi feito com a aplicação de inseticidas e o controle de doenças foi realizado com fungicidas (AGROFIT, 2019).

3.2.3. Manejo dos Lâminas de irrigação

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pelo método de Penman-Monteith, parametrizado no boletim FAO-56 (Allen et al., 1998), Equação 8. Com os dados meteorológicos coletados da estação agrometeorológica do *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (8)$$

em que: ET_0 : Evapotranspiração de Referência (mm dia⁻¹); R_n : Saldo de radiação diário (MJ m⁻² dia⁻¹); G : Fluxo total diário de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹); T : Temperatura média diária do ar (°C); U_2 : Velocidade do vento média diária à altura de 2 m (m s⁻¹); e_s : Pressão de saturação do vapor médio diário (kPa); e_a : Pressão atual do vapor médio diário (kPa); ($e_s - e_a$): déficit de saturação de vapor médio diário (kPa); Δ : declividade da curva da pressão do vapor em relação à temperatura (kPa °C⁻¹); γ : coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹).

A irrigação foi realizada pelo método de micro aspersão, com espaçamento de 3,5 x 3,5 m, pressão de serviço de 30 m.c.a, vazão média de 0,1 m³ h⁻¹ e intensidade de aplicação de 5,8 mm h⁻¹. A quantificação das lâminas de irrigação aplicada durante o experimento, foi registrada pela leitura diária dos hidrômetros (Tabela 3.3), com turno de rega de dois dias. Nos 10 primeiros dias após o semeio os níveis de reposição de água foram constantes para todos os tratamentos, após esse período o manejo de irrigação foi determinado com base na evapotranspiração diária média da cultura referenciada à semana anterior, Equação 9. A suspensão dos eventos de irrigação se deu a partir do dia 08 de fevereiro de 2021 no estágio de desenvolvimento fisiológico R_6 (vagem cheia).

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (9)$$

em que: ET_0 (mm dia⁻¹); K_C : coeficiente da cultura de cada fase de desenvolvimento foi considerado os valores de: 1,0; 1,2 e 0,50, para as fases inicial, vegetativo e final, respectivamente, conforme o boletim FAO-56 (Allen et al., 1998).

Tabela 3.3. Frações da Evapotranspiração da Cultura (ET_c , %) e lâminas totais de água aplicadas (irrigação + precipitação pluvial, mm) durante o ciclo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

ET_c (%)	35	70	105	140	175	210
Lâmina total (mm)	364,33	461,50	564,50	670,30	777,10	883,60

Fonte: Autor (2023).

3.2.4. Medida da Umidade do Solo com o TDR

Durante o experimento, o conteúdo de água do solo na zona das raízes (W , mm) foi obtido por meio da técnica de reflectometria de domínio do tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*) modelo (CS616, *Campbell Scientific*, Logan, Utah), ligados a um sistema de aquisição de dados CR1000, programada para adquirir os dados a cada 30 minutos. As sondas de TDR foram posicionadas verticalmente no solo, distantes 0,15 m das plantas e dentro das fileiras centrais, na profundidade de 0,00-0,30 m, conforme metodologia recomendada por Rocha et al. (2014) e calibradas por Sarmento et al. (2019), seguindo metodologia descrita por SILVA (2013).

O armazenamento de água no solo (ARM, mm), foi monitorado a partir do balanço hídrico pelo método de (Thornthwaite e Mather, 1955), adaptado por Lyra (2010) para culturas agrícolas. Calculando a capacidade de água no solo (CAD, mm), para as diferentes fases da cultura, conforme a (Equação 10), considerando a profundidade efetiva do sistema radicular (z , m), que de acordo com FEHR e CAVINESS (1977) varia de 0,1 a 0,4 m, entre a emergência e a senescência da cultura, respectivamente. A umidade do solo a base úmida na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (θ , m³ m⁻³) foram quantificados por curva de retenção de água no solo.

$$CAD = 1.000(\theta_{cc} - \theta_{pmp})z \quad (10)$$

em que: base úmida na capacidade de campo ($\theta_{cc}=0,2297$ m³ m⁻³) e base úmida no ponto de murcha permanente ($\theta_{pmp}=0,1380$ m³ m⁻³).

Valores referentes à água facilmente disponível (AFD, mm) foram calculados conforme a Equação 11, que utiliza o fator de disponibilidade hídrica igual a 0,60 (Bernardo et al., 2019):

$$AFD = CADf \quad (11)$$

em que: f é a disponibilidade hídrica da cultura (0,60, adm.).

3.2.5. Modelagem e Dados Biométricos

As variáveis de crescimento da planta foram coletadas quinzenalmente, em cinco plantas por subparcela, de forma aleatória dentro da área útil dos tratamentos escolhidos. Foram avaliadas as variáveis: Comprimento de plantas (CP, cm), Fitomassa seca total (FST, t ha⁻¹) e o Índice de área foliar (IAF, m²_{folha} / m²_{superfície}).

A partir da emergência da cultura foram realizadas medições biométricas quinzenais, em cada avaliação para análise do crescimento da cultura em função dos graus-dia acumulados, que foram determinados utilizando-se a equação 12:

$$GDA = \sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_b) \quad (12)$$

em que: ΣGDA (°C dia⁻¹) representa os graus-dia acumulados; $T_{m,i}$ (°C) é a temperatura do ar média diária do dia i , com i variando de 1 (data de semeadura), até n dias (dias considerados) e T_b (°C) é a temperatura basal para cultura, em que se adotou 10 °C (FARIAS et al., 2009). T_m foi determinada pelos extremos diários de temperatura do ar, pela relação $(T_x + T_n) / 2$, em que T_x (°C) é a temperatura do ar máxima e T_n (°C) a mínima diária.

Para quantificação do CP foi utilizada fita métrica graduada medindo o comprimento desde a base até o ápice da planta, os dados coletados e digitados foram ajustados ao modelo Logístico de crescimento desenvolvido por Tei et al. (1996), adaptado por Lyra et al. (2014) para culturas agrícolas, Equação 13.

$$W = \frac{W_f}{\left[1 + \left(\frac{W_f}{W_0} - 1 \right) \exp(-r \Sigma GD) \right]} \quad (13)$$

em que: W (m): é a variável de crescimento; W_0 (m) taxa de crescimento inicial e W_f (m) taxa de crescimento final do ciclo da cultura; r (m dia⁻¹): é a taxa máxima de crescimento relativo, calculada com base nos graus dia acumulado.

A quantificação da FST, foi realizada de forma destrutiva ao longo do ciclo da cultura, as plantas foram particionadas em: folhas, caules e vagens. Posteriormente, pesado em uma balança de precisão, acondicionados em sacos de papel craft, e levado à estufa de ventilação forçada à temperatura de 65 °C por 72 h (BENINCASA, 2003). Os dados observados foram ajustados ao modelo Sigmoidal, de 3 parâmetros, Equação 14.

$$FST = \frac{a}{\left[1 + \exp\left(-\frac{(GDA - x_0)}{b}\right)\right]} \quad (14)$$

em que: FST: é a fitomassa seca de total (t ha⁻¹); a: matéria seca final (t); x_0 : ponto de inflexão (t) e representa a assíntota, ou seja, o valor máximo da variável de crescimento a ser atingido pelas plantas; b: o crescimento inicial e o x é o valor para estimar o GDA.

O cálculo para determinação da Área Foliar (AF) das plantas se deu por meio do somatório da área das folhas individuais, obtido pelo produto entre comprimento e largura de um folíolo, multiplicado por 3. Adotou-se o fator de correção de forma de 0,70 (GASSEN, 2001), em seguida multiplicado pelo número de folhas de cada planta para estimar a área foliar, conforme a Equação 15.

$$AF = C * L * 3 * 0,7 * NF * NP \quad (15)$$

em que: AF: é a área foliar (m²); C: é o comprimento do folíolo (m); L: é a largura do folíolo (m); 3: é a quantidade de folíolos por folha; 0,7: é o fator de correção de forma da folha; NF: números de folhas por plantas (un.); NP: é o número de plantas por m² (un.).

O IAF foi obtido pela divisão entre a área foliar e a área ocupada por m², e em seguida ajustada para um hectare, conforme, Equação 16.

$$IAF = \frac{AF}{AOC} \quad (16)$$

em que: IAF: Índice de Área Foliar (adm.); AF: Área foliar da planta (m²); AO: Área ocupada de coleta (m²).

Posteriormente, o modelo pico log normal, foi ajustado para estimar os valores de IAF em função dos graus-dia acumulados, conforme Equação 17.

$$IAF = a \exp \left[-0.5 \left\{ \ln \frac{\frac{\sum GDA}{x_0}}{b} \right\}^2 \right] \quad (17)$$

em que: a: é o valor de y (IAF) máximo; b: é o grau de decaimento de y (IAF) mínimo; X_0 é o valor de ΣGDA no qual y é máximo; e ΣGDA são os graus-dia acumulados ($^{\circ}C \text{ dia}^{-1}$).

3.2.6. Análise dos Dados Simulados

A avaliação do desempenho dos modelos em relação aos dados estimados foi feita por meio de comparações entre resultados simulados e observados utilizando índices estatísticos como: índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c), porcentagem de desvio (PE), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de regressão ajustado (R^2_{ajs}).

O Índice de Concordância proposto por Willmott (1982), calculados pela Equação 18, avalia a concordância existente entre os pontos simulados e observados por meio da aproximação ou afastamento dos dados. Esse índice é representado pela letra “d” e varia de zero a um, em que zero indica a nulidade total e um indica a exatidão.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (18)$$

em que: “ S_i ” é o valor estimado pelo modelo no dia i; “ O_i ” é o valor observado no dia i e “ \bar{O} ” é a média dos valores observados.

O Coeficiente de Correlação de Pearson “r” mede o grau de associação entre duas variáveis, indicando a correlação entre os dados observados e simulados, essa correlação pode ser positiva ou negativa e é calculada pela Equação 19.

$$r = \left[\frac{\sum OS - \frac{\sum O * \sum S}{N}}{(N-1) * S_o * S_s} \right] \quad (19)$$

em que: “r” é o coeficiente de correlação de Pearson; ΣOS é a soma dos produtos entre os valores de O (observado) e Y (simulado); $\Sigma O * \Sigma S$ é o produto da soma dos valores de O e

S; N é o número de observações; So é o desvio padrão dos valores de o e o Ss é o desvio padrão dos valores de s.

A Equação 20 demonstra a avaliação por meio do Índice de confiança “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que é utilizada com o objetivo de indicar o desempenho dos métodos (Tabela 3.4), com base no produto do coeficiente de correlação de Pearson “r” e o índice de concordância de Willmott “d”.

$$c = (r * d) \quad (20)$$

Tabela 3.4. Índice de confiança (c) e critérios de desempenho.

Valor de “c”	Desempenho do modelo
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Regular
0,41 a 0,50	Ruim
≤0,40	Muito ruim

Fonte: Adaptado de Camargo e Sentelhas (1997).

A Raiz Quadrada do Erro Médio (Equação 21) é utilizada para quantificar a performance geral do modelo sintetizando a diferença média entre os valores observados e estimados. De acordo com Loague e Green, (1991), quanto mais próximo de zero, melhor o resultado e o ajuste do modelo para a simulação.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (S_i - O_i)^2}{n - 1}} \quad (21)$$

em que: RMSE é a raiz quadrada do erro médio; Si é o valor estimado pelo modelo; Oi é o valor observado e n é o número de dados.

O R^2_{ajs} é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores em relação ao número de observações, Equação 22.

$$R^2_{ajs} = 1 - \left[\frac{(1 - R^2)(n - i)}{n - p} \right] \quad (22)$$

em que, p é o número de parâmetros assumidos pelo modelo; n é o número de amostras ou medidas, i é a relação de interceptação da curva dos valores observado com a curva do modelo, considerando 1 se houver interceptação das curvas com os pontos.

Os modelos foram submetidos ao teste t de Student a ($p \leq 0,05$), Equação 23.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (23)$$

em que \bar{x} : Média da amostra; μ_0 : Valor fixo usado para comparação com a média da amostra; s : desvio padrão; n : número da amostra.

O desvio padrão foi calculado usando a Equação 24.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (24)$$

em que, s : desvio padrão; \bar{x} : média da amostra; n : número da amostra.

3.2.7. Indicadores de Produção

A colheita da área experimental foi realizada no dia 01 de março de 2021 (124 DAS), após as plantas atingirem a fase de maturação fisiológica (R_8), vale salientar que esse estágio de desenvolvimento da cultura variou em função da cultivar M_{8644} (123 DAS) e M_{8349} (117 DAS). Foi avaliado, em uma área útil central de 6,0 m² por subparcela, o Rendimento de grãos (RG, kg ha⁻¹).

O RG (t ha⁻¹), corrigido para 13% de umidade (base úmida), determinada por meio do método de estufa a 105 °C por 24 h (BRASIL, 1992), coletadas na área útil de 6,0 m² de cada subparcela e posteriormente estimado, para um hectare, Equação 25.

$$RG = \left(\frac{M}{C * E} \right) 10.000 \quad (25)$$

em que: RG - Rendimento de grãos; M - Massa colhida na área amostrada (6,0 m², t); C - Comprimento das linhas de plantio amostrada (m); E - Espaçamento entre as linhas (m).

A razão entre o RG (t ha⁻¹) e a Fitomassa seca total (FST, somatório da massa seca das folhas, caule e vagens, t ha⁻¹), determina o IC, Equação 26.

$$IC = \left(\frac{RG}{FST} \right) \quad (26)$$

em que: RG - Rendimento de grãos ($t\ ha^{-1}$); FST – Fitomassa seca total ($t\ ha^{-1}$).

A eficiência no uso da água foi calculada a partir do somatório individual de cada nível de irrigação aplicada e a precipitação pluvial efetiva dividido pelo rendimento de grãos da cultura. Dessa forma, os resultados da EUA estão apresentados em milímetro de água por quilograma de grãos por hectare ($mm\ kg^{-1}\ ha^{-1}$). O cálculo para determinar a precipitação pluvial efetiva foi feito subtraindo-se o excesso hídrico (determinado pelo balanço hídrico da cultura) da chuva total ao longo do ciclo, Equação 27.

$$EUA = \frac{P_{efe} + NI}{RG} \quad (27)$$

em que: P_{efe} e a precipitação pluvial efetiva, mm; NI são as lâminas de irrigação, mm; e RG é o rendimento de grãos da cultura, $kg\ ha^{-1}$.

A FST ($kg\ ha^{-1}$) foi quantificada quinzenalmente a partir da emergência da cultura, de forma destrutiva, particionando: folha, caule e vagens. Em seguida todo material foi pesado em balança de precisão, acondicionado em sacos craft e levado à estufa de ventilação forçada à temperatura de $65^{\circ}C$ por 72h (BENINCASA, 2003). Equação 28.

$$FST = \frac{\left(\frac{FSF + FSC + FSV}{NPC}\right) * NPH}{1000} \quad (28)$$

em que: FSP – Fitomassa seca de folha (g); FSC – Fitomassa seca de caule (g); FSV – Fitomassa seca de vagem (g); NPC – Número de plantas coletadas para amostra (un.); NPH – Número de plantas por hectare (un.); 1000 – transformação de grama para quilograma;

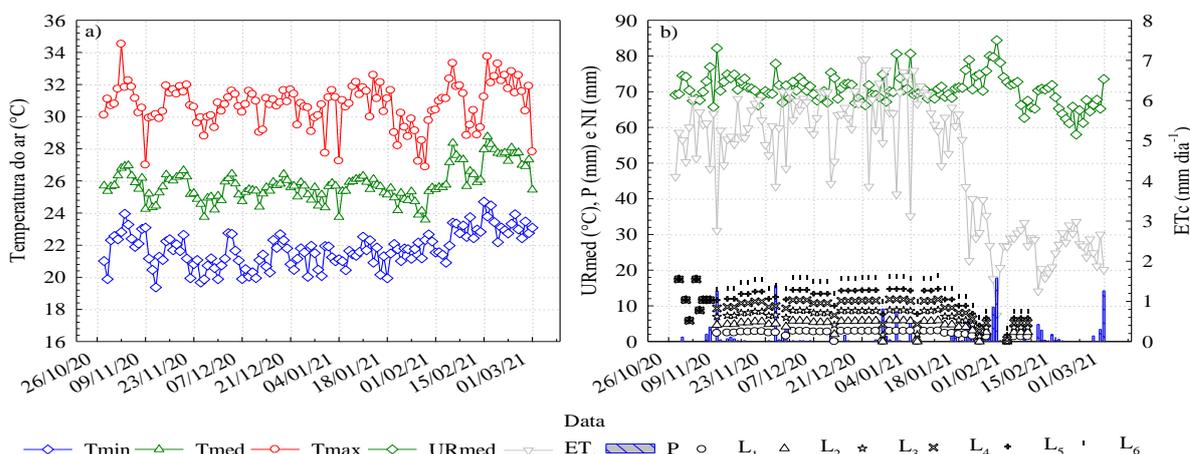
Os dados coletados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos pelo teste F ($p < 0,05$), foram submetidos a análise de regressão. Os coeficientes das regressões tiveram sua significância verificada pelo teste t ($p < 0,05$).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período experimental 28 de outubro de 2020 e 01 de março de 2021 (124 dias) a temperatura do ar média foi de 25,81 °C, enquanto a maior temperatura do ar foi de 34,5 °C, registrada aos seis dias após o semeio (DAS) e aos 16 DAS à temperatura mínima (19,4 °C). De acordo com Lopes e Lima (2015) a temperatura ótima para o cultivo da soja está entre 20 e 30 °C, confirmando as boas condições térmicas no período que foi conduzido a pesquisa (Figura 11.1a). Souza et al. (2004), ratificam que a temperatura do ar na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas atende à necessidade ótima da maioria culturas agrícolas tropicais.

A umidade relativa média do ar foi 70,4 % e precipitação pluvial total de 173,8 mm (Figura 11.1b). De acordo com Franke e Dorfman (2000) para que a soja apresente desenvolvimento e rendimento máximos, a quantidade de água necessária varia entre 450 e 850 mm dependendo da variedade e das condições climáticas da região de cultivo, evidenciando a necessidade do uso da irrigação nessa pesquisa.

Figura 3.1. Variação da temperatura do ar mínima - T_n , °C; média - T_m , °C; máxima - T_x , °C (a) e Umidade média relativa do ar - UR_{med} , °C; Precipitação pluvial - P , mm; Lâminas de irrigação - LI , mm; e Evapotranspiração da cultura - ET_c , mm, durante o cultivo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 3.5 consta a precipitação pluvial total durante o ciclo de cultivo da soja de 124 dias (173,80 mm), as lâminas de irrigação totais aplicadas variaram de 190,5 a 709,8 mm, de L_1 (35% da ET_c) a L_6 (210% da ET_c), a lâmina total aplicada que é o somatório da

precipitação pluvial mais irrigação (lâmina total), o déficit e excesso hídrico (mm) provenientes dos balanços hídricos da cultura sob as lâminas de irrigação.

Tabela 3.5. Precipitação pluvial total - Ptotal, mm; Lâminas de irrigação brutas totais aplicadas - Irrigação total - IT, m; Precipitação pluvial total mais irrigação - LT, mm; Déficit e Excesso hídrico, mm; durante o ciclo de cultivo de soja, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

Tratamentos	Ptotal	IT	LT	Déficit	Excesso
L ₁ (35% ET _c)	173,80	190,5	364,33	-259,63	68,68
L ₂ (70% ET _c)	173,80	287,7	461,53	-172,47	73,74
L ₃ (105% ET _c)	173,80	390,7	564,52	-95,64	87,92
L ₄ (140% ET _c)	173,80	496,5	670,32	-50,72	138,23
L ₅ (175% ET _c)	173,80	603,3	777,08	-41,51	229,49
L ₆ (210% ET _c)	173,80	709,8	883,55	-40,31	329,25

Fonte: Autor (2023).

A influência das lâminas de irrigação em função da ET_c ficou evidenciada para a cultura da soja (M₈₆₄₄ e M₈₃₄₉) durante as fases R₄ a R₈, nesses períodos as plantas apresentaram desenvolvimento máximo de seu dossel vegetativo e, conseqüentemente, elevada superfície transpiratória (Figura 3.2). Como os referidos estádios coincidiram com a primeira quinzena de janeiro e a primeira quinzena de março, período de maior ocorrência de chuva, teve como resultado menores valores de evapotranspiração.

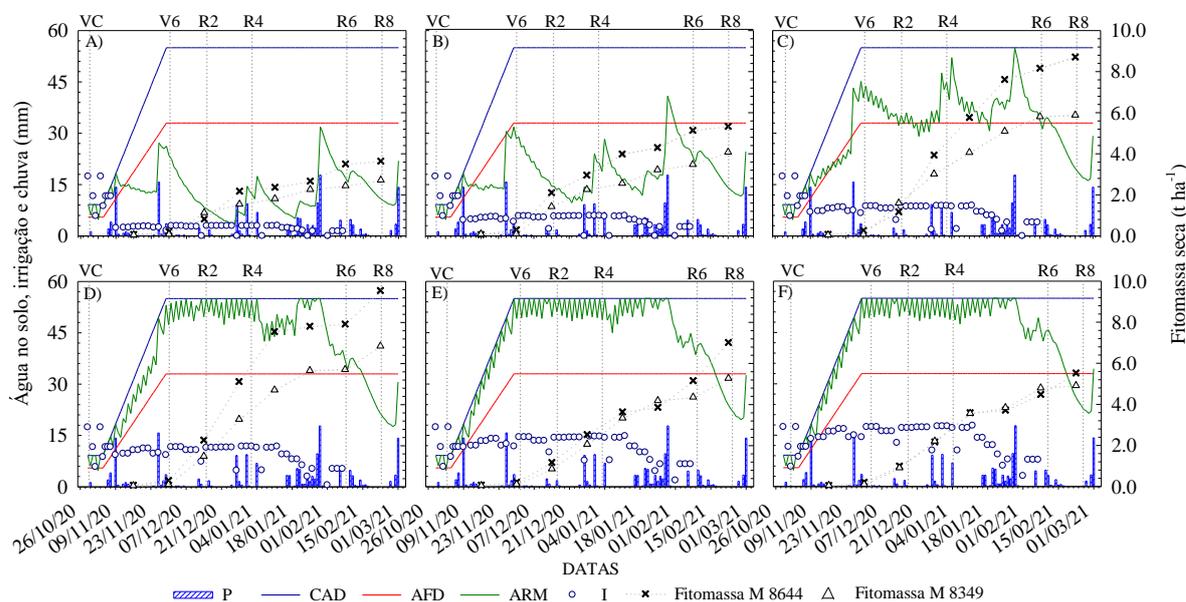
Com a lâmina de 35% da ET_c (Figura 3.2a) a variedade de soja M₈₃₄₉ passou por 37 dias na fase vegetativo, enquanto a cultivar M₈₆₄₄ precisou de 36 dias para a mesma fase, com ARM de 500 mm e com a AFD em 640 mm, durante esse período choveu 46 mm, sendo realizada irrigação de 90 mm para ambas as cultivares. Durante fase reprodutiva de 12 de dezembro de 2020 a 22 de fevereiro de 2021 a precipitação pluvial foi 107 mm, sendo necessário o uso da irrigação apenas de 56 mm. Ainda, durante o ciclo da cultura, foi constatado que a lâmina de 35% da ET_c ficou 95% do período de cultivo abaixo da AFD, caracterizando estresse hídrico para essa lâmina.

Para o tratamento com 70% da ET_c (Figura 3.2b), a lâmina de água total foi 169 mm (precipitação e irrigação) na fase vegetativa para ambas as cultivares. Na fase reprodutiva a cultura permaneceu por um longo período com déficit hídrico (113 dias). De acordo com Oliveira et al. (2020), os estádios mais críticos para a cultura da soja, no tocante a deficiência hídrica, é do florescimento ao enchimento dos grãos, R₄ a R₈ respectivamente. Porém os

autores reportam a importância do armazenamento de água nos períodos iniciais de estabelecimento da cultura (germinação e emergência).

Nos tratamentos com lâminas de irrigação de 140%, 175% e 210% da ET_c , não foi verificado déficit hídrico, na fase reprodutiva, pois o ARM ficou abaixo da AFD apenas nos últimos 15, 13 e 11 dias, respectivamente, do final do ciclo de cultivo para ambas as variedades, uma vez que durante todo o ciclo da cultura esteve acima da AFD (Figura 3.2D, 3.2E e 3.2F).

Figura 3.2. Balanço hídrico para cultura da soja, com ênfase para a Capacidade de água disponível - CAD, mm; Água facilmente disponível - AFD, mm; Armazenamento de água no solo - ARM, mm, Precipitação pluvial – P, mm; e Irrigação – I, mm. Com níveis de reposição de água em função da evapotranspiração da cultura, 35% da ET_c (190,5 mm), 70% da ET_c (287,7), 105% da ET_c (390,7), 140% da ET_c (496,5), 175% da ET_c (603,3), 210% da ET_c (709,8). V_C Folhas cotiledonares; V_6 sexta folha trifoliada; R_2 Florescimento pleno; R_4 vagem desenvolvida; R_6 Grão verde ou vagem cheia; R_8 Maturação plena. Em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3.6, os coeficientes de determinação ajustado (R^2_{aj}) para o comprimento de planta de soja variaram de 0,984 a 0,999, isso indica que o modelo foi eficiente para explicar a maior parte da variabilidade do comprimento de planta submetida a diferentes lâminas de irrigação na região de Rio Largo,

AL. Porém, é importante ressaltar que o R^2_{ajs} corresponde apenas um indicativo relativo do ajuste de uma regressão não-linear.

Conforme os resultados do “teste t” observa-se que todos os coeficientes do modelo ajustados (W_f , W_0 e r) foram estatisticamente significativos ($P < 0,01$) para o comprimento de planta submetidas a diferentes lâminas de irrigação. Andrade Neto et al. (2010) avaliando o crescimento e produtividade do sorgo forrageiro BR 601 sob adubação verde também ajustaram o modelo logístico, obtiveram coeficientes entre 0,91 e 0,99, para a altura de planta. Para a cultura do milho, Lyra et al. (2014) ajustaram o modelo logístico da altura da planta e o R^2 variou entre 0,989 e 0,994, recomendando que o modelo explica a maior parte da variabilidade da altura de planta.

Tabela 3.6. Comprimento de planta - CP, m; estimado pelo modelo Logístico, 3 parâmetros, para as cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

Parâmetros						
Comprimento de planta (CP)						
Lâminas	Cultivar	W_{fo}	W_f	W_0	r	R^2_{ajs}
L ₁	M ₈₆₄₄	0,4364	0,4378** ($\pm 0,0063$)	0,0305** ($\pm 0,0016$)	0,0043** ($\pm 0,0001$)	0,998
	M ₈₃₄₉	0,3174	0,3138** ($\pm 0,0126$)	0,0422** ($\pm 0,0067$)	0,0038** ($\pm 0,0005$)	0,984
L ₂	M ₈₆₄₄	0,4574	0,4858** ($\pm 0,0105$)	0,0302** ($\pm 0,0024$)	0,0045** ($\pm 0,0002$)	0,997
	M ₈₃₄₉	0,3684	0,3850** ($\pm 0,0103$)	0,0399** ($\pm 0,0037$)	0,0038** ($\pm 0,0003$)	0,995
L ₃	M ₈₆₄₄	0,4704	0,5128** ($\pm 0,0147$)	0,0310** ($\pm 0,0033$)	0,0045** ($\pm 0,0003$)	0,996
	M ₈₃₄₉	0,4202	0,4212** ($\pm 0,0034$)	0,0339** ($\pm 0,0011$)	0,0044** ($\pm 8,9E-5$)	0,999
L ₄	M ₈₆₄₄	0,5232	0,5382** ($\pm 0,0184$)	0,0292** ($\pm 0,0039$)	0,0048** ($\pm 0,0004$)	0,994
	M ₈₃₄₉	0,4550	0,4560** ($\pm 0,0052$)	0,0355** ($\pm 0,0015$)	0,0042** ($\pm 0,0001$)	0,999
L ₅	M ₈₆₄₄	0,4255	0,4194** ($\pm 0,0184$)	0,0316** ($\pm 0,0056$)	0,0045** ($\pm 0,0005$)	0,987
	M ₈₃₄₉	0,3458	0,3547** ($\pm 0,0082$)	0,0341** ($\pm 0,0034$)	0,0044** ($\pm 0,0003$)	0,995
L ₆	M ₈₆₄₄	0,3743	0,3819** ($\pm 0,0104$)	0,0289** ($\pm 0,0034$)	0,0047** ($\pm 0,0003$)	0,994
	M ₈₃₄₉	0,3275	0,3468** ($\pm 0,0109$)	0,0312** ($\pm 0,0042$)	0,0044** ($\pm 0,0004$)	0,992

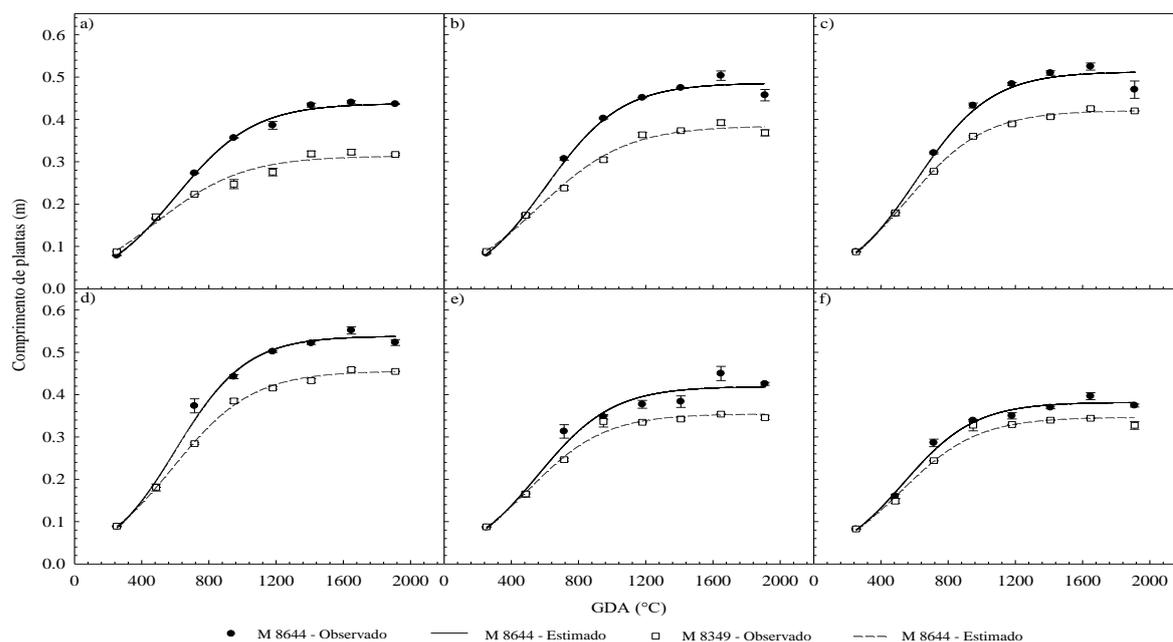
**significativo à nível de 1%; *significativo à nível de 5%; ns não significativo pelo teste t. Comprimento final da planta observada (W_{fo} , m), inicial (W_0 , m) e final (W_f , m) e taxa de crescimento relativo, r ($m\ m^{-1}\ dia^{-1}$), ajustado pelo modelo Logístico. Coeficiente de regressão ajustado (R^2_{ajs});

Fonte: Autor (2023).

Analogamente ao observado, os maiores comprimentos de plantas finais estimados foram observados na cultivar M₈₆₄₄, proporcionadas pelas lâminas de irrigação L₄ (0,5382 m) e L₃ (0,5128 m), os quais diferiram em 2,9 e 9,1%, respectivamente, em relação aos valores observados. Em contrapartida, os menores comprimentos de plantas finais estimados também foram encontrados na cultivar M₈₆₄₄, porém, nas lâminas de irrigação L₁ (0,3138 m)

e L_6 (0,3468 m), que diferem em 1% e 6% quando comparados aos valores observados, respectivamente (Figura 3.3). Dentre as cultivares de soja produzidas no Brasil, a maioria apresenta o tipo de crescimento indeterminado, com poucas ramificações e altura mínima de 60 cm, valores abaixo do mínimo necessário inviabiliza a colheita mecanizada e aumenta as perdas de grãos (WERNER et al., 2016).

Figura 3.3. Comprimento de planta – CP, m.; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c), L_4 (d), L_5 (e), L_6 (f), em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

Os dados estimados apresentaram índices de concordância de Willmott (d) oscilando entre 0,992 (M_{8644} “ L_5 ”) e 1,000 (M_{8349} “ L_3 ”), coeficiente de correlação de Pearson (r) variou entre 0,985 na cultivar M_{8644} submetido ao nível de irrigação L_5 e 0,999 na cultivar M_{8349} com a lâmina L_3 , enquanto que a variação observada para o índice de confiança foi de 0,977 (M_{8644} “ L_5 ”) a 0,999 (M_{8349} “ L_3 ”) e a maior (0,021) raiz quadrada do erro médio (RMSE) com a cultivar M_{8644} submetida a lâmina L_5 (Tabela 3.7). Morais et al. (2017) constataram ótimo ajuste do modelo logístico para a altura de planta do milho em épocas de semeio em Alagoas, com R^2_{ajs} variando de 0,985 a 0,991 e os parâmetros (W_f , W_0 e TCR) ajustados pelo modelo apresentaram efeitos significativos ($P < 0,01$) pelo teste t. Semelhante ao observado nesse estudo para a cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação.

Para a altura de planta do algodão, Bender et al. (2020) analisaram o ajuste do modelo logístico e constataram ótima acurácia, medida pelo R^2_{ajs} variando de 0,996 a 0,946.

Tabela 3.7. Avaliação estatística de simulações (modelo Logístico, 3 parâmetros) e observações de Comprimento de planta - CP, cm; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, de outubro 2020 a março de 2021.

Índices estatísticos					
Comprimento de planta (CP)					
Lâminas	Cultivar	d	r	c	RMSE
L ₁	M ₈₆₄₄	0,999	0,998	0,997	0,008
	M ₈₃₄₉	0,993	0,986	0,979	0,013
L ₂	M ₈₆₄₄	0,998	0,996	0,994	0,013
	M ₈₃₄₉	0,998	0,995	0,993	0,010
L ₃	M ₈₆₄₄	0,997	0,994	0,991	0,017
	M ₈₃₄₉	1,000	0,999	0,999	0,004
L ₄	M ₈₆₄₄	0,998	0,995	0,993	0,016
	M ₈₃₄₉	0,999	0,999	0,998	0,016
L ₅	M ₈₆₄₄	0,992	0,985	0,977	0,021
	M ₈₃₄₉	0,997	0,994	0,991	0,010
L ₆	M ₈₆₄₄	0,997	0,994	0,992	0,011
	M ₈₃₄₉	0,996	0,992	0,987	0,012

Índice de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE).

Fonte: Autor (2023).

Conforme os resultados apresentados na Tabela 3.8, os valores dos índices de área foliar (IAF) estimados pelo modelo pico log normal mostraram R^2_{ajs} variando entre 0,792 e 0,962, que são inferiores aos observados pelo modelo logístico para a variável comprimento de planta. Os coeficientes de ajuste da equação (a, b e x_0) apresentaram ajustes significativos ($P < 0,01$). Os maiores e menores valores de IAF máximos estimados (6,696 e 0,294) foram proporcionados pelo mesmo tratamento, que também apresentou o máximo observado (cultivar M₈₃₄₉ com a lâmina L₄). Após o nível máximo de IAF observado e estimado nesse estudo, houve redução em função do processo natural de senescência foliar.

Além disso, observou-se diferenças de IAF (observado e estimado) entre as lâminas de irrigação. Esse comportamento pode ser explicado pela menor taxa de expansão celular da cultura, assim como pelo intenso processo de senescência foliar ao longo do período de cultivo, principalmente, nos tratamentos submetidos ao estresse hídrico (WERNER et al., 2016; BENDER et al., 2020).

Resultados semelhantes foram observados por Kunz et al. (2007), que observaram IAF máximo de 5,30 e mínimo de 4,82 sob diferentes lâminas de irrigação. Lyra et al. (2014) encontraram valores de IAF estimados pelo modelo pico log normal R^2 variando de 0,835 a 0,990 para a cultura do milho. Os autores ainda observaram os maiores e menores valores de IAF máximos estimados de 4,47 e 2,49, respectivamente.

Tabela 3.8. Índice de área foliar - IAF, adm.; estimado pelo modelo Pic Log Normal, para as cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

Parâmetros						
Índice de Área Foliar (IAF)						
Lâminas	Cultivar	a_0	a	b	x_0	R^2_{ajs}
L ₁	M ₈₆₄₄	2,03	1,884** ($\pm 0,1860$)	0,538** ($\pm 0,1046$)	1220,81** ($\pm 97,2243$)	0,851
	M ₈₃₄₉	2,95	3,082** ($\pm 0,4662$)	0,300** ($\pm 0,0566$)	1133,48** ($\pm 61,5716$)	0,792
L ₂	M ₈₆₄₄	3,32	3,455** ($\pm 0,2872$)	0,406** ($\pm 0,0494$)	1136,99** ($\pm 46,9666$)	0,916
	M ₈₃₄₉	3,70	3,890** ($\pm 0,4474$)	0,310** ($\pm 0,0437$)	1077,28** ($\pm 45,8235$)	0,876
L ₃	M ₈₆₄₄	4,76	4,993** ($\pm 0,5968$)	0,336** ($\pm 0,0561$)	1218,30** ($\pm 59,2095$)	0,860
	M ₈₃₄₉	5,48	5,721** ($\pm 0,6782$)	0,298** ($\pm 0,0441$)	1137,11** ($\pm 48,0984$)	0,879
L ₄	M ₈₆₄₄	5,65	5,805** ($\pm 0,4928$)	0,385** ($\pm 0,0469$)	1155,11** ($\pm 45,8627$)	0,920
	M ₈₃₄₉	6,13	6,696** ($\pm 0,8162$)	0,294** ($\pm 0,0456$)	1175,37** ($\pm 50,5008$)	0,875
L ₅	M ₈₆₄₄	4,22	4,136** ($\pm 0,2626$)	0,369** ($\pm 0,0327$)	1151,58** ($\pm 32,5723$)	0,953
	M ₈₃₄₉	3,72	3,894** ($\pm 0,3864$)	0,328** ($\pm 0,0431$)	1166,42** ($\pm 45,5423$)	0,893
L ₆	M ₈₆₄₄	3,58	3,518** ($\pm 0,2028$)	0,362** ($\pm 0,0279$)	1110,58** ($\pm 27,7816$)	0,962
	M ₈₃₄₉	4,29	4,546** ($\pm 0,4232$)	0,311** ($\pm 0,0377$)	1174,36** ($\pm 40,7772$)	0,916

**significativo à nível de 1%; *significativo à nível de 5%; ns não significativo pelo teste t. IAF máximo observado (a_0), IAF máximo estimado (a), IAF mínimo estimado (b), e o GDA em que ocorre o IAF máximo (x_0), ajustado pelo modelo Pic Log Normal. Coeficiente de regressão ajustado (R^2_{ajs});

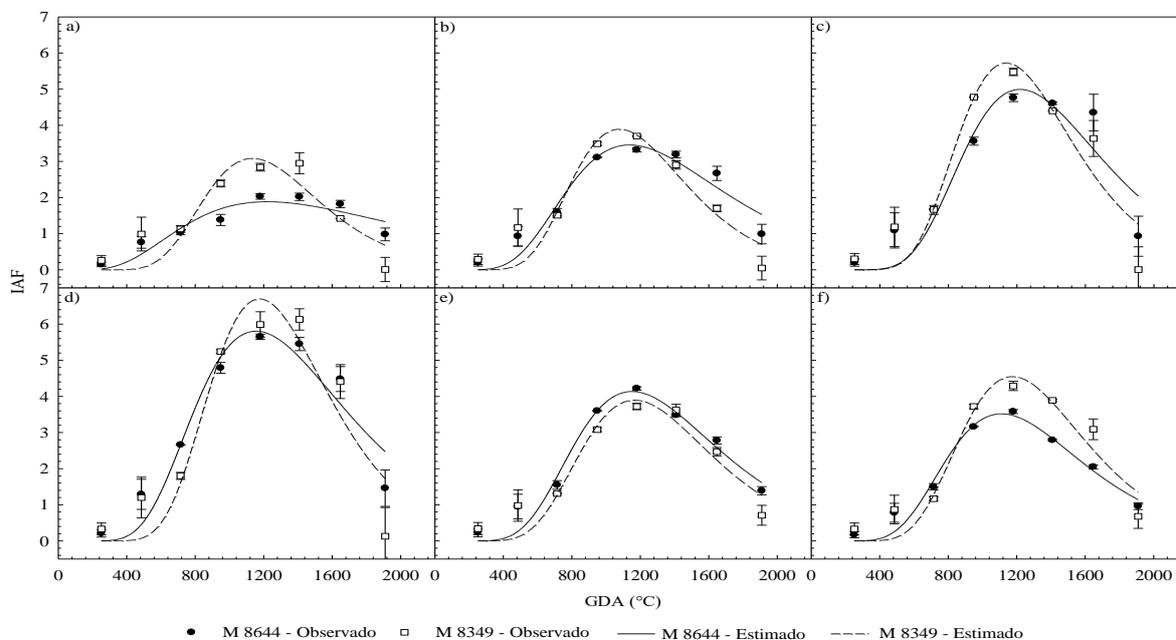
Fonte: Autor (2023).

Os IAF das plantas de soja observados e estimados apresentaram valores máximos de 6,13 e 6,70, respectivamente, com a cultivar M₈₃₄₉, proporcionado pelo nível de irrigação L₄ (Figura 3.4d), enquanto os menores valores observados (2,03) e estimados (1,88) foram encontrados com a cultivar M₈₆₄₄ e lâmina de irrigação L₁ (Figura 3.4a). Houve diferença de 202% e 255,4% entre os valores observados e estimados nos maiores valores em relação aos menores (Figura 3.4).

De acordo com Tagliapietra et al. (2018), o rendimento da soja é influenciado de forma direta pelo IAF, sendo uma variável crítica e é afetada tanto por fatores a biótipos quanto biótipos. O rendimento da soja ocorre por meio da interceptação da radiação solar pelas

plantas através do IAF e sua conversão em matéria seca durante o processo de fotossíntese (ZANON et al., 2016).

Figura 3.4. Índice de área foliar – IAF, adm.; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, L₁ (a), L₂ (b), L₃ (c), L₄ (d), L₅ (e), L₆ (f), em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

Nesse estudo com a cultura da soja, tanto os dados observados como os estimados demonstraram alta concordância com índice de Willmott, em que os resultados variaram de 0,948 na cultivar M₈₃₄₉ e lâmina de irrigação L₁ a 0,991 com a cultivar M₈₆₄₄ e lâmina L₆. O coeficiente de correlação de Pearson variou de 0,906 a 0,986 e o índice de confiança máximo foi de 0,977. Esses resultados demonstram ótimo ajuste do modelo aos dados de IAF (Tabela 3.9).

Tabela 3.9. Avaliação estatística de simulações (modelo Pic Log Normal) e observações de Índice de área foliar - IAF, adm.; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo, AL, de outubro 2020 a março de 2021.

Índices estatísticos					
Índice de Área Foliar (IAF)					
Lâminas	Cultivar	d	r	c	RMSE
L ₁	M ₈₆₄₄	0,962	0,928	0,893	0,240
	M ₈₃₄₉	0,948	0,906	0,858	0,480
L ₂	M ₈₆₄₄	0,980	0,962	0,942	0,330
	M ₈₃₄₉	0,970	0,945	0,917	0,458

L ₃	M ₈₆₄₄	0,965	0,935	0,902	0,653
	M ₈₃₄₉	0,969	0,942	0,913	0,698
L ₄	M ₈₆₄₄	0,980	0,962	0,943	0,557
	M ₈₃₄₉	0,968	0,939	0,909	0,844
L ₅	M ₈₆₄₄	0,989	0,982	0,972	0,293
	M ₈₃₄₉	0,975	0,959	0,935	0,415
L ₆	M ₈₆₄₄	0,991	0,986	0,977	0,222
	M ₈₃₄₉	0,980	0,964	0,944	0,447

Índice de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE).

Fonte: Autor (2023).

Conforme os dados apresentados na Tabela 3.10, observou-se que o modelo sigmoidal apresentou ótimo ajuste para a variável fitomassa seca total (FST, t ha⁻¹), em que os parâmetros de fitomassa seca total estimada (a), ponto de inflexão (x₀) e fitomassa seca inicial foram estatisticamente significativos pelo “teste t” (P < 0,01 e 0,05). Os dados estimados apresentaram R²_{ajs} variando de 0,962 a 0,995. Esses resultados são convergentes com Oliveira et al. (2013), usando o modelo Sigmoidal para avaliar a FST da cultura do milho.

Tabela 3.10. Fitomassa seca total - FST, t ha⁻¹; estimada pelo modelo Sigmoidal de 3 parâmetros, para as cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

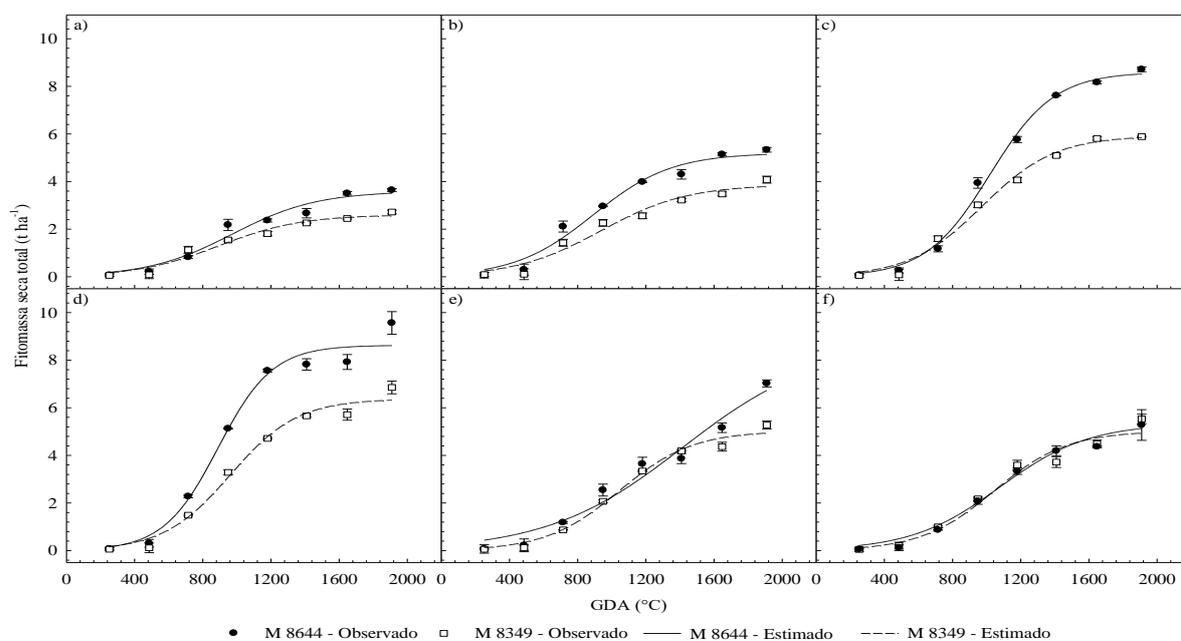
		Parâmetros				
		Fitomassa seca total (FST)				
Lâminas	Cultivar	a ₀	a	b	x ₀	R ² _{ajs}
L ₁	M ₈₆₄₄	3,642	3,591** (±0,323)	249,050* (±65,507)	973,463** (±83,328)	0,963
	M ₈₃₄₉	2,722	2,607** (±0,209)	242,385* (±63,053)	894,016** (±77,108)	0,962
L ₂	M ₈₆₄₄	5,334	5,199** (±0,319)	230,664** (±47,892)	890,689** (±58,232)	0,976
	M ₈₃₄₉	4,082	3,873** (±0,337)	254,546* (±65,853)	936,741** (±82,650)	0,963
L ₃	M ₈₆₄₄	8,713	8,597** (±0,247)	189,120** (±19,333)	1019,220** (±23,694)	0,995
	M ₈₃₄₉	5,886	5,920** (±0,261)	215,143** (±31,555)	972,725** (±39,066)	0,989
L ₄	M ₈₆₄₄	9,563	8,626** (±0,385)	160,00** (±32,292)	889,609** (±38,289)	0,983
	M ₈₃₄₉	6,854	6,373** (±0,315)	197,247** (±35,229)	962,064** (±42,941)	0,985
L ₅	M ₈₆₄₄	7,024	8,678* (±2,337)	397,679* (±113,871)	1417,170** (±259,569)	0,966
	M ₈₃₄₉	5,277	5,025** (±0,248)	214,927** (±32,967)	1044,260** (±41,684)	0,988
L ₆	M ₈₆₄₄	5,530	5,341** (±0,487)	260,967** (±59,433)	1077,530** (±80,724)	0,974
	M ₈₃₄₉	6,228	5,025** (±0,248)	214,927** (±32,967)	1044,260** (±41,684)	0,988

**significativo à nível de 1%; *significativo à nível de 5%; ns não significativo pelo teste t. ao: fitomassa seca total observada ($t\ ha^{-1}$); a: fitomassa seca total estimada ($t\ ha^{-1}$); x0: ponto de inflexão (g); e b: fitomassa seca inicial, ajustados pelo modelo Sigmoidal de 3 parâmetros. Coeficiente de regressão ajustado (R^2_{ajs});

Fonte: Autor (2023).

Pode-se observar uma tendência de aumento nas médias de FST observadas pelas cultivares de soja até a lâmina L_4 , semelhante ao ocorrido para os valores estimados, sendo verificado um aumento significativo na ordem de 251% da FST obtida na menor lâmina de irrigação aplicada (L_1) em relação a lâmina ótima (L_4), esse comportamento pode ser justificado pelo estresse hídrico provocado na menor lâmina de irrigação aplicada (Figura 3.5).

Figura 3.5. Fitomassa seca total – FST, $t\ ha^{-1}$; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, L_1 (a), L_2 (b), L_3 (c), L_4 (d), L_5 (e), L_6 (f), em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

Os resultados estimados para FST, apresentaram índices de concordância de Willmott (d) entre 0,984 (M_{8349} “ L_6 ”) e 0,999 (M_{8644} “ L_3 ”), coeficiente de correlação de Pearson variando de 0,979 na cultivar M_{8349} submetida ao nível de irrigação L_6 a 0,998 na cultivar M_{8644} com a lâmina L_3 , enquanto que a variação observada para o índice de confiança foi de 0,963 (M_{8349} “ L_6 ”) a 0,997 (M_{8644} “ L_3 ”) e a maior raiz quadrada do erro médio foi de 0,505 $t\ ha^{-1}$ obtida com a cultivar M_{8349} submetida a lâmina L_6 (Tabela 3.11).

Tabela 3.11. Avaliação estatística de simulações (modelo Sigmoidal de 3 parâmetros) e observações de Fitomassa seca total - FST, t ha⁻¹; para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

Índices estatísticos					
Fitomassa seca total (FST)					
Lâminas	Cultivar	d	r	c	RMSE (t ha ⁻¹)
L ₁	M ₈₆₄₄	0,990	0,982	0,973	0,252
	M ₈₃₄₉	0,990	0,982	0,972	0,185
L ₂	M ₈₆₄₄	0,994	0,989	0,983	0,296
	M ₈₃₄₉	0,990	0,983	0,973	0,270
L ₃	M ₈₆₄₄	0,999	0,998	0,997	0,231
	M ₈₃₄₉	0,997	0,995	0,992	0,234
L ₄	M ₈₆₄₄	0,996	0,992	0,987	0,459
	M ₈₃₄₉	0,996	0,993	0,989	0,306
L ₅	M ₈₆₄₄	0,991	0,984	0,975	0,422
	M ₈₃₄₉	0,997	0,995	0,992	0,202
L ₆	M ₈₆₄₄	0,993	0,988	0,981	0,310
	M ₈₃₄₉	0,984	0,979	0,963	0,505

Índice de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE);

Fonte: Autor (2023).

Foi detectada diferença significativa entre a interação dos tratamentos com diferentes lâminas de irrigação (LI) e cultivares (C) de soja (LI x C), para todas as variáveis analisadas variáveis (Tabela 3.12): Rendimento de grãos (RG); Índice de colheita (IC); Eficiência no uso da água (EUA) e Fitomassa seca total (FST) ($P < 0,01$).

Tabela 3.12. Análise de variância para Produtividade agrícola - PA, t ha⁻¹; Índice de colheita - IC, adm.; e Eficiência no uso da água - EUA, mm; durante o cultivo de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

Quadrados médios					
Variáveis fisiológicas (48 DAS)					
Fonte de variação	G.L.	RG	IC	EUA	FST
Lâminas	5	5773477,05**	0,049684**	10,3511**	26485672,70**
Bloco	3	37440,20 ^{ns}	0,000152 ^{ns}	0,1291 ^{ns}	84960,84 ^{ns}
Resíduo 1	15	14143,07	0,000630	0,0513	204160,15
Cultivares	1	5612309,09**	0,539752**	21,7486**	33807457,40**

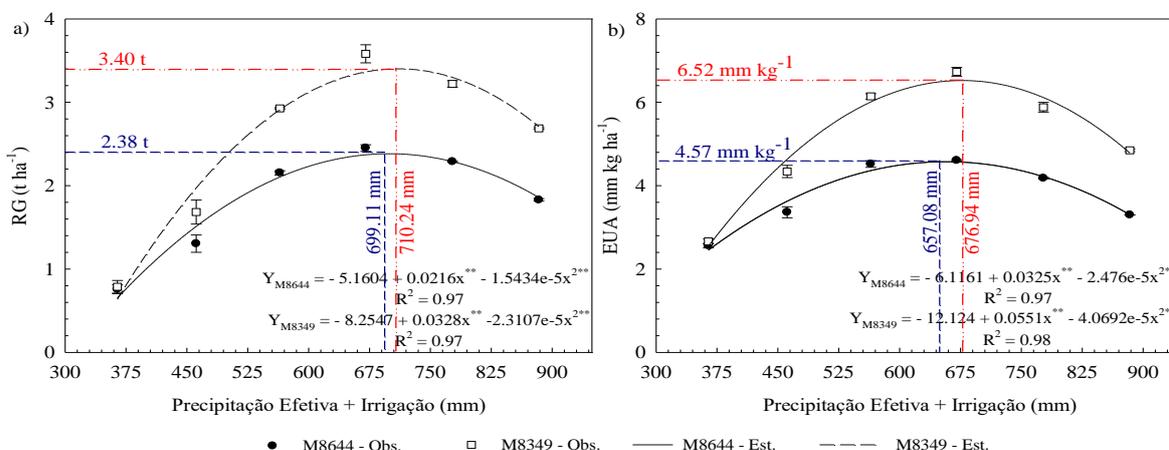
LI X C	5	327950,86**	0,011747**	1,0146**	1708799,01**
Resíduo 2	18	14119,98	0,000431**	0,0530	103418,42
Total	47	-	-	-	-
R. Linear		15618544,74*	0,220414*	14,3072*	91854,93 ^{ns}
R. Quadrática		12204833,20*	0,015048**	36,0010**	91854,93**
C.V. 1 (%)		5,56	6,68	5,12	7,80
C.V. 2 (%)		5,55	5,53	5,20	5,55
Médias Observadas					
M ₈₆₄₄ - C ₁		1797,60 a	0,2695 a	3,7554 a	4956,05 a
M ₈₃₄₉ - C ₂		2481,48 b	0,4816 b	5,1016 b	6634,53 b
DMS		72,06	0,0125	0,1397	195,03

G.L. – Graus de liberdade; C.V. – Coeficiente de variação; ** - Significativo a 1%; * - Significativo a 5%; ns - Não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; PA – Produtividade agrícola, t ha⁻¹; IC – Índice de colheita, adm.; EUA – Eficiência no uso da água, mm; FST – Fitomassa seca total, t ha⁻¹.

Fonte: Autor (2023).

O rendimento de grãos (RG) apresentou ajustes quadráticos Figura 3.6, com boa capacidade explicativa ($R^2 = 0,97^{**}$ para as duas cultivares estudadas), isso demonstra que na C₁ (M₈₆₄₄) as plantas submetidas ao tratamento com a lâmina de 146% da ET_c alcançaram a máxima produtividade (2,38 t ha⁻¹), representando incrementos de 214% quando confrontado ao RG obtido com a menor lâmina de irrigação aplicada (35% da ET_c), enquanto, os níveis acima da lâmina ótima causaram reduções de 9,6%. Para a C₂ (M₈₃₄₉), o maior RG (3,40 t ha⁻¹) foi obtido com a lâmina de 685,72 mm (143% da ET_c), enquanto o menor valor (0,787 t ha⁻¹) foi constatado nas plantas com menor lâmina aplicada (35% da ET_c). Porém, a maior lâmina aplicada (210% da ET_c) causou redução no RG de 21% em relação ao RG obtido com a lâmina ótima (143% da ET_c). Esses resultados corroboram com Sincik et al. (2008), avaliando o rendimento da soja sob deficiência hídrica, observaram redução significativa de 50% no tratamento com menor lâmina de água aplicada em relação as plantas cultivadas em condições hídricas ideais. Rosadi et al. (2005) também verificaram restrições significativas na produção e rendimento da soja submetida ao estresse hídrico, evidenciando os piores resultados quando intensificava o estresse. Nesse sentido, estudos publicados na literatura indicam que a cultura da soja apresenta necessidade hídrica crescente, em função do desenvolvimento da planta, atingindo valores máximos (7,0 a 8,0 mm por dia⁻¹) durante os estádios de floração e enchimento de grãos, com decréscimos a partir desse período (CANDOGAN et al., 2013).

Figura 3.6. Rendimento de grãos – RG, t ha⁻¹ (a) e Eficiência no uso da água – EUA, mm kg ha⁻¹ (b) de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



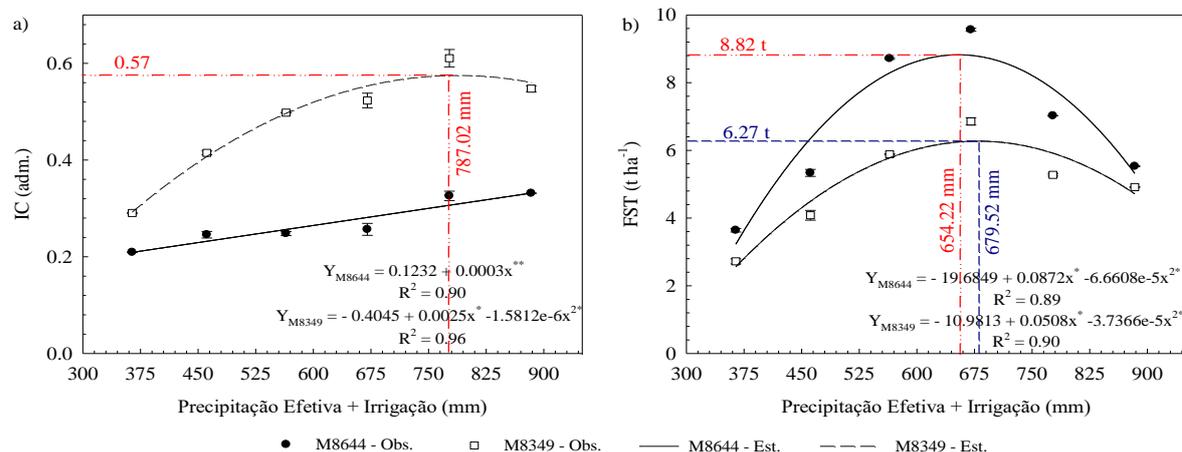
Fonte: Autor (2023).

A variável eficiência do uso da água (EUA) ajustou-se ao modelo quadrático com R^2 de 0,97** e 0,98** para as cultivares M₈₆₄₄ (C₁) e M₈₃₄₉ (C₂), respectivamente. A cultivar C₂ apresentou máxima EUA (6,55 mm kg⁻¹) com a lâmina estimada de 142 % da ET_c, enquanto a cultivar C₁ alcançou 4,57 mm kg⁻¹ com a lâmina de irrigação de 133 da ET_c (Figura 3.7b). Silva et al. (2015), ratificaram que quanto menor a disponibilidade de água menor também será o grau de abertura estomática para reduzir a perda de água, consequentemente, a eficiência no uso da água é maior, mantendo o mínimo de equilíbrio hídrico. Plantas C₃, como a soja são limitadas a assimilar CO₂ em situações hídricas adversas. Chaves et al. (2002) explicam que plantas sob deficiência hídrica moderada frequentemente apresentam aumento na eficiência do uso da água, uma vez que uma redução apenas parcial da abertura estomática limita mais fortemente a transpiração do que a entrada de CO₂.

Ajuste diferente foi verificado para o índice de colheita (IC), a variedade C₂ ajustou-se ao modelo quadrático com R^2 de 96**, enquanto a cultivar C₁ ajustou-se ao modelo linear com R^2 de 96* (Figura 3.7a). Foram verificados valores máximos de IC de 0,33 e 0,52 para C₁ e C₂, respectivamente. Johnson e Majors (1979) trabalhando com a cultura da soja, verificaram que esses parâmetros se relacionavam negativamente, estando o IC positivamente relacionado com a massa seca total da planta. Sinclair (1998), explica que se deve considerar que esse índice é composto pela razão entre duas variáveis, uma das quais (rendimento) está presente simultaneamente no numerador e denominador, e

intrinsecamente apresenta menor variação, reforçando a hipótese de que esse é um caráter com pequena variabilidade na sojicultura.

Figura 3.7. Índice de colheita – IC, adm. (a) e Fitomassa seca total – FST, t ha⁻¹ (b) de cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

As lâminas de irrigação influenciaram de forma significativa a fitomassa seca total (FST) das cultivares de soja, sendo observada resposta polinomial quadrática (Figura 11.7b). A cultivar C₁ apresentou FST de 8,82 t ha⁻¹ com a lâmina de irrigação de 138% da ET_c, enquanto a cultivar C₂ alcançou 6,27 t ha⁻¹ com a lâmina de irrigação de 142% da ET_c para essa variável. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Sincik et al. (2008), que observaram que produção de biomassa reduziram significativamente com a redução da disponibilidade de água no solo. Catuchi et al. (2012), em seus trabalhos, notaram uma redução na massa seca total, aproximadamente, 50% entre as cultivares de soja BR-16 e Embrapa 48. Catuchi et al. (2011) impuseram o déficit hídrico no estágio V4 em duas cultivares de soja CD 220 (convencional) e CD 226RR (transgênica) e observaram a redução de, aproximadamente, 50%, na massa fresca total nas duas cultivares.

3.4. CONCLUSÕES

Os modelos de crescimento utilizados nesse estudo apresentam ajustes significativos para comprimento de planta, índice de área foliar e fitomassa seca total de soja e, assim demonstram que podem ser utilizados para auxiliar a análise de crescimento da cultura.

As lâminas de irrigação não influenciaram a capacidade dos modelos representar o crescimento e produtividade da cultura.

Houve diferença significativa entre a interação dos tratamentos Lâmina de Irrigação x Cultivares para as variáveis Rendimento de Grãos, Índice de colheita e Fitomassa seca total.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROFIT. Sistemas de agrotóxicos fitossanitários. Disponível em: <http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 20 out. 2019.

ANDRADE NETO, R. C.; MIRANDA, N. O.; DUDA, G. P.; GÓES, G. B.; LIMA, A. S. Crescimento e produtividade do sorgo forrageiro BR 601 sob adubação verde. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.124-130, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200002>.

BENDER, E. P.; BATISTA, J. N.; LYRA, G. B.; POLIDORO, J. C.; JANTALIA, C. P.; LYRA, G. B. Modelagem do crescimento e produtividade do algodão em cultivo comercial no cerrado baiano. **Nativa**, v.8, n.3, p.403-412, 2020. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i3.10029>.

CARVALHO, O.M.; Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo, cultivados com cana-de-açúcar. 2003. P.74 (Dissertação mestrado em agronomia– Rio Largo: Universidade Federal de Alagoas, 2003.

CATUCHI, T. A., VÍTOLO, H. F., BERTOLLI, S. S. & SOUZA, G. M. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**, v.41, n.3, p.373-378, 2011.

CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZI, K. A.; BARBOSA, A. M.; SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja a adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.519-527, 2012.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra 2019/2020**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em 06/06/2021.

COSTA, G. A. **Avaliação da disponibilidade hídrica para o milho na região de Rio Largo – AL**. 21 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias, 2003.

FRANKE, A. E.; DORFMAN, R. Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária**

Brasileira, v.35, n.8, p.1675-1683, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000800022>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. 2020. < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612#resultado>>. Acesso em 07 de outubro de 2021.

JOHNSON, D.R., MAJORS, D. J. Harvest index of soybeans as affected by planting date and maturity rating. **Agron J**, v.71, n.4, p.538-51, 1979.

KUNZ, J. H.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1511-1520, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100001>.

LOPES, N. F.; LIMA, M. G. S. Fisiologia da produção, Viçosa, MG: **Ed. UFV**, 2015, 492 p.

LYRA, G. B.; ROCHA A. E. Q.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I. Crescimento e produtividade do milho, submetido a doses de nitrogênio nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Ceres**, v.61, n.4, p.578-586, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461040019>.

MAGALHÃES, I. D.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. DE; TEODORO, I.; ROCHA, A. E. Q. DE; CAVALCANTE JÚNIOR, C. A.; LYRA, G. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; CARVALHO, A. L. DE; FERRAZ, R. L. DE S. Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.7, p.1188–1196, 2019.

MORAIS, R. B. G.; LYRA, G. B.; SANTOS, L. R.; CAVALCANTE JÚNIOR, C. A.; CARVALHO, A. L.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. Crescimento e produtividade de milho em diferentes épocas de plantio, nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.16, n.1, p.109-119, 2017. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v16n1p109-119>.

OLIVEIRA, P.; NASCENTE, A. S.; KLUTHCOUSKI, J.; PORTES, T. A. Crescimento e produtividade de milho em função da cultura antecessora. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, p.239-246, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000300005>.

OLIVEIRA, Z. B., KNIES, A. E., BOTTEGA, E. L., & DA SILVA, C. M. (2020). Estimativa da demanda hídrica da soja utilizando modelo de balanço hídrico do solo e dados da previsão do tempo. *IRRIGA*, 25(3), 492-507.

SANTIAGO, A. D. PROCÓPIO, S. O.; CARVALHO H. W. L.; BRAZ, G. B. P. Desempenho de cultivares de soja em áreas com histórico de produção de cana-de-açúcar no Sealba. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. 30 p. (**Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros**, ISSN 1678-1961; 142).

SILVA, D. F. G. (2020). Estratificação ambiental, estabilidade e adaptabilidade produtiva de genótipos de soja a partir de ensaios multiambientais.

SINCIK, M.; CANDOGAN, B. N.; DEMIRTAS, C.; BÜYÜKCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GOKSOY, A. T. Deficit Irrigation of Soya Bean (*Glycine max* (L.) Merr.) in a Sub-humid climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*. [S.L], v.194, n.3, p.200-205, 2008.

SINCLAIR, T.R. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Sci.*, 38:638-643, 1998.

TAGLIAPIETRA, E. L.; STRECK, N. A.; ROCHA, T. S. M.; RICHTER, G. L.; SILVA, M. R.; CERA, J. C.; GUEDES, J. V. C.; ZANON, A. J. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. ***Agronomy Journal***, v.110, p.932-938, 2018. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0523>.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FERREIRA, A. S.; AGUIAR E SILVA, M. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soybean growth affected by seeding rate and mineral nitrogen. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v.20, p.734-738, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p734-738>.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; ROCHA, T. S. M.; ALBERTO, C. M.; BARTZ, A. C.; PAULA, G. M.; TOMIOZZO, R.; COSTA, L. C.; FENSTERSEIFER, C. A.; TAGLIAPIETRA, E. L.; CARDOSO, A. P.; WEBER, P. S.; BEXAIRA, K. P. Efeito do tipo de crescimento no desenvolvimento de cultivares modernas de soja após o início do florescimento no Rio Grande do Sul. ***Bragantia***, v.75, n.4, p.446-458, 2016. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.535>.

SILVA, A. J. P. **Estimação da percolação em lisímetros de drenagem e evapotranspiração da bananeira usando TDR**. 108 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Recôncavo Da Bahia – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. 2013.

ROCHA, A. E. Q.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; MEDEIROS, R. P.; TEODORO, I. Conteúdo de água no solo por reflectometria no domínio do tempo e balanço de água no solo em cultivo de milho. **Revista IRRIGA**, v. 19, n. 2, p. 267-278, 2014.

LICHTENTHALER, H.K.; WELLBURN, A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, v.11, p.591-592, 1983.

TEI, F.; AIKMAN, D. P.; SCAIFE, A. Growth of Lettuce, Onion, and Red Beet. 2. Growth Modelling. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 5, p. 645-652, 1996

LYRA, G. B., ROCHA A. E. Q., LYRA, G. B., SOUZA, J. L., TEODORO, I. Crescimento e produtividade do milho, submetido a doses de nitrogênio nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n.4, p. 578-586, 2014.

CAPÍTULO IV

DESEMPENHO DO MODELO *AQUACROP*[®] FAO PARA CULTIVO DE SOJA EM ALAGOAS

RESUMO: Com as evidentes ameaças climáticas e a limitação de informações agronômicas para a cultura da soja, o uso de modelos agrícolas faz-se necessário para ampliar e divulgar os conhecimentos técnicos de previsão de safra. O presente trabalho teve por objetivo, avaliar o modelo *AquaCrop*[®] FAO para soja cultivada sob diferentes lâminas de irrigação, na região de Rio Largo, AL, além de identificar a ocorrência de correlações entre os dados de fitomassa, rendimento de grãos e conteúdo de água na zona radicular observada e simulada pelo modelo. Os dados de entrada para avaliação do modelo foram coletados durante experimento realizado no ano de 2020/21 no *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA. Assim como, dados coletados das estações agrometeorológicas (temperatura do ar máxima e mínima, precipitação e componentes para quantificação da evapotranspiração de referência) localizadas próximo às áreas de cultivo. O desempenho do modelo *AquaCrop*[®] foi avaliado por meio de comparações estatísticas utilizando testes como o índice de concordância, coeficiente de correlação de Pearson, índice de confiança, porcentagem de desvio e raiz quadrada do erro médio. Para o conteúdo de água na zona radicular foram observados resultados semelhantes para as duas cultivares, isso se deve a pouca variação genética entre as cultivares, com boa predição entre os resultados simulados e observados com RMSE variando de 7,67 até 13,87 mm para os níveis irrigação de 70 e 105% da ET_c , respectivamente, da cultivar M_{8644} e o coeficiente de correlação de Pearson variando de 0,51 até 0,87 para as lâminas de irrigação de 35 e 140% da ET_c da cultivar M_{8349} . Houve superestimativa da fitomassa simulada quando comparada com a simulada pelo modelo *AquaCrop* em: -1,4; 49,1; 20,0; 11,4; 52,6; 86,7 % e 46; 120,3; 103,1; 78,2; 132,4; 88,9% para as lâminas de irrigação de 35, 70, 105, 140, 175 e 210% da ET_c , nas cultivares M_{8644} e M_{8349} , respectivamente. O modelo *AquaCrop*[®] apresenta boa performance entre valores observados e simulados de umidade do solo, acúmulo de biomassa e rendimento de grãos quando submetido a diferentes lâminas de irrigação.

Palavras-chave: Modelagem agrícola; *Glycine max* (L.); irrigação.

CAPÍTULO IV

PERFORMANCE OF THE AQUACROP® FAO MODEL FOR SOYBEAN CULTIVATION IN ALAGOAS

ABSTRACT: Soybean *Glycine max* (L.) is an agricultural crop with great economic and social importance for Brazil. The aim of this work was to evaluate the AquaCrop® FAO model for soybean cultivated under different irrigation levels, in the region of Rio Largo, AL, in addition to identifying the occurrence of correlations between phytomass, grain yield and water content. in the root zone observed and simulated by the model. The input data for evaluating the model were collected during an experiment carried out in the year 2020/21 at the Campus of Engineering and Agricultural Sciences - CECA. As well as data collected from agrometeorological stations (maximum and minimum air temperature, precipitation, and components for quantification of reference evapotranspiration) located close to the cultivation areas. The performance of the AquaCrop® model was assessed through statistical comparisons using tests such as the concordance index, Pearson's correlation coefficient, confidence index, deviation percentage and square root of mean error. For the water content in the root zone, similar results were observed for both cultivars, this is due to little genetic variation between cultivars, with good prediction between simulated and observed results with RMSE ranging from 7,67 to 13,87 mm for irrigation levels of 70 and 105% of ET_c , respectively, of the M_{8644} cultivar and the Pearson correlation coefficient ranging from 0,51 to 0,87 for levels of irrigation of 35 and 140% of the ET_c of the M_{8349} cultivar. There was overestimation of the simulated phytomass when compared with that simulated by the AquaCrop® model in: -1.4; 49.1; 20; 11.4; 52.6; 86.7% and 46; 120.3; 103.1; 78.2; 132.4; 88.9% for irrigation depths of 35, 70, 105, 140, 175 and 210% of ET_c , in cultivars M_{8644} and M_{8349} , respectively. The AquaCrop model performs well between observed and simulated values of soil moisture, biomass accumulation and grain yield when subjected to different irrigation levels.

Key words: Agricultural modelling; *Glycine max* (L.); irrigation.

4.1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional gera maior demanda por alimentos e energia, por consequência, compromete a segurança alimentar e energética e, assim caracteriza um desafio global para a humanidade (OVIROH et al., 2023). Com base em dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), estima-se que, atualmente, 815 milhões de pessoas sofram de desnutrição (CICERI & ALLANORE, 2019). A demanda por recursos está projetada para aumentar na medida em que a população cresça até 2050, o que requer aumentos de aproximadamente 55% na disponibilidade de água, 60% de alimentos e 80% de energia (DAHER et al., 2019).

Com esta eminente preocupação, a soja [*Glycine max* (L.) Merrill] obtém destaque no cenário econômico global como a maior fonte de óleo e proteína vegetal produzida mundialmente (SILVA, 2020). No Brasil, essa leguminosa além de ser uma das principais culturas agrícolas produzidas, o país é o maior produtor mundial, com 154,56 milhões de toneladas colhidos em 44,06 milhões de hectares em 2022/23 (CONAB, 2023).

Em Alagoas, a produção dessa oleaginosa ainda é considerada baixa (4.640 toneladas em 1.224 hectares cultivados). Uma das principais causas dessa baixa produção é a limitação espacial e temporal da precipitação, o uso de cultivares de baixo potencial produtivo, associado ao manejo inadequado de recursos hídricos, como irrigação mal planejada (SANTIAGO, 2019; CONAB, 2022). De acordo com Aamaas & Peters (2017), o uso irregular dos recursos hídricos é um dos principais fatores que limitam a produção vegetal. Assim, faz-se necessário o manejo adequado de água, sobretudo na irrigação, para que se obtenha máxima produtividade das culturas.

O uso de modelos agrícolas é ferramenta importante que pode auxiliar no planejamento da irrigação e manejo agrícola, pois além de assessorar no estudo dos efeitos e interações das condições ambientais, pode ainda, simular cenários sob diferentes condições hídricas, de solo e atmosfera (MAGALHÃES et al., 2019).

O modelo agrometeorológico AquaCrop[®] da FAO (RAES et al., 2009) é ideal para simulação devido a sua facilidade de calibração e poucos requisitos de entrada, mantendo um equilíbrio entre simplicidade, precisão e robustez, em comparação com outros modelos (BELETSE et al., 2011; MABHAUDHI et al., 2014). O AquaCrop é voltado principalmente à simulação da biomassa e a produtividade das plantas cultivadas em resposta à água disponível (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009; ABEDINPOUR et al., 2012).

Desde que o modelo AquaCrop® foi lançado em janeiro de 2009, foram relatadas fortes habilidades para simular o rendimento e a biomassa de diferentes culturas em condições de campo e o balanço de água do solo em diversas condições ambientais e regimes de rega, por exemplo milho (NYAKUDYAA & STROOSNIJDER 2014; PAREDES et al., 2014), algodão (GARCIA-VILA et al., 2009), girassol (STRICEVIC et al., 2011), trigo (KUMAR et al., 2014), soja (KHOSHRAVESH et al., 2013), feijão (MAGALHÃES et al., 2019) entre outras.

No entanto, o modelo AquaCrop® foi pouco utilizado para a soja, principalmente na região Nordeste. Mas a obtenção de informações técnico-científicas para dar suporte ao desenvolvimento da cultura e promover aumento de produtividade com retornos econômicos competitivos é imprescindível. Pelo exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar o modelo AquaCrop® da FAO para duas cultivares de soja irrigada sob diferentes níveis de reposição da água evapotranspirada na região de Rio Largo – AL.

4.2. MATERIAL E MÉTODO

4.2.1. Experimento para Avaliação do Modelo *AquaCrop*[®]

4.2.1.1. Descrição da área experimental

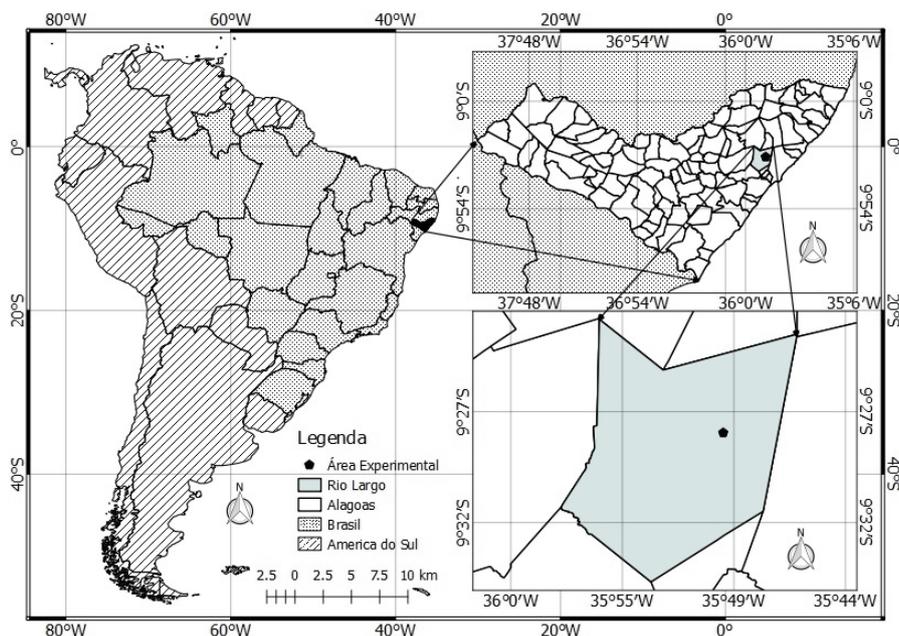
A avaliação do modelo *AquaCrop*[®] foi realizada com os dados coletados no experimento realizado no *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias - CECA (09°28'02" S, 35°49'43" W e 127 m de altitude) da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, município de Rio Largo, Alagoas, Brasil, entre 28 de outubro de 2020 e 01 de março de 2021 (124 dias), em uma área de 2.660 m². De acordo com a classificação de Thornthwaite e Mather (1955), o clima da região é caracterizado, como úmido, megatérmico (quente), com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno. A precipitação média anual é 1.800 mm, temperatura do ar média anual 25,4° C e umidade relativa do ar média mensal acima de 70% (SOUZA et al., 2006 FERREIRA JUNIOR et al., 2014). Os dados meteorológicos do período experimental (temperatura do ar - T, °C; umidade relativa do ar - U, %; velocidade do vento a 2 m de altura - u^2 , m s⁻¹; e precipitação pluvial - P, mm), foram obtidos por meio da estação agrometeorológica automática (Micrologger – 21 XL, Campbell Scientific, Logan, Utah), distante 30 m da área experimental. O solo local foi classificado como Latossolo amarelo coeso argisólico de textura média/argilosa.

4.2.1.2. Delineamento experimental e Manejo agrícola

O experimento foi realizado no período de menor incidência de chuva, com semeadura no dia 28 de outubro de 2020 e colheita no dia 01 de março de 2021, utilizando o delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram seis lâminas de irrigação: L₁ - 35%, L₂ - 70%, L₃ - 105%, L₄ - 140%, L₅ - 175% e L₆ - 210%, em função da evapotranspiração da cultura (ET_c) e duas cultivares de soja M₈₆₄₄ e M₈₃₄₉. As seis lâminas de irrigação ficaram nas parcelas e as duas cultivares nas subparcelas.

A área experimental foi de 70,0 m de comprimento por 38,0 m de largura, totalizando 2.660 m². Em cada bloco foram fixadas seis parcelas (lâminas de irrigação) composta por 20 linhas com 10,0 m de comprimento por 8,0 m de largura (80,0 m²), e nas subparcelas (cultivares de soja) 10 linhas com 5,0 m de comprimento e 8,0 m de largura (40,0 m²), totalizando 24 parcelas e 48 subparcelas experimentais, Figura 4,1.

Figura 4.1. Localização da área experimental de soja submetida a diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

As sementes foram inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio *Bradyrhizobium japonicum*, estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080, para a fixação biológica do nitrogênio (FBN) seguindo a dosagem recomendada pelo fabricante. Após inoculação a semeadura foi realizada manualmente, com espaçamento entre linhas de 0,50 m e população de plantas final para cultivar Monsoy 8644 – “C₁” (200.000 plantas ha⁻¹) e Monsoy 8349 – “C₂” (300.000 plantas ha⁻¹), essas densidades foram adotadas considerando o Nordeste de Tocantins (Microrregião – 504) de acordo com recomendação do fabricante, os resultados observados para cultivar M₈₃₄₉ – “C₂”, com nível de irrigação de 140% da ET_c - (L₄), foi o mais produtivo e apresentou diferença significativa quando submetido aos testes estatísticos em comparação com os outros tratamentos sendo, portanto, utilizado como parâmetro de entrada para o modelo *AquaCrop*[®] Versão 6.1 Plus (RAES *et al.*, 2012).

O controle das plantas daninhas foi realizado com herbicidas em pré-emergência e em pós-emergência, assim como o controle de pragas foi feito com a aplicação de inseticidas e o controle de doenças foi realizado com fungicidas (AGROFIT, 2019).

4.2.2. Avaliação do Modelo *AquaCrop*[®]

O modelo *AquaCrop*[®] foi avaliado para a cultura da soja cultivada na região de Rio Largo, AL (Tabela 4.1), descrito no item 16.1., utilizando os parâmetros experimentais das cultivares M₈₆₄₄ e M₈₃₄₉ (C₁ e C₂ respectivamente), para avaliar o comportamento do modelo variando as diferentes lâminas de irrigação. Dessa forma, estimou-se também o conteúdo de água no solo na zona radicular, fitomassa total acumulada e rendimento de grãos, os resultados foram comparados com os valores observados em campo para avaliar desempenho do modelo.

Tabela 4.1. Variáveis de entrada conservativas para cultura da Soja no *AquaCrop*[®].

Descrição	Valores	Valores	Default	Unid.
Conservativo (geralmente aplicável)	M ₈₆₄₄	M ₈₃₄₉		
Temperatura base	10,00	10,00	5,00	°C
Temperatura de paralisação	40,00	40,00	30,00	°C
Cobertura do dossel com 90% de emergência das plântulas (CC ₀)	1,30	1,95	1,65	cm ²
Coefficiente de crescimento do dossel (CGC)	16,40	9,90	10,60	% dia ⁻¹
Declínio no coeficiente da cultura após atingir o máximo de cobertura do dossel (CCX)	87	87	98	%
Coefficiente de declínio do dossel (CDC) até a senescência	15,20	13,10	2,90	% dia ⁻¹
Limite limiar de crescimento da folha p-superior	0,25	0,25	0,15	
Limite limiar de crescimento da folha p-inferior	0,60	0,60	0,65	
Forma da curva do coeficiente de estresse no crescimento da folha	3,00	3,00	3,00	
Limiar de condutância estomática p-superior	0,25	0,25	0,60	
Forma da curva do coeficiente estresse estomático	3,00	3,00	3,00	
Coefficiente de senescência em estresse p- superior	0,75	0,75	0,70	
Forma da curva do coeficiente de estresse na senescência	3,00	3,00	3,00	
Ponto de anaerobiose	15	15	5	%
Considerado conservador, específico para cada cultivar				
Parâmetro de produtividade da água é normalizado pelo clima (WP*)	17,00	17,00	15,00	g m ⁻²
Índice de colheita de referência (HI ₀)	23	24	40	%
GDDa (graus dias acumulados) a partir de 90% de emergência para o início da antese	470	740	1065	°GD
Duração da antese	14,00	24,00	29,00	dias
Coefficiente de inibição estomático no HI	5,00	8,00	3,00	

Fonte: Autor (2023).

4.2.3. Descrição do Modelo *AquaCrop*[®]

O modelo utilizado para realizar as simulações de cenários foi *AquaCrop*[®] versão 6.1 (maio, 2018), desenvolvido pela FAO (HSIAO *et al.*, 2009). As simulações foram realizadas com a inserção de arquivos básicos de entrada para o modelo como: banco de dados climáticos (temperatura do ar mínima e máxima, evapotranspiração de referência - ET_0 , precipitação e CO_2 - o modelo usa como padrão dados de concentração média anual de CO_2 do Observatório Mauna Loa, no Havaí), banco de dados cultural (densidade de plantio, fases e estádios fenológicos, tempo de emergência, cobertura máxima do solo), banco de dados de irrigação e banco de dados do solo (densidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e conteúdo de saturação). O software utilizado para criar os bancos de dados foi o Microsoft Office 2016[®] (Bloco de Notas).

O modelo considera a produtividade normalizada da água da cultura (WP) constante para um determinado clima, sendo normalmente agrupada de acordo com o metabolismo da cultura, para plantas que apresentam mecanismos C_3 a produtividade de água estará entre 15 e 20 g m^{-2} (STEDUTO *et al.*, 2009). Outro importante parâmetro de saída do modelo é o rendimento agrícola (Y), que é calculado por meio do produto entre biomassa (B) e índice de colheita (IC), o qual é simulado com relação ao tempo, desde a floração até a maturação fisiológica (STEDUTO *et al.*, 2009).

4.2.3.1. Parâmetros climáticos

O banco de dados climáticos foi composto pelos parâmetros de entrada: precipitação pluvial, temperatura do ar máxima e mínima diária (as quais foram coletadas e cedidas pelo Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia – Professor José Leonaldo de Souza (LIA)), evapotranspiração de referência (ET_0) (estimada pelo método *Penman-Monteith* - FAO com dados de entrada provenientes da mesma estação agrometeorológica) e a concentração média anual de CO_2 atmosférico, que é usada como padrão de concentração para o ano 2000 (369,47 ppm = 716,0 mg m^{-3}) registrados no Observatório do *Mauna Loa* no Havaí (RAES *et al.*, 2017) e ajustado pelo modelo para o respectivo ano simulado. O modelo também relaciona os componentes solo-cultura-atmosfera por meio do balanço de água (ARAYA *et al.*, 2010A). Esses arquivos foram salvos no software *WordPad*[®], ficando posteriormente disponíveis ao usuário na interface de comando.

4.2.3.2. Parâmetros de solo

O banco de dados necessário para rodar o modelo *AquaCrop*[®], foi composto por: textura, condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), conteúdo volumétrico de água na saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente Tabela 4.2. Para os experimentos realizados na área no *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA/UFAL), foram obtidos os parâmetros a partir de coletas realizadas em campo e análises em laboratório de Física dos Solos da Universidade Federal de Alagoas.

Os arquivos de saída do modelo geraram um banco de dados que foi organizado em planilhas do *Microsoft Office Excel*[®] 2016 e posteriormente transferidos para o *SigmaPlot*[®] 14.0 para confecção dos gráficos. Enquanto a quantificação de umidade do solo foi determinada para calibração do modelo *AquaCrop*[®] observada através do método eletromagnético (*Time Domain Reflectometry* - TDR) sendo esse um método confiável para mensurar os teores de água do solo (ARSOY *et al.*, 2013). Seguindo metodologia proposta por Rocha *et al.*, (2014), distribuindo as hastes de 0,30 m de comprimento verticalmente a profundidades de 0,0 - 0,30 m. As hastes foram calibradas previamente para o solo da área.

A disponibilidade total de água do solo (DTA), foi calculada por meio da equação 30, proposta por Bernardo, Soares e Mantovani (2006).

$$DTA = \frac{C_C - P_M}{10} d_a \quad (30)$$

em que: DTA (mm cm^{-1}) é a disponibilidade total de água no solo; C_C (% em massa) representa a capacidade de campo; P_m (% em massa) ponto de murcha; e d_a (g cm^{-3}) densidade do solo.

A disponibilidade real de água no solo (DRA), foi calculada por meio da equação 31, proposta por Bernardo, Soares e Mantovani (2006).

$$DRA = DTA * f \quad (31)$$

em que: DRA (mm cm^{-1}) que é a disponibilidade real de água no solo; e f (adm.) fator de disponibilidade de água no solo, sempre menor que 1.

A Capacidade total de água no solo (CTA), foi mensurada através da equação 32, proposta por Bernardo, Soares e Mantovani (2006).

$$DRA = DTA * z \quad (32)$$

em que: CTA (mm) é a capacidade total de água do solo e z (cm) é a profundidade efetiva do sistema radicular.

Tabela 4.2. Parâmetros físicos hídrico do solo das áreas experimentais em Rio Largo e Atalaia - AL, Ponto de murcha permanente – (PWP); Capacidade de campo – (FC); Conteúdo de água na saturação – (SAT).

Textura do solo	Camadas do solo	Densidade (g cm ⁻³)	Conteúdo volumétrico de água no solo (mm /mm ⁻¹)		
			PWP	FC	SAT
<i>Rio Largo 2020/21</i> - Médio argilosa	00-10	1,36	0,12	0,20	0,40
	10-20	1,44	0,13	0,22	0,43
	20-30	1,52	0,14	0,24	0,43

Fonte: Autor (2023).

4.2.4. Parâmetros Fenológicos e de Crescimento da Cultura

O arquivo de cultura no *AquaCrop*[®] apresenta parâmetros específicos da cultura pertencentes a todos os estádios de crescimento fenológico com desenvolvimento da parte aérea, raízes, evapotranspiração, água, fertilidade e temperatura (STEDUTO *et al.*, 2009).

O banco de dados da cultura foi formulado a partir de coletas destrutivas e não destrutivas do experimento realizado em Rio Largo, AL. A parametrização do modelo é dividida basicamente em dois módulos, as variáveis classificadas como conservativas e as não conservativas. As conservativas são as que permanecem constantes em função do tempo, como produtividade de água (WP*) que é definida de acordo com as características climáticas em função da cultura agrícola adotada (STEDUTO *et al.*, 2009).

As pragas e doenças não são consideradas, apresentando uma limitação para a modelagem (AKUMAGA *et al.*, 2017). Desta forma, controlou-se a presença de ervas nativas, pragas e doenças, objetivando reduzir a interferência negativa na produção final da cultura.

Para normatizar os parâmetros específicos da cultura, foram contabilizados os graus-dia acumulados (GDA, °C dia) através da equação 33, A partir da emergência da cultura até a colheita:

$$GDA = \sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_b) \quad (33)$$

em que: ΣGDA (°C dia⁻¹) representa os graus-dia acumulados; $T_{m,i}$ (°C) é a temperatura média diária do ar do dia i , com i variando de 1 (data de semeadura), até n dias (dias considerados) e T_b (°C) é a temperatura basal para cultura, em que se adotou 10 °C (FARIAS

et al., 2009). T_m foi determinada pelos extremos diários de temperatura do ar, pela relação $(T_x + T_n) / 2$, em que T_x (°C) é a temperatura do ar máxima e T_n (°C) a mínima diária.

As avaliações de crescimento foram realizadas quinzenalmente analisando as variáveis necessárias para calibração e validação do modelo (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Observações fenológicas e variáveis específicas para o modelo *AquaCrop*[®] com a cultura da Soja, cultivada em Rio Largo, Alagoas durante a avaliação do modelo.

Descrição	Valores	Valores	Unidades
	M ₈₆₄₄	M ₈₃₄₉	
Tempo desde a semeadura até a emergência	5	5	DAS
Tempo desde a semeadura até a cobertura máxima do dossel	46	45	DAS
Duração da floração	14	15	DAS
Tempo desde o plantio até o início da senescência	104	103	DAS
Tempo desde o plantio até à maturação fisiológica	123	117	DAS
Profundidade efetiva das raízes	0,40	0,38	metros
Densidade de plantio, Rio Largo (2020/21)	200.000	300.000	Plantas ha ⁻¹
Cobertura máxima do dossel (CCx) Rio Largo (2020/21)	87	87	%

Fonte: Autor (2023).

A quantificação do rendimento de grãos para a cultura foi calculada a partir da massa total de grão em cada tratamento, ajustada para um teor de umidade de 13%. O modelo *AquaCrop*[®], de acordo com Steduto *et al.* (2009), simula o rendimento de grãos e o acúmulo de biomassa de forma semelhante ao modelo de Doorenbos e Kassam (1979), que utiliza a relação da evapotranspiração (ET) no cálculo do rendimento agrícola da cultura (Y) equação 34. Entretanto, há a partição da evapotranspiração em evaporação da água do solo (E) e transpiração da água pela cultura (Tr) por parte do *AquaCrop*[®], conservando os outros parâmetros como acúmulo de biomassa total e índice de colheita da cultura.

$$Y = B * IC \quad (34)$$

em que: Y é o rendimento da cultura (t ha⁻¹); B é a biomassa total (t ha⁻¹) e IC é o índice de colheita.

A razão entre o RG (t ha⁻¹) e a Fitomassa seca total (FST, somatório da massa seca das folhas, caule e vagens, t ha⁻¹), determina o IC, Equação 35.

$$IC = \left(\frac{RG}{FST} \right) \quad (35)$$

em que: RG - Rendimento de grãos (t ha⁻¹); FST – Fitomassa seca total (t ha⁻¹).

4.2.5. Performance do Modelo *AquaCrop*[®]

4.2.5.1. Análise dos dados modelados

A acurácia e verificação do desempenho do modelo em relação aos dados de saída para a calibração e validação foi realizada por meio de comparações entre resultados estimados e observados utilizando testes estatísticos. Comparou-se os valores de cobertura do solo (CC), biomassa seca (BS), rendimento de grãos (Y) e umidade do solo, utilizando indicadores estatísticos como: índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c), porcentagem de desvio (PE), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de regressão ajustado (R²_{ajs}).

O Índice de Concordância proposto por Willmott (1982), calculados pela Equação 36, avalia a concordância existente entre os pontos simulados e observados por meio da aproximação ou afastamento dos dados. Esse índice é representado pela letra “d” e varia de zero a um, em que zero indica a nulidade total e um indica a exatidão.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (36)$$

em que: “S_i” é o valor estimado pelo modelo no dia i; “O_i” é o valor observado no dia i e “ \bar{O} ” é a média dos valores observados.

O Coeficiente de Correlação de Pearson “r” mede o grau de associação entre duas variáveis, indicando a correlação entre os dados observados e simulados, essa correlação pode ser positiva ou negativa e é calculada pela Equação 37.

$$r = \left[\frac{\sum OS - \frac{\sum O * \sum S}{N}}{(N-1) * S_o * S_s} \right] \quad (37)$$

em que: “r” é o coeficiente de correlação de Pearson; $\sum OS$ é a soma dos produtos entre os valores de O (observado) e S (simulado); $\sum O * \sum S$ é o produto da soma dos valores de O e S; N é o número de observações; S_o é o desvio padrão dos valores de o e o S_s é o desvio padrão dos valores de s.

A Equação 38 demonstra a avaliação através do Índice de confiança “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que é utilizada com o objetivo de indicar o desempenho dos métodos (Tabela 4.4), com base no produto do coeficiente de correlação de Pearson “r” e o índice de concordância de Willmott “d”.

$$c = (r * d) \quad (38)$$

Tabela 4.4. Índice de confiança (c) e critérios de desempenho.

Valor de “c”	Desempenho do modelo
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Regular
0,41 a 0,50	Ruim
≤0,40	Muito ruim

Fonte: Adaptado de Camargo e Sentelhas (1997)

A Porcentagem de Desvio indica a sub ou superestimava entre os valores observados e simulados (TOJO SOLER, 2004). Essa porcentagem é dada pela Equação 39.

$$PE = \left[\frac{(S_i - O_i)}{O_i} \right] * 100 \quad (39)$$

em que: “PE” é a porcentagem de desvio; “Si” é o valor estimado pelo modelo e “Oi” é o valor observado.

A Raiz Quadrada do Erro Médio (Equação 40) é utilizada para quantificar a performance geral do modelo sintetizando a diferença média entre os valores observados e estimados. De acordo com Loague e Green, (1991), quanto mais próximo de zero, melhor o resultado e o ajuste do modelo para a simulação.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (S_i - O_i)^2}{n - 1}} \quad (40)$$

em que: RMSE é a raiz quadrada do erro médio; Si é o valor estimado pelo modelo; Oi é o valor observado e n é o número de dados.

O R^2_{ajs} é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores em relação ao número de observações, Equação 41.

$$R_{aj_s}^2 = 1 - \left[\frac{(1 - R^2)(n - i)}{n - p} \right] \quad (41)$$

em que, p é o número de parâmetros assumidos pelo modelo; n é o número de amostras ou medidas, i é a relação de interceptação da curva dos valores observado com a curva do modelo, considerando 1 se houver interceptação das curvas com os pontos.

Os modelos foram submetidos ao teste t de Student a ($p \leq 0,05$), Equação 42.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (42)$$

em que \bar{x} : Média da amostra; μ_0 : Valor fixo usado para comparação com a média da amostra; s : desvio padrão; n : número da amostra.

O desvio padrão foi calculado usando a Equação 43.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (43)$$

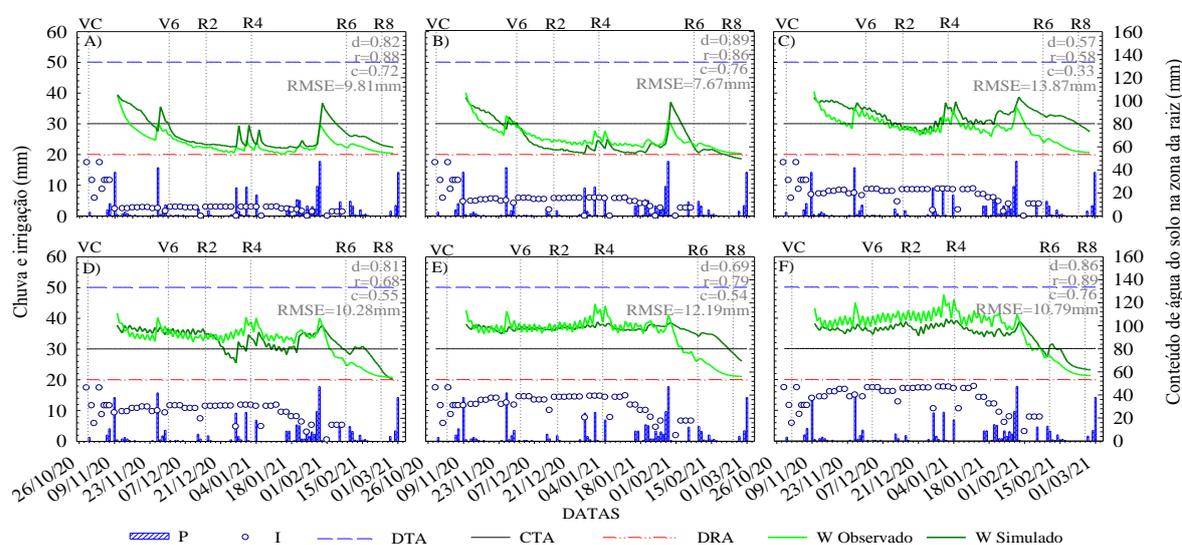
em que, s : desvio padrão; \bar{x} : média da amostra; n : número da amostra

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o ciclo da cultura da soja (28/10/2020 a 01/03/2021) a precipitação total foi 173,80 mm, com distribuição irregular, desta forma, observou-se uma média por evento de chuva de 1,8 mm e frequência de aproximadamente 1 evento a cada 5,2 dias o que corresponde a 22,4% de dias com precipitação.

Na Figura 4.2, são apresentados os resultados da simulação para o conteúdo de água no solo na zona das raízes (W, 0-40 cm) da cultura da soja (cultivar M₈₆₄₄) na região de Rio Largo- AL. Os valores simulados, assim como os medidos em campo, respondem ao abastecimento de água no solo (irrigação e precipitação) dos tratamentos com lâminas de 35, 70, 105 e 140% da ET_c. Observou-se também que o modelo superestimou nos estádios de desenvolvimento de planta quando iniciou o florescimento (V₆ e R₄), exceto para as lâminas de 175 e 210% da ET_c, em que o modelo subestimou os resultados simulados durante as mesmas fases citadas. Estes valores corroboram os encontrados por Hsiao et al. (2009), Farahani et al. (2009) e Zeleke et al. (2011), que relataram que o AquaCrop tende a superestimar o W para a cultura do milho, algodão e canola, respectivamente. Em contrapartida, outros estudos mostraram que a AquaCrop subestimou o W para o milho (MEBANE et al., 2013) e o trigo (IQBAL et al., 2014; MKHABELA & BULLOCK, 2012).

Figura 4.2. Conteúdo de água do solo na zona da raiz (W, mm), observado e simulado na camada de 0,0-0,40 m, disponibilidade total de água do solo – DTA, mm cm⁻¹, disponibilidade real de água do solo – DRA, mm cm⁻¹ e capacidade total de água no solo – CTA, mm na cultivar M₈₆₄₄ de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

Ahmadi et al. (2015), avaliando a produtividade do milho e o teor de água com o uso do AquaCrop[®], concluiu que um dos principais motivos para a variação dos resultados encontrados pelo modelo, está na deficiência do AquaCrop[®] em considerar a grande heterogeneidade do solo no campo. Portanto, usar o mesmo conjunto de dados físico-hídricos do solo é uma fonte potencial de incerteza substancial na modelagem de W. Gervais et al. (2010), ratifica que a subestimação do W com altos teores de água no solo pelo AquaCrop[®] é provavelmente causada pelo modelo que não permite que o teor de água no solo permaneça acima da capacidade de campo (CC) durante dias consecutivos. Para Raes et al. (2011), o modelo AquaCrop[®] prevê que os solos saturados drenam até atingir a CC em período curto, os autores ainda reportam que o AquaCrop não tem um mecanismo para lidar com a entrada súbita de água no sistema, isto é, uma sub-rotina de ascensão capilar ainda não foi implementada.

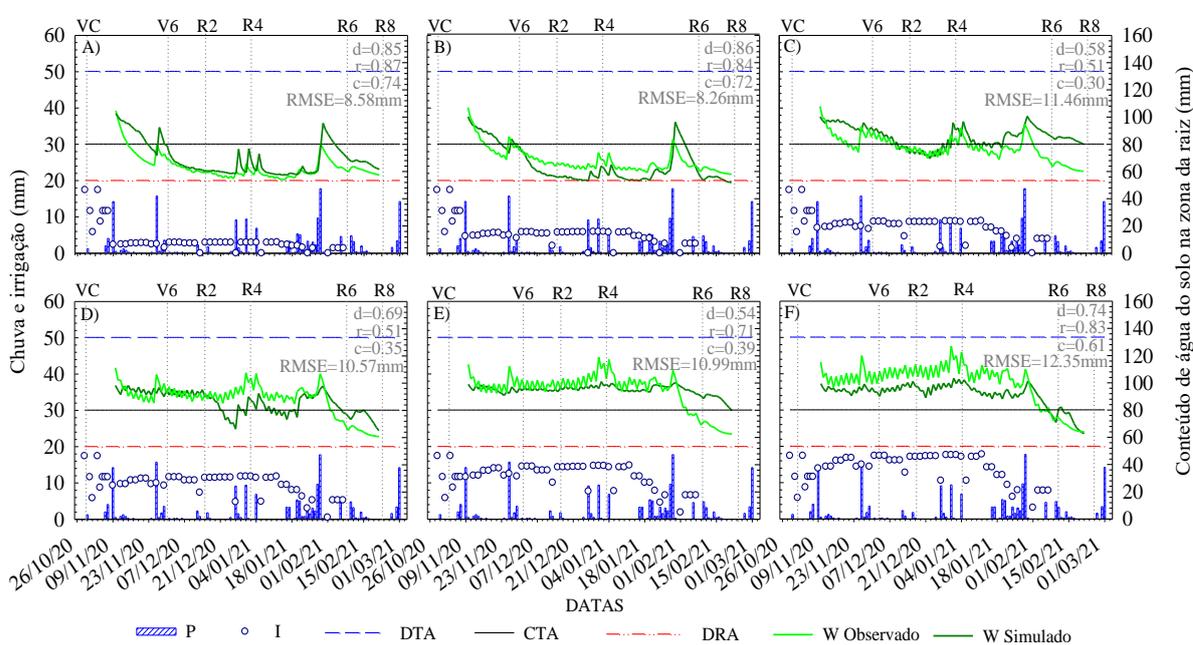
Considerando o ciclo da cultura, foi observado que na parcela irrigada com 35% da ET_c o teor de água no solo se manteve 8% (valores observados) abaixo da disponibilidade real de água (DRA), o que caracterizou estresse hídrico nesse tratamento, e o teor de água no solo observado permaneceu acima da DRA nas áreas irrigadas com 70, 105, 140, 175 e 210% da ET_c . O modelo AquaCrop[®] prevê com precisão os ciclos de aplicação e evaporação de água no solo devido a eventos de irrigação, porém, tende a subestimar o teor total de água no solo, particularmente nas parcelas de irrigação deficitária (HUSSEIN et al., 2011; PAREDES & TORRES, 2016; MAGALHÃES et al., 2019). Geerts et al. (2009) ratificam que, quando a simulação do conteúdo de água no solo é prevista com exatidão, a estimativa da evapotranspiração da cultura é satisfatória para o balanço hídrico do solo no AquaCrop[®]. Porém os autores Sandhu; Irmak. (2019) sugeriram que, se o modelo for revisado em relação aos parâmetros de solo, seu desempenho para simular a dinâmica da água no solo, especialmente em condições de estresse hídrico e para condições não estressantes, pode ser melhorado consideravelmente.

As estatísticas de desempenho do modelo evidenciaram simulações com concordância variando de $(0,57 < "d" < 0,89)$ nas parcelas irrigadas com as lâminas de 35, 70, 105, 140, 175 e 210% da ET_c quando comparadas aos valores observados (Figura 4.3). De acordo com Dancey & Reidy (2013) a correlação foi considerada forte em todos os tratamentos analisados (35, 70, 105, 140, 175 e 210% da ET_c) com $0,58 \leq r \leq 0,89$. O RMSE variou de 7,67 a 13,87 mm, correspondentes a 7,1 a 14% do armazenamento total de água

no solo. A performance geral do modelo AquaCrop® é classificada como boa, com desvio percentual em média de 19% no período em que foi observado, de acordo com a classificação de Smith (1997).

Na Figura 4.3, são apresentados os resultados da simulação para o conteúdo de água no solo na zona das raízes da cultura da soja para a cultivar M₈₃₄₉. Os resultados encontrados para esta cultivar são muito semelhantes aos encontrados para cultivar M₈₆₄₄, isso deve a pouca variação genética entre as cultivares, não havendo assim diferença significativa entre elas para o balanço hídrico da cultura, obtendo comportamento idêntico quando previsto pelo modelo AquaCrop®. Em relação as estatísticas de desempenho, os resultados também são semelhantes ($0,54 < \text{“d”} < 0,86$; correlação com $0,51 \leq r \leq 0,87$ e RMSE variou de 8,26 a 12,35 mm) nas parcelas irrigadas com as lâminas de 35, 70, 105, 140, 175 e 210% da ETc.

Figura 4.3. Conteúdo de água do solo na zona da raiz (W, mm), observado e simulado na camada de 0,0-0,40 m, disponibilidade total de água do solo – DTA, mm cm⁻¹, disponibilidade real de água do solo – DRA, mm cm⁻¹ e capacidade total de água no solo – CTA, mm na cultivar M₈₃₄₉ de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo AL, de outubro 2020 a março de 2021.

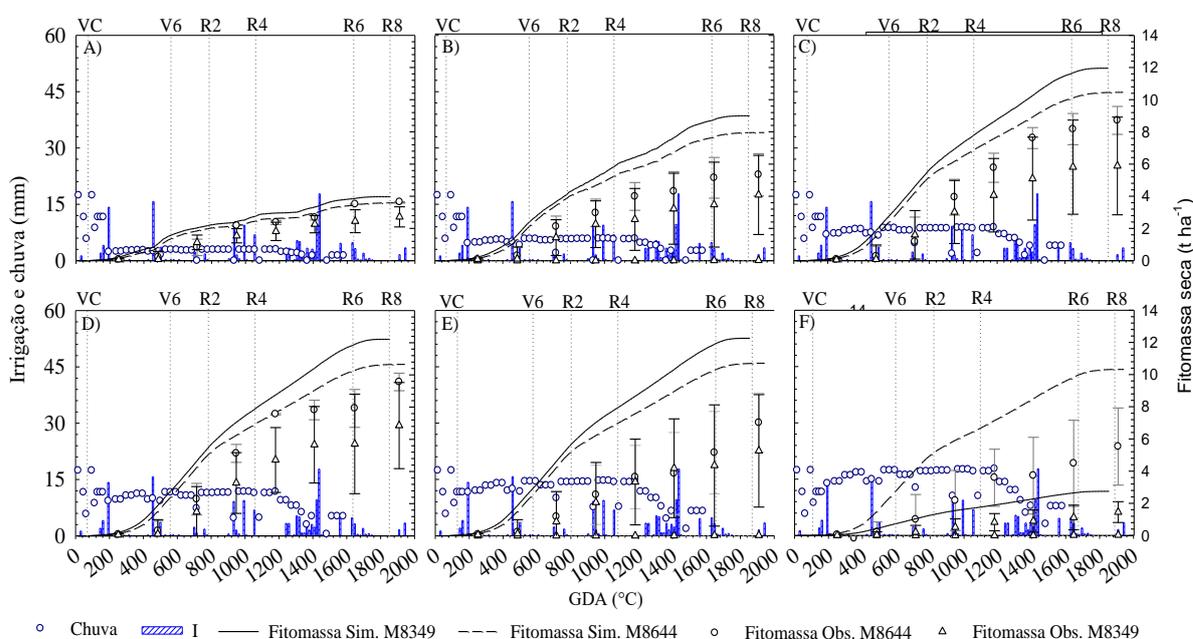


Fonte: Autor (2023).

Os resultados de acúmulo de biomassa obtidos experimentalmente e simulados pelo modelo AquaCrop® ao longo do ciclo da soja estão apresentados na Figura 4.4. O modelo alcançou a produção final de biomassa em todas as lâminas de irrigação. A cultivar M₈₃₄₉

obteve melhor rendimento de biomassa nas lâminas de irrigação com 35, 70, 105, 140 e 175% da ET_c , enquanto a cultivar M_{8644} obteve melhor rendimento na lâmina de irrigação de 210% da ET_c . O modelo superestimou o acúmulo de fitomassa em praticamente todas as lâminas de irrigação aplicadas com exceção para a lâmina de irrigação de 210% da ET_c , com a cultivar M_{8349} . Steduto et al. (2007), explica que o modelo AquaCrop[®] é baseado no comportamento conservador do WP, que é simplesmente a relação entre produção de biomassa e transpiração, neste caso como não houve restrições hídricas, a transpiração diminuiu e o acúmulo de fitomassa aumentou.

Figura 4.4. Dados observados e simulados de fitomassa ($t\ ha^{-1}$) para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.



Fonte: Autor (2023).

Os índices estatísticos apresentaram valores satisfatórios para as duas cultivares estudadas (Tabela 4.5), a cultivar M_{8644} obteve $0,66 < "d" < 0,96$; correlação com $0,95 \leq r \leq 0,99$ e RMSE variou de 0,44 a 3,7 mm, e para a cultivar M_{8349} $0,56 < "d" < 0,81$; correlação com $0,96 \leq r \leq 0,98$ e RMSE variou de 1,1 a 5,1 mm.

Foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os valores observados e simulados pelo modelo AquaCrop[®] para o rendimento de fitomassa final (-1,4; 49,1; 20; 11,4; 52,6; 86,7 %) para as lâminas de irrigação de 35, 70, 105, 140, 175 e 210% da ET_c , respectivamente, com a cultivar M_{8644} . A cultivar M_{8349} apresentou diferenças de 46; 120,3;

103,1; 78,2; 132,4; 88,9% para as respectivas lâminas de irrigação aplicadas. Paredes e Torres (2017) encontraram tendências semelhantes ao avaliarem a parametrização do modelo AquaCrop® para a biomassa da ervilha. Nos tratamentos de 70 a 210% da ET_c o modelo superestimou a matéria seca em todas as avaliações durante o ciclo da soja, com as maiores dispersões durante as fases reprodutivas da cultura (R₂ a R₈). Resultados semelhantes foram encontrados por Salemi et al. (2011) e Du et al. (2011) com a cultura do trigo, em que observaram incrementos de acúmulo de fitomassa em função da elevação dos índices pluviométricos em diferentes regiões e anos de estudos.

Tabela 4.5. Avaliação estatística de simulações e observações da fitomassa seca pelo modelo AquaCrop®, utilizando os índices de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

Índices estatísticos					
Fitomassa seca total (t ha ⁻¹)					
Lâminas	Cultivar	d	r	c	RMSE (mm)
L ₁	M ₈₆₄₄	0,967	0,967	0,935	0,447
	M ₈₃₄₉	0,817	0,984	0,804	1,036
L ₂	M ₈₆₄₄	0,857	0,995	0,853	1,867
	M ₈₃₄₉	0,579	0,989	0,572	3,568
L ₃	M ₈₆₄₄	0,933	0,976	0,911	1,858
	M ₈₃₄₉	0,679	0,993	0,674	4,274
L ₄	M ₈₆₄₄	0,965	0,980	0,945	1,360
	M ₈₃₄₉	0,722	0,986	0,711	4,079
L ₅	M ₈₆₄₄	0,721	0,956	0,689	3,638
	M ₈₃₄₉	0,564	0,979	0,552	5,165
L ₆	M ₈₆₄₄	0,668	0,975	0,652	3,745
	M ₈₃₄₉	0,634	0,968	0,614	4,539

Índice de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE);

Fonte: Autor (2023).

Em relação ao rendimento de grãos a cultivar M₈₃₄₉ apresentou melhor desempenho (3.181 kg por ha⁻¹) com a lâmina de irrigação de 140% da ET_c. quando comparada com a cultivar M₈₆₄₄ (2.451 kg por ha⁻¹) com a mesma lâmina (140% da ET_c de irrigação), o AquaCrop subestimou os valores de rendimento de grãos para a cultivar M₈₃₄₉ (-18%) e superestimou para a cultivar M₈₆₄₄ (0,04%) (Tabela 4.6).

Tabela 4.6. Avaliação estatística de simulações e observações do conteúdo de água na zona radicular pelo modelo *AquaCrop*[®], utilizando os índices de concordância Willmont (d), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), para cultivares de soja submetida às diferentes lâminas de irrigação, em Rio Largo (AL), Brasil, de outubro 2020 a março de 2021.

		Índices estatísticos					
		Rendimento final de biomassa (kg ha ⁻¹)			Rendimento final de grãos (kg ha ⁻¹)		
Lâminas	Cultivar	Observado	Simulado	%Desvio	Observado	Simulado	%Desvio
L ₁	M ₈₆₄₄	3.642,30	3.590,00	-1,44%	757,64	603,00	-20,41%
	M ₈₃₄₉	2.722,20	3.974,00	46,04%	787,59	867,00	10,08%
L ₂	M ₈₆₄₄	5.334,20	7.955,00	49,13%	1.304,07	1.735,00	33,05%
	M ₈₃₄₉	4.082,20	8.995,00	120,35%	1.683,42	2.083,00	23,74%
L ₃	M ₈₆₄₄	8.713,20	10.453,00	19,97%	2.154,23	2.390,00	10,94%
	M ₈₃₄₉	5.885,70	11.955,00	103,12%	2.927,19	2.842,00	-2,91%
L ₄	M ₈₆₄₄	9.563,00	10.655,00	11,42%	2.451,14	2.452,00	0,04%
	M ₈₃₄₉	6.854,50	12.215,00	78,20%	3.581,78	2.911,00	-18,73%
L ₅	M ₈₆₄₄	7.024,00	10,717,00	52,58%	2.289,06	2.468,00	7,82%
	M ₈₃₄₉	5.277,40	12.266,00	132,43%	3.220,86	2.911,00	8,91%
L ₆	M ₈₆₄₄	5.530,50	10.323,00	86,66%	1.829,50	2.435,00	33,10%
	M ₈₃₄₉	6.227,60	11.766,00	88,83%	2.688,08	2.898,00	7,81%

Fonte: Autor (2023).

Os modelos podem subestimar ou superestimar as produtividades simuladas, visto que o modelo foi desenvolvido para simular a produtividade que pode ser obtida na teoria, sem considerar, pragas e doenças, e efeito do fotoperíodo no desenvolvimento da soja e, leva ao acréscimo ou redução na estimativa da produtividade para datas de plantio precoce e tardia (AKUMAGA et al., 2017; BATTISTI et al., 2017). No geral, os resultados mostram a adequação da parametrização adotada do *AquaCrop*[®] para previsões de biomassa de soja e rendimento de grãos, portanto, uma boa capacidade de previsão do modelo; entretanto, a obtenção desses resultados exigiu uma parametrização adequada.

Nunes et al. (2019) utilizou o modelo *AquaCrop*[®] para avaliação de risco climático e o desempenho do modelo para simulação de produtividade de feijão-caupi, Magalhães et al. (2019) avaliaram o uso do modelo *AquaCrop*[®] e diferentes lâminas de irrigação, e ambos os autores mostraram que o modelo pode ser utilizado na simulação da produtividade para a região de estudo, pois foi sensível à sazonalidade e mostrou-se consistente nessas previsões, embora não tenha sido validado em campo.

4.4. CONCLUSÃO

O modelo AquaCrop[®] apresenta boa performance ao comparar valores de umidade do solo simulados com os observados. Mas para acúmulo de biomassa e rendimento de grãos, é eficiente apenas em cultivos com déficits hídricos.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAMAAS, B.; PETERS, G. P. The climate impact of Norwegians' travel behavior. **Travel Behaviour and Society**, v. 6, n. 1, p. 10-18, 2017.

ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; MAN, S.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-66, 2012.

AHMADI, S. H.; MOSALLAEPOUR, E.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A.; SEPASKHAH, A. R. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. **Water Resources Management**, v. 29, n. 8, p. 2837-2853, 2015.

AKUMAGA, U.; TARHULE, A.; YUSUF, A. A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 225-234, 2017.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in Southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28-37, jan. 2017.

BELETSE, Y.G., LAURIE, R., DU PLOOY, C.P., VAN DEN BERG, A., LAURIE, S., 2011. Cali-bration and validation of AquaCrop model for orange fleshed sweet potatoes. In: Ardakanian, R., Walter, T. (Eds.), Capacity Development for Farm Management Strategies to Improve Crop Water Productivity using AquaCrop: Lessons Learned. UNW-DPC Publication Series, **Knowledge** No. 7, Bonn, Germany.

BERNARDO, Salassier; SOARES, Antônio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. Manual de Irrigação. 8. ed..Viçosa: editora UFV, 2006.

BIAZIN, B., STROOSNIJDER, L., 2012. To tie or not to tie ridges for water conservation in Rift Valler drylands of Ethiopia. *Soil Tillage Res.* 124, 83–94.

CICERI, D.; ALLANORE, A. Local fertilizers to achieve food self-sufficiency in Africa. *Science of The Total Environment*, v. 648, p. 669-680, 2019.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra 2022/2023.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia**. Porto Alegre: Artmed, 2013. 608 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield Response to Water**. FAO Irrigation and Drainage paper N° 33. Rome: FAO, 1979. 193p.

FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR, M. **Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies**. Springer Science & Business Media, 2009. 549 p.

DAHER, B.; HANNIBAL, B.; PORTNEY, K. E.; MOHTAR, R. H. Toward creating an environment of cooperation between water, energy, and food stakeholders in San Antonio. *Science of The Total Environment*, v. 651, n. 2, p. 2913-2926, 2019.

GARCIA-VILA M, FERERES E, MATEOS L, ORGAZ F, STEDUTO P. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 2009; 101: 477–487.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA, C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES, B.; OSCO, V.; STEDUTO, P. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. ***Agronomy Journal***, v. 101, n. 3, p. 499-508, 2009.

GERVAIS, M., BULLOCK, P., MKHABELA, M., FINLAY, G., RADDATZ, R., 2010. Improvements to the accuracy of modelled soil water content from the second-generation Prairie agrometeorological model. *Can. J. Soil Sci.* 90, 527–542.

HSIAO, T.C., LEE, H., PASQUALE, S., BASILIO, R.L., DIRK, R., ELIAS, F., 2009. AquaCrop—the FAO Crop Model to simulate yield response to water. III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101, 448–459.

IQBAL A. M., SHEN Y., STRICEVIC R., PEI H., SUN H., AMIRI E., PENAS A., SARA DEL RIO. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management* 135 (2014) 61– 72

KHOSHRAVESH M, MOSTAFAZADEH-FARD B, HEIDARPOUR M, KIANI AR (2013) AquaCrop model simulation under different irrigation water and nitrogen strategies. *Water Sci Technol* 67:232–238

KUMAR P, SARANGI A, SINGH DK, PARIHAR SS (2014) Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. *Irrig Drain* 63:474–487

MABHAUDHIA T., ALBERT T. M., YACOB G. B. Parameterization and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agricultural and Forest Meteorology* 192–193 (2014) 132–139

MAGALHAES, I. D.; LYRA, G. B.; DE SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; DA ROCHA, A. E. Q.; CAVALCANTE, C. A.; DE SOUZA FERRAZ, R. L. Performance of the AquaCrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. ***Australian Journal of Crop Science***, v. 13, n. 7, p. 1188-1196, 2019.

MEBANE, V.J., DAY, R.L., HAMLETT, J.M., WATSON, J.E., ROTH, G.W., 2013. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed Maize in Pennsylvania. *Agron. J.* 105, 419e427

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. ***Agricultural Water Management***, v. 110, p. 16-24, 2012.

NYAKUDYAA, I. W.; STROOSNIJDER, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: modelling with AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 280-296, 2014.

NUNES, H. G. G. C.; DE PINHO SOUSA, D.; MOURA, V. B.; FERREIRA, D. P.; DE NÓVOA, J.V.; DE OLIVEIRA V. I. C.; DA SILVA, F. V. D.; DE OLIVEIRA, E. C. Performance of the AquaCrop model in the climate risk analysis and yield prediction of cowpea (*Vigna Unguiculatta L. Walp*). **Aust. J. Crop Sci.** 13 (07), 1105–1112, 2019.

PAREDES, P.; MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 81-97, 2014.

RAES, D. et al. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. **Agronomy Journal**. V. 101, Issue 3. 2009.

SANTIAGO, A. D. PROCÓPIO, S. O.; CARVALHO H. W. L.; BRAZ, G. B. P. Desempenho de cultivares de soja em áreas com histórico de produção de cana-de-açúcar no Sealba. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. 30 p. (**Boletim de Pesquisa / Embrapa Tabuleiros Costeiros**, ISSN 1678-1961; 142).

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

STRICEVIC, R., COSIC, M., DJUROVIC, N., PEJIC, B., MAKSIMOVIC, L., 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agric. Water Manage.* 98, 1615–1621.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

SILVA, J. A.; SANTOS, P. A. B.; CARVALHO, L.G.; MOURA, E. G.; ANDRADE, F.R. Gas exchanges and growth of soybean cultivars submitted to water deficiency. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. 50, e58854. 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5058854>.

Oviroh, P. O., Austin-Breneman, J., Chien, C. C., Chakravarthula, P. N., Harikumar, V., Shiva, P., ... & Papalambros, P. Y. (2023). Micro water-energy-food (MicroWEF) Nexus: a system design optimization framework for integrated natural resource conservation and development (INRCDD) projects at community scale. *Applied Energy*, 333, 120583.

ZELEKE, K. T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1610-1618, 2011.

APÊNDICES:

Apêndice 1. Croqui do experimento.

