



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO E PRODUTIVIDADE DO
ALGODOEIRO IRRIGADO: SIMULAÇÃO COM O MODELO
AQUACROP**

MAISA DE OLIVEIRA MATOS

RONDONÓPOLIS – MT

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO E PRODUTIVIDADE DO
ALGODOEIRO IRRIGADO: SIMULAÇÃO COM O MODELO
AQUACROP**

MAISA DE OLIVEIRA MATOS
ENGENHEIRA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

Orientador: Prof. Dr. Thiago Franco Duarte

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Rondonópolis, Mato Grosso, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

RONDONÓPOLIS – MT
2025

À Deus que me deu força para conquistar meus objetivos ao meu esposo Ronam Mayco Dal Pra e aos meus pais e avós. Eles foram a minha base e aqueles que me proporcionaram estrutura para chegar até o final.

Dedicatória

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todo cuidado amor e proteção, pelas bênçãos concedidas, e por me dar força e sabedoria em cada fase deste processo.

Ao meu esposo Ronam Dal Pra por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis me incentivando, aconselhando e demonstrando todo amor e cuidado.

A minha Mãe Tais Regina de Oliveira e a minha avó Oraides Martins de Oliveira, pelas suas orações e por suas ligações e visitas me motivando e me aconselhando a procurar fazer o meu melhor e cada etapa realizada.

Ao meu professor e orientador Dr. Thiago Franco Duarte por todo carinho, dedicação, comprometimento e paciência. Por me motivar desde a graduação a iniciar o mestrado. E pela parceria de trabalharmos juntos esses 5 anos em projetos de pesquisa na UFR, me motivando e orientando sempre a fazer o melhor.

A minha cunhada Rayany Mayara Dal Pra e sogra Noemia Dal Pra, por me motivarem a continuar e persistir nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos companheiros de mestrado, Thais Magalhães, Yasmim Beltrão, Joyce Costa, Natalia Doval, Alam Souza, Andreia Scheffer, Jéssica Santos e Sâmia Barbosa por toda parceria e por me ajudarem em cada etapa das disciplinas e da pesquisa.

A Universidade Federal de Rondonópolis por me proporcionar o aprimoramento profissional e pessoal.

Ao GPAS (Grupo de Pesquisa em Água e solo), da UFR, que foi fundamental para a implantação e manutenção do experimento, todos sempre comprometidos.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa concedida e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento do Projeto.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

RESUMO

O algodoeiro (*Gossypium L.*) é uma espécie agrícola de grande importância econômica no Brasil, cuja demanda por tecnologias que potencializem a produtividade, aliadas à sustentabilidade, tem se tornado cada vez mais necessária. Após as devidas avaliações, modelos de simulação da produtividade, como o AquaCrop, permitem estimar a resposta da cultura em função da disponibilidade de água no solo e seu impacto na produtividade do algodoeiro, por meio de simulações. O objetivo do presente estudo foi avaliar o armazenamento de água no solo, a produtividade do algodoeiro e a cobertura do dossel por meio de modelagem e simulação no software AquaCrop. Os dados observados foram obtidos em parte de um experimento conduzido na área experimental da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR) no período de 2023, em delineamento fatorial 4 x 4, em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os 16 tratamentos consistiram de quatro cultivares e quatro lâminas de irrigação. No presente trabalho, em função da escassez de recursos e de pessoal, a coleta e a análise de dados foram limitadas a três repetições nos tratamentos com as cultivares TMG 44 B2RF e BASF – FM 944GL e as lâminas de irrigação correspondentes a 50% e 100% da evapotranspiração da cultura (ET_c), aplicadas por sistema de aspersão. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico. Os resultados simulados com o AquaCrop para o armazenamento de água no solo e para a cobertura foliar e produtividade, durante parte do ciclo no ano de 2023, foram semelhantes aos encontrados na literatura. O modelo apresentou uma subestimação nas lâminas de 50% da ET_c para o armazenamento de água no solo, demonstrando nos parâmetros estatísticos um coeficiente de concordância de Willmott (d) de 0,60, coeficiente de determinação (R²) de 0,47 e coeficiente de Willmott (c) de 0,4. Para a produtividade, cobertura de dossel e a relação entre cobertura de dossel e índice de área foliar, o modelo apresentou excelentes dados de simulação, com parâmetros estatísticos (d, R², c) alcançando valores acima de 0,85. Isso demonstra que a calibração do modelo pode ser uma ferramenta viável na agricultura para o algodoeiro cultivado no Mato Grosso.

Palavras-chave: Modelo agrometeorológico, evapotranspiração, disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

Cotton (*Gossypium* L.) is an agricultural species of great economic importance in Brazil, whose demand for technologies that enhance productivity, combined with sustainability, has become increasingly necessary. After the proper evaluations, productivity simulation models, such as AquaCrop, allow estimating the crop response as a function of water availability in the soil and its impact on cotton productivity, through simulations. The objective of the present study was to evaluate soil water storage, cotton yield and canopy cover through modeling and simulation in the AquaCrop software. The observed data were obtained in part from an experiment conducted in the experimental area of the Federal University of Rondonópolis (UFR) in 2023, in a 4 x 4 factorial design, in randomized blocks, with four replications. The 16 treatments consisted of four cultivars and four irrigation depths. In the present study, due to the scarcity of resources and personnel, data collection and analysis were limited to three replications in the treatments with the cultivars TMG 44 B2RF and BASF – FM 944GL and the irrigation depths corresponding to 50% and 100% of the crop evapotranspiration (ET_c), applied by sprinkler system. The soil of the experimental area was classified as a dystrophic Red Latosol. The results simulated with AquaCrop for soil water storage and leaf cover and yield, during part of the cycle in 2023, were similar to those found in the literature. The model showed an underestimation of 50% of the ET_c for soil water storage, demonstrating in the statistical parameters a Willmott coefficient of agreement (d) of 0.60, coefficient of determination (R²) of 0.47 and Willmott coefficient (c) of 0.4. For yield, canopy cover and the relationship between canopy cover and leaf area index, the model presented excellent simulation data, with statistical parameters (d, R², c) reaching values above 0.85. This demonstrates that model calibration can be a viable tool in agriculture for cotton grown in Mato Grosso.

Keywords: Agrometeorological model, evapotranspiration, water availability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	Dinâmica da água no solo	12
2.2	Armazenamento de água no solo	13
2.3	Evolução do ciclo do algodoeiro e princípios utilizados na relação entre algodão e água no solo	13
2.4	Programas de simulação com o efeito da água disponível no solo.....	14
2.5	Modelo AquaCrop e simulação na cultura do algodão	15
3	METODOLOGIA	17
3.1	Local da área de estudo.....	17
3.1	Controle de pragas a doenças.....	19
3.2	Correção de solo e adubação	19
3.3	Determinação da evapotranspiração da cultura	19
3.4	Obtenção de umidade do solo pelo método padrão da estufa.....	21
3.5	Área foliar	23
3.6	Cobertura de Dossel.....	25
3.7	Condutividade hidráulica do solo	26
3.8	Textura do solo	28
3.9	Capacidade de campo	29
3.10	Ponto de murcha permanente.....	30
3.11	Índice de colheita	31
3.12	Calibração do modelo no software AquaCrop.....	32
3.13	Estatística	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Armazenamento de água no solo	37
4.2	Cobertura de dossel.....	41
4.3	Produtividade	45
4.4	Relações entre a cobertura do dossel e o índice de área foliar.....	49
5	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Area experimental da Universidade Federal de Rondonópolis (Google Earth).	17
Figura 2. Croqui do Experimento do Algodão.	18
Figura 3. Coleta de solo (A). Trado para coleta de solo em diferentes profundidades (B). ...	21
Figura 4. Medição área foliar comprimento e largura.	23
Figura 5. Exemplo de medição na folha do algodoeiro	24
Figura 6. Aplicativo Canopeo. Dados após análise de dossel e pastas com parcelas analisadas.	25
Figura 7. Trincheira e anéis volumétricos utilizados para coleta de amostras para determinação da condutividade hidráulica saturada do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024.....	26
Figura 8. Permeâmetro de carga constante para determinação condutividade hidráulica saturada do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024.	27
Figura 9. Provetas e densímetro utilizados para determinação da análise granulométrica do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024.	28
Figura 10. Mesa de tensão utilizada para determinação do teor de umidade em amostras submetidas às sucções de 1; 6 e 10 kPa, do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024.	29
Figura 11. Aparelho extrator de Richard utilizado para determinar o ponto de murcha permanente do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024.	30
Figura 12. Pesagem massa fresca, separação pluma e caro Pesagem da massa fresca de folhas e ramos, e separação de pluma e caroço de plantas de algodão cultivadas na área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024..	31
Figura 13. Tela inicial do Aplicativo AquaCrop. Fonte: Acervo do software	32
Figura 18. Cobertura de dossel, medida a campo e simulada pelo AquaCrop, na cultura do algodão, cultivar FM944 GL, na área experimental da UFR, em Rondonópolis em 2023, com lâmina de irrigação de 50% e 100% da ETc. representados da seguinte forma, lâmina de 100% Bloco 1 (A), Bloco 2 (B), Bloco 3 (C). Lâmina de 50% Bloco 1 (D), Bloco 2 (E), Bloco 3 (F).	42

Figura 22. Produtividade do algodoeiro, medida a campo e simulada, da cultivar TMG 44 B2RF lâminas de 100 e 50% da ETc.	46
Figura 23. Produtividade do algodoeiro, medida a campo e simulada, das cultivares FM944 GL lâminas de 100 e 50% da ETc.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficiente de cultivo (kc) para o algodoeiro	20
Tabela 2. Parâmetros da evolução da Cobertura Foliar (CC), medidos nas cultivares FM 944 e TMG 44, de algodoeiro cultivado na área experimental da UFR, que receberam lâminas de irrigação de 50 e 100% da ETc, respectivamente, em um Latossolo Vermelho, distrófico, no período de maio outubro de 2023.....	33
Tabela 3. Parâmetros hidráulicos do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024.....	34

1 INTRODUÇÃO

O algodão se destaca como a terceira cultura mais importante para a agricultura brasileira em termos de produtividade, sendo superado apenas pela soja e pelo milho, respectivamente. Segundo o indicador Cepea/Esalq, em 2024, o Brasil assumiu a liderança mundial na exportação de algodão em pluma, superando, inclusive, os Estados Unidos, que mantinham essa posição desde 1994. O estado de Mato Grosso destaca-se como o principal produtor nacional de algodão. Na região do Cerrado, o cultivo do algodoeiro tem proporcionado uma segunda safra, na qual a semeadura é realizada logo após a colheita da soja, entre janeiro e março (Baio *et al.*, 2020).

Após uma etapa inicial exclusivamente vegetativa, que depende do material genético e da temperatura do ar, a planta inicia a floração, que é do tipo indeterminado. No início do período de floração, a planta apresenta uma elevada demanda hídrica, mas é preciso considerar que o excesso de água pode reduzir a produtividade e a qualidade do produto (Embrapa, 2000, 2017). A resposta do algodoeiro à necessidade de água é caracterizada por uma mudança na prioridade de crescimento. Quando submetida ao estresse hídrico, a planta tende a redirecionar recursos para o desenvolvimento do sistema radicular (Zonta *et al.*, 2015).

Em condições de déficit hídrico, a produção dos capulhos ocorre de forma precoce e em menor quantidade. Esse fenômeno é uma estratégia de sobrevivência da planta, permitindo a reprodução antes que a necessidade hídrica se torne mais severa e comprometa totalmente seu ciclo de vida. Dessa forma, o grau de disponibilidade hídrica para o algodoeiro é um fator fundamental para que a planta alcance uma produtividade adequada ao final do ciclo da cultura (Makamov, 2022).

O uso de modelos de simulação tem sido amplamente empregado na previsão do desempenho de culturas agrícolas. Com a inserção de determinadas informações ao longo do ciclo, tais como parâmetros de clima, solo, cultura, irrigação e condições iniciais de umidade do solo, um programa computacional é capaz de estimar a evolução da cultura. Isso auxilia o agricultor na tomada de decisões em campo, tornando o manejo agrícola mais eficiente (Aziz, 2022; Jim, 2018).

O objetivo do presente estudo foi avaliar a disponibilidade hídrica, a produtividade, a cobertura de dossel e o índice de área foliar do algodoeiro, medidos a campo, com os dados de simulação do AquaCrop, visando à calibração do modelo e demonstrando ser uma ferramenta viável na agricultura para o algodoeiro cultivado no Mato Grosso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica da água no solo

A água movimenta-se no sistema solo-planta em consequência de diferenças de seu potencial total, deslocando-se de regiões de maior para menor potencial hídrico. Os solos agrícolas desempenham um papel fundamental como reservatórios de água, ar, calor e nutrientes, elementos essenciais para a germinação das sementes e o desenvolvimento das plantas. Esse armazenamento é crucial para a manutenção de um sistema radicular saudável, contribuindo para o ciclo completo de crescimento das plantas e promovendo a máxima eficiência produtiva (Letey, 1985).

A umidade do solo constitui um parâmetro essencial para o balanço hídrico, sendo determinante na definição do período ideal para a realização de práticas agrícolas, como irrigação, semeadura e preparo do solo. Os níveis de umidade variam em função de fatores como precipitação, irrigação, evaporação e transpiração. A compreensão desses processos é fundamental para elucidar a dinâmica hídrica no solo, permitindo uma gestão eficiente dos recursos hídricos no contexto agrícola (Ramos, 2014).

A dinâmica da água no solo pode ser analisada por meio de parâmetros como a umidade em base de massa, a umidade em base de volume e o armazenamento de água no solo. Esses parâmetros são determinados por equações específicas, possibilitando a quantificação precisa da quantidade de água presente no perfil do solo, aspecto fundamental para o manejo eficiente dos recursos hídricos na agricultura (Gonçalves, 2006).

Um parâmetro essencial na dinâmica da água no solo, que deve ser analisado tanto em campo quanto em laboratório, é a capacidade de campo. Esse conceito refere-se ao teor de água no solo previamente saturado, depois da drenagem do excesso de água. Especificamente, a capacidade de campo é definida como a quantidade máxima de água que o solo consegue reter contra a ação da gravidade após ter sido completamente saturado. Solos com maior teor de argila apresentam uma capacidade de campo mais elevada, enquanto solos arenosos possuem uma capacidade de campo inferior (Taiz, 2006).

A taxa de fluxo de água nos solos depende de dois fatores: a condutividade hidráulica e o tamanho do gradiente de potencial total da água no solo. A condutividade hidráulica é definida como a facilidade com que a água se move pelo solo e varia de acordo com o teor de água e o tipo de solo. Solos argilosos, por possuírem menores espaços entre as partículas, apresentam

condutividade hidráulica reduzida, enquanto solos arenosos, que possuem maiores espaços entre as partículas, apresentam alta condutividade hidráulica (Taiz, 2006).

Na análise da dinâmica da água no solo, observa-se que, à medida que ocorre a secagem do solo, mais reduzido se torna o seu potencial hídrico, podendo alcançar valores inferiores àqueles correspondentes à umidade retida com 1.500 kPa de tensão, ponto de murcha permanente. Esse limite é alcançado quando o potencial hídrico do solo se reduz a níveis que impedem a planta de restaurar a pressão de turgor, mesmo na ausência total de transpiração. Nesse estado, o potencial hídrico do solo (ψ_w) torna-se igual ou inferior ao potencial osmótico (ψ_s) da planta. Ressalta-se que o ponto de murcha permanente não é exclusivamente uma propriedade do solo, pois também depende das características fisiológicas da planta (Taiz, 2006).

2.2 Armazenamento de água no solo

O armazenamento de água no solo resulta de diversos processos, sendo os principais: escoamento, percolação, infiltração e evapotranspiração. O conteúdo de água no solo tem sido amplamente estudado nos últimos anos devido à sua complexidade, uma vez que apresenta variações espaciais e temporais no campo (Petroni, 2004).

As propriedades hidráulicas do solo, principalmente a macroporosidade e a microporosidade, influenciam a recarga de águas subterrâneas, o transporte de solutos, a disponibilidade de água para as plantas, as atividades microbianas e o fluxo de gases no solo (Jayarathne, 2021).

2.3 Evolução do ciclo do algodoeiro e princípios utilizados na relação entre algodão e água no solo

O crescimento do algodoeiro é diretamente influenciado por fatores ambientais, que impactam seu desenvolvimento vegetativo. A irrigação desempenha um papel fundamental no crescimento e desenvolvimento dessa cultura, especialmente em regiões caracterizadas por períodos prolongados de estiagem. A demanda hídrica do algodoeiro é estimada com base nos processos de evapotranspiração (Beltrão *et al.*, 1997).

A evolução do desenvolvimento do algodoeiro é determinada, principalmente, pelas condições de semeadura, que promovem alterações na morfologia e fisiologia da planta. Essa cultura apresenta uma elevada exigência hídrica, porém demonstra extrema sensibilidade ao excesso de água em todas as fases do seu ciclo. A disponibilidade excessiva de água, desde a semeadura até o desenvolvimento pleno da planta, pode causar o abortamento das maçãs, resultando em redução significativa da produtividade (Fowler e Ray, 1977).

O ciclo do algodoeiro pode ser dividido em seis fases, tais como: emergência, vegetativa, botões florais, florescimento, abertura dos capulhos e colheita. Cada uma das fases do algodoeiro tem características específicas que influenciam diretamente na produtividade e na qualidade da fibra. A compreensão de cada fase do algodão é de fundamental importância para práticas agrícolas eficazes. Outros fatores que influenciam a qualidade da fibra são a temperatura, a disponibilidade hídrica, a radiação solar e os fatores físicos hídricos do solo (Costa *et al.*, 2008).

Pesquisadores que analisaram os parâmetros físicos e hídricos do solo concluíram que eles influenciam diretamente a fibra e a produção do caroço (Galbieri & Belot, 2016; Barbosa & Asmus, 2019), como a textura, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade. Por sua vez, a ausência dos atributos físicos do solo altera diretamente a absorção dos nutrientes (Haliloglu, 2019).

2.4 Programas de simulação com o efeito da água disponível no solo

Existem vários programas de simulação com efeito da água no solo. Um dos mais conhecidos é o simulador HYDRUS, que é um modelo numérico que simula o transporte de água no solo, baseado na equação de Richards, utilizado especificamente para analisar o fluxo de água em meios porosos não saturados (Simunek, 2012).

O DSSAT é um simulador de crescimento de culturas e balanço hídrico do solo, muito utilizado na avaliação de práticas agrícolas (Raes, 2009). O MOHID Land é um programa de simulação que elabora modelos hidrológicos realizando a simulação do balanço hídrico, o qual considera infiltração, evapotranspiração e escoamento, sendo muito aplicado em estudos que analisam impactos ambientais e gestão de bacia hidrográfica (Ferreira, 2010).

Outro programa de simulação de suma importância é o WEAP, utilizado para gestão integrada dos recursos hídricos, considerando a demanda ofertada de água para a cultura, proporcionando suporte no planejamento de irrigação e avaliação de mudanças climáticas

(Yates, 2005). Dentro dos modelos de simulação, o mais utilizado em estudos de produtividade e biomassa é o AquaCrop, que foi desenvolvido pela FAO, com foco na relação entre a produtividade de uma cultura e a disponibilidade de água no solo, sendo importante para estimar o rendimento agrícola em diferentes condições hídricas (Raes, 2009).

2.5 Modelo AquaCrop e simulação na cultura do algodão

Nas últimas décadas, diversos modelos computacionais, denominados modelos de agroecossistemas, foram desenvolvidos com o objetivo de simular processos fisiológicos específicos das culturas agrícolas, bem como o crescimento completo das plantas. Esses modelos fornecem dados simulados com base em diferentes condições, incluindo disponibilidade hídrica, aplicação de fertilizantes e práticas de manejo agrícola. A maioria desses modelos passa por processos rigorosos de avaliação e calibração, permitindo uma análise detalhada do crescimento das culturas e a estimativa do rendimento produtivo (Iqbal *et al.*, 2014).

Os modelos computacionais de crescimento de cultivos são ferramentas que simulam o desenvolvimento das plantas em diferentes condições, utilizando equações matemáticas de natureza empírica (CHIBARABAD, 2018) ou mecanicista (HUOT, 2020). Ao integrarem os fatores do sistema solo-água-planta-atmosfera, esses modelos auxiliam na definição de estratégias de manejo mais eficientes, permitindo otimizar a produtividade da água, determinar períodos ideais para semeadura ou plantio, além de orientar a escolha de cultivares e a aplicação adequada de fertilizantes (Lima Filho *et al.*, 2013).

No AquaCrop, existem dois tipos de parâmetros: os conservativos, que são aqueles considerados estáveis, independentemente das condições de cultivo, nos quais não há necessidade de alteração pelo usuário, e os parâmetros não conservativos, que devem ser medidos e inseridos no modelo pelo usuário, conforme as condições de manejo, local de cultivo e cultivar utilizada.

Em comparação com outros modelos de simulação, o AquaCrop se destaca por utilizar como principais parâmetros a irrigação e a precipitação, considerando o déficit hídrico e as propriedades do solo ao longo de diversos processos de crescimento. Entre esses processos estão a condutância estomática, o índice de colheita, a senescência do dossel e a expansão do dossel. Desde seu lançamento, em 2009, o modelo AquaCrop tem sido amplamente validado

por meio de estudos que investigam a caracterização e a resposta das culturas ao estresse hídrico, bem como seu potencial para aumentar a produtividade agrícola (COOREVITS, 2010).

Segundo estudos de Aziz, Ahmad Rizvi e Sultan (2022), o modelo de simulação AquaCrop apresentou bons resultados para a cobertura do dossel na cultura do algodão em todos os tratamentos de irrigação. No entanto, a lâmina de 50% apresentou subestimação. No mesmo estudo, observou-se que, em alguns casos, o AquaCrop subestimou a produtividade medida em campo devido ao estresse hídrico. De modo geral, para todos os tratamentos, o coeficiente de determinação entre a produtividade hídrica simulada e a observada foi de $r^2 = 0,943$, demonstrando que a previsão do modelo é coerente com os dados obtidos em campo.

Na realização da simulação, é necessário inserir dados no modelo, o que é importante para a organização no formato do modelo AquaCrop, sendo agrupados arquivos de cultura, solo, clima e irrigação, que são combinados em um arquivo final denominado projeto para a realização da simulação do modelo. Todos os dados lançados incluem as características da cultivar utilizada, tais como a profundidade da raiz (máximas e mínimas), a densidade de semeadura/plantio, os requerimentos térmicos (temperaturas basais inferior e superior), as datas dos estádios fenológicos (semeadura, floração, senescência e colheita), a cobertura do dossel, o índice de colheita e os coeficientes de estresse, que constituem variáveis fundamentais para a modelagem do crescimento e desenvolvimento das culturas. Adicionalmente, a simulação de processos agrícolas demanda a incorporação de dados climáticos (precipitação, temperatura, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa e concentração anual de CO_2), bem como parâmetros edáficos, incluindo umidade no ponto de murcha permanente, saturação, textura do solo e condutividade hidráulica saturada. O escoamento superficial é frequentemente estimado pelo método Número-Curva (CN), enquanto o manejo da irrigação é caracterizado pela lâmina aplicada e pelos períodos de aplicação (Conceição, 2022).

3 METODOLOGIA

3.1 Local da área de estudo

O experimento foi conduzido no período de maio a outubro de 2023 na área experimental pertencente à Universidade Federal de Rondonópolis, Mato Grosso, com coordenadas geográficas $16^{\circ}27'50,1''\text{S}$ e $54^{\circ}34'45,2''\text{W}$ a 227 m de altitude (SIRGAS 2000). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico.

A figura 1 representa o mapa de localização do local onde foi realizado o experimento.

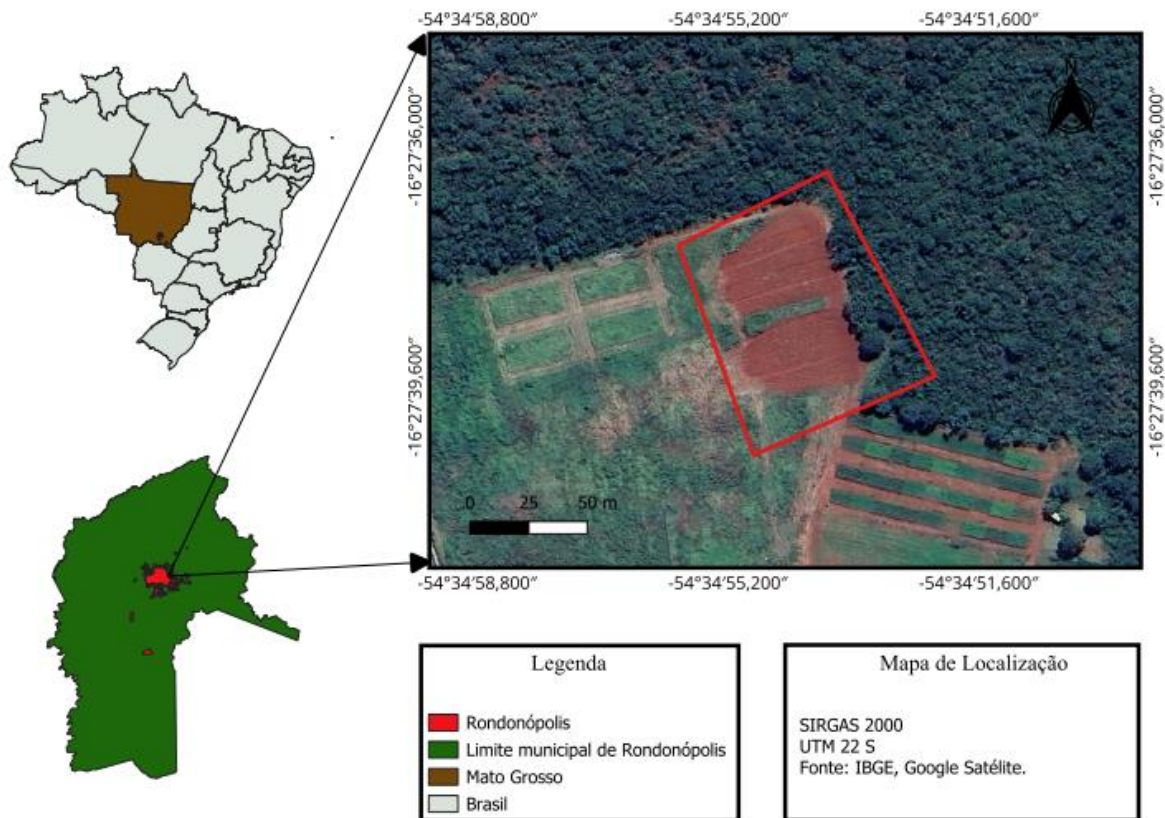


Figura 1. Área experimental da Universidade Federal de Rondonópolis (Google Earth).

Conforme a classificação climática de Köppen, a região onde se localiza a cidade de Rondonópolis possui duas estações bem definidas: a estiagem ocorre de maio a setembro, enquanto o período chuvoso se inicia em outubro. Dessa forma, o clima da região é classificado de cerrado, com uma pluviosidade média anual de 1.527 mm. O delineamento experimental foi

fatorial 4 x 4, em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os 16 tratamentos consistiram de quatro cultivares e quatro lâminas de irrigação.

No presente trabalho, em função da escassez de recursos e de pessoal, a coleta e a análise de dados foram limitadas a três repetições nos tratamentos com os cultivares TMG 44 B2RF e BASF – FM 944GL e as lâminas de irrigação correspondentes a 50% e 100% da evapotranspiração da cultura (ETc), aplicadas por sistema de aspersão, com cinco aspersores entre dois blocos. O espaçamento foi de 0,90 m entre fileiras e de 0,11 m entre plantas. Portanto, para fins de simulação e para viabilizar a realização do experimento, foram utilizadas apenas 12 parcelas experimentais. Nessas parcelas, foram avaliadas as cultivares TMG 44 B2RF e BASF – FM 944GL, sob lâminas de irrigação de 50% e 100% da ETc. A escolha dessas cultivares se deu por estarem entre as mais cultivadas na região. Já as lâminas de irrigação de 100% e 50% da ETc foram selecionadas por representarem, respectivamente, a exigência da cultura e o tratamento com menor condição de déficit hídrico.

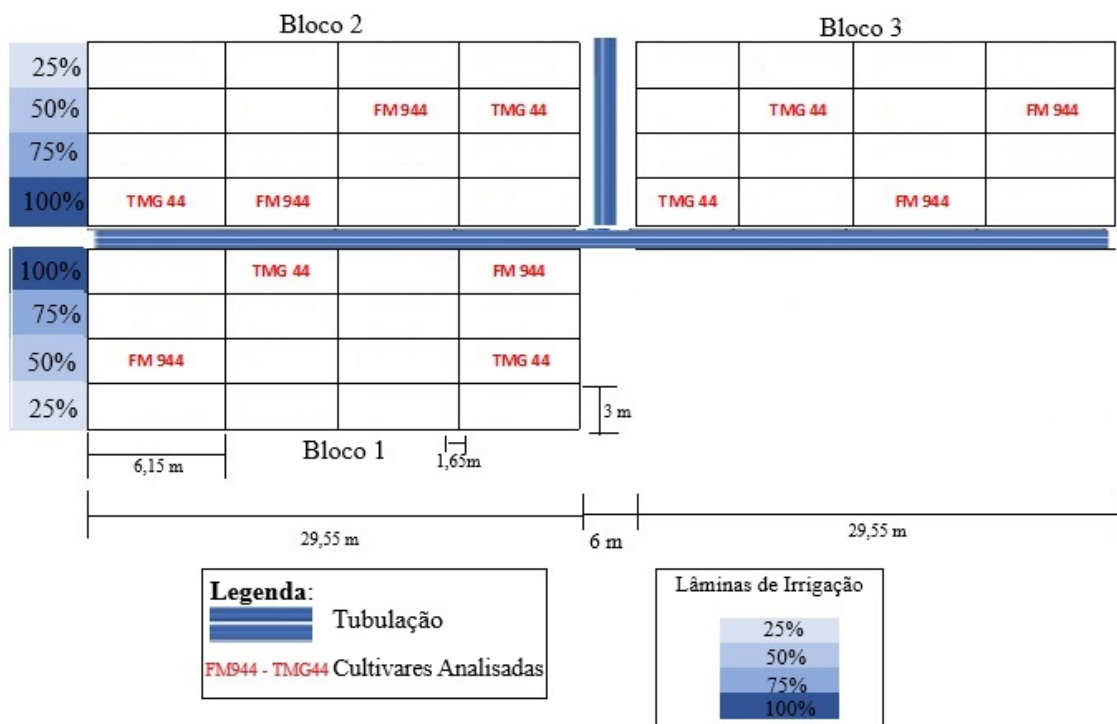


Figura 2. Croqui do Experimento do Algodão. Fonte: Acervo do Autor

3.1 Controle de pragas a doenças

O controle de pragas e doenças na área experimental do algodão foi realizado por meio da aplicação de inseticidas, acaricidas e fungicidas. Para o manejo de plantas daninhas, foram utilizados herbicidas à base de glifosato, aplicados conforme a emergência das plantas invasoras. Todas as aplicações foram conduzidas com o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e um pulverizador costal manual da marca Jacto, modelo PJ, com capacidade para 20 litros.

3.2 Correção de solo e adubação

A recomendação de adubação foi baseada no estudo de Lima Silva (2018), adotando-se a aplicação de 135 kg ha⁻¹ de fósforo e 140 kg ha⁻¹ de potássio, cujas fontes foram, respectivamente, o superfosfato simples (P₂O₅) e o cloreto de potássio (KCl). A adubação nitrogenada foi realizada posteriormente via fertirrigação, utilizando ureia como fonte de nitrogênio. Durante a semeadura, foram aplicados 25 kg ha⁻¹ de nitrogênio, enquanto a adubação em cobertura contou com a aplicação de 130 kg ha⁻¹.

3.3 Determinação da evapotranspiração da cultura

A irrigação foi realizada por meio do sistema *line source*, que opera por aspersão. A aplicação da água foi baseada na evapotranspiração máxima da cultura (ET_c), calculada como o produto da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo coeficiente de cultivo (K_c).

Para a determinação da ET_o, utilizou-se o método de Penman-Monteith, conforme a recomendação da FAO (Allen et al., 1998). Esse método é amplamente reconhecido por sua precisão e fundamenta-se na equação descrita a seguir:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma T + \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

ET_o = evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

Δ = gradiente da curva pressão de vapor vs. temperatura (kPa °C⁻¹);

Rn = saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹);

G = fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹);

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹);

U2 = velocidade do vento a 2 m (m s⁻¹);

es = pressão de saturação do vapor de água atmosférico (kPa);

ea = pressão atual do vapor de água atmosférico (kPa); e

T = temperatura média diária do ar (°C).

Os dados meteorológicos necessários para o cálculo foram obtidos a partir de uma estação agrometeorológica automática pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR). A estação está localizada a 260 metros da área experimental, garantindo a precisão dos dados utilizados no experimento.

Os valores do coeficiente de cultivo (kc) para as quatro fases de desenvolvimento do algodoeiro foram extraídos da Tabela 1 e aplicados uniformemente a todas as cultivares avaliadas no experimento. Esses valores seguem as recomendações do Boletim FAO 56 (Allen et al., 1998), que estabelece parâmetros padronizados para o manejo hídrico em culturas agrícolas, considerando as diferentes fases fenológicas da planta. O coeficiente de cultivo (kc) foi utilizado em quatro etapas: inicial, desenvolvimento, meia-estação e final, considerando constantes os valores de kc para as etapas inicial, meia-estação e final. A adoção de valores de kc constantes para o segundo e terceiro estádios seguiu o Boletim 24 da FAO, de Doorenbos e Pruitt (1975), e o Boletim 33 da FAO, de Doorenbos e Kassan (1979). Como base, foi sempre utilizada a data do plantio, que neste experimento ocorreu no dia 18 de maio de 2023, e a data de colheita, em 10 de outubro de 2023.

Tabela 1. Coeficiente de cultivo (kc) para o algodoeiro

Estágio de fenológico	Fase	kc
I	Inicial (0-25 dias)	0,45
II	Desenvolvimento (26-70 dias)	0,75
III	Desenvolvimento (71-120 dias)	1,15
IV	Maturação (121-colheita)	0,70

A irrigação foi ajustada de acordo como a eficiência do sistema de irrigação por aspersão, calculada com base na Evapotranspiração da cultura (Equação 2):

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad \text{Equação 2}$$

3.4 Obtenção de umidade do solo pelo método padrão da estufa

Para determinação da umidade do solo foram realizadas tradagens nas profundidades de 0-15cm; 15-30 cm; 30-45 cm; 45-60 cm; 60-75; 75-100 cm. As amostras foram coletadas com auxílio de trado tipo rosca devidamente demarcado conforme Figura 3.



Figura 3. Coleta de solo (A). Trado para coleta de solo em diferentes profundidades (B).
Fonte: Acervo do autor

As amostras de solo foram devidamente identificadas e encaminhadas ao laboratório de Agrometeorologia e Mecânica de Solo da Universidade Federal de Rondonópolis. Inicialmente, foram pesadas para a obtenção da massa úmida e, em seguida, levadas à estufa a 105 °C por 24

horas. Após esse período, foram novamente pesadas para a determinação da massa seca. A umidade na base de massa (Embrapa e Usda) foi calculada conforme a Equação 3.

$$\theta m = \frac{(MU-MS)}{MS} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

θm = Umidade a Base de Massa (%);

MU = Massa do Solo Úmido (g);

MS = Massa do Solo Seco (g).

As amostras de solo foram coletadas uma vez por semana durante todo o experimento, sempre às quintas-feiras, às 7:00 da manhã.

Para a determinação do armazenamento de água no solo, foi necessário calcular a umidade volumétrica (Embrapa e Usda), conforme a Equação 4.

$$\theta v = \theta m * \rho \text{ (do solo)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

θv = Umidade a base volumétrica (cm³/cm³);

θm = Umidade base de massa; (g/g)

ρ = densidade do solo (g/cm³).

O armazenamento de água no perfil do solo foi obtido conforme a Equação 5, ou regra do trapézio (Libardi, 2012):

$$hL = \int_0^L \theta(Z) dz \cong [0,5\theta(Z_0) + \sum_{i=1}^{n-1} \theta(Z_i) + 0,5\theta(Z_n)]\Delta Z \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

θ : Umidade volumétrica (cm³/cm³);

Z₀= Camada Inicial (cm);

Z_n= Camada final (cm);

Z_i= Última camada (cm);

ΔZ = Variação de profundidade (cm).

Os dados obtidos sobre o armazenamento de água no solo foram comparados com os dados simulados no software AquaCrop. No simulador, esse parâmetro é denominado WCtoc (Water Content in Total Soil Profile), que representa o conteúdo de água no perfil total do solo. De acordo com o manual do AquaCrop, trata-se do armazenamento de água no solo, sendo esses valores analisados e comparados com os dados medidos em campo.

3.5 Área foliar

A área foliar foi determinada pelo método indireto em campo, conforme ilustrado na Figura 4. Para isso, foi selecionada uma planta de algodão representativa dentro da parcela, da qual foram coletados os seguintes dados: altura da planta, número de folhas, estágio fenológico, além do comprimento e da largura de cada folha. A mensuração da área foliar foi realizada a cada 7 dias durante os primeiros 2 meses após o plantio e, posteriormente, a cada 15 dias, sempre no período da manhã.



Figura 4. Medição área foliar comprimento e largura. Fonte: Acervo do autor

A área foliar pelo método indireto (Embrapa, 2012) utiliza a equação 6 para a determinação.

$$AF: C \times L \times F \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

C = Comprimento (cm);

L = Largura (cm);

F = Fator de forma da folha.

E para calcular o IAF utilizou a seguinte formula, equação 7.

$$IAF: \frac{AF}{Area\ do\ Solo} \quad Equação\ 7$$

Para a obtenção do fator de forma da folha, foi realizado o plantio das cultivares de algodão TMG 44 B2RF e BASF – FM 944GL em casa de vegetação. A cada 15 dias, foram coletadas aproximadamente 20 folhas de cada cultivar, que foram levadas ao laboratório para a medição da área foliar, considerando seu comprimento e largura (Figura 5).

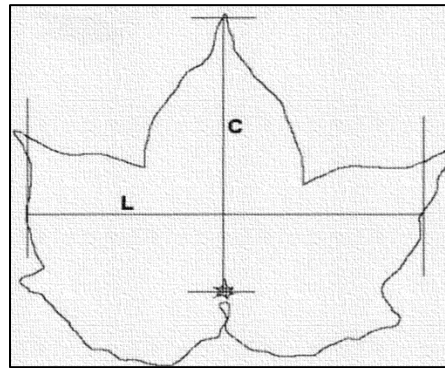


Figura 5. Exemplo de medição na folha do algodoeiro (Autor)

Em seguida, as mesmas folhas foram escaneadas no aparelho LI-COR, modelo 3100, que forneceu o valor real da área foliar. As medições de comprimento e largura representaram a área de um retângulo. Com os valores obtidos pelo aparelho e as medições realizadas manualmente, foi possível gerar a equação da reta e determinar um fator de correção, conhecido como fator de forma da folha. A equação da reta que determina o fator de forma é dada pela seguinte fórmula:

$$y=0.7567x+0.0004 \quad Equação\ 7$$

3.6 Cobertura de Dossel

A estimativa da Cobertura do Dossel (CC) foi obtida em campo com o auxílio do aplicativo Canopeo, disponível para download gratuito. O aplicativo fornece dados de CC a partir de fotos tiradas com o celular em uma linha de plantio representativa de cada parcela escolhida. As estimativas foram realizadas semanalmente, no período da manhã, a partir do primeiro mês do experimento.

As fotos foram capturadas em uma linha de plantio representativa e armazenadas na galeria do celular, sendo posteriormente processadas pelo aplicativo, que fornecia a porcentagem de cobertura do dossel de cada parcela individualmente (Figura 6).

Para calcular a cobertura do dossel, o Canopeo utilizava algoritmos que diferenciavam o solo da vegetação. Esse processo identificava os ramos vegetativos em atividade fotossintética, destacando a cor verde correspondente às folhas do dossel do algodoeiro.

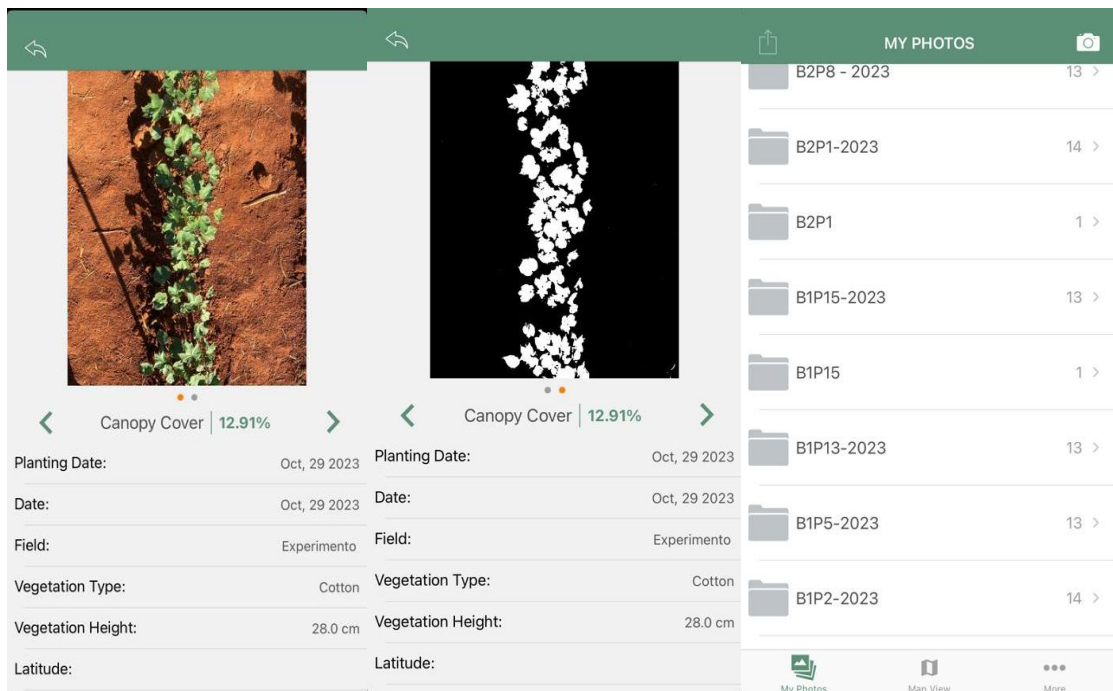


Figura 6. Aplicativo Canopeo. Dados após análise de dossel e pastas com parcelas analisadas. Fonte: Acervo do autor.

3.7 Condutividade hidráulica do solo

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, foram coletadas três amostras indeformadas de solo em duas trincheiras na área plantada com algodão. As amostras foram obtidas nas seguintes profundidades: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm, 50-60 cm, 60-70 cm, 70-80 cm, 80-90 cm e 90-100 cm (Figura 7).



Figura 7. Trincheira e anéis volumétricos utilizados para coleta de amostras para determinação da condutividade hidráulica saturada do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024. Fonte: Acervo do autor

Essas amostras de solo, foram levadas para o laboratório, saturadas e colocadas no aparelho conhecido como permeâmetro de carga constante para medir a condutividade hidráulica do solo, conforme a Figura 8.



Figura 8. Permeômetro de carga constante para determinação condutividade hidráulica saturada do solo da área experimental da UFR (Latossolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024. Fonte: Acervo do autor

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado a vazão de água foi estimada no permeômetro de carga constante, em intervalo de 20 minutos, de acordo com a seguinte equação 7:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Q = Vazão, ($\text{cm}^3 \text{ min}^{-1}$);

V = Volume de água, em (cm^3);

T = Tempo, (minutos).

A condutividade hidráulica foi calcula pela equação 8 de Darcy:

$$K = Q * \frac{L}{A * h} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

Q = Vazão, em ($\text{cm}^3 \text{ min}^{-1}$);

K = Condutividade hidráulica, em (cm/min);

A = Área transversal do solo, em (cm^2);

h = Carga total dissipada ao longo do movimento da água, em (cm);

L = Altura do cilindro de, em (cm).

3.8 Textura do solo

Para determinar a textura do solo, utilizou-se a norma ABNT NBR 7181, de dezembro de 1984, referente à análise granulométrica do solo. Inicialmente, preparou-se uma solução contendo 45,7 g de hexametáfosfato de sódio dissolvidos em 1000 mL de água destilada. Em seguida, 125 mL dessa solução foram adicionados a 100 g de solo, permanecendo em repouso por 12 horas. Após esse período, a amostra foi colocada em um agitador com água destilada por 15 minutos.

A mistura resultante foi transferida para uma proveta de 1000 mL, onde foram realizadas agitações manuais por 1 minuto. As medições ocorreram nos tempos de 4, 8, 15 e 30 minutos, além de 1, 2, 4, 8 e 24 horas após o início da sedimentação, conforme ilustrado na Figura 9. Aproximadamente 15 a 20 segundos antes de cada intervalo programado, o densímetro foi inserido na solução para realizar as leituras.

As medições foram realizadas em duas repetições, nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm.



Figura 9. Provetas e densímetro utilizados para determinação da análise granulométrica do solo da área experimental da UFR (Latossolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024. Fonte: Acervo do autor

3.9 Capacidade de campo

Foram coletadas amostras de solo indeformadas, com volume de 50 cm³, em duas trincheiras. Essas amostras foram posteriormente preparadas em laboratório, saturadas e submetidas a diferentes pressões: 1, 6 e 10 kPa em mesa de tensão, e 33, 100, 300 e 500 kPa no aparelho extrator de Richard, conforme a metodologia de Klute (1986).

A Figura abaixo ilustra a mesa de tensão utilizada para a aplicação das pressões de 1, 6 e 10 kPa. Ressalta-se que a pressão de 10 kPa foi adotada para a determinação da capacidade de campo.



Figura 10. Mesa de tensão utilizada para determinação do teor de umidade em amostras submetidas às sucções de 1; 6 e 10 kPa, do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024. Fonte: Acervo do autor

Em cada uma das tensões aplicadas, após a estabilização da umidade sem perda adicional de água, as amostras de solo foram pesadas para determinação do peso úmido. A partir desses valores, foi calculada a umidade do solo, possibilitando a obtenção da curva de retenção

de água. Esses dados foram posteriormente inseridos no simulador AquaCrop para análise e modelagem do comportamento hídrico do solo.

3.10 Ponto de murcha permanente

De acordo com a metodologia de Klute (1986), amostras de solo deformado foram coletadas em duas trincheiras. O solo coletado foi utilizado para preencher anéis de borracha, os quais foram colocados na câmara de pressão de Richards e submetidos à pressão de 1.500 kPa, conforme ilustrado na Figura 11. Foram realizadas 3 repetições para cada uma das camadas de solo (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, 90-100 cm) nos dois perfis de solo das trincheiras.



Figura 11. Aparelho extrator de Richard utilizado para determinar o ponto de murcha permanente do solo da área experimental da UFR (Latosolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024. Fonte: Acervo do autor

Após as amostras de solo serem submetidas em diferentes pressões na câmara de Richard, as mesmas foram pesadas para obter o peso úmido, e posteriormente colocadas em estufa a 115 °C por 24 horas, e pesadas para obter o peso seco.

3.11 Índice de colheita

Para o índice de colheita, foram coletadas três plantas de cada uma das 12 parcelas com as cultivares TMG44 e FM944, utilizando lâminas de 100% e 50% da ETC. Em cada planta, os capulhos e as plumas foram colocados em sacos plásticos identificados, e o restante da parte aérea da planta foi retirado. As amostras foram levadas para o laboratório e devidamente identificadas. A massa fresca da parte aérea foi pesagem, e as amostras foram levadas à estufa a 65 °C por 96 horas para obter a massa seca. Todo o procedimento foi realizado em uma balança semi-analítica. Em seguida, a separação da pluma e do caroço foi realizada manualmente, e os componentes foram pesados separadamente (Figura 12).



Figura 12. Pesagem massa fresca, separação pluma e caroço. Pesagem da massa fresca de folhas e ramos, e separação de pluma e caroço de plantas de algodão cultivadas na área experimental da UFR (Latossolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024. Fonte: Acervo do autor

O índice de colheita foi obtido e é deduzido da proporção de acordo com a equação 9, que expressa a relação entre a massa seca de pluma mais caroço e a massa seca de biomassa total da planta. Esse índice indica, em termos de massa seca, a proporção da biomassa total que é colhida como rendimento econômico.

$$IC(\%) = \left(\frac{\text{Massa do algodão em caroço}}{\text{Massa seca parte aérea da planta}} \right) * 100 \quad \text{Equação 9}$$

3.12 Calibração do modelo no software AquaCrop

Para que o AquaCrop fosse calibrado, foi necessário inserir dados meteorológicos, de identificação e caracterização da cultura, de manejo (se de sequeiro ou irrigada, com as respectivas lâminas de irrigação), e de características físicas e propriedades hidráulicas do solo, conforme a Figura 13.

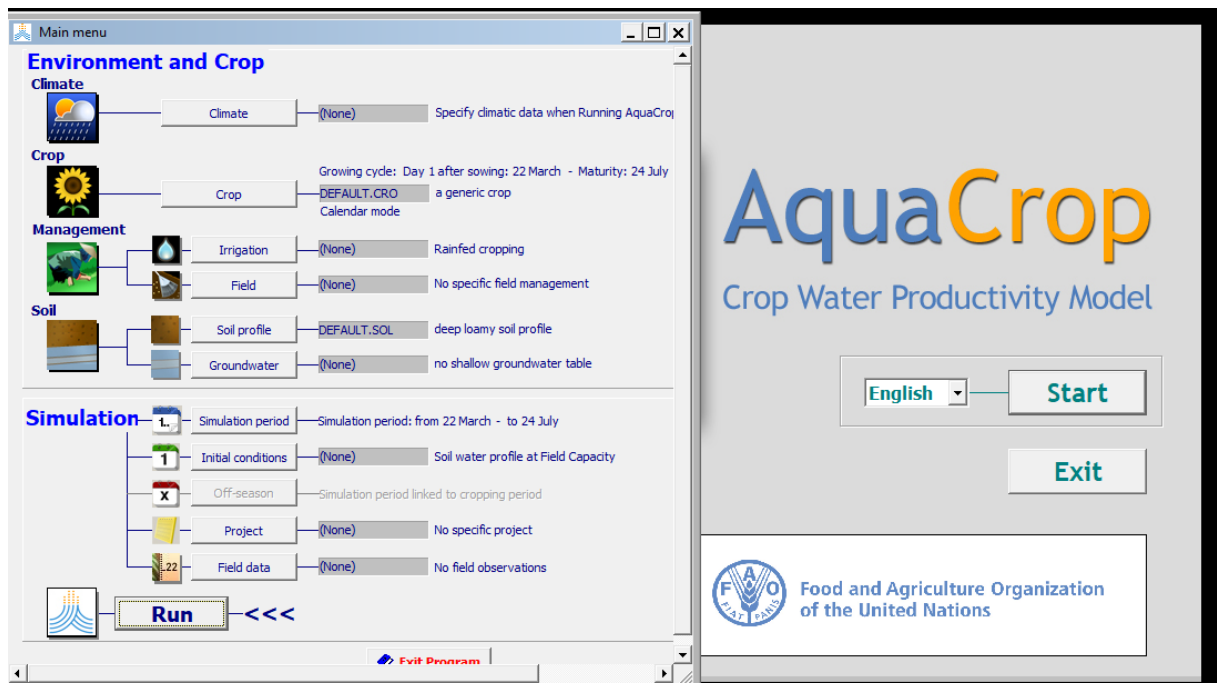


Figura 13. Tela inicial do Aplicativo AquaCrop. Fonte: Acervo do software

Os dados inseridos referem-se aos anos de 2023 e 2024. Os dados meteorológicos incluem valores diários de temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa média, velocidade do vento medida a 10 metros de altura, total de radiação solar global incidente e precipitação total diária. Esses dados foram obtidos na estação meteorológica da UFR. Os dados de manejo incluíram a existência ou não de irrigação e os valores das lâminas de água fornecidas. Já os dados da cultura abarcaram a identificação da planta, o espaçamento, os parâmetros de evolução da cobertura do dossel e o índice de colheita.

Os dados de solo empregados foram obtidos a partir da coleta de amostras em dez camadas, em duas trincheiras, consistindo em análises granulométricas, capacidade de campo,

ponto de murchamento permanente, condutividade hidráulica saturada e densidade. Os valores médios desses parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

Para a calibração e validação do modelo, foram inseridos todos os dados de solo, clima, planta e irrigação. Os dados de planta incluíram a cobertura de dossel, obtida em campo, conforme apresentado na Tabela 2, e o índice de colheita. Foram criados quatro arquivos de dados no software AquaCrop: TMG 44 B2RF e BASF – FM 944GL, com lâminas de irrigação de 50% e 100% para cada uma delas.

Para a calibração do modelo, foram adicionados os dados climáticos do período de plantio durante o ano de 2023, obtidos pela estação meteorológica da UFR. Esses dados foram tabelados e inseridos como arquivo no AquaCrop. Os dados de irrigação foram coletados durante cada aplicação e medidos em copos medidores, sendo registrados conforme as lâminas de 50% e 100% da ETc, e montados dois arquivos distintos no AquaCrop.

Quanto aos dados de solo, foram coletadas amostras a campo e realizadas análises laboratoriais para determinar a capacidade de campo, ponto de murchamento permanente, textura do solo e condutividade hidráulica do solo. Foi montado apenas um arquivo no AquaCrop, pois o solo é do mesmo tipo em todas as parcelas.

As simulações realizadas no AquaCrop foram executadas em arquivos separados, considerados diferentes “projetos”. A umidade inicial do solo e os arquivos de dados meteorológicos e de solo foram comuns a todos, mas com distinções entre as lâminas de irrigação e as cultivares.

Tabela 2. Parâmetros da evolução da Cobertura Foliar (CC), medidos nas cultivares FM 944 e TMG 44, de algodoeiro cultivado na área experimental da UFR, que receberam lâminas de irrigação de 50 e 100% da ETc, respectivamente, em um Latossolo Vermelho, distrófico, no período de maio outubro de 2023.

Tratamento	Cobertura inicial do dossel (%)	Dias até a emergência	Cobertura máxima do dossel (%)	Dias até máxima cobertura do dossel	Dias até a floração	Duração da floração
FM 944 50%	11,82	5	37	120	69	20
FM 944 100%	14,75	5	80	50	69	20
TMG 44 50%	09,13	5	47	118	69	20
TMG 44 100%	14,98	5	77	72	69	20

Tabela 3. Parâmetros hidráulicos do solo da área experimental da UFR (Latossolo Vermelho), em Rondonópolis cultivado com algodão, em 2023 e 2024.

Camada	Espessura (cm)	Textura	Densidade (kg/m ³)	Capacidade de campo (%)	Ponto de murcha permanente (%)	Condutividade hidráulica saturada (mm d ⁻¹)
0-10	10	Franco Argiloso	1300	36,9	14,1	2.275,6
10-20	10	Franco Argiloso	1360	36,8	17,1	575,8
20-30	10	Franco Argiloso	1290	29,3	12,5	4.184,4
30-40	10	Franco Argiloso	1240	28,5	14,0	1.575,7
40-100	60	Franco Argiloso	1210	30,4	13,6	3.691,3

3.13 Estatística

Ao analisar os dados obtidos em campo e os simulados no AquaCrop, foi realizada a validação dos dados utilizando índices estatísticos, como: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Índice de Confiança, Correlação de Pearson, Erro Percentual Absoluto Médio, Regressão Linear, Coeficiente de Determinação e Cohen.

Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE): Essa métrica estatística foi empregada para avaliar a dispersão dos resíduos entre os valores observados e aqueles estimados pelos métodos analisados (Alencar et al., 2011). A fórmula utilizada para o cálculo da RMSE é dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_o - Y_e)^2}{N}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

Y_o = representa os valores observados;

Y_e = representa os valores estimados;

N = número total de observações;

Índice de Confiança (c): Desenvolvido por Camargo e Sentelhas (1997), esse índice integra o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) para representar um indicador da eficiência dos métodos avaliados, sendo definido pela seguinte fórmula:

$$c = d * r \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

c = Representa o índice de confiança ou desempenho;

d = Índice de concordância, calculado previamente usando a equação que quantifica o grau de concordância entre valores observados e estimados;

r = Coeficiente de correlação, que mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis.

A Correlação de Pearson possibilita uma avaliação quantitativa e objetiva da relação entre variáveis, auxiliando em uma interpretação mais sólida e embasada dos resultados experimentais (Schneider, 1998). Sua fórmula é dada por:

$$r = \frac{\sum[(Y_e - \bar{Y}_e) \cdot (Y_o - \bar{Y}_o)]}{\sqrt{\sum(Y_e - \bar{Y}_e)^2 \cdot \sum(Y_o - \bar{Y}_o)^2}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

Y_e = valores esperados ou previstos;

Y_o = valores observados;

\bar{Y}_e = média dos valores da variável Y_e ;

\bar{Y}_o = média dos valores da variável Y_o .

A equação de Willmott, relatada como Índice de Concordância de Willmott (d), é uma métrica estatística, um indicador quantitativo empregado para aferir a acurácia de modelos preditivos por meio da comparação entre valores observacionais e aqueles gerados por simulação. Concebida por C.J. Willmott em 1981, esta métrica tem ampla aplicabilidade em investigações científicas nos domínios da modelagem ambiental, hidrológica e climática, sendo frequentemente utilizada para avaliar o desempenho de modelos matemáticos e computacionais na representação de fenômenos naturais.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Y_e - Y_o)^2}{\sum(|Y_e - \bar{Y}_o| + |Y_o - \bar{Y}_o|)^2} \right] \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

Y_e = valores esperados ou previstos;

Y_o = valores observados;

\overline{Ye} = média dos valores da variável Ye ;

$\overline{Y_o}$ = média dos valores da variável Y_o .

Equação de Regressão Linear e Coeficiente de Determinação (R^2): Os dados gerados pelos diferentes métodos foram analisados por meio de equações de regressão linear, com o coeficiente de determinação (R^2) sendo utilizado para medir a correlação entre os métodos. O R^2 foi empregado como um indicador da qualidade do ajuste entre os valores observados e aqueles estimados pelos métodos avaliados.

$$Y = a + bX \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

Y = variável dependente (resposta ou predição);

X = variável independente (preditor);

a = intercepto (valor de Y quando $X=0$);

b = coeficiente angular (declividade da reta, indicando a variação de Y para cada unidade de X).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Armazenamento de água no solo

As figuras 14 e 15 mostram o conteúdo de água armazenado ao longo do tempo nas cultivares FM 944GL e TMG 44 B2RF, com lâminas de 50% e 100% da ET_c, nas profundidades de 0-100 cm, demonstrando a quantidade de irrigação em cada lâmina ao longo de todo o ciclo, nos blocos 1, 2 e 3. Após 5 dias do plantio, foi realizada uma irrigação de 29 mm, importante para a germinação da semente, totalizando 35 irrigações durante todo o ciclo. Nesse período, foi realizada a coleta de solo para análise do armazenamento medido, totalizando 18 coletas.

É possível notar nos gráficos da Figura 14 o comportamento do armazenamento de água no solo ao longo dos 140 dias. A cultivar TMG 44 B2RF, nas lâminas de 50% da ET_c, apresentou visualmente maiores diferenças entre os dados medidos e simulados. Para as lâminas de 100% da ET_c, verifica-se visualmente que, no meio do ciclo, há uma tendência de sobrestimar o conteúdo de água no solo por parte do modelo, o que vai diminuindo com o passar dos dias, apresentando momentos de excelente acurácia em todas as épocas.

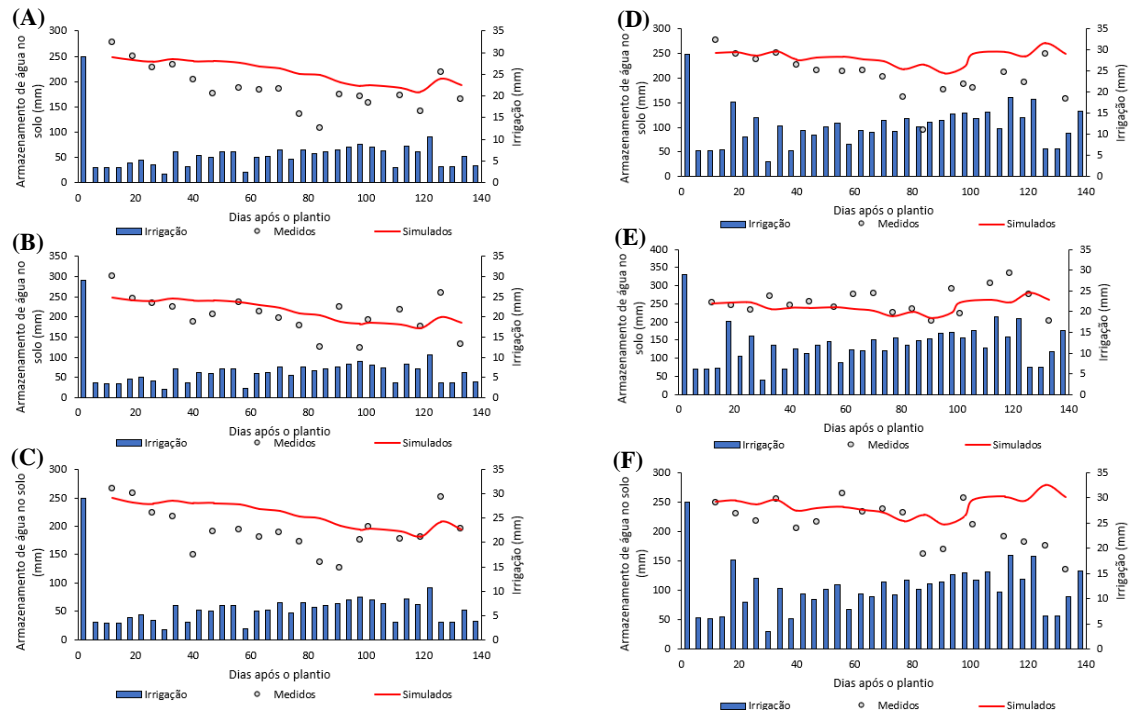


Figura 14. Armazenamento de água no solo, medida a campo e simulada pelo AquaCrop, na cultura do algodão, na área experimental da UFR, em Rondonópolis, cultivar TMG 44 B2RF, em 2023, com lâmina de irrigação de 50% 100 %da ETc., representados da seguinte forma, lâmina de 50% Bloco 1 (A), Bloco 2 (B), Bloco 3 (C). Lâmina de 100% Bloco 1 (D), Bloco 2 (E), Bloco 3 (F).

Verifica-se visualmente na Figura 15, para a cultivar FM 944GL nas lâminas de 50% e 100% da ETc, que, no meio do ciclo, o modelo apresenta uma tendência à superestimação do teor de água no solo. Contudo, essa discrepância reduz-se progressivamente ao longo dos dias, resultando em períodos de elevada precisão em todas as épocas. Conforme observado na Figura 16, através dos parâmetros estatísticos, é possível perceber pouca concordância no armazenamento de água no solo entre os dados medidos e simulados. Entretanto, os desvios identificados entre as simulações e os dados observados neste estudo também são mencionados por outros autores ao compararem valores simulados e observados de armazenamento de água no solo. Segundo Costa *et al.* (2021), por exemplo, relataram discrepâncias em suas simulações da cultura do feijão em Minas Gerais ao utilizarem o modelo.

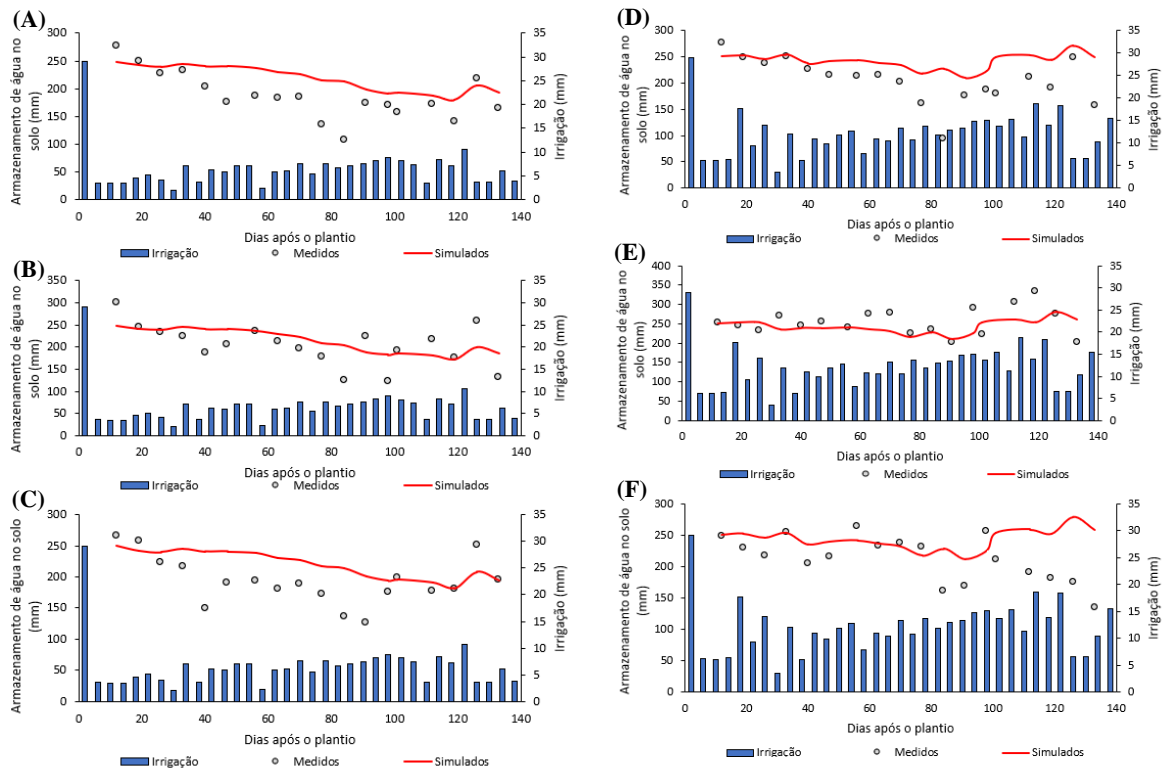


Figura 15. Armazenamento de água no solo, medida a campo e simulada pelo AquaCrop, na cultura do algodão, na área experimental da UFR, em Rondonópolis, cultivar FM944 GL, em 2023, com lâmina de irrigação de 50% 100 % da ETC., representados da seguinte forma, lâmina de 50% Bloco 1 (A), Bloco 2 (B), Bloco 3 (C). Lâmina de 100% Bloco 1 (D), Bloco 2 (E), Bloco 3 (F).

A Figura 16 apresenta a simulação do armazenamento de água no solo cultivado com algodoeiro, cultivar TMG 44, quando irrigado com as lâminas correspondentes a 50% e 100% da ETC. A simulação apresentou baixa concordância ($c = 0,40$) e coeficiente de determinação de 26,4% (Figura 16). Conceição (2022), realizando a calibração e testes do modelo AquaCrop para o feijão sob diferentes regimes de irrigação, verificou que o armazenamento de água no solo obteve coeficiente de determinação variando entre 0,38 e 0,68, dependendo da cultivar analisada.

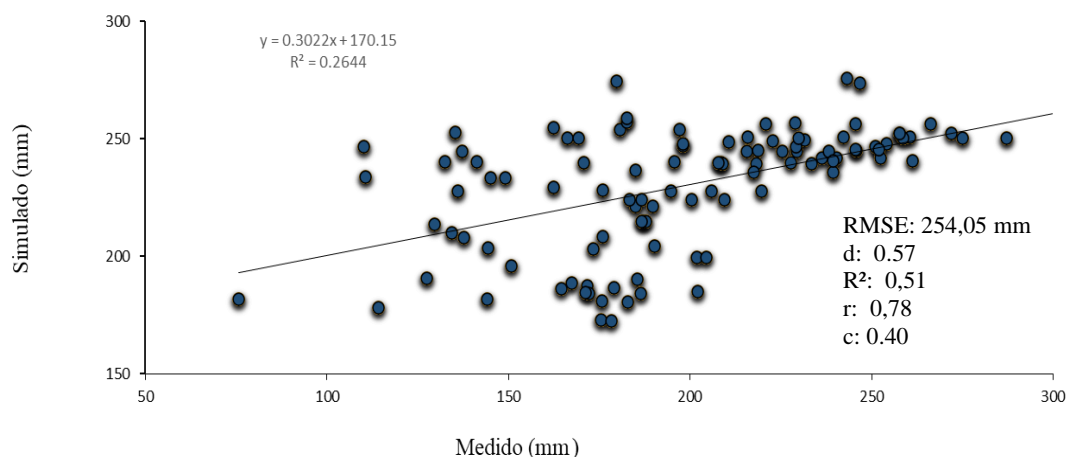


Figura 16. Armazenamento de água no solo para a cultura do algodão, medida a campo e simulada, da cultivar TMG 44 B2RF lâminas de 100 e 50% da ETc.

A Figura 17 apresenta o gráfico de correlação para a cultivar FM944GL sob os regimes de irrigação de 50% e 100% da ETc. A partir da análise do gráfico e da validação dos dados por meio de parâmetros estatísticos, verificou-se que o desempenho da simulação do armazenamento de água no solo resultou em um coeficiente de concordância de Willmott (d) de 0,60, coeficiente de determinação (R^2) de 0,47 e coeficiente de Willmott (c) de 0,41. Esses valores indicam uma baixa concordância entre os dados simulados e observados, evidenciando limitações na precisão do modelo para essas condições.

Conforme observado nas figuras 14 e 15, as cultivares com lâmina de irrigação de 50% da ETc apresentam visualmente maiores diferenças entre os dados medidos e simulados. Em estudos de Coorevits (2010), a parametrização do modelo AquaCrop para a cultura do feijão sob as condições climáticas da Bélgica observou que, em cenários de estresse, a acurácia das previsões do modelo é reduzida. Esse comportamento pode estar associado à influência do fator de estresse (K_s) na simulação dos processos fisiológicos da planta.

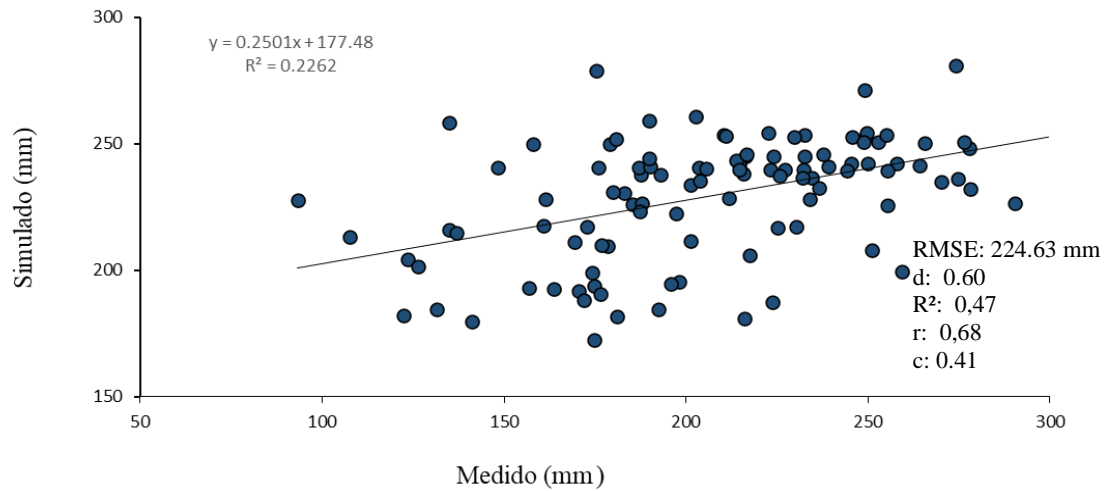


Figura 17. Armazenamento de água no solo para a cultura do algodão, medida a campo e simulada, da cultivar FM944 GL lâminas de 100 e 50% da ETc.

4.2 Cobertura de dossel

A Figura 18 representa os gráficos de cobertura de dossel (CC) da cultivar FM944GL sob lâmina de irrigação de 100% da ETc (esquerda) e de 50% da ETc (direita). A parametrização do modelo foi iniciada a partir da inserção dos dados de cobertura máxima do dossel, conforme descrito na Tabela 3. Esses dados foram inseridos e, ao analisar a simulação nos três blocos, observando os dados dos gráficos em cada bloco, é possível notar um comportamento similar entre os dados medidos e simulados da lâmina de 100% da ETc. No entanto, na lâmina de 50%, há uma diferença considerável. Essa diferença pode ser observada na validação dos dados no gráfico de correlação, na Figura 20.

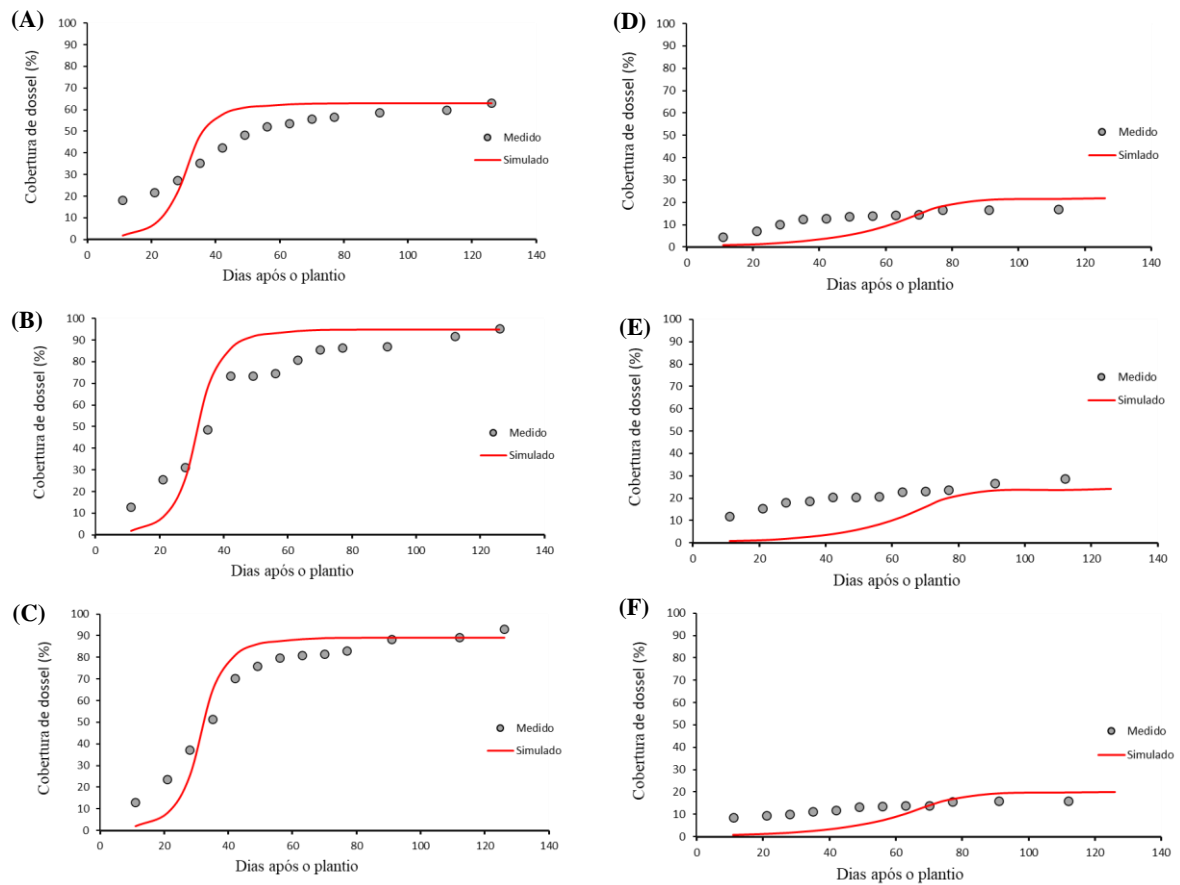


Figura 1814. Cobertura de dossel, medida a campo e simulada pelo AquaCrop, na cultura do algodão, cultivar FM944 GL, na área experimental da UFR, em Rondonópolis em 2023, com lâmina de irrigação de 50% e 100% da ETc. representados da seguinte forma, lâmina de 100% Bloco 1 (A), Bloco 2 (B), Bloco 3 (C). Lâmina de 50% Bloco 1 (D), Bloco 2 (E), Bloco 3 (F).

A Figura 19 apresenta os gráficos de cobertura do dossel (CC) da cultivar TMG 44 B2RF sob duas condições de irrigação: 100% da evapotranspiração da cultura (ETc) à esquerda e 50% da ETc à direita. A parametrização do modelo foi realizada a partir da inserção dos dados de cobertura máxima do dossel, conforme descrito na Tabela 3. Os dados foram inseridos e analisados por meio de simulações em três blocos experimentais. A análise dos gráficos de cada bloco indica uma correspondência significativa entre os dados observados e simulados para a lâmina de irrigação de 100% da ETc. No entanto, para a lâmina de 50% da ETc, observou-se uma discrepância considerável entre os valores medidos e simulados. Essa diferença pode ser visualizada na validação dos dados por meio do gráfico de correlação apresentado na Figura 21.

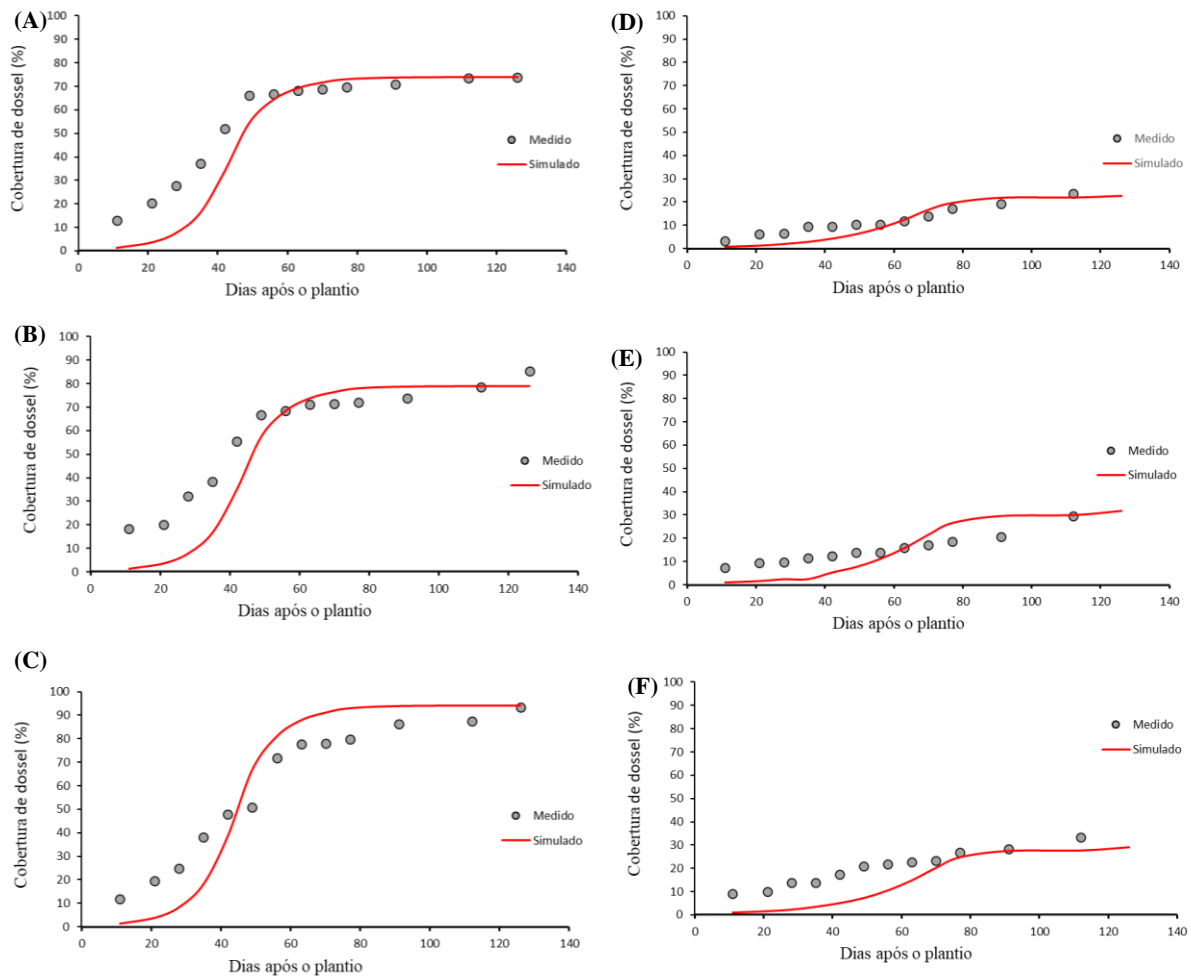


Figura 19. Cobertura de dossel, medida a campo e simulada pelo AquaCrop, na cultura do algodão, cultivar TMG 44 B2RF, na área experimental da UFR, em Rondonópolis em 2023, com lâmina de irrigação de 50% e 100% da ETC. representados da seguinte forma, lâmina de 100% Bloco 1 (A), Bloco 2 (B), Bloco 3 (C). Lâmina de 50% Bloco 1 (D), Bloco 2 (E), Bloco 3 (F).

A Figura 20 demonstra o gráfico de correlação da cultivar FM944GL sob duas condições de irrigação: 50% e 100% da evapotranspiração da cultura (ETc). A partir da análise do gráfico e da validação dos dados por meio de parâmetros estatísticos, verificou-se que o desempenho da simulação da cobertura de dossel apresentou $d = 0,95$, um coeficiente de determinação (R^2) de 0,94 e um coeficiente de concordância de Willmott (c) de 0,95. Esses valores indicam, com base na análise estatística, uma excelente concordância entre os dados simulados e observados. A cobertura de dossel medida e observada apresenta, na maioria das simulações, dados coerentes com os observados em campo. Em estudos avaliando a cobertura de dossel na calibração do modelo AquaCrop para a cana-de-açúcar nas regiões de Rio Largo

e Campos dos Goytacazes, observou-se um coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$ e $d = 0,99$, indicando uma elevada concordância entre os dados medidos e aqueles simulados pelo modelo, conforme observado por Alencar (2014).

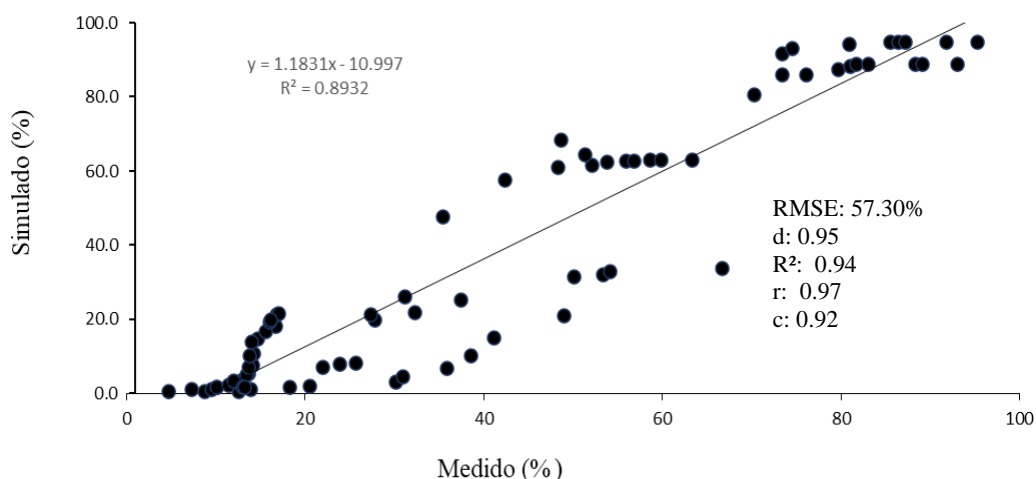


Figura 20. Cobertura do dossel para a cultura do algodão, medida a campo e simulada, da cultivar FM944 GL lâminas de 100 e 50% da ETc.

A Figura 21 apresenta o gráfico de correlação da cultivar TMG 44 B2RF sob duas condições de irrigação: 50% e 100% da evapotranspiração da cultura (ETc). A análise do gráfico, associada à validação estatística dos dados, revelou que a simulação da cobertura do dossel obteve um índice d de 0,95, um coeficiente de determinação (R^2) de 0,94 e um coeficiente de concordância de Willmott (c) de 0,92. Esses resultados indicam, com base na análise estatística, uma elevada concordância entre os valores simulados e observados, demonstrando a precisão do modelo na representação da variável estudada. Os dados medidos em campo e os dados simulados apresentam elevada concordância, principalmente pela análise ter sido feita de forma coerente. Dessa forma, é possível definir a época de floração e outros parâmetros para que a simulação seja eficiente.

Em estudos no Irã com a cultura do trigo, foi demonstrado que os dados simulados pelo AquaCrop ficaram próximos dos medidos até a fase de floração. Após esse período, houve uma queda drástica no crescimento do dossel. Esse acontecimento pode estar associado a erros na coleta dos dados ou até mesmo na diferenciação de variáveis, como a temperatura (Andarzin *et al.*, 2011).

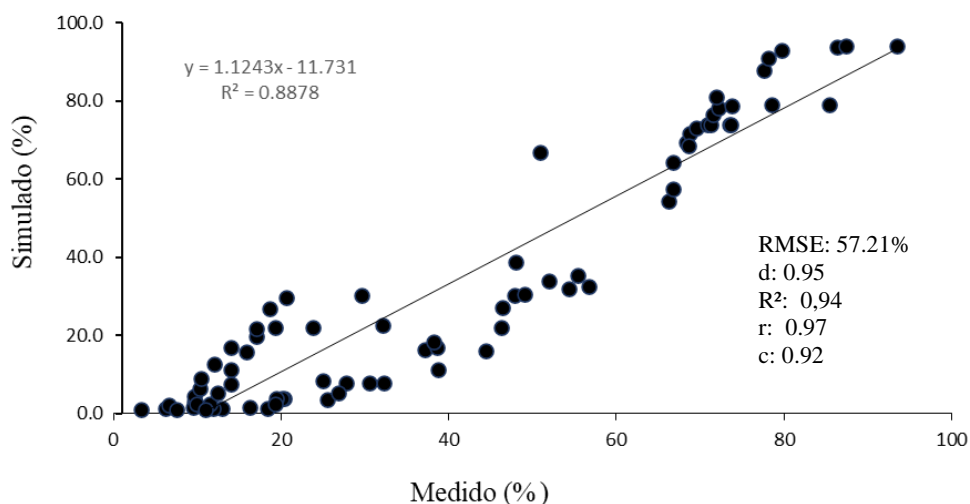


Figura 21. Cobertura do dossel para a cultura do algodão, medida a campo e simulada, da cultivar TMG 44 B2RF lâminas de 100 e 50% da ETc.

4.3 Produtividade

A produtividade da cultivar TMG 44 B2RF nas lâminas de 100% e 50% da evapotranspiração da cultura (ETc) e da cultivar FM944GL também nas lâminas de 100% e 50% da ETc foi analisada. Cada cultivar foi dividida em três blocos, com as duas lâminas de irrigação. A análise da produtividade simulada e medida tem demonstrado valores próximos, com validação estatística que comprova a coerência dos resultados. Segundo Sandhu e Irmak (2019), o AquaCrop pode ser aplicado na seleção de práticas de manejo adaptativo da cultura para melhorar o rendimento e a produtividade, pois fornece dados robustos e precisos.

A maior produtividade do algodão foi de 5,362 t ha⁻¹, simulada no Bloco 3 da cultivar TMG 44 B2RF com lâmina de 100%, e 6,32 t ha⁻¹ medida no Bloco 3 da mesma cultivar e lâmina (Figura 22). A menor produtividade foi de 1,78 t ha⁻¹, simulada no Bloco 1 da cultivar TMG 44 B2RF com lâmina de 50%, e 0,54 t ha⁻¹ medida no Bloco 1 da mesma cultivar e lâmina. A correlação entre os dados medidos a campo e os dados simulados pelo software AquaCrop foi realizada com três blocos e duas lâminas de irrigação.

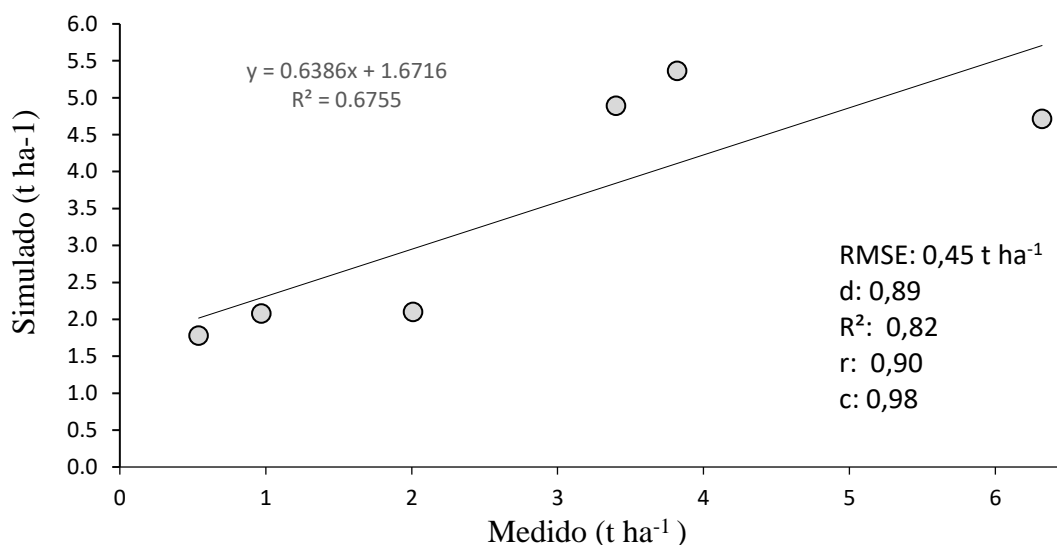


Figura 15. Produtividade do algodoeiro, medida a campo e simulada, da cultivar TMG 44 B2RF lâminas de 100 e 50% da ETc.

Com base na Figura 22, podemos observar que houve um comportamento linear crescente, demonstrando que os dados são válidos e representam uma similaridade. Segundo Vieira *et al.* (2020), foram realizados testes de simulação utilizando o modelo AquaCrop, demonstrando correlações significativas entre os dados medidos e simulados para a produtividade do feijão-caupi. Nesse estudo, a simulação de produtividade no ano de 2016 obteve uma variação de 684 a 1.596 kg ha⁻¹, enquanto os valores medidos variaram de 577 a 1.680 kg ha⁻¹. Para alguns autores, esses resultados são semelhantes, demonstrando que o modelo pode apresentar pequenos erros relativos de 5,3% e 6% para os tratamentos analisados durante a fase de validação.

Segundo Hussein *et al.* (2011), na simulação com o AquaCrop para previsão do crescimento do algodão e estimativa da produtividade da cultura sob déficit de irrigação, caso o modelo não seja adequadamente ajustado, os resultados podem não ser coerentes com os dados de campo. No entanto, o AquaCrop é o modelo que melhor simula a produtividade em condições de déficit hídrico.

Nos dados observados neste trabalho, foi possível verificar sua validação, em que a regressão linear obteve um valor de R² de 0,82, demonstrando a previsão do modelo. Valores mais próximos de 1 indicam que os dados simulados e medidos são coerentes e têm similaridade, enquanto valores mais próximos de 0 indicam que não há relação entre os dados medidos e simulados.

A Figura 24 mostra a correlação entre os dados medidos a campo e os dados simulados pelo software AquaCrop, utilizando dados de três blocos e duas lâminas de irrigação. O gráfico apresentou um comportamento com efeito linear crescente, demonstrando que os dados são válidos e representam uma similaridade. A maior produtividade do algodão foi de 6,126 t ha⁻¹, simulada no Bloco 2 da cultivar FM944 GL com lâmina de 100%, e 5,83 t ha⁻¹ medida no Bloco 3 com lâmina de 100%. A menor produtividade foi de 1,663 t ha⁻¹, simulada no Bloco 1 da cultivar FM944 GL com lâmina de 50%, e 1,04 t ha⁻¹ medida no Bloco 3 com lâmina de 50%. A irrigação demonstrou uma produtividade de 4 a 5 vezes maior do que a do algodão irrigado com déficit hídrico.

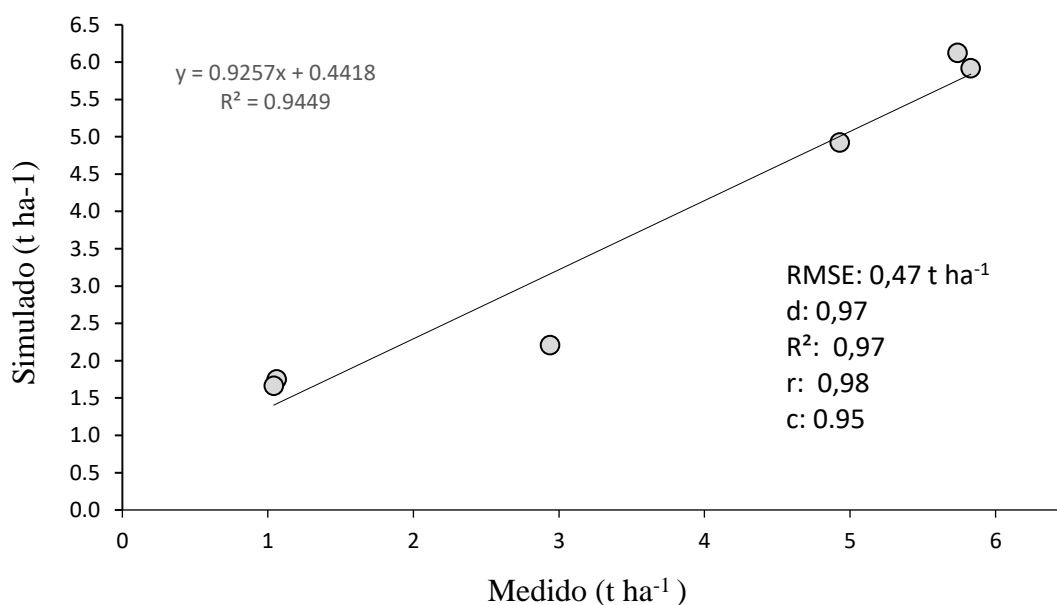


Figura 16. Produtividade do algodoeiro, medida a campo e simulada, das cultivares FM944 GL lâminas de 100 e 50% da ETc.

Os resultados apresentados na análise da correlação entre os dados medidos a campo e os dados simulados pelo AquaCrop para a produtividade indicam uma forte relação entre as duas variáveis, conforme demonstrado pelo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9449$). Esse valor sugere que o modelo foi capaz de capturar com alta precisão a variabilidade dos dados observados. Além disso, a inclinação da reta de regressão (0,9257) e o coeficiente linear positivo (0,4418) indicam que os valores simulados estão muito próximos dos valores medidos, apresentando apenas uma leve tendência de superestimação.

A elevada correlação observada pode ser atribuída a uma boa parametrização do modelo em relação à disponibilidade hídrica e à resposta fisiológica da cultura. O AquaCrop baseia-se

na relação entre a biomassa acumulada e a transpiração real da planta, utilizando a eficiência no uso da água como principal variável de controle (Raes *et al.*, 2009). O ajuste adequado desses coeficientes pode ter permitido uma representação precisa da produtividade.

Além disso, a homogeneidade das condições de solo e manejo pode ter favorecido uma resposta mais previsível do modelo. Estudos anteriores demonstraram que diferenças na capacidade de retenção de água no solo, na taxa de infiltração e na distribuição do sistema radicular podem influenciar diretamente a produtividade simulada pelo AquaCrop (Steduto *et al.*, 2012). No entanto, a alta correlação indica que esses fatores possivelmente tiveram um impacto reduzido no desempenho do modelo nesta análise.

Outro fator relevante é a baixa influência de eventos climáticos extremos nos dados analisados. O AquaCrop assume que a resposta da cultura à água segue padrões estabelecidos, mas não necessariamente captura efeitos de estresses intermitentes, como déficits hídricos curtos e intensos, ou o impacto de altas temperaturas na fotossíntese (Gavasso-Rita *et al.*, 2023). Dessa forma, a elevada precisão na previsão sugere que as condições climáticas durante o período analisado foram relativamente estáveis e bem representadas pelo modelo.

Ademais, a resposta varietal da cultura à disponibilidade hídrica pode ter sido bem caracterizada na parametrização do modelo. O AquaCrop permite a parametrização de coeficientes específicos para diferentes cultivares, e a boa correlação sugere que os valores utilizados para representar a variedade estudada estavam bem ajustados às condições de campo (Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2012).

Com isso, a eficiência da produção de algodão irrigado está associada à otimização da disponibilidade de água e nutrientes no solo, resultando em valores elevados de disponibilidade de água, armazenamento de água e aprimoramento das condições edáficas. Esse processo favorece o desenvolvimento do dossel vegetal, promovendo um aumento significativo na produtividade da cultura. A partir disso, a simulação pelo AquaCrop da produtividade do algodão apresentou uma grande similaridade com os dados de campo. Modelos de simulação demonstram contribuições significativas para a agricultura, sendo utilizados para monitorar e capturar informações, além de explorar dados provenientes de experimentos de campo, especialmente os relacionados à produtividade. Com a obtenção de diferentes lâminas de irrigação, esses modelos têm sido empregados para gerenciar o potencial de rendimento limitado pela disponibilidade de água (Kostková, 2021).

4.4 Relações entre a cobertura do dossel e o índice de área foliar

A Figura 24 demonstra o gráfico de correlação entre o índice de área foliar e a cobertura de dossel da cultivar FM 944, sob lâmina de 50% da ETc. Os dados obtidos da cobertura de dossel e do índice de área foliar são a média dos três blocos analisados. A análise do gráfico, associada à validação estatística dos dados, revelou que o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,81$) indica que 81% da variabilidade dos dados observados é explicada pelo modelo. O coeficiente de correlação ($r = 0,89$) representa uma forte relação linear entre os valores de CC e IAF, confirmando que a relação apresenta um bom ajuste. A relação entre CC e IAF pode ser dada por várias equações, sendo que Hsiao *et al.* (2009) previu um valor de CC de 94,5%, enquanto outros estudos preveem, para os mesmos dados, um valor de CC de 75,5%. Isso demonstra que, para encontrar a melhor equação que se ajusta aos dados, será necessário realizar vários testes.

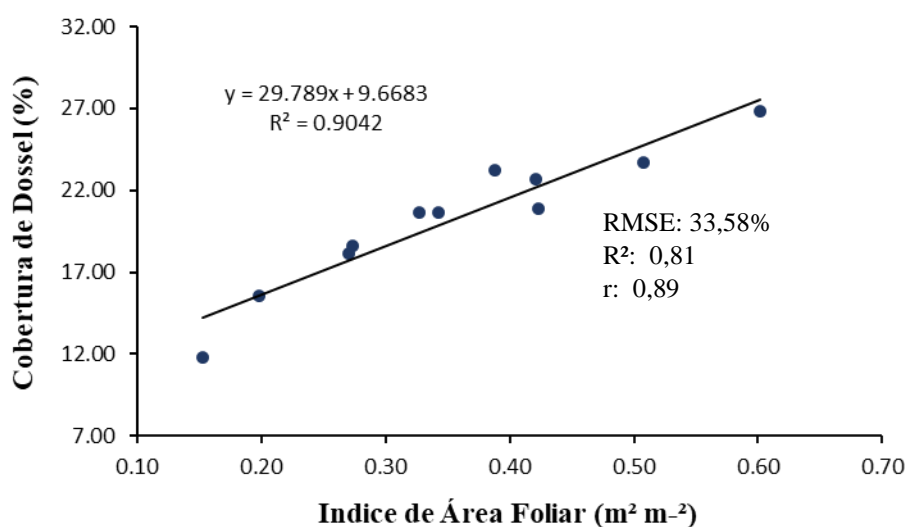


Figura 24. Relação entre índice de área foliar (IAF) e cobertura do dossel (CC) para a cultura do algodão irrigado no ano de 2013, para a cultivar FM944 GL com 50% da ETc.

A Figura 25 é o gráfico de correlação da cultivar TMG 44 B2RF sob lâmina de 50%, que apresentou tendência linear crescente. A interpretação do gráfico, em conjunto com a validação estatística dos dados, demonstrou que o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,81$) indica que 81% da variabilidade presente nos dados observados pode ser explicada pelo modelo

adotado. Além disso, o coeficiente de correlação ($r = 0,90$) evidencia uma relação linear expressiva entre os valores de CC e IAF, sugerindo um ajuste adequado entre as variáveis analisadas. Em seus estudos, Hsiao et al. (2009) ajustou bem os dados de CC e LAI para o milho, para todos os três anos analisados, obtendo $R^2 = 0,97$.

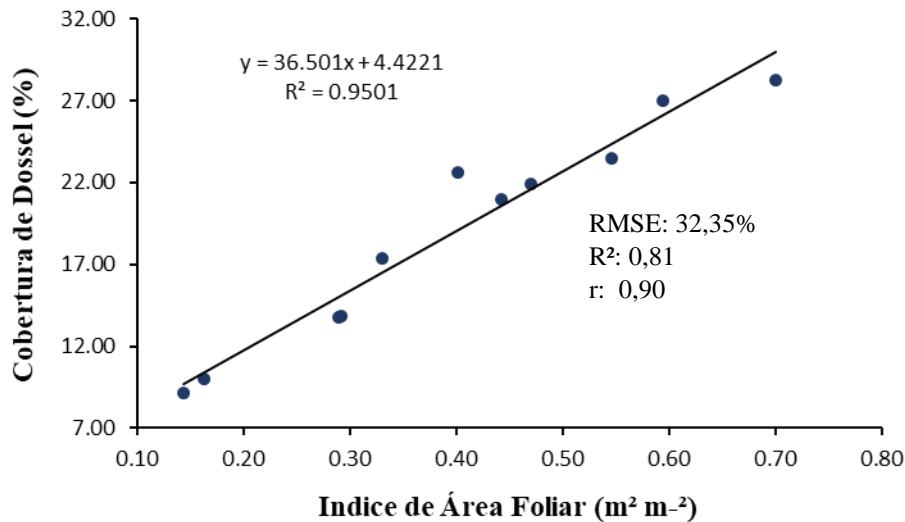


Figura 25. Relação entre índice de área foliar (IAF) e cobertura do dossel (CC) para a cultura do algodão irrigado no ano de 2013, para a cultivar TMG 44 B2RF 50% da ETc.

A Figura 26 apresenta o gráfico de correlação da cultivar TMG 44 sob a condição de 50%, evidenciando uma tendência linear crescente. A análise desse gráfico, juntamente com a validação estatística dos dados, indicou que o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,84$) explica 84% da variabilidade observada nos dados, demonstrando a adequação do modelo utilizado. Além disso, o coeficiente de correlação ($r = 0,92$) revela uma relação linear significativa entre os valores de CC e IAF, indicando um bom ajuste entre as variáveis examinadas.

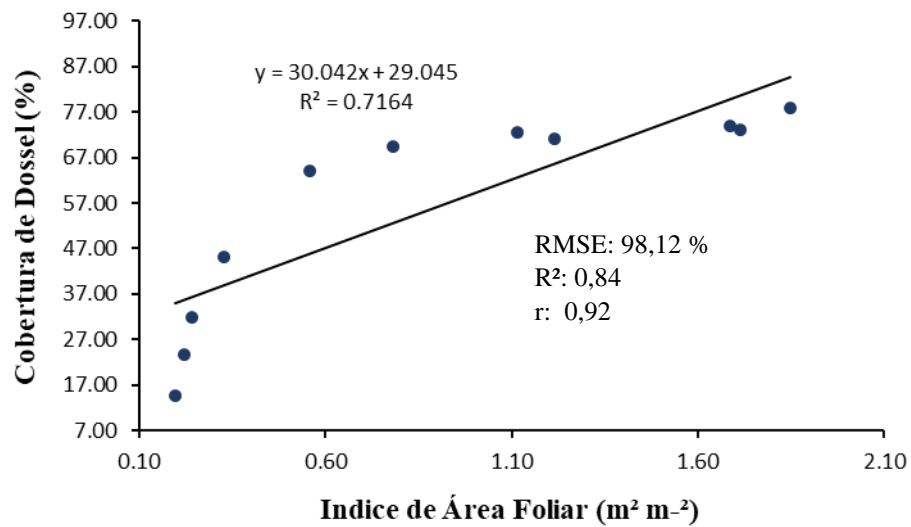


Figura 26. Relação entre índice de área foliar (IAF) e cobertura do dossel (CC) para a cultura do algodão irrigado no ano de 2013, para a cultivar FM944 GL 100% da ETc.

A Figura 27 apresenta o gráfico de correlação da cultivar TMG 44 B2RF na condição de 100% da ETc, evidenciando uma tendência linear crescente. A análise do gráfico, aliada à validação estatística dos dados, revelou que o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,89$) indica que 89% da variabilidade dos dados observados é explicada pelo modelo adotado. Além disso, o coeficiente de correlação ($r = 0,94$) demonstra uma forte relação linear entre os valores de CC e IAF, sugerindo um ajuste consistente entre as variáveis analisadas.

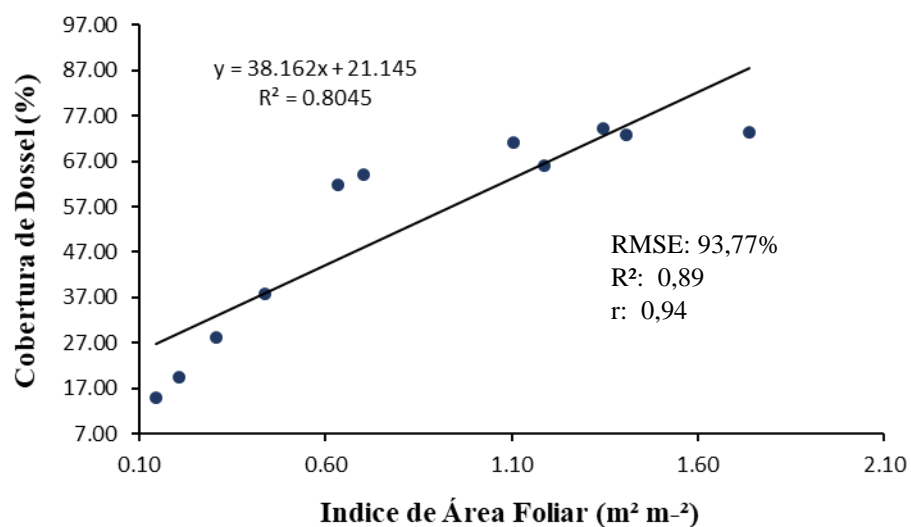


Figura 27. Relação entre índice de área foliar (IAF) e cobertura do dossel (CC) para a cultura do algodão irrigado no ano de 2013, para a cultivar TMG 44 B2RF 100% da ETc.

5 CONCLUSÃO

O modelo foi calibrado para as cultivares FM944GL e TMG 44 B2RF, com lâminas de 50% e 100% da ET_c , apresentando resultados com excelente validação estatística para a cobertura de dossel, índice de área foliar em relação à cobertura de dossel e produtividade do algodoeiro.

Para o armazenamento de água no solo, os resultados não apresentaram correlações com excelente validação estatística entre os dados medidos e simulados pelo AquaCrop. Os dados simulados nas condições com estresse hídrico foram subestimados em relação aos valores medidos.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no Norte de Minas Gerais. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 5, p. 437-449, 2011.
- ALENCAR, Leônidas Pena de. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 2014.
- ANDARZIAN, B. et al. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, n. 1, p. 1-8, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO – Irrigation and Drainage Paper 56, 1998. 297 p.
- AZIZ, Marjan; AHMAD RIZVI, Sultan; SULTAN, Muhammad. Simulating Cotton Growth and Productivity Using AquaCrop Model under Deficit Irrigation in a Semi-Arid Climate. **Agriculture**, p. 1-18, 8 fev. 2022.
- BAIO, F. H. R.; GABRIEL, R. R. F.; ZANIN, A. R. A.; CAMPOS, C. N. S.; ROQUE, C. G.; TEODORO, P. E. Application technology of boron via foliar and its effects on cotton crop phenology. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 7367-7379, 2020.
- BARBANTE KRTBAUY. **Fisiologia vegetal: relações hídricas**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABDR, 2004. 451 p.
- BELTRÃO, N. E. de M.; AZEVEDO, D. M. P. de; VIEIRA, D. J.; NÓBREGA, L. B. da. Recomendações técnicas e considerações gerais sobre o uso de herbicidas, desfolhantes e reguladores de crescimento na cultura do algodão. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 1997. 32 p. Documento, 48.
- BARBOSA, G. R. M.; ASMUS, G. L. Densidade populacional do nematoides-das-lesões-radiculares em cana-de-açúcar em função de cultivares, manejo do palhicho e escarificação do solo. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 2, p. 87-94, 2019.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 2, p. 225-233, 1997.
- COSTA, A. C. P. et al. Algodão. In: **Agronegócio brasileiro**, São Paulo: Sonopress Gráfica, 2008. p. 24-29.
- COSTA, M. S.; MANTOVANI, E. C.; DE JESUS, F. L. F.; SANCHES, A. C.; DA SILVA, J. L. B.; DE OLIVEIRA SANTOS, J. Uso do software AquaCrop para simular a resposta do feijão à diferentes regimes de irrigação. **IRRIGA**, v. 1, n. 3, p. 557-572, 2021.

COOREVITS, L. **Calibration and validation of green beans for the AquaCrop model**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

CHIBARABADA, T. P.; MODI, A. T.; MABHAUDHI, T. Calibration and testing of AquaCrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) and dry bean (*Phaseolus vulgaris*). In: **Water Use and Nutritional Water Productivity of Selected Major and Underutilised Grain Legumes**, p. 138, 2018.

CONCEIÇÃO, N. F. W. **Calibração, teste e aplicação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão sob regimes de irrigação**. Orientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria. 2022. 43 f. Dissertação (Mestrado), Jaboticabal-SP, 2022.

CONATY, W. C.; BURKE, J. J.; MAHAN Jr., B.; NEILSON, J.; SUTTON, B. G. Determining the optimum plant temperature of cotton physiology and yield to improve plant-based irrigation scheduling. **Crop Science**, v. 52, p. 1828-1836, 2012.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for Predicting Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: FAO, 1975.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield Response to Water**. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 1979.

DUQUE, G. O. **O Nordeste e as lavouras xerófilas**. Fortaleza: BNB, 1973. 238 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manejo da água na produção agrícola**. Brasília: EMBRAPA, 2000.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Boletim técnico sobre manejo hídrico e produtividade**. Brasília: EMBRAPA, 2017.

FARIA, R. T.; FOLEGATTI, M. V.; FRIZZONE, J. A.; SAAD, A. M. Determination of a long-term optimal irrigation strategy for dry beans in Parana State, Brazil. **Scientia Agricola**, v. 54, p. 155-164, 1997.

FERREIRA, A.; OLIVEIRA, S. **MOHID Land: A distributed hydrological model applied to the simulation of the hydrological cycle in a small catchment**. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 10, p. 1817-1830, 2010.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARANTANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 627-636, 2007.

FOWLER, J. L.; RAY, L. L. Response of two cotton genotypes to five equidistant spacing patterns. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 733-738, 1977.

GAVASSO-RITA, Y. L.; PAPALEXIOU, S. M.; LI, Y.; ELSHORBAGY, A.; LI, Z.; SCHUSTER-WALLACE, C. Crop models and their use in assessing crop production and food security: A review. **Food and Energy Security**, v. 13, n. 1, p. e503, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.503>

VAN GENUCHTEN, M. Th.; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales de Geophysique**, v. 3, p. 615-628, 1985.

GONÇALVES, A. C. A. **Fundamentos para irrigação**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2006.

GALBIERI, R.; BELOT, J. L. Nematoides fitoparasitas do algodoeiro nos cerrados brasileiros: Biologia e medidas de controle. **Instituto Mato-grossense do Algodão – IMAmt**, Cuiabá, Brasil, p. 37-89, 2016.

Gavasso-Rita, Y., et al. Crop models and their use in assessing crop production and food security. *Food and Energy Security*, 12(1), e503, 2023.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

HALILOGLU, H. The effect of phosphorus and zinc on yield and on some agronomic characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 17, n. 2, p. 2665-2676, 2019.

HSIAO, T. C., STEDUTO, P., & RAES, D. AquaCrop, The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, 101(3), 448-459; 2009.

HUOT, C.; ZHOU, Y.; PHILP, J. N.; DENTON, M. D. O desenvolvimento da profundidade da raiz em gramíneas forrageiras perenes tropicais está relacionado ao ângulo da raiz, ao diâmetro da raiz e à área foliar, 2020.

HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulando a resposta do rendimento do algodão à irrigação deficitária com o modelo AquaCrop da FAO. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1319–1330, 2011. DOI: 10.5424/sjar/20110904-358-10.

IQBAL, M. A. et al. 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**, v. 135, p. 61–72, 2014.

JACOBS, J. M.; MOHANTY, B. P.; HSU, E. C.; MILLER, D. SMEX02: Variabilidade em escala de campo, estabilidade temporal e similaridade da umidade do solo. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 436–446, 2004.

JAYARATHNE, J. R. R. N.; CHAMINDU DEEPAGODA, T. K. K.; CLOUGH, T. J.; THOMAS, S.; ELBERLING, B.; SMITS, K. M. Efeito da distribuição do tamanho do agregado na umidade do solo, difusividade do gás do solo e emissões de N₂O de um solo de pastagem. 2021.

JIN, X.; YANG, G.; LI, Z.; XU, X.; WANG, J.; LAN, Y. Estimativa da produtividade hídrica em trigo de inverno usando o modelo AquaCrop com dados hiperespectrais de campo. **Agriculture**, v. 19, p. 1–17, 2018.

KOSTKOVÁ, M.; HLAVINKA, P.; POHANKOVÁ, E.; KERSEBAUM, K. C.; NENDEL, C.; GOBIN, A. et al. Desempenho de 13 modelos de simulação de culturas e seu conjunto para

simular quatro culturas arvenses na Europa Central. **Journal of Agricultural Science**, v. 159, p. 69–89, 2021.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, n. 2, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo: retenção e cálculo da água no solo**. 2. ed. São Paulo: EdUSP, 2012. 346 p. ISBN 9788531413841.

LIMA SILVA, P. C. **Algodoeiro fertirrigado com nitrogênio via gotejamento**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2019.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no recôncavo baiano através do modelo CROPGRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1294–1300, 2013.

LUO, Y.; WANG, X.; CUI, M.; WANG, J.; GAO, Y. O corte aumenta a produção de raízes finas e a renovação das raízes numa pastagem Songnen restaurada artificialmente. 2021.

MAKAMOV, A. H.; NORBEKOV, J. K.; YULDASHEVA, Z. Z.; BURIEV, Z. T.; SHAVKIEV, J. S. Indicadores de algumas características morfoeconômicas de genótipos de algodão sob condições ótimas de suprimento de água e déficit hídrico. **Pesquisa Acadêmica em Ciências Educacionais**, v. 3, n. 12, p. 65-75, 2022.

MEURER, E.; NOVAIS, R. F. et al. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 65-90.

MOLDRUP, P.; ROLSTON, D.; YAMAGUCHI, T. Um modelo simples e mecanicista para resistência do solo à absorção de água pelas plantas. **Soil Science**, Baltimore, v. 153, n. 2, p. 87-93, fev. 1992.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. Wiley, 2021.

PAREDES, P.; MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Avaliação do desempenho do modelo FAO AquaCrop para estimar a produtividade do milho e o uso de água sob irrigação plena e deficitária com foco na parametrização do modelo. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 81–97, 2014.

PETRONE, R. M.; PRICE, J. S.; CAREY, S. K.; WADDINGTON, J. M. Caracterização estatística da variabilidade espacial da umidade do solo em um cutover petland. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 41–52, 2004.

RAATS, P. Captação de água dos solos pelas raízes das plantas. **Transport in Porous Media**, Berlim, v. 68, n. 1, p. 5-28, ago. 2007.

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. **Agricultural**

Water Management, v. 97, n. 10, p. 1510-1526, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

RAMOS, F.; PIVETTA, F.; MATOS, V.; SEIXAS, G.; JÚNIOR, J. Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju. **Original Article**, Cuiabá, 2014.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; 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.

ROOSE, T.; FOWLER, A. C. Um modelo para absorção de água pelas raízes das plantas. **Journal of Theoretical Biology**, Boston, v. 228, n. 2, p. 155-171, out. 2004.

ROSOLEM, C. A.; BOGIANI, J. C. Nutrição e estresse nutricional em algodoeiro. In: **O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes**. Cuiabá: IMAmt/AMPA, 2014. p. 103-121.

SANDHU, S.; IRMAK, S. Evaluation of the AquaCrop model in simulating maize grain yield, biomass, and evapotranspiration under rainfed and irrigated conditions. **Agricultural Water Management**, 2009.

SANTOS, K. F. **Determinação de atributos físicos e do carbono orgânico do solo em diferentes tipos de uso da terra no planalto sul catarinense**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1998. 236 p.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; ŠEJNA, M. Development and applications of the HYDRUS computer software packages. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 12, p. 3683-3696, 2012.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: Concepts and applications. FAO, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>

SOUZA, J. S. **Poda das plantas frutíferas**. São Paulo: Nobel, 1977. 224 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 719 p. ISBN 85-363-0291-7.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58 p.

VIEIRA, A. C.; SILVA, J. R.; OLIVEIRA, M. L.; SOUSA, F. R. Testes de simulação com o modelo AquaCrop na estimativa da produtividade do feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 175-182, 2020.

YATES, D.; SIEBER, J.; PURKEY, D.; HUBER-LEE, A. WEAP21—a demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 1: Model characteristics. **Water International**, v. 30, n. 4, p. 487-500, 2005.

ZONTA, J. H. et al. Efeito da irrigação no rendimento e qualidade de fibras em cultivares de algodoeiro herbáceo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 43-52, 2015.