

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MIRELLY MERES SILVA SOUZA**

**CALIBRAÇÃO DO MODELO DA ZONA AGROECOLÓGICA PARA  
ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM CHAPADINHA,  
MARANHÃO**

**Chapadinha, MA**

**Mai, 2024**

MIRELLY MERES SILVA SOUZA

**CALIBRAÇÃO DO MODELO DA ZONA AGROECOLÓGICA PARA  
ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM CHAPADINHA,  
MARANHÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação de Engenharia Agrícola da  
Universidade Federal do Maranhão, como  
requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Silva dos Santos.  
Coorientador (a): Prof. Dr<sup>a</sup>. Kamilla Andrade de  
Oliveira.

**Chapadinha, MA**

**Maior, 2024**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Meres Silva Souza, Mirelly.

CALIBRAÇÃO DO MODELO DA ZONA AGROECOLÓGICA PARA  
ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM CHAPADINHA,  
MARANHÃO / Mirelly Meres Silva Souza. - 2024.

32 p.

Orientador(a): Eduardo Silva dos Santos.

Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do  
Maranhão, Chapadinha, Ma, 2024.

1. Glycine Max. 2. Déficit Hídrico. 3.  
Agrometeorologia. 4. . 5. . I. Silva dos Santos,  
Eduardo. II. Título.

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

TCC defendido e aprovado, em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_, pela Comissão Examinadora constituída pelos professores:

---

Orientador

Prof. Dr. Eduardo Silva dos Santos

Curso de Engenharia Agrícola

---

Examinador

Prof. Dr. Plinio Antônio Guerra Filho

Curso de Engenharia Agrícola

---

Examinador

Me. Romário Porto de Oliveira

Curso de Agronomia

À Deus, pois sem Ele nada seria possível, à  
minha mãe Ângela Meres, ao meu padrasto  
Alexandre Filho, aos meus irmãos  
Alexandre Junior, Maria Cecília e Antony  
Benício, e ao meu pai, Marcos Cândido.  
**DEDICO!**

*“Be strong and brave!”*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela vida, pelo amparo, por sempre me manter de pé diante das dificuldades e por sempre iluminar cada passo da minha vida.

Agradeço imensamente a toda minha família por todo incentivo, aos meus avós, em especial meu avô Antônio Ferreira e minha avó Francisca Rocha, que sonha em ver sua neta formada, as minhas tias Marilene, Gessica Line, Ana Cleia e tio Agilson por sempre estarem por perto incentivando, torcendo e vibrando comigo a cada pequena conquista acadêmica, e em especial a minha mãe Ângela Meres, por sempre me amparar e me apoiar diante das dificuldades, por não me deixar desistir, pois sem ela eu não teria chegado até aqui, és a minha inspiração, agradeço também ao meu padrasto Alexandre Filho, por todos os ensinamentos, todo apoio, incentivo e por sempre me ajudar, pois se cheguei até aqui foi porque vocês sempre estiveram sempre ao meu lado.

Aos meus irmãos Alexandre Junior, Maria Cecília e Antony Benício por se inspirarem em mim, vocês são a minha base.

Agradeço ao meu pai Marcos Cândido pelo apoio.

Agradeço a minha amiga de infância Cassiane que esteve sempre ao meu lado, torcendo por mim e me apoiando nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos amigos que a graduação me deu: Renata Gamboa, Ana Sampaio, Ana Paula, Vitor Medeiros, João Mateus, Natan Oliveira, Wanderley Rocha, Daniel Lobo, Eduardo Arouche e Carlos Augusto, e em especial agradeço a minha dupla Bruna Brito por toda ajuda, paciência, companheirismo e por sempre estar do meu lado em todos os momentos.

Agradeço de forma especial meu orientador, o prof. Dr. Eduardo Santos e a minha coorientadora prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kamilla Andrade, pelas oportunidades que me deram, por todo conhecimento compartilhado e pelos conselhos valiosos que me deram. Muito obrigada!

Agradeço também ao professor pelo qual tenho uma imensa admiração Khalil Menezes pelos conselhos e por todos os ensinamentos.

Agradeço imensamente a todas as amigas que fiz e aos conhecidos que encontrei ao longo do percurso e que, de alguma maneira, me apoiaram e fizeram parte dessa jornada.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	11
<b>OBJETIVOS</b>	12
Objetivo geral	12
Objetivo específico	12
<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	12
Aspectos abrangentes da produção de soja no estado do Maranhão	12
Exigências edafoclimáticas da cultura	13
Modelo de simulação agrometeorológico	15
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	16
Produtividade Potencial (Método da Zona Agroecológica) (PP)	17
Produtividade Real	18
Base de Dados	19
Avaliação do Modelo	20
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	22
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	26
<b>REFERÊNCIAS</b>	26

**Contemporânea**

*Contemporary Journal*

4(1): 560-580, 2024

ISSN: 2447-0961

**CALIBRAÇÃO DO MODELO DA ZONA AGROECOLÓGICA PARA ESTIMATIVA  
DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM CHAPADINHA, MARANHÃO**

CALIBRATION OF THE AGROECOLOGICAL ZONE MODEL FOR ESTIMATING  
SOYBEAN YIELD IN CHAPADINHA, MARANHÃO

DOI: 10.56083/RCV4N1-031

Recebimento do original: 01/12/2023

Aceitação para publicação: 05/01/2024

Mirelly Meres Silva Souza<sup>1</sup>, Eduardo Silva dos Santos<sup>2</sup>, Carlos Augusto Maciel Silva<sup>3</sup>, Kamilla Andrade Oliveira Emiliano<sup>4</sup>, Daiane Fossatti Dall'Oglio<sup>5</sup>, Bruna da Silva Brito Ribeiro<sup>6</sup>, Gleicy de Jesus Matos Abreu<sup>7</sup>, José Ítallo Oliveira Sousa<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): mirelly.meres@discente.ufma.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): santos.eduardo@ufma.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): maciel.carlos@discente.ufma.br

<sup>4</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): kamilla.andrade@ufma.br

<sup>5</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): daiane.fossatti@ufma.br

<sup>6</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): bruna.brito@discente.ufma.br

<sup>7</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): gleicy.matos@discente.ufma.br

<sup>8</sup> Universidade Federal do Maranhão (UFMA): jose.itallo@discente.ufma.br

## RESUMO

A baixa disponibilidade hídrica é um fator limitante na produtividade de culturas agrícolas como a soja. Modelos de simulação de culturas são utilizados como ferramentas de alto potencial para atenuar os impactos causados pelas mudanças climáticas. Objetivou-se, com este trabalho, calibrar e testar o modelo da Zona Agroecológica – FAO para a região produtora de soja de Chapadinha do Estado do Maranhão. Foram utilizados dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia, produtividade observada de valores de cultivo e uso de variedades de soja (POVCU) para calibração e dados de produtividade (POIBGE) de uma série temporal das safras de 2002/2003 a 2021/2023 para etapa de avaliação. No processo de calibração, verificou uma produtividade observada média (POVCU) de 3582,7 kg ha<sup>-1</sup> e uma produtividade média estimada pelo modelo (PE) de 3581,6 kg ha<sup>-1</sup>. O modelo FAO apresentou excelente ajuste, com  $R^2 = 1$ ; RMSE = 1,70 kg ha<sup>-1</sup>; MAE = 0,95 kg ha<sup>-1</sup>; MBE = 0,0 kg ha<sup>-1</sup>, índice de Wilmont e de concordância (d e c) = 1. Assim, o modelo da Zona Agroecológica estima com precisão e acurácia a produtividade da cultura da soja, podendo ser aplicado para previsão de produtividade nas condições climáticas de Chapadinha.

**PALAVRAS-CHAVE:** Glycine Max, Déficit Hídrico, Agrometeorologia.

## INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das culturas mais importante do Brasil, cobrindo uma área de mais de 44 milhões de hectares na safra 2022/2023 (CONAB, 2023). O agronegócio no estado do Maranhão, localizado na região nordeste, desenvolveu-se nos últimos anos de acordo com Buss *et al.* (2019), por conta principalmente de áreas de cerrado aptas a agricultura, transformando-se em importante região agrícola na produção de grãos, com destaque a cultura da soja, que está em crescente expansão. Nestas regiões, a cultura da soja é altamente dependente das condições climáticas e o déficit hídrico é a principal fonte de lacunas de produtividade. A diferença de produtividade por déficit hídrico pode variar, em média, de 500 a 2.500 kg ha<sup>-1</sup> ao longo das áreas brasileiras de produção de soja (Sentelhas *et al.*, 2015). Com base nisso, o déficit hídrico é uma grande preocupação para a produção brasileira de soja nas condições climáticas atuais e futuras. Santos *et al.* (2023), ao estudarem a relação da precipitação com a produtividade da soja em Mata Roma - MA, verificaram uma perda de produtividade de 68% para anos considerados muito secos.

Nesse contexto, os estudos com modelos de simulação de culturas são ferramentas computacionais que ajudam a prever e analisar o crescimento, desenvolvimento e o rendimento da produtividade em diferentes condições ambientais e agrícolas, e auxiliam na atenuação dos impactos causados pelas mudanças climáticas. Diversos são os modelos de simulação de cultura existentes na literatura, destacando-se: *Aquacrop* (Hsiao *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009); *Crop Simulation Model – CropGro* (Boote *et al.*, 1998); *Agricultural Production Systems Simulator – APSIM* (Keating *et al.*, 2003) e o Modelo da Zona Agroecológica - FAO (Doorenbos e Kassam, 1994), sendo este último bastante utilizado em estudos sob condições climáticas do Brasil, devido à sua simplicidade, facilidade de ajustes e aplicabilidade.

Dentre os estudos que foram desenvolvidos através do uso do Modelo FAO em regiões brasileiras, podemos destacar: estimativas de produtividade (Monteiro; Sentelhas, 2014), determinação das melhores épocas de semeadura (Rolim *et al.*, 2001), tolerância de determinadas culturas à déficits hídricos (Battisti; Sentelhas, 2015) e análise da eficiência do manejo agrícola (Battisti *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2021).

Considerando a relevância da cultura da soja na agricultura, é crucial utilizar um modelo simplificado de previsão de produtividade adaptado à realidade do cultivo em diferentes regiões. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi parametrizar e calibrar o Modelo da Zona Agroecológica - FAO para a estimativa da produtividade da soja limitada pela disponibilidade

hídrica para a região produtora de Chapadinha - MA. Para tal propósito, essa análise auxiliará estudos futuros relacionados a estimativas de produtividade, determinação das melhores épocas de semeadura, tolerância de determinadas culturas à déficits hídricos, análise da eficiência do manejo agrícola e risco climático, dentre outros estudos correlatos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo geral**

Avaliar o modelo da Zona Agroecológica (FAO) de estimativa de produtividade para a cultura da soja nas condições edafoclimáticas de Chapadinha.

### **Objetivo específico**

- Calibrar e parametrizar o modelo FAO para dois ciclos da cultura da soja de 110 e 130 dias;
- Avaliar o modelo sobre diferentes capacidades de água disponível de 24, 48 e 72 mm.

## **REVISÃO DE LITERATURA**

### **Aspectos abrangentes da produção de soja no estado do Maranhão**

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura que demonstra uma significativa capacidade de produção, sendo uma fonte alimentar amplamente aproveitada e diversificada. Além disso, este grão possui um alto teor proteico, chegando a até 50% de proteína, o que a torna alvo de consideráveis investimentos e objeto de extenso interesse em pesquisas visando aprimorar a sua qualidade e produtividade (Dros, 2004).

Com o contínuo avanço na produção de soja ao longo das últimas décadas, a leguminosa brasileira ganhou destaque como uma cultura de extrema importância para o agronegócio do Brasil, sendo responsável pelo crescente volume de exportações. O grão estabeleceu-se como a principal commodity agrícola do país, desfrutando de um mercado internacional sólido e de uma cadeia produtiva nacional bem definida e estruturada (Liszbinski; Brizolla; Patias, 2021).

O crescimento da produção de soja segue um padrão de desenvolvimento regional fundamentado nas vantagens comparativas da atividade agrícola, tais como condições edafoclimáticas, solo fértil, adoção de tecnologia avançada e habilidades empresariais. Em termos regionais, o cultivo da soja estimulou o desenvolvimento dos estados do Sul e Sudeste, converteu o Centro-Oeste em uma região de crescimento vigoroso e se expandiu para os

cerrados do Nordeste, como Maranhão, Piauí e Bahia, além de alcançar a região Norte, representada pelo estado do Tocantins. Isso evidencia o papel significativo da soja como um dos principais impulsionadores do crescimento econômico em extensas áreas (Benevides; Staback, 2023).

A região do MATOPIBA, localizada nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, é uma área em crescimento contínuo que engloba o bioma do cerrado e desempenha um papel fundamental na produção de soja no Brasil. O surgimento do MATOPIBA foi motivado pela necessidade de expandir as fronteiras agrícolas, impulsionadas pelo capital em busca de garantir sua reprodução (Luz *et al.*, 2019).

O MATOPIBA surgiu como uma região de grande importância para a expansão da produção de soja no contexto brasileiro. A presença de vastas áreas disponíveis para cultivo e condições climáticas favoráveis sustentam uma perspectiva otimista em relação ao aumento da área destinada ao plantio. Reconhecendo esse potencial, o Brasil tem se destacado no desenvolvimento de um conjunto único de práticas e conhecimentos no cultivo da soja, por meio da colaboração entre pesquisa, empresas do setor e produtores rurais. Esse avanço é fruto do alto nível de tecnologia utilizada e das constantes adaptações e inovações implementadas (Ribeiro; Haberli Junior, 2021).

A expansão de novas áreas para o cultivo da cultura no Leste Maranhense mais precisamente na microrregião de Chapadinha e os nove municípios que ela é constituída, ocorre por alguns fatores como, solo e clima propícios para o cultivo e principalmente a proximidade da região ao Porto do Itaqui, o que possibilita o escoamento da produção mais rápido.

### **Exigências edafoclimáticas da cultura**

Os níveis de riscos e incertezas na agricultura são significativos e, para gerenciá-los, cabe ao agricultor tomar decisões embasadas em informações técnicas e econômicas. Entre as diversas práticas agrícolas, a seleção de genótipos adaptados ao ambiente de cultivo é crucial, pois influenciam diretamente na otimização dos fatores abióticos como água, luz e nutrientes, permitindo que a cultura alcance todo o seu potencial (Argenta *et al.*, 2001).

A radiação solar é um fator ambiental crucial para a cultura, é a fonte de energia luminosa para a fotossíntese e desencadeia sinais ambientais que afetam uma variedade de processos fisiológicos na soja. Assim, a intensidade da radiação solar, a duração e a qualidade do espectro de luz desempenham papéis fundamentais nas respostas morfológicas e fenotípicas

observadas na soja, como a altura da planta, indução ao florescimento e ontogenia (FARIAS *et al.* 2007).

A influência do fotoperíodo sobre o desenvolvimento da soja é variável entre as cultivares, ou seja, cada cultivar possui um número de horas de luz, chamado de fotoperíodo crítico, acima do qual, o florescimento é atrasado. Por isso a soja é considerada uma planta de dias curtos. Plantas de dias curtos, são induzidas ao florescimento quando a duração do dia é menor do que o seu fotoperíodo crítico. Quando a duração do dia é maior do que o fotoperíodo crítico, as plantas não recebem o sinal para florescer e continuam no período vegetativo. Portanto o manejo do fotoperíodo e temperatura, através da escolha da cultivar e da data de semeadura é preponderante para obter sucesso na produção de soja (RODRIGUES *et al.*, 2001).

A precipitação é o fator meteorológico primordial que influencia diretamente o êxito das safras, sendo que sua escassez durante o ciclo das culturas e/ou excesso durante a colheita pode acarretar danos significativos, dependendo da severidade do acontecimento. Portanto, estudos climatológicos acerca da chuva, especialmente sua quantidade, distribuição, duração e intensidade, podem ser de grande importância para a eficiência na produção agrícola (Manosso, 2005).

As culturas podem apresentar atrasos no florescimento devido à diminuição da temperatura e da duração do período diurno. Esses atrasos podem resultar em distúrbios fisiológicos, levando a um crescimento excessivo ou insuficiente dos ramos, o que, em ambos os casos, pode levar ao aborto de uma quantidade significativa de inflorescências e vagens segundo Mundstock (2005).

A cultura da soja é bastante exigente em relação ao atendimento de suas necessidades fisiológicas. Dependendo do seu estágio de crescimento, a falta de nutrientes ou uma leve escassez de água podem impactar negativamente a produção final (Embrapa, 2024).

A alteração do clima global pode impactar os componentes do ciclo hidrológico, influenciando diretamente a disponibilidade de água e a duração dos períodos de cheias e secas. Estresses ambientais, como a falta de chuvas, não apenas podem reduzir significativamente os rendimentos das colheitas, mas também limitar as regiões onde espécies de grande importância comercial podem ser cultivadas (Farias *et al.*, 2001).

Conforme a EMBRAPA (2006), a disponibilidade de água é essencial para a soja, sobretudo em duas fases de seu crescimento: a germinação e o florescimento/enchimento dos grãos. Situações de falta de água durante a germinação e crescimento inicial podem levar à

morte das sementes e a uma distribuição desigual das plantas. Já durante o florescimento e enchimento dos grãos, essas deficiências podem resultar em problemas fisiológicos na planta, como o fechamento dos estômatos e a deformação das folhas, resultando em amarelamento precoce das folhas e flores, além do aborto das vagens, o que acaba diminuindo a produção de grãos.

### **Modelo de simulação agrometeorológico**

Alguns elementos de risco na agricultura, como o risco climático, que pode surgir da imprevisibilidade do clima de variações na disponibilidade de água, eventos climáticos extremos ou inadequados, têm impacto indireto na propagação de pragas e doenças. Esses fatores representam uma ameaça à sustentabilidade da produção agrícola. Por consequência disto, estudos são indispensáveis para desenvolver respostas e técnicas adequadas visando a redução desses riscos. Dessa forma, a utilização de modelos de simulação de culturas é fundamental, pois incorporam conhecimentos de diversas áreas como fisiologia vegetal, agrometeorologia, ciência do solo, entre outras, resultando em simulações mais precisas em relação ao crescimento e rendimento das culturas e dos sistemas agrícolas (Jame e Cutforth, 1996).

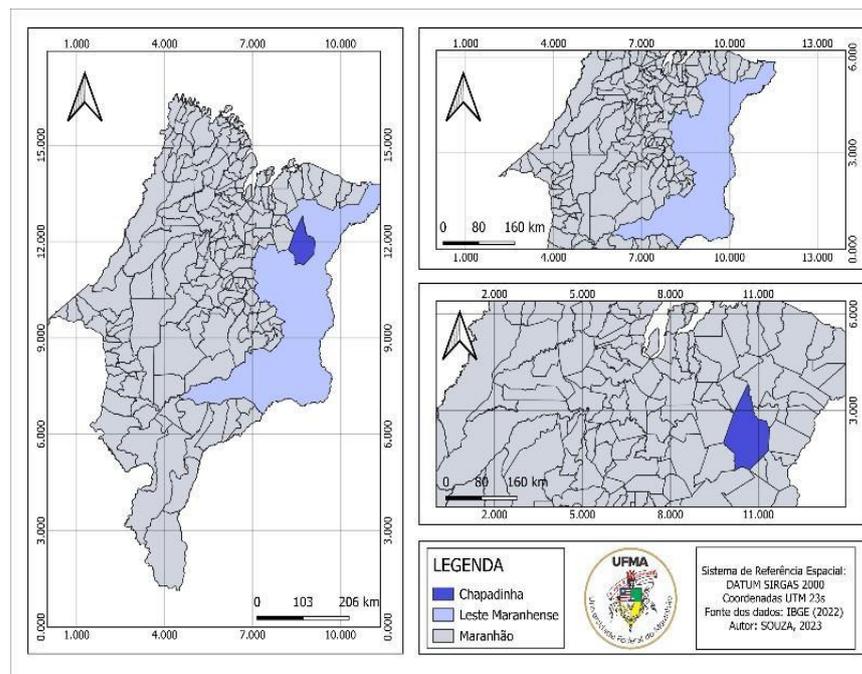
O aumento expressivo da utilização de modelos de simulação de culturas na pesquisa é consequência do avanço das técnicas de modelagem e da melhoria no processamento de cálculos realizado pelos computadores (Hanks e Ritchie, 1991; Penning de Vries *et al.* 1991). Com os modelos agrometeorológicos é possível simular a melhor época de produtividade com a menor quebra possível considerando apenas os dados meteorológicos como, temperatura, precipitação e fotoperíodo e alguns parâmetros da cultura como o IAF (índice de área foliar), CC (correção do índice de colheita), CIAF (correção do índice de área foliar) e a umidade. Com base na produtividade potencial (Pp), é possível ajustar os resultados para estimar a produtividade real da cultura.

O Modelo da Zona Agroecológica, desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979) e ajustado pela FAO em 1994, tem a finalidade de prever a produtividade de uma cultura com base na disponibilidade de água ao longo de seu ciclo. Essa abordagem é valorizada pela facilidade de obtenção dos dados necessários e pelos resultados relevantes alcançados em diversos estudos realizados em âmbito global.

A produtividade máxima ou potencial (Pp) de uma cultura é alcançada quando ela possui características genéticas adequadas para a região, é exposta a condições ideais de radiação solar, temperatura, fotoperíodo, necessidades hídricas, e fertilidade do solo, e é gerida de forma apropriada. Um segundo limite de produtividade é atingido quando a cultura enfrenta restrições de água, sendo chamado de produtividade alcançável (Pa). Portanto, entre Pp e Pa existe uma diferença de produção conhecida como "*yield gap*" para uma condição específica de cultivo e adequa-se na identificação das possíveis causas da perda de produtividade. Dessa forma, conforme o tipo de produtividade analisado, é possível observar as principais causas da redução na produtividade (Marin *et al.*, 2008; Sentelhas *et al.*, 2015; Andrea *et al.*, 2018; Nóia Júnior e Sentelhas, 2019).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

A área de estudo foi a microrregião de Chapadinha localizada no estado do Maranhão, inserida na mesorregião Leste Maranhense (Figura 1) e faz parte do bioma Cerrado (IBGE, 2022). Situada nas coordenadas geográficas 3°44' de Latitude Sul, 43°21' de Longitude Oeste Greenwich, com altitude média de 105 metros. O clima, segundo Thornthwaite (1948), é do tipo C2s2A'a', ou seja, subúmido, megatérmico com grande deficiência hídrica no verão, com temperatura média anual de 27,9 °C sendo mais elevada nos meses de outubro e novembro, ambos com 29,3 °C e mais baixa em junho com média térmica de 26,9 °C; a precipitação pluviométrica alcança valores médios anuais de 1613 mm (Passos *et al.*, 2016). Os solos da região estão representados em sua maioria por Latossolo Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo, Plintossolo e Planossolos de acordo com a EMBRAPA (2006).



**Figura 1.** Mapa de localização da área de estudo.

**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

### Produtividade Potencial (Método da Zona Agroecológica) (PP)

A estimativa da produtividade potencial foi realizada pelo método da Zona Agroecológica (Modelo FAO), descrito por Doorenbos e Kassam (1994), conforme a seguinte sequência de cálculos:

$$PP = PPBp * CIAF * CR * CC * ND / (1 - 0,01 * U\%) \quad (1)$$

em que:

PPBp é a produtividade bruta de matéria seca para uma cultura padrão ( $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ );

CR é a correção da taxa de respiração, igual a 0,5 quando a temperatura média do ar ( $T_a$  °C) for igual ou superior a 20 °C e 0,6 quando  $T_a < 20$  °C (Doorenbos; Kassam, 1994);

Cc é a correção para a parte colhida, obtida pela relação da matéria seca do grão pela matéria seca total da planta;

ND é o número de dias do ciclo da cultura;

U% com valor de 13% representa a umidade residual no grão para a cultura da soja (Doorenbos; Kassam, 1994); e

$C_{IAF}$  a correção do índice de área foliar obtida ao longo do ciclo, conforme a Equação 2:

$$C_{IAF} = 0,0093 + 0,185 * IAF_{m\acute{a}x} - 0,0175 * IAF_{m\acute{a}x}^2 \quad (IAF_{m\acute{a}x} \geq 5, C_{IAF} = 0,5) \quad (2)$$

Para obtenção da PPBp foi realizado a soma das produtividades potenciais padrão para período de céu limpo (PPBc) e de céu nublado (PPBn) em kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, obtidas pelas Equações 3 e 4:

$$PPB_c = \left[ (107,2 + 8,604 * Q_o) * cTc * \frac{n}{N} \right] \quad (3)$$

$$PPB_n = \left[ \left( 31,7 + 5,234 * Q_o * cTn * \left( 1 - \frac{n}{N} \right) \right) \right] \quad (4)$$

em que:

Qo representa a irradiação solar global extraterrestre (MJ m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>);

cTc e cTn são os fatores de correção para a temperatura do ar em dias de céu claro e nublado; e

n é a insolação diária (horas dia<sup>-1</sup>), e N é o fotoperíodo (horas dia<sup>-1</sup>).

As equações 1, 2, 3 e 4 foram propostas por Pereira *et al.*, (2002).

### **Produtividade Real**

A produtividade real (PR) foi estimada a partir da deficiência hídrica relativa (1-ETr/ETc) e ponderada por um fator de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (ky), conforme a Equação 5 (Doorenbos; Kassam, 1994):

$$PR = PP * \left\{ 1 - Ky * \left[ 1 - \left( \frac{ETr}{ETm} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

em que:

ETr é a evapotranspiração real da cultura; e

ETm é a evapotranspiração máxima da cultura, dada pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ETo), estimada pelo método de Thornthwaite (1948), e o coeficiente de cultura (kc) para cada fase fenológica; ky é um fator de sensibilidade ao estresse hídrico, variável com a fase fenológica da cultura. Utilizaram-se os valores de ky propostos por Sentelhas et al. (2015).

Na Tabela 1 são apresentados os kc e ky utilizados na modelagem em função dos ciclos das cultivares, com base na escala de duração dos estádios fenológicos, segundo Fehr e Caviness (1977).

**Tabela 1.** Duração dos estádios fenológicos das cultivares de soja com diferentes ciclos (dias) e respectivos coeficientes de cultura (kc) e fator de sensibilidade ao estresse hídrico (ky) utilizados no modelo da FAO.

Ciclos	S-V2	V2-R1	R1-R5/R6	R6-R8
90	8	29	29	25
100	9	32	32	27
110	10	35	35	30
120	15	35	40	30
130	15	40	45	30
kc	0,56	1,21	1,50	0,9
ky	0,06	0,17	0,89	0,08

S: semeadura; V2: folha desenvolvida no primeiro nó acima do unifoliolado; R1: início da floração; R5: legume contendo grãos com três mm em um dos quatro nós superiores; R6: legume contendo grãos completamente desenvolvidos em um dos quatro nós superiores e, R8: maturidade completa.

**Fonte:** Adaptado de Fehr e Caviness (1977).

O balanço hídrico para a cultura desejada foi estimado segundo método de Thornthwaite e Mather (1955), com valores de capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) variando de baixa, média e alta, sendo estimada em função da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (40 cm), resultando em valores para CAD de 24, 48 e 72 mm, para os tipos de solo I, II e III, respectivamente (Queiroz *et al.*, 2021) como mostra a (Tabela 2). Também foi avaliado a CAD média, sendo esta, a média das produtividades estimadas nas CADs de 24, 48 e 72 mm.

**Tabela 2.** Parâmetros utilizados para análise das CAD's relacionadas ao solo.

Solos	Tipo I	Tipo II	Tipo III
<b>Capacidade de Retenção de Água</b>	Baixa	Média	Alta
<b>TA Teor de Argila</b>	$10\% \leq TA < 15\%$ Ou $TA \geq 15\%$ com $\Delta \geq 50$	$15\% \leq TA < 35\%$ com $\Delta < 50$	$TA \geq 35\%$
<b>AD/CAD</b>	$AD = 0,6 \text{ mm.cm}^{-1}$ $CAD = AD \times Pe$	$AD = 1,2 \text{ mm.cm}^{-1}$ $CAD = AD * Pe$	$AD = 1,8 \text{ mm.cm}^{-1}$ $CAD = AD * Pe$
<b>Tipos</b>	Neossolo Quartzarênico, Areias quartzosas e solos aluviais arenosos	Latossolos Vermelho - Amarelo e Vermelho - Escuro	Latossolos roxo, vermelho - escuro e vermelho - amarelo (com mais de 35% de argila); Cambissolos eutróficos e solos aluviais de textura média argilosa.

CAD - capacidade de armazenamento de água no solo e Pe - profundidade efetiva.

**Fonte:** Adaptado de MAPA (2018).

### Base de Dados

Tendo em vista a simulação de estimativa de produtividade da soja pelo modelo FAO, foram utilizados dados meteorológicos diários de temperatura média do ar (°C), insolação (horas) e precipitação (mm) obtidos da estação climatológica convencional do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no período de 2002 a 2022, do município de Chapadinha - MA.

Para a calibração, foram utilizados dados de produtividade em  $\text{kg ha}^{-1}$ , provenientes de testes de valor de cultivo e uso (VCUs) de 28 variedades de soja, sendo quatro convencionais e vinte e quatro transgênicas (Tabela 3). Os valores dos VCUs foram de no mínimo dois e no máximo três anos de teste realizados em campo, realizados na melhor época de semeadura (2020 a 2022), totalizando sessenta e três dados de produtividade em campo utilizados no processo de calibração.

**Tabela 3.** Cultivares de soja utilizadas na calibração do modelo FAO.

CULTIVAR	GMR	CM	VCU	CULTIVAR	GMR	CM	VCU
84i86RSF IPRO (DOMÍNIO)	8.4	105	3522	PAMPEANA 60 RR	9.2	115	4067
TMG2383IPRO	8.4	110	3397	PAMPEANA 9410 IPRO	9.4	130	4259
TMG 2379 IPRO	8.4	100	3395	PAMPEANA 80 RR	9.5	130	3881
81i81RSF IPRO (EXTREMA)	8.4	100	3279	PAMPEANA 9510 IPRO	9.5	130	4218
80i82RSF IPRO (OLIMPO)	8.6	100	4274	PAMPEANA 40 RR	9.6	125	3468
M8644IPRO	8.6	100	4238	BRS Perola	8.8	110	3669
FTR 4280 IPRO	8.6	100	3605	BRS Tracajá	9.2	115	3930
NS8383RR	8.6	110	3903	BRS Carnaúba	9.6	130	3214
FTR 3190 IPRO	9.0	100	3754	BRS Sambaíba	9.3	115	3536
CZ 48B08 I2X	8.0	100	4379	BRS 8990RR	8.8	110	3746
PAMPEANA 90 RR	9.0	110	4210	BRS 333RR	9.4	125	3583
FTR 3191 IPRO	9.0	110	3991	BRS SambaíbaRR	9.3	115	3400
FTR 4288 IPRO	9.0	110	3329	BRS 333RR	9.4	125	3180
PAMPEANA 9310 IPRO	9.2	110	4451	BRS 270RR	9.2	120	3300

GMR – Grau de maturidade relativo; CM – Ciclo médio (Dias); VCU – Valor de cultivo e uso (kg ha<sup>-1</sup>).

Fonte: MAPA (2023).

### Avaliação do Modelo

O desempenho do modelo foi avaliado por meio dos seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE, sigla em inglês), erro absoluto médio (MAE, sigla em inglês), viés médio (MBE, sigla em inglês), índice de concordância de Willmott (d) (Willmott, 1982) e coeficiente de concordância (c) (Camargo; Sentelhas, 1997), conforme as Equações 6 a 10.

Equação 6:

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

Equação 7:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N}$$

Equação 8:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N P_i - O_i}{N}$$

Equação 9:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right]$$

Equação 10:

$$c = \sqrt{R^2} \times d$$

em que:

$P_i$  são os valores estimados;

$O_i$  os valores observados, e  $O$  à média dos valores observados;

$N$  = número de observações.

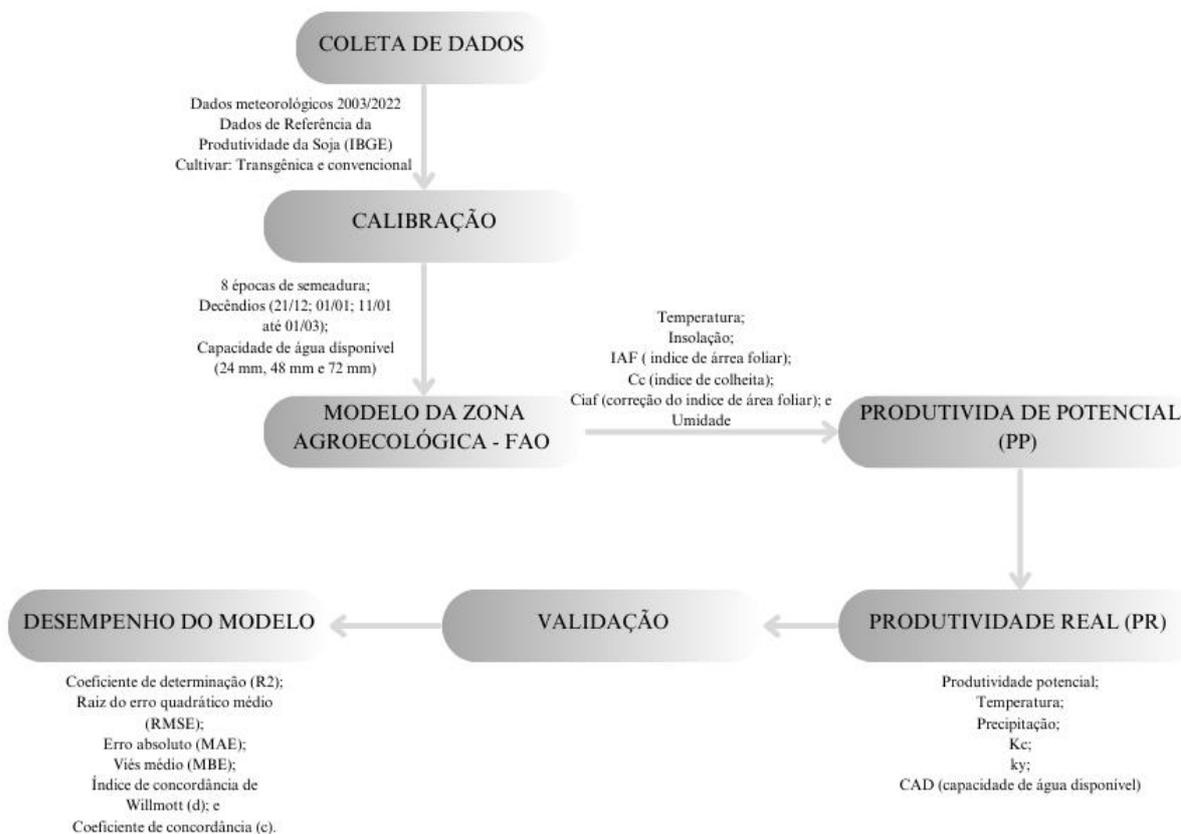
O critério adotado para interpretar o desempenho pelo índice “c” está apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4.** Critério de interpretação do desempenho do modelo FAO na estimativa da produtividade da soja, pelo índice “c”.

Valor de “c”	Desempenho
> 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	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

**Fonte:** Camargo e Sentelhas (1997).

A Figura 2 apresenta um fluxograma detalhado com passo a passo dos dados utilizados e de como foi realizada a calibração e a validação do modelo.

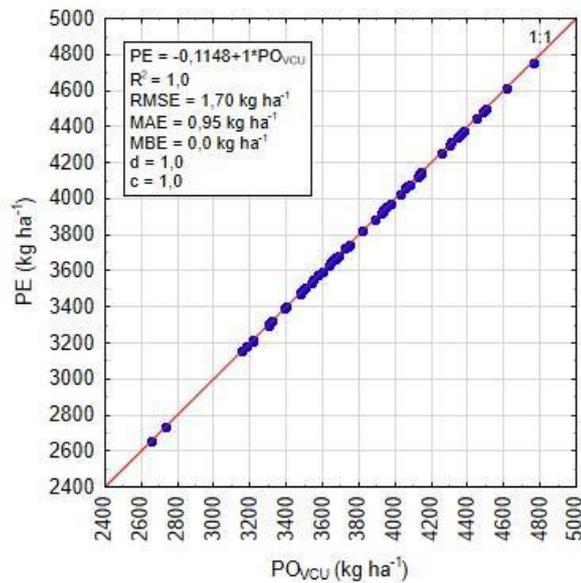


**Figura 2:** Fluxograma representando materiais e métodos.  
**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta observações quanto à calibração do modelo FAO entre os valores de produtividade observada ( $PO_{VCU}$ ) e estimados (PE). Verificou-se uma  $PO_{VCU}$  média de  $3582,7 \text{ kg ha}^{-1}$  e PE média de  $3581,6 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Analisando todo o conjunto de dados estimados e observados, constata-se que o modelo apresentou excelente ajuste aos dados, verificando que a dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 reforça os parâmetros de desempenho, sem tendências de superestimativa ou subestimativa, apresentando exatidão (coeficiente angular = 1,0) e alta precisão ( $R^2 = 1,0$ ), explicando 100% da variabilidade dos dados observados.



**Figura 3.** Relação entre a produtividade estimada pelo modelo FAO (PE) e produtividade observada em campo (PO<sub>VCU</sub>) na região de Chapadinhã.

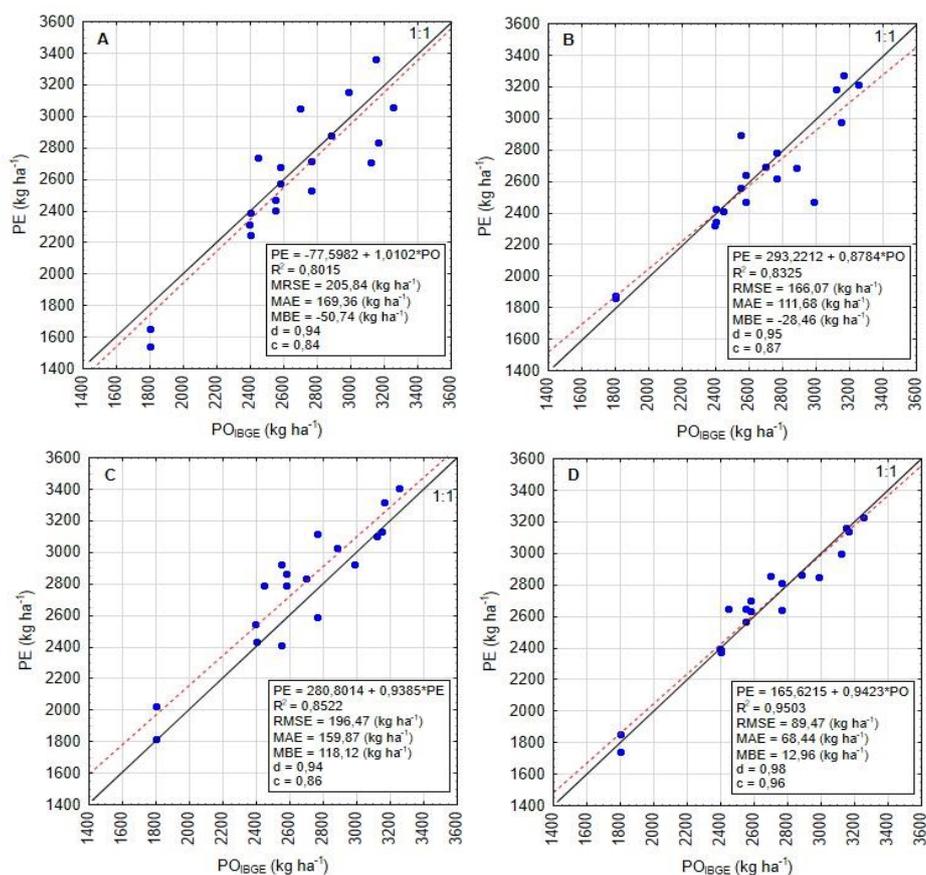
**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Com relação ao desempenho estatístico do modelo FAO para a estimativa da produtividade limitada pela disponibilidade hídrica, verificou-se baixíssimos valores de erros RMSE (1,70 kg ha<sup>-1</sup>) e MAE (0,95 kg ha<sup>-1</sup>), indicando que o modelo FAO apresentou um ajuste exato aos dados observados, sem presença de tendência (MBE = 0,0 kg ha<sup>-1</sup>). Além disso, o máximo valor do índice de concordância de Willmott (d = 1,0) e coeficiente de concordância classificado como ótimo (c = 1,0) indica exata concordância dos dados estimados e observados, confirmando a eficácia do método.

Após a calibração do modelo FAO nas condições edafoclimáticas de Chapadinhã os parâmetros médios de correção da parte colhida (Cc) e do índice de área foliar (C<sub>IAF</sub>) para estimativa da PP, na etapa de validação, foram de 0,3495 e 0,4485, respectivamente. Corroborando com estes novos valores de ajuste, Sentelhas *et al.* (2015) avaliando a lacuna de produtividade da soja em determinadas localidades do Brasil, adotaram valores de Cc e C<sub>IAF</sub> de 0,33 e 0,4696, valores muito próximos dos encontrados neste trabalho.

Na Figura 4 é possível verificar a avaliação do modelo para as quatro condições simuladas na região de Chapadinhã. A produtividade média observada do IBGE (PO<sub>IBGE</sub>), para a série avaliada (2002/03-2020/21), foi de 2645,8 kg ha<sup>-1</sup> e para as produtividades estimadas pelo modelo FAO nas CADs de 24, 48, 72 mm e CAD média, foram de 2595,1, 2617,4, 2763,9 e 2658,7 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Verifica-se nas Figuras 4A, 4B, 4C e 4D a relação entre a produtividade limitada pela disponibilidade de água estimada pelo modelo FAO e a produtividade observada da soja, segundo dados do IBGE, bem como, os indicadores estatísticos RMSE, MAE, MBE, e os índices “d” e “c”. Com relação a precisão ( $R^2$ ), percebe-se que o modelo explica 80,15, 83,25, 85,22 e 95,03% da variabilidade dos dados do IBGE para as quatro condições simuladas da produtividade da soja.



**Figura 4.** Relação entre a produtividade estimada pelo modelo FAO (PE) para as CADs de 24 (A), 48 (B), 72 mm (C) e CAD média (D) e produtividade observada do IBGE (PO<sub>IBGE</sub>) na região de Chapadinha.

**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

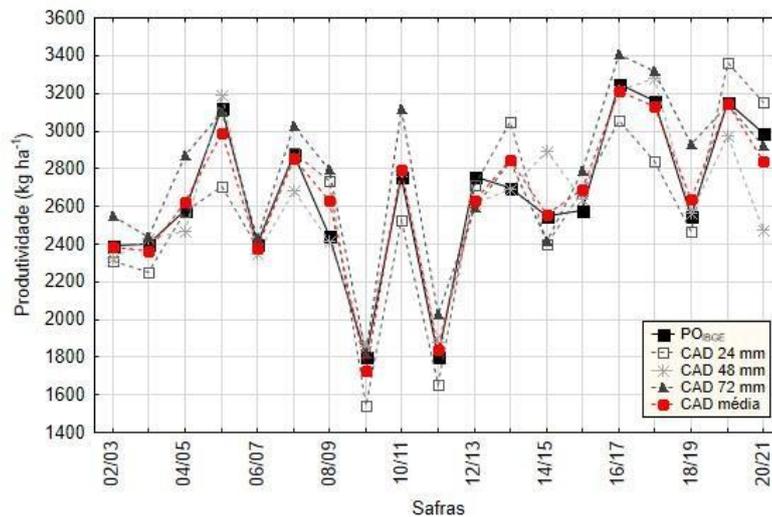
A acurácia do modelo FAO para as quatro simulações (Figura 4A, 4B, 4C, 4D) de produtividade estimada, demonstrada pelos índices “d” variando de 0,94 a 0,96, indica que houve uma alta concordância entre a PE e a PO<sub>IBGE</sub>. Essa boa exatidão observada para todas as avaliações, também é verificada pelo índice de concordância “c” classificando o desempenho do modelo, sendo muito bom (c = 0,84) para CAD 24 mm e ótimo (c = 0,87, 0,86 e 0,96) para as CADs 48, 72 mm e CAD média, respectivamente.

Analisando o desempenho estatístico do modelo FAO nas condições de avaliação (CAD 24, 48, 72 mm e CAD média) para estimativa da PE, observam-se baixos valores dos erros RMSE (205,84; 166,07; 196,47 e 89,47 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) e MAE (169,36; 111,68; 159,87 e 68,44 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), indicando que o modelo apresenta bom ajuste, fato passível de ser confirmado através dos valores do MBE (-50,74; -28,46; 118,12; 12,96 kg ha<sup>-1</sup>). Ou seja, o modelo é bem coerente com os dados do IBGE, indicando uma baixa subestimativa para as avaliações na CAD 24 e 48 mm (Figura 4A e 4B) e baixa superestimativa na CAD 72 mm e CAD média (Figura 4C e 4D).

De acordo com os valores do RMSE, as mesmas podem ser consideradas excelentes, uma vez que esse valor não ultrapassou os 10% de erro (Jamieson *et al.*, 1991, Sentelhas *et al.*, 2015) também obtiveram bons resultados no processo de calibração do mesmo modelo para condições brasileiras, apresentando desempenho muito bom, com boa precisão ( $R^2 = 0,76$ ) e exatidão ( $d = 0,87$ ). Com relação ao MAE foi verificado um valor de 284 kg ha<sup>-1</sup>, com leve superestimativa, com MBE de 7 kg ha<sup>-1</sup>. Oliveira *et al.*, (2012) após parametrização, calibração e retirada de tendência do modelo FAO nas condições edafoclimáticas da região do Triângulo Mineiro, constaram que o mesmo modelo apresentou ajuste satisfatório, com  $R^2 = 0,55$ ; RMSE = 4900 kg ha<sup>-1</sup>; MAE = 4000 kg ha<sup>-1</sup>; MBE = 0,00 kg ha<sup>-1</sup> e índice  $d = 0,80$ .

Como o MBE representa o erro médio da estimativa, e este por sua vez, indica uma subestimativa e ou superestimativa dos valores de produtividade estimado em relação aos valores observados do IBGE, adotou-se esses mesmos valores de MBE encontrados nas avaliações da PE, como procedimento para retirada dessas tendências, verificando-se uma nova distribuição da PE pelo modelo FAO na região de Chapadinha, como mostra a Figura 5.

Verifica-se na Figura 5 que após a retirada da tendência, a produtividade estimada, para todas as avaliações, acompanha o comportamento temporal da série histórica de dados de  $PO_{IBGE}$ , com destaque para a produtividade estimada na CAD 48 mm e CAD média, que performam melhor a variabilidade da  $PO_{IBGE}$ , mesmo observando anos com subestimativa e superestimativa da produtividade da soja.



**Figura 5.** Distribuição temporal das produtividades estimadas pelo modelo FAO sem tendência e da produtividade da região de Chapadinha (IBGE) de 2002/03 a 2020/21.

**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

A Tabela 5 apresenta os novos valores de desempenho estatístico do modelo após a retirada da tendência dos dados de produtividade estimada.

**Tabela 5.** Representação dos índices estatísticos das figuras 3A, 3B, 3C e 3D, da relação entre a produtividade estimada pelo modelo FAO (PE) para as CAD de 24 (A), 48 (B), 72 mm (C) e CAD média (D) e produtividade observada do IBGE ( $PO_{IBGE}$ ) na região de Chapadinha.

CAD	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	MBE	d	c	Classificação
24	0,8015	199,49	159,99	0,00	0,94	0,84	Muito bom
48	0,8325	163,61	112,43	0,00	0,96	0,87	Ótimo
72	0,8522	157,00	131,97	0,00	0,96	0,89	Ótimo
Média	0,9503	88,53	69,53	0,00	0,99	0,96	Ótimo

CAD – Capacidade de armazenamento de água (mm); R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; RMSE – raiz quadrada do quadrado médio do erro (kg ha<sup>-1</sup>); MAE -erro absoluto médio (kg ha<sup>-1</sup>); MBE - viés médio (kg ha<sup>-1</sup>); d - índice de Willmot; c - índice de concordância.

**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Com relação aos indicadores de precisão (R<sup>2</sup>, c) e exatidão (d) do modelo, não houve alteração na performance após a retirada da tendência, permanecendo a mesma classificação para as quatro avaliações. Com relação aos erros (RMSE, MAE), demonstra que a variabilidade detectada antes do ajuste diminuiu levemente, quando se compara aos valores da Figura 4. O valor do MBE = 0 kg ha<sup>-1</sup> demonstra que, o modelo apresenta-se bem coerente com os dados de produtividade do IBGE.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A calibração e validação do modelo de Zona Agroecológica permitiram estimar suficientemente bem os valores de produtividade da cultura da soja penalizada em função do déficit hídrico relativo, nas quatro condições da capacidade de água disponível, para que os efeitos do clima possam ser verificados nos valores de produtividade observados.

O modelo pode ser aplicado para previsão de produtividade nas condições climáticas de Chapadinha e se apresenta como importante ferramenta para determinação das melhores épocas de semeadura, verificar cultivares de soja mais resistentes à déficits hídricos, estimar lacuna de produtividade explorável e analisar o risco climático da região. Assim, trabalhos futuros podem ser realizados para a calibração de um modelo generalista para diferentes regiões, com diferentes condições climáticas, abrindo um leque para novos trabalhos nesse âmbito.

## REFERÊNCIAS

ANDREA, Maria Carolina. da S.; BOOTE, Kenneth J.; SENTELHAS, Paulo C.; ROMANELLI, Thiago L. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264–273, 2018.

ARGENTA, Gilber.; SILVA, Paulo R. F.; BORTOLINI, Clayton G.; FORSTHOFER, Everton L.; MANJABOSCO, Eduardo A.; BEHEREGARAY NETO, Vasco. Resposta de híbridos simples de milho à redução do espaçamento entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 71-78, 2001.

BATTISTI, Rafael.; SENTELHAS, Paulo C.; PILAU, Gustavo F.; et al. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43 n. 3, 390 – 396, 2013.

BATTISTI, Rafael.; SENTELHAS, Paulo. C. Drought tolerance of Brazilian soybean cultivares simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, v.51, p.285-298, 2015.

BENEVIDES, Raiane.; STABACK, Daiane. Perfil locacional da soja: um estudo das Mesorregiões paranaenses para os anos de 2000, 2010 e 2020. **IGEPEC**, Toledo, v. 27, n. 2, p. 9-25. 2023.

BOOTE, Kenneth J. et al. The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, GY, Hoogenboom, G., Thornton, PK *Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*, vol 7. Springer, Dordrecht, p. 99–128, 1998.

BUSS, Ricardo. N., MENDANHA, José. F., SILVA, Daniel. M. da., SIQUEIRA, Glécio M. (2019). Infraestrutura logística de transporte e armazenagem da soja no estado do Maranhão – Brasil / Logistic infrastructure for soybean transportation and storage in Maranhão state – Brazil. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n 12, p. 31564-31580, 2019.

CAMARGO, Ângelo P.; SENTELHAS, Paulo C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 2 segundo levantamento, nov. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>

DROS, J. M. Administrando os avanços da soja: dois cenários de expansão do cultivo de soja na América do Sul. Amsterdã: **AIDEnvironment**, 2004. 71p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper**, Rome, Italy: 1979,33p

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Solos do Nordeste. Recife, 2006. Disponível em: [www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html](http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html) .

FARIAS, José R. B.; ASSAD, Eduardo D.; ALMEIDA, Ivan. R.; EVANGELISTA, Balbino A.; LAZZAROTTO, Cláudio.; NEUMAIER, Norman.; NEPOMUCENO, Alexandre L. Caracterização do risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FARIAS, José. R. B.; NEPOMUCENO, Alexandre. L.; NEUMAIER, Norman. Ecofisiologia da soja, (**Embrapa Soja. Circular técnica, 48**), 8 p. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

FEHR, Walter. R.; CAVINESS, Charles. Stages of soybean development. **Ames: Iowa State University of Science and Technology**, 11p. 1977 (Special Report, 80).

HANKS, John., RITCHIE, Joe.T. Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph No. 31. Agronomy Society of America, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, **Agricultural Systems**, Elsevier, vol 41(4), p. 526-527, 1991.

HSIAO, Theodore C., HENG, Lee., STEDUTO, Pasquale., ROJAS-LARA, Basilio., 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.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7832>.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Catálogo de Estações Convencionais. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>.

JAME, Y.W., CUTFORTH, W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 76, p. 9-19, 1996.

JAMIESON, Peter. D.; PORTER, John R.; WILSON, Derek R. A teste of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research**, v. 27, n. 4, p. 337-350, 1991.

KEATING, Brian. A., CARBERRY, Peter S. HAMMER, G. L. PROBERT, Mervyn E. ROBERTSON, Michael John. HOLZWORTH, Dean P. HUTH, Neil Ian. HARGREAVES, John N.G. MEINKE, Holger. HOCHMAN, Zvi. MCLEAN, Greg B.. VERBURG, Kirsten. SNOW, V. O. DIMES, John P. SILBURN, Mark. WANG, Enli. BROWN, Stuart D. BRISTOW, Keith L. ASSENG, Senthold. CHAPMAN, Scott C. SMITH, Christopher J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, ed. 3–4, p. 267–288, 2003.

LISZBINSKI, Bianca. B.; BRIZOLLA, Maria M. B.; PATIAS, Tiago. Z. Produção de soja: perspectivas sociais e ambientais a partir do olhar do produtor. *Geosul*, v. 36, n. 79, 2021.

LUZ, J. A. A. et al. Evolução da produção de soja no Piauí. In: Anais do XXXIX **Encontro nacional de engenharia de produção** (ENEGEP), 39, Santos/ SP. 2019.

MANOSSO, Fernando C. (2010) “A produtividade de soja, trigo e milho e suas relações com a precipitação pluviométrica no município de Apucarana-PR no período de 1968 a 2002”, *Geografia (Londrina)*, 14(1), p. 87–98.

MARIN, Fábio R.; LOPES-ASSAD, Maria L.; ASSAD, Eduardo D.; VIAN, Carlos. E.; SANTOS, Marcelo C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 1449–1455, 2008.

MONTEIRO, Leonardo A.; SENTELHAS, Paulo C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 3, p. 265-272, 2014.

MUNDSTOCK, Cláudio M.; THOMAS, André. L. SOJA: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, p. 31, 2005.

NÓIA JÚNIOR, Rogério. de S.; SENTELHAS, Paulo. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, n. August 2018, p. 140–151, 2019.

OLIVEIRA, R. A. et al. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando o método ZAE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.

PASSOS, Madilo. L. V.; ZAMBRZYCKI, Geraldo. C.; PEREIRA, Reginaldo. S. Balanço hídrico e classificação climática para uma determinada região de Chapadinha-MA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 4, p. 758766, 2016.

PENNING DE VRIES, P. K. T.; KROPFF, M. J.; TENG, P. S.; KIRK, G. J. D. Systems simulation at IRRI. IRRI Res. Pap. Ser. 151, Manila, Philippines, 1991.

PEREIRA, Antônio R.; ANGELOCCI, Luis R.; SENTELHAS, Paulo C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.

QUEIROZ, Raymyson. R. S. MENEZES, Ronaldo H. N., ROCHA, Danyelle R. da L. MOREIRA, Rayane . C. Cenário agrícola para o plantio da cultura do feijão caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] no estado do Maranhão baseado em projeções futuras de mudanças climáticas. **Revista Geama**, v. 7, n. 1, p. 04-14, 2021.

RAES, Dirk.; STEDUTO, Pasquale.; HSIAO, Theodore. C.; FERERES, Elias. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. **Main Algorithms and Software Description**. **Agronomy Journal**, v. 101, v. 3, p. 438–447, 2009.

RIBEIRO, Anderson. N. HABERLI JUNIOR, Caetano. Uso de meios digitais, capacidades de inovação e resultados do sojicultor no PR e MATOPIBA. **Quaestum**, v. 2, p. 1-14, 2021.

RODRIGUES, Osmar.; DIDONET, Agostinho. D.; LHAMBY, J. C. B.; BERTAGNOLLI, P. F.; LUZ, J. S. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 431-437, 2001.

ROLIM, Glauco. S.; SENTELHAS, Paulo. C.; UNGARO, Maria Regina G. Análise de risco climático para a cultura do girassol, em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, usando os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 91-102, 2001.

SANTOS, T. G. et al. Assessment of agricultural efficiency and yield gap for soybean in the Brazilian Central Cerrado biome. *Bragantia*, Campinas, v. 80, p. e1821, 2021.

SENTELHAS, Paulo. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

STEDUTO, Pasquale.; HSIAO, Theodore C.; RAES, Dirk.; FERERES, Elias. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 426–437, 2009.

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA - SIDRA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - Maranhão. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/maranhao>.

THORNTHWAITE, Charles. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, Charles. W.; MATHER, John. R. The water balances. Centerton, Drexel Institute of Technology-Laboratory of Climatology. **Publications in Climatology**, v. 8, n. 1, p. 104, 1955.

WILLMOTT, Clifford. J. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society, Boston, v. 63, p. 1309-1313, 1982.