

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA BACHARELADO

MARLISSON VIEIRA CASTELO BRANCO

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE E YIELD GAP DA SOJA CONSIDERANDO
AS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A REGIÃO DE GERAIS DE
BALSAS-MA**

SÃO LUÍS
2024

MARLISSON VIEIRA CASTELO BRANCO

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE E YIELD GAP DA SOJA CONSIDERANDO
AS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A REGIÃO DE GERAIS DE
BALSAS-MA**

Monografia apresentada ao Curso de
Agronomia Bacharelado do Centro de Ciências
Agrárias da Universidade Estadual do
Maranhão, como requisito para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador(a): Prof. Drº Ronaldo Haroldo
Nascimento de Menezes

SÃO LUÍS
2024

Castelo Branco, Marlisson Vieira

Estimativa de produtividade e Yield gap da Soja considerando as projeções de mudanças climáticas para a região de Gerais de Balsas-MA / Marlisson Vieira Castelo Branco. – São Luis, MA, 2024.

44 f

Monografia (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual do Maranhão, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Haroldo Nascimento de Menezes

1.MZA-FAO. 2. Glycine max. 3. RCP 4.5 e 8.5. I.Título.

MARLISSON VIEIRA CASTELO BRANCO

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE E YIELD GAP DA SOJA CONSIDERANDO
AS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A REGIÃO DE GERAIS DE
BALSAS-MA**


Monografia apresentada ao Curso de
Agronomia Bacharelado do Centro de Ciências
Agrárias da Universidade Estadual do
Maranhão, como requisito para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador(a): Prof. Drº Ronaldo Haroldo
Nascimento de Menezes

Aprovada em: 09/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Haroldo N. de Menezes – **Orientador**
Doutor em Meteorologia, área de concentração Agrometeorologia
Departamento/DEA/UEMA

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS WENDELL SOARES DIAS**
Data: 19/08/2024 12:29:46 -0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

M.e. Carlos Wendell Soares Dias – **Avaliador**
Especialista em Eng. Sanitária e Controle Ambiental, Mestre em
Agroecologia e Doutorando em Agroecologia pela UEMA
Nugeo



M.e. Jucivan Ribeiro Lopes - **Avaliador**
Graduado em Agronomia e Mestre em Agroecologia pela UEMA
Nugeo

SÃO LUÍS
2024

Aos meus pais, Constancia Januaria Vieira Neta e Esinaldo Oliveira Castelo Branco, pelo apoio e estrutura que me proporcionaram, permitindo-me seguir em frente e alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao divino, por me dar forças para superar todos os desafios desta caminhada.

Aos meus pais, Esinaldo Oliveira Castelo Branco e Constancia Januaria Vieira Neta, pela base sólida e pelo apoio contínuo em todos os momentos.

Ao meu orientador, Ronaldo Haroldo de Menezes, por sua orientação, paciência e por compartilhar seu vasto conhecimento, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À minha família, por acreditarem no meu potencial.

Aos meus amigos e colegas, pelo apoio/auxílio, trocas de conhecimento, pelas palavras de incentivo e pela compreensão durante os momentos de ausência.

Aos professores do curso de Agronomia, por transmitirem seus conhecimentos e contribuírem para o meu crescimento acadêmico.

À UEMA pelo suporte e pelas oportunidades oferecidas durante toda minha graduação.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

A Deusa da sorte só sorri para quem tem o faro certo.
(Jinpach Ego)

RESUMO

A agricultura, especialmente a sojicultura, é altamente dependente das condições climáticas. Este estudo tem como objetivo estimar a produtividade e o Yield Gap da soja, considerando os impactos de déficit hídrico e manejo agrícola na região de Balsas-MA, sob cenários climáticos atuais e futuros (RCP 4.5 e RCP 8.5). Utilizou-se dados da climatologia e projeções e o Modelo Sarrazon para calcular o balanço hídrico, para três períodos de plantio (outubro, novembro e dezembro) e seis classes de água disponível no solo (AD). Os cálculos de produtividade foram realizados com base no Modelo de Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO). Os resultados indicam que a produtividade potencial (PP) varia conforme a data de plantio, com maiores valores em dezembro. A produtividade atingível (PA) aumenta com a capacidade de retenção hídrica do solo, sendo maior em dezembro, mas inviabiliza o plantio da safrinha. No cenário atual, o Yield Gap climático (YGc) reflete perdas significativas de produtividade devido à limitação hídrica, com Eficiência Climática (EC) variando de 47,1% a 83,4%. O Yield Gap de manejo (YGm) é menor, sugerindo que práticas de manejo eficientes podem mitigar as perdas. Para os cenários futuros, a PP permanece sem muitas alterações, mas a PA diminui, especialmente no cenário RCP 8.5, devido ao aumento das restrições hídricas. O YGc é maior nos cenários futuros, destacando a crescente importância das práticas de manejo agrícola e a adaptação às mudanças climáticas. Conclui-se que a disponibilidade hídrica é crucial para a produtividade da soja e que estratégias específicas de manejo podem amenizar os impactos negativos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: MZA-FAO. *Glycine max*. RCP 4.5 e 8.5

ABSTRACT

Agriculture, particularly soybean cultivation, is highly dependent on climatic conditions. This study aims to estimate soybean productivity and the Yield Gap by considering the impacts of water deficit and agricultural management in the Balsas-MA region under current and future climatic scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5). Climatic data, projections, and the Sarrazon Model were used to calculate the water balance, considering three planting periods (October, November, and December) and six soil available water classes (AWC). Productivity calculations were based on the FAO Agroecological Zone Model (FAO-AEZ). Results indicate that potential productivity (PP) varies according to planting date, with higher values observed in December. Attainable productivity (AP) increases with the soil's water retention capacity, peaking in December, but making the second crop planting unfeasible. In the current scenario, the climatic Yield Gap (YGc) reflects significant productivity losses due to water limitations, with Climatic Efficiency (CE) ranging from 47.1% to 83.4%. The management Yield Gap (YGm) is smaller, suggesting that efficient management practices can mitigate losses. For future scenarios, PP remains relatively unchanged, but AP decreases, particularly under RCP 8.5, due to increased water restrictions. YGc is higher in future scenarios, emphasizing the growing importance of agricultural management practices and adaptation to climate change. The study concludes that water availability is crucial for soybean productivity and that specific management strategies can alleviate the negative impacts of climate change. Moreover, future scenarios project increased water limitations and a reduction in AP, highlighting the need for climate change adaptation.

Keywords: MZA-FAO, *Glycine max*, RCP 4.5 e RCP 8.5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Matopiba e unidades da federação, no bioma cerrado.....	16
Figura 2.	Forçante radiativa dos RCPs.....	19
Figura 3.	Localização geográfica da região homogênea de precipitação de Gerais de Balsas.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados geográficos dos municípios da região dos Gerais de Balsas, adaptado de IBGE (2010).....	23
Tabela 2	Variáveis de entrada no Modelo SARRAZON.....	25
Tabela 3	Parâmetros de solo utilizado para simulação do balanço hídrico.....	25
Tabela 4	Características da cultura.....	26
Tabela 5	Coeficientes de crescimento (Kc).....	26
Tabela 6	Produtividades, quebras e eficiências considerando o cenário atual para cultura da soja com plantio em outubro, novembro e dezembro.....	32
Tabela 7	Produtividades, quebras e eficiências considerando o cenário 4.5 para cultura da soja com plantio em outubro, novembro e dezembro.....	34
Tabela 8	Produtividades, quebras e eficiências considerando o cenário 8.5 para cultura da soja com plantio em outubro, novembro e dezembro.....	35

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Significado
PP	Produtividade Potencial
PPBp	Produtividade Bruta de Matéria Seca para uma Cultura Padrão
Ciaf	Correção para o Índice de Área Foliar
Cr	Correção da Taxa de Respiração
Cc	Correção para a Parte Colhida
NDA	Número do Dia do Ano
U%	Umidade (porcentagem)
IAF	Índice de Área Foliar
PPBc	Produtividade no Período de Céu Claro
PPBn	Produtividade no Período de Céu Nublado
Qo	Radiação Solar Extraterrestre
n	Número de Horas Efetivas de Brilho Solar
N	Fotoperíodo
cTc	Correção para o Efeito da Temperatura em Condições de Céu Claro
cTn	Correção para o Efeito da Temperatura em Condições de Céu Nublado
T	Temperatura Média do Ar
Ø	Latitude
δ	Declinação Solar
D	Distância Relativa Terra-Sol
Hn	Ângulo Horário do Nascer do Sol
PA	Produtividade Atingível
Ky	Coeficiente de Sensibilidade ao Déficit Hídrico
ETr	Evapotranspiração Real da Cultura da soja
ETc	Evapotranspiração Potencial da Cultura da soja
PR	Produtividade Real
EC	Eficiência Climática
EA	Eficiência Agrícola
YGw	Yield Gap por Déficit Hídrico
YGm	Yield Gap por Manejo Agrícola
W/m ²	Watts por metro quadrado
kg/ha	quilogramas por Hectares
PMP	Ponto de murcha permanente
CC	capacidade de campo
ZARC	Zoneamento agrícola de risco climático
MZA	Modelo da Zona Agroecológica
ETr	Evapotranspiração real
ETc	Evapotranspiração da máxima cultura

ppm	Parte por milhão
Pe	Profundidade efetiva sistema radicular
CAD	Capacidade de agua disponível
AD	Agua disponível
ISNA	Índice de satisfação e necessidade de agua
RCP	Trajetórias de Concentração Representativa
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
BH	Balanço Hidrico
Kc	Coeficiente de crescimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 Origem e importância econômica da soja	14
3.1.1 Soja no maranhão	15
3.2 Mudanças climáticas	17
3.2.1 Projeções de mudanças climáticas.....	17
3.2.2ModeloEta-HadGEM2	18
3.3 Balanço Hídrico	20
3.4 Classes AD do solo	21
3.5 Modelo MZA-FAO e Yield gap.....	21
4. PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS	23
4.1 Dados observados e local de pesquisa	23
4.2 Dados de Projeções Climáticas	24
4.3 Balanço Hídrico da soja.....	25
4.4 Estimativa de produtividade	27
4.4.1 Produtividade potencial	27
4.4.2 Produtividade Atingível	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Indicadores de Produtividade: Cenário Atual	29
5.2 Indicadores de Produtividade: Cenário Futuro	33
6. CONCLUSÃO	36
7. REFERENCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max L.*) ocupa um papel fundamental na economia mundial, sendo cultivada em quase todo o globo. Devido à sua importância e ao cultivo intensivo, a soja destaca-se como uma das principais culturas do agronegócio mundial, tendo no Brasil um papel de liderança entre as commodities (BISCAIA & BERTACI, 2022). Com a expansão da cultura, o Brasil vem se consolidando como um dos maiores produtores de soja, com a região conhecida como MATOPIBA, que abrange partes dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, ganhando destaque como a principal fronteira agrícola para novos investimentos. A região, que se tornou um foco estratégico para o agronegócio brasileiro, está impulsionando a expansão da produção de soja no país, contribuindo significativamente para a sua posição no mercado mundial (SPYRIDES, 2020)

Contudo o aumento da produtividade da soja está sujeito a riscos devido às variações climáticas. Pesquisas indicam que as projeções climáticas sinalizam impactos significativos na produtividade. Esses impactos podem ser agravados por fenômenos atmosférico-oceânicos associados às variações climáticas, que se tornam fatores limitantes para altos rendimentos, principalmente devido ao aumento da temperatura do ar e mudanças nos padrões de precipitação, que afetam diretamente o desenvolvimento da cultura e consequentemente a quebra de produtividade. (NÓIA JÚNIOR & SENTELHAS, 2019; SPYRIDES, 2020)

No contexto da agricultura moderna, que está cada vez mais voltada para as demandas do mercado e para a aplicação de tecnologias avançadas e pesquisas, duas ferramentas/tecnologias se destacam como fundamentais para o conhecimento dos riscos climáticos associado às culturas que participam na otimização da produção agrícola são: o Zoneamento Agrícola de Risco Climático e os modelos de simulação de produtividade.

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático é uma ferramenta técnico-científica que avalia a variabilidade climática local, para determinar a aptidão de uma região para o cultivo de determinadas culturas. Ele identifica a melhor época para semear, correlacionando o ciclo das culturas com o tipo de solo e utilizando o balanço hídrico para minimizar as quebras de safra, alinhando os períodos de maior exigência hídrica das culturas com as fases de maior disponibilidade de água e menor risco de estiagens (JANUARIO et al., 2018).

Por outro lado, os modelos de simulação de produtividade são essenciais para estimar o "yield gap" (lacuna de produtividade), que permite distinguir diferentes níveis de produtividade e quantificar as perdas causadas por déficit hídrico e práticas agrícolas inadequadas. Esses

modelos fornecem dados valiosos para a tomada de decisões, contribuindo para a eficiência e competitividade no agronegócio (SENTELHAS et al., 2015; SANTOS et al., 2021). Juntas, essas ferramentas oferecem uma abordagem integrada para maximizar a produtividade agrícola e mitigar riscos climáticos.

Sendo assim, o presente trabalho se propõe estimar os níveis de produtividade agrícola da cultura da soja e o yield gap ocasionados por déficit hídrico e por manejo agrícola para projeções climáticas futuras e cenário atual considerando as seis classes de água disponível.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar a produtividade agrícola e o Yield Gap por déficit hídrico e manejo agrícola da cultura da soja na região produtora de Gerais de Balsas-MA, para o cenário atual e projeções de mudanças climáticas para as seis classes de AD do solo.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar os diferentes níveis de produtividade agrícola por datas de plantio e classes de AD;
- Analisar os níveis de eficiência agrícola considerando o cenário climático atual para cada classe de AD do solo;
- Analisar os níveis de eficiência climática considerando o cenário climático atual e projeções futuras para cada classe de AD do solo;
- Determinar o Yield Gap por déficit hídrico e manejo agrícola para as classes de AD do solo

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Origem e importância econômica da soja

O cultivo da soja (*Glycine max*) teve suas origens no norte da China, resultante do cruzamento e subsequente domesticação de duas espécies selvagens de soja, o cultivo se iniciou no Ocidente no século XX, inicialmente como soja forrageira nos Estados Unidos em 1940, e posteriormente, a soja passou a ser cultivada para a produção de grãos. No Brasil, o cultivo da soja começou na Bahia, passando por São Paulo e Rio Grande do Sul, onde a cultura encontrou uma melhor adaptação devido às condições de alta altitude da região, que eram semelhantes às condições dos Estados Unidos, de onde as cultivares foram importadas. Atualmente, graças ao

melhoramento genético, a soja é cultivada em quase todo o território brasileiro, adaptando-se às diversas condições climáticas (SANTOS, 2021).

Com a consolidação da soja principalmente na região do Cerrado em 40 anos de cultivo de soja, a produção aumentou quase sete vezes, enquanto a área cultivada quadruplicou. Na safra 2018/19, a produção brasileira alcançou 115 milhões de toneladas, em uma área cultivada de 35,8 milhões de hectares, com produtividade média de 3.206 kg ha⁻¹ (SILVA et al., 2022)

Atualmente, a soja é considerada a principal cultura do agronegócio brasileiro, utilizada para diversas finalidades no mercado interno e externo. Devido à sua variabilidade de uso, a soja apresenta um valor econômico elevado tanto a nível nacional quanto internacional. No cenário mundial, o Brasil superou os Estados Unidos, tornando-se o maior produtor de soja. Na safra 2022/2023, a produção brasileira de soja alcançou um recorde estimado de 153,5 milhões de toneladas, com uma área plantada de 43,4 milhões de hectares (CONAB, 2023).

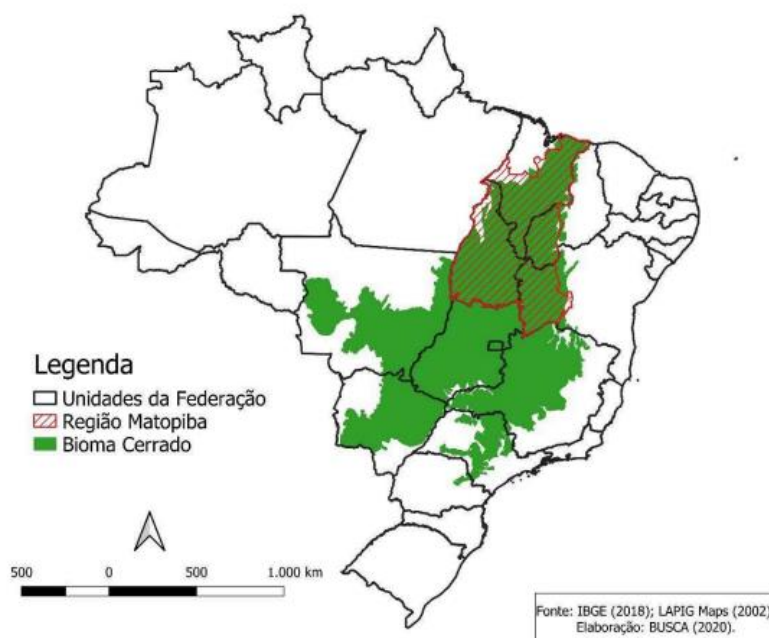
Estima-se que em 2050, a população mundial alcançará aproximadamente 10 bilhões de pessoas. Com esse crescimento populacional, será necessário aumentar a produção de alimentos entre 50% a 70% para atender à demanda crescente por alimentos, energia e renda em muitos países. Esse aumento se deve à mudança na dieta, onde carboidratos estão sendo substituídos por proteínas (carne). Para aumentar a produção, existem duas abordagens principais: expandir a área cultivada ou melhorar a produtividade das áreas já cultivadas. Ao expandir de área agrícola tem-se uma alternativa para o aumento da produção de alimentos, entretanto, a adoção dessa medida gera grande impacto ambiental e a migração para locais com menor aptidão ao cultivo, e maior risco climático ou então em áreas florestais. Outra alternativa seria aumentar a produtividade, pela redução da lacuna de produtividade, através da intensificação da área agricultável atual, aumentar a produtividade, com eficiência no uso de recursos e reduzindo o impacto ambiental (RICHTER, 2021).

3.1.1 Soja no maranhão

O agronegócio no estado do Maranhão, desenvolveu-se nos últimos anos, por conta principalmente de áreas de cerrado aptas à agricultura, transformando-se em importante região agrícola na produção de grãos, com destaque a cultura da soja, que está em crescente expansão (SOUZA, et al., 2024). De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção de soja no estado do Maranhão cresceu 5,5%, atingindo 3,77 milhões de toneladas na safra 2022/2023. Esse crescimento é atribuído às boas expectativas de rendimento dos grãos e à expansão das áreas de plantio (CONAB, 2023).

O Maranhão faz parte da região do MATOPIBA, uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil, como demonstrado na Figura 1. A microrregião dos Gerais de Balsas foi a primeira área do Maranhão a adotar o cultivo de soja nos moldes da agricultura científica globalizada, assumindo um papel de destaque no processo de regionalização produtiva (CASTILLO, 2021). No sul do Maranhão, a cadeia produtiva da soja apresenta resultados notáveis. Durante a safra de 2013/2014, a produção de soja atingiu 1,6 milhão de toneladas, representando 20% da produção de Matopiba, com uma área plantada de 580 mil hectares e uma produtividade média de 2.752 kg/ha. No município de Balsas, a produção de soja saltou de 152 mil toneladas em 2000 para 457 mil toneladas em 2014, posicionando Balsas como o terceiro maior município produtor de soja na região do Matopiba. Em 2019, o município produziu 619.997 toneladas, e em 2020, a produção estadual de soja alcançou 3,1 milhões de toneladas, um crescimento de 7,5% em relação à safra anterior, impulsionado pelo aumento significativo do rendimento médio, que atingiu 3,2 mil kg/ha (ESPÍNDOLA, 2015; IMESC, 2020; CRUZ; SANTOS, 2022)

Figura 1: Matopiba e unidades da federação, no bioma cerrado



Fonte: Castillo (2021)

3.2 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas atuais, causadas por atividades humanas, estão se intensificando a uma velocidade sem precedentes nos últimos 2 mil anos. Essas mudanças trazem consequências graves para a Terra e a humanidade, como o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, incluindo tempestades, secas severas e ondas de calor. Desde 1950, a maioria das áreas continentais tem enfrentado um crescimento desses eventos, que deverá piorar nas próximas décadas, especialmente se a temperatura média global subir 4,0°C em relação ao período de 1850-1900, o que poderia aumentar em até nove vezes a ocorrência de eventos extremos em algumas regiões (IPCC AR6, 2021).

Segundo Alpino et al. (2022), no início dos anos 1990, o número de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas, inundações e tempestades, dobrou, com uma média anual de 213 ocorrências entre 1990 e 2016. Foram identificados diversos riscos associados a essas mudanças: aumento da variabilidade das precipitações, resultando em inundações e secas mais frequentes e intensas; alterações no escoamento dos rios; redução na produtividade agrícola; elevação da temperatura global entre 1,8°C e 4°C; mudanças na composição do solo; e modificações nos ciclos de vetores de doenças, afetando a saúde pública.

Ainda de acordo com Alpino et al. (2022) essas mudanças climáticas podem causar riscos à Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) por meio de reduções na disponibilidade de alimentos, acesso, utilização e estabilidade do sistema alimentar, o que, combinado com a alta demanda, eleva os preços dos alimentos. No ano de 2017, registrou-se um aumento de 25% da fome aguda e crônica no mundo em relação aos dois anos anteriores, devido principalmente a fatores climáticos, como o aumento das secas.

Perdas de produtividade relacionadas a episódios de secas ocorreram em 75% da área global destinada à agricultura, e os efeitos combinados de estresse térmico e hídrico reduziram a produtividade média global de milho, soja e trigo em 11,6%, 12,4% e 9,2%, respectivamente (IPCC-WGII, 2022; PEREIRA et al., 2023)

3.2.1 Projeções de mudanças climáticas

Os Modelos Climáticos Globais (MCGs) são amplamente utilizados para resolver processos físicos na atmosfera através de parametrizações matemáticas avançadas, visando caracterizar os principais sistemas meteorológicos em grande escala que influenciam o clima global. Contudo, devido à abrangência planetária desses modelos, eles apresentam baixa resolução espacial, dividindo o globo em quadrículas de aproximadamente 250 km ou mais.

Essa resolução limitada dificulta a detecção da variabilidade climática em áreas específicas, especialmente na região tropical, como o Nordeste do Brasil (COSTA et al., 2020)

Para projeções regionais, a eficácia dos modelos globais na simulação da temperatura e precipitação é limitada, especialmente quando se trata de implementar medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, devido a problemas de escala espacial. Para enfrentar esse desafio, é necessário utilizar modelos regionais com maior resolução. No Brasil, o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) tem avaliado e aplicado Modelos Regionais específicos para a América do Sul, o Brasil e algumas regiões específicas do país. Geralmente, esses modelos são adaptados a partir de modelos globais de simulação climática, aumentando a resolução por meio da redução da escala (métodos de downscaling). (BERLATO; CORDEIRO, 2018).

3.2.2 Modelo Eta-HadGEM2

Como mencionado anteriormente, os modelos climáticos são as principais ferramentas para projetar e analisar cenários de mudanças climáticas. Devido à resolução espacial, os modelos climáticos globais (MCGs) podem não ser adequados para representar escalas regionais. Nestes casos, é usual a utilização de técnicas de regionalização, que envolvem aplicação de condições de contorno oriundas de MCGs em modelos climáticos regionais (MCR) (BILLERBECK; MELLO JÚNIOR, 2019).

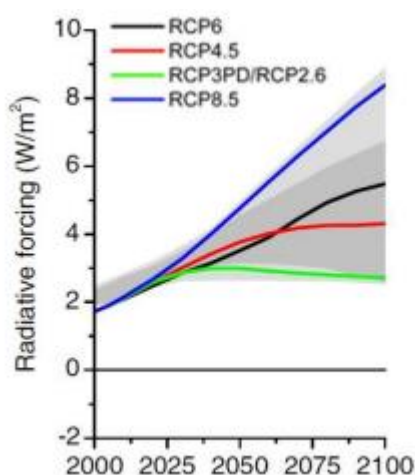
O modelo regional ETA, vem sendo utilizado pelo CPTEC/INPE desde 1996, e tem apresentado boa concordância com as observações climáticas disponíveis para a América do Sul. Este modelo possui versões com resolução horizontal de 5 km para a região sudeste, e de 20 km e 40 km para a América latina. O modelo ETA-INPE utiliza condições de contorno do modelo climático global HadGEM2-ES a partir de cenários RCP4.5 e RCP8.5. O período histórico simulado é de 1961 a 2005, enquanto as projeções climáticas estão disponíveis de 2006 a 2099 para os mesmos cenários (BILLERBECK; MELLO JÚNIOR, 2019).

3.2.3 Cenários RCP 4.5 e 8.5

Os RCP, Trajetórias de Concentração Representativa, em tradução livre, são cenários expressos em W/m^2 e definidos como conjuntos consistentes de projeções dos componentes da forçante radiativa (a mudança no equilíbrio entre a radiação de entrada e saída para a atmosfera causada, principalmente, por alterações na composição atmosférica) que se destinam a servir como entrada para a modelagem climática, com diferentes concentrações de CO_2 (MEIRA, 2020).

Os RCP são divididos em quatro cenários, os quais são identificados por sua forçante radiativa no ano 2100 em relação a 1759. O primeiro cenário, RCP 2.6, representa um cenário de mitigação rigoroso cuja forçante radioativa possui um nível muito baixo de forçamento radiativo, 2.6 W/m²; os cenários intermediários, RCP 4.5 e RCP 6.0, são de estabilização com forçantes radiativas de 4.5 e 6.0 W/m² respectivamente; e por fim, o RCP 8.5 que representa um cenário mais extremista com altas emissões de CO², com forçante radiativa de 8.5 W/m². Esses cenários (RCP) foram desenvolvidos com uso de Modelos de Avaliação Integrados (IAM), que incluem componentes econômicos, demográficos, energéticos e climáticos (MEIRA, 2020).

Figura 2: Forçante radiativa dos RCPs



Fonte: Van Vuuren et. al (2011)

Entre os cenários, o RCP4.5 é considerado um cenário realista, com alta probabilidade de que a humanidade siga o curso de seu desenvolvimento indo ao encontro dos pressupostos inerentes a esse cenário. Os cenários realistas preveem estabilização nas emissões globais de gases de efeito estufa. O RCP4.5 prevê a estabilização da forçante radiativa em 4,5 W/m² aproximadamente no ano de 2050, permanecendo nessa condição até o final do século, com aproximadamente 650 ppm de CO². Nesse cenário, o forçamento radiativo é definido em termos de um conjunto de seis gases de efeito estufa, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆), além da influência do monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), e ainda considera a influência de aerossóis de enxofre e de carbono negro e orgânico (ALMEIDA et al., 2021).

Como os RCPs são baseados em cenários, cada um irá refletir de forma diferente um conjunto de premissas socioeconômicas. O RCP4.5 é um cenário de estabilização, portanto, pressupõe a imposição de políticas de mitigação de emissões (ALMEIDA et al., 2021). Por outro lado, o cenário RCP 8.5 projeta um futuro com crescimento contínuo da população e desenvolvimento tecnológico lento, com acentuadas emissões de CO₂. Este cenário é sombrio, o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito estufa, sendo consistente com uma política que não priorizará a redução das emissões, com uma forte dependência de combustíveis fósseis (QUEIROZ et al., 2021).

3.3 Balanço Hídrico

O balanço hídrico caracteriza-se pela interação entre o sistema solo-água-planta-atmosfera, considerando como base as entradas e saídas da água neste sistema. A dinâmica do sistema varia em função da disponibilidade de água no solo, das características do solo, da demanda evaporativa da atmosfera e da capacidade da cultura em extrair a água do solo (ARMOA BÁEZ, 2020). A estimativa do Balanço Hídrico é fundamental para o sucesso de um empreendimento agrícola. Pois é a partir do balanço hídrico que irá se identificar possíveis longos períodos de déficits hídricos acumulados no solo, mostrando a necessidade de reposição hídrica para desenvolvimento dos cultivos e também conseguir gerenciar os recursos hídricos (DA SILVA ABREU; HERNANDEZ, 2021; DE VILLA et al., 2022;).

Os dados obtidos a partir do balanço hídrico têm sido amplamente utilizados em diversas áreas do conhecimento, como na classificação climática, caracterização hidrológica, planejamento agrícola e estudos de cenários de mudança climática. No campo da Agrometeorologia, essa ferramenta é de grande valor, especialmente para a gestão eficiente dos recursos hídricos, o que é essencial na agricultura moderna (DOURADO-NETO et al., 2010; CASSETARI; DE QUEIROZ, 2020).

Em cenários de mudanças climáticas que incluem redução de chuvas e aumento da temperatura do ar, espera-se que o conteúdo de água do solo diminua, afetando as taxas de evapotranspiração. Essa mudança pode resultar na modificação do balanço hídrico. Nesse sentido, estudos com simulação de cenários climáticos vêm sendo realizados no Brasil, principalmente, para avaliar os efeitos das mudanças climáticas na produtividade de culturas. A modelagem agrohidrológica, com uso de diversos modelos, tem sido utilizada para prever e simular os componentes do balanço hídrico e a dinâmica hídrica em diversos cenários. Portanto, modelos agrohidrológicos fornecem balanços hídricos e de energia detalhados, além

disso, permitem a simulação de cenários adotando diferentes estratégias de manejo do solo e em diversos cenários ambientais e climáticos (DE SOUZA BRITO, 2022).

Um dos modelos de simulação de balanço hídrico conhecidos é o Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos (SARRAZON) desenvolvido por Baron & Clopes (1996). Este modelo utiliza como parâmetro de entrada: Coeficiente da Cultura; Ciclo da cultura; Evapotranspiração Potencial; Análise de Sensibilidade; Profundidade Radicular e Capacidade de Água disponível (CAD) (DE SOUSA & VASCONCELLOS, 2003).

3.4 Classes AD do solo

A água disponível no solo (AD) é a quantidade de água entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A retenção de água pelo solo, fundamental para o crescimento das culturas, depende das suas características estruturais, físicas e mineralógicas. A capacidade de água disponível (CAD) é calculada com base na AD do solo e na profundidade do sistema radicular, representando o volume de água que pode ser retido e absorvido pelas raízes. Apesar de não considerar o equilíbrio dinâmico do sistema solo-planta-atmosfera, o conceito é amplamente aplicável (TEIXEIRA et al., 2021).

O Zarc (Zoneamento Agrícola de Risco climático) sofreu uma atualização, um novo sistema de classificação de solos que deixa de utilizar o tradicional sistema de solos “Tipo 1”, “Tipo 2” e “Tipo 3” e passa a adotar uma nova metodologia que define seis classes de água disponível (AD1, AD2, AD3, AD4, AD5, AD6). Nesse sistema, a classe de AD do solo é determinada com base na sua composição textural completa, ou seja, com os teores de areia, silte e argila. A água disponível (AD) do solo deve ser estimada para cada área de produção, a partir da sua composição textural determinada por análise de solo padrão. A estimativa é feita através do uso de uma equação (função de pedotransferência), devidamente ajustada para os distintos solos brasileiros. Com isso as 06ADs apresentam maior precisão nas estimativas de risco de déficit hídrico e uma melhor representação da realidade nos diferentes solos brasileiros em comparação aos três tipos utilizados anteriormente (EMBRAPA, 2024)

3.5 Modelo MZA-FAO e Yield gap

Os Modelos de simulação de produtividade são ferramentas que auxiliam o processo produtivo dos cultivos agrícolas afim de antecipar ou quantificar riscos e proporcionar a possibilidade de planejamento e tomada de decisões que minimizem as perdas de produção de toda a cadeia agrícola, seja por fator climático, genético, e de manejo. São ferramentas que possibilitam a criação de cenários através da variação de combinações dos diversos fatores que influenciam a produtividade das culturas, pois com a simulação é possível prever resultados

de ensaios e/ou ações que não podem ser obtidos experimentalmente ou em condições de campo. Os modelos empíricos empregam relações simples entre a produtividade e uma ou duas variáveis meteorológicas, já os modelos matemático-fisiológicos são capazes de explicar parte dos processos fisiológicos das plantas através de equações matemáticas, e os modelos mecanísticos tem a capacidade de explicitar todos os processos envolvidos na produção de matéria seca das culturas (SANTOS, 2021).

Porém, para a aplicação de modelos em larga escala na agricultura, o método do modelo matemático-fisiológico é uma das melhores alternativas, pois após calibrado devidamente, é capaz de apresentar resultados satisfatórios para um amplo conjunto de condições com um baixo número de variáveis de entrada (SANTOS, 2021). Um desses é o modelo matemático-fisiológico da Zona Agroecológica (MZA-FAO), sendo amplamente utilizado no Brasil em estudos aplicados.

O modelo Zona Agroecológica da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) estima a produtividade potencial (PP) que é obtida pela interação entre o genótipo, a radiação solar, o fotoperíodo e a temperatura do ar, variáveis que condicionam a fotossíntese bruta, a respiração de manutenção e, assim, a fotossíntese líquida, que representa a energia disponível para o crescimento da cultura. A fotossíntese bruta é estimada pelo somatório da fotossíntese obtida em condições de céu claro e de céu nublado, em função de coeficientes adimensionais relacionados à eficiência do processo fotossintético, associados ao tipo de cultura, ao índice de área foliar, ao metabolismo de fixação de CO_2 atmosférico, à radiação solar e ao fotoperíodo e à temperatura do ar (RODRIGUES, 2021).

Quando a PP é penalizada pela deficiência hídrica, o modelo passa a estimar a produtividade atingível (PA). A deficiência hídrica relativa ($1 - \text{ETr}/\text{ETc}$) é obtida pela relação entre a evapotranspiração real da cultura (ETr), estimada por meio do balanço hídrico de cultura, de acordo com o método de Thornthwaite e Mather (1955), e a evapotranspiração máxima da cultura (ETc). E o coeficiente de cultura (Kc). No balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), a capacidade de água disponível para o solo e a cultura (profundidade do sistema radicular) de interesse pode ser estimada por meio de funções de pedotransferência devidamente calibradas para a área de estudo (RODRIGUES, 2021).

E por último a produtividade real (PR), que é definida como a produtividade obtida a campo pelo produtor rural e é condicionada pelos fatores determinantes da PP, limitantes da

PA e pelos fatores redutores influenciados pelo manejo agrícola adotado no cultivo, como pragas, doenças e plantas daninhas (SENTELHAS et al., 2016)

Yield gap ou quebra/lacuna de produtividade é um termo que vem sendo amplamente estudado e aplicado a fim de identificar fatores responsáveis pela quebra de produção das culturas. E pode ser definido através da relação existente entre os diferentes tipos e níveis de produtividade de uma cultura agrícola e os fatores que a determinam, podendo ser de ordem genética, climática e de manejo agrícola. Portanto o YG será a relação da produtividade potencial, atingível e real (SANTOS, 2021)

4. PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

4.1 Dados observados e local de pesquisa

A área de estudo está localizada no estado do Maranhão (entre 1° e 10° de Latitude Sul e 41,5° e 48,6° de Longitude Oeste) e compreende a região de Gerais de Balsas (Figura 3) que envolve cinco municípios (Tabela 1), sendo a maior região produtora de soja do Estado, conforme definida por Menezes (2009).

Foram utilizados dados climáticos mensais (1986-2016) observados de precipitação e temperatura obtidos do acervo da Agência Nacional de Águas – ANA, por intermédio do Sistema de Informações Hidrológicas–HidroWeb, e Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Tabela 1. Dados geográficos dos municípios da região dos Gerais de Balsas, adaptado de IBGE (2010).

Municípios	Latitude	Longitude
Alto Parnaíba	-9.1114	-45.9305
Balsas	-7.53292	-46.035
Feira nova do maranhão	-6.95434	-46.678
Riachão	-7.36012	-46.6146
Tasso Fragoso	-8.46798	-45.7573

Fonte: Adaptado de IBGE (2010)

Figura 3 – Localização geográfica da região homogênea de precipitação de Gerais de Balsas.



Fonte: Nugeo

4.2 Dados de Projeções Climáticas

Foram utilizados dados de projeção climáticas de temperatura do ar e precipitação pluvial para os próximos 30 anos, período de 2020 a 2050, obtidas do modelo regional Eta-HadGEM2, com resolução regional de 20 Km, os dados são gerados pelo CPTEC/INPE e disponibilizados no Portal PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NO BRASIL, uma plataforma de fácil acesso para visualizar e baixar projeções de mudanças climáticas sobre o território brasileiro a partir de modelagens brasileiras e internacionais (PCLIMA, 2024).

As projeções climáticas foram baseadas em dois cenários de mudanças climáticas: O cenário RCP 4.5, consistente com a estabilização da demanda energética mundial, programas de reflorestamento fortes e políticas climáticas rigorosas. Com relação às emissões de gases efeito estufa, a projeção de estabilização das emissões de metano, porém com leve aumento das emissões de CO² até 2040, com valor máximo atingido de 650 ppm equivalente na segunda metade do século XXI e o cenário RCP 8.5, que considera um futuro com crescimento contínuo da população e desenvolvimento tecnológico lento, com acentuadas emissões de CO². Este cenário é sombrio, o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito estufa, sendo consistente com uma política que não priorizará a redução das emissões, com uma forte dependência de combustíveis fósseis (DE SOUZA QUEIROZ et al., 2021).

4.3 Balanço Hídrico da soja

O balanço hídrico foi definido para a cultura da soja utilizando o programa computacional Sarrazon (BARON et al., 1996), para o cálculo do balanço hídrico, aplicado aos dados em escala temporal decenal e considerando a climatologia (dados observados) e as projeções futuras baseadas em cenários de mudanças climáticas. Os principais parâmetros de entrada no programa são:

a) Agroclimáticos – a precipitação pluvial e a evapotranspiração potencial, determinada pelo método de Thornthwaite (1948), baseado na temperatura do ar (Tabela 1).

Tabela 2 - Variáveis de entrada no Modelo SARRAZON

Clima			Solo
Pc	Tr	ETp ou ETo	CAD
30 anos (dados de climatologia de 1987 - 2016)	30 anos de dados para os cenários 4.5 e 8.5 entre 2020 – 2050	Método de Thornthwait (1948) baseado nos cenários de Tr	Classe de solo (Tabela 2) e Pe do sistema radicular da soja

Pc – Precipitação; Tr – Temperatura do ar; ETp – Evapotranspiração potencial; ETo – Evapotranspiração de referência; CAD – Capacidade de água disponível; Pe – Profundidade efetiva

Fonte: Autor (2024)

b) Solo – Foi utilizada a nova abordagem das seis classes de água disponível no solo(AD) e Capacidade de Água Disponível-CAD, este último dada em função da classe de solo e da profundidade efetiva (Pe) do sistema radicular da cultura (Tabela 2).

Tabela 3 – Parâmetros de solo utilizado para simulação do balanço hídrico

Classes de AD	AD/CAD
AD1 – 0,40 mm/cm ⁻¹	AD = 0,40 mm/cm-1 CAD = AD x Pe
AD2 - 0,54 mm/cm ⁻¹	AD = 0,54 mm/cm-1 CAD = AD x Pe
AD3 - 0,71 mm/cm ⁻¹	AD = 0,71 mm/cm-1 CAD = AD x Pe
AD4 - 0,93 mm/cm ⁻¹	AD = 0,93 mm/cm-1 CAD = AD x Pe
AD5 - 1,23 mm/cm ⁻¹	AD = 1,23 mm/cm-1 CAD = AD x Pe
AD6 - 1,41 mm/cm ⁻¹	AD = 1,41 mm/cm-1 CAD = AD x Pe

AD – Água disponível; CAD – Capacidade de água disponível; Pe – Profundidade efetiva

Fonte: Autor (2024)

A utilização dessa nova abordagem das seis classes de AD tem permitido incorporar um conjunto mais amplo de informações que levam a um melhor entendimento dos processos de

crescimento, produtividade e riscos dos cultivos agrícolas. Além disso, recentes avanços na predição da água disponível do solo em função da granulometria permitem a formulação de uma abordagem mais completa para o equacionamento do componente da AD nas avaliações de risco (TEIXEIRA et al., 2021).

c) Cultura – Foi considerado com relação à cultura, a profundidade do sistema radicular (Pe), ciclo e duração das fases fenológicas e coeficiente de crescimento (Kc) conforme tabelas abaixo.

Tabela 4 - Características da cultura. Fase I: emergência; Fase II: crescimento vegetativo; Fase III: floração/enchimento de grão; Fase IV: maturação

Cultura	Pe(cm)	CAD (mm)	Ciclo da Soja (dias)	Fase fenológica(dias)
Soja	40 cm	Solo AD1 = 16 Solo AD2 = 22 Solo AD3 = 28 Solo AD4 = 38 Solo AD5 = 49 Solo AD6 = 56	120 dias	Fase I – 20 Fase II - 30 Fase III – 35 Fase IV - 35

Pe – Profundidade efetiva; CAD – Capacidade de água disponível
Fonte: Autor (2024)

Tabela 5 – Coeficientes de crescimento (Kc)

Cultura	Decêndios												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Soja	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	1,00	1,15	1,00	0,80	0,70	0,60	0,50	0,50

Fonte: EMBRAPA, 2002.

As simulações do balanço hídrico foram estabelecidas a partir do início da estação chuvosa da região de gerais de balsas para três períodos de plantio, outubro, novembro e dezembro, considerando o ciclo da soja de 120 dias nesses três períodos de plantio. Foram realizadas no total 18 simulações com data de plantio iniciada a cada dia 5 de outubro, novembro e dezembro para as seis classes de AD para o cenário atual e projeções futuras. Após a simulação foi obtido o Índice de Satisfação das Necessidades de Água – ISNA, que representa a relação entre a evapotranspiração real e a máxima da cultura, para as fases de semeadura/emergência (Fase I), crescimento vegetativo (Fase II), floração e enchimento de grãos (Fase III) e Maturação (Fase IV). O nível de probabilidade no SARRAZON utilizado foi de 80%, ou seja, em 8 de cada 10 anos, tem-se 80% de chance dos valores de ISNA encontrarem-se entre os valores estipulados nas fases fenológicas. Determinar o ISNA é importante para a obtenção da estimativa da produtividade atingível (PA), considerando a penalização da produtividade potencial (PP) da cultura pelo déficit hídrico em cada fase de desenvolvimento da cultura.

4.4 Estimativa de produtividade

Foi determinado a Produtividade Potencial - PP (em condições ótimas de cultivo sem déficit hídrico) e a Produtividade Atingível - PA (considerando o déficit hídrico durante as fases fenológicas da cultura). A Produtividade Real-PR foi obtido do acervo de dados do IBGE.

4.4.1 Produtividade potencial

Para estimar a produtividade potencial agrícola da soja foi utilizado o modelo matemático-fisiológico da Zona Agroecológica (MZA-FAO), segundo Battisti (2013), conforme equação (1). Este nível de produtividade é teórico, representa a produtividade em condições ótimas de cultivo e sem deficiência de água no solo.

$$PP = \frac{PPBp * Ciaf * Cr * Cc * NDA}{(1 - 0,01 * U\%)} \quad (1)$$

Em que:

Cr , corresponde a correção da taxa de respiração, obtida seguindo os valores de Temperatura Média do ar (T_{med}):

Para $T_{med} < 20^{\circ}\text{C}$, $Cr = 0,6$

Para $T_{med} > 20^{\circ}\text{C}$, $Cr = 0,5$

O termo Cc é a correção para a parte colhida, devido a umidade ($U\%$) que fica retida no produto (grãos), que para soja representa 8%. Para uma cultura real, o Índice Área Foliar-IAF varia continuamente desde a semeadura até a maturação, devido a isso, é necessária uma correção, que foi obtida pelo termo $Ciaf$, que varia em função do IAF máximo atingido durante o cultivo. Neste caso o valor de $Ciaf$ é dado pela equação (2):

$$Ciaf = 0,0093 + 0,185 IAF - 0,015 IAF_{\text{máx}}^2 \quad (2)$$

Se $IAF \geq 5$, $Ciaf = 0,5$

Por fim, ainda na equação (1), o termo $PPBp$ é a produtividade bruta de matéria seca para uma cultura padrão ($\text{kg ha}^{-1}\text{dia}^{-1}$), estimada pela equação 3:

$$PPBp = PPBc + PPBn \quad (3)$$

Em que: $PPBc$ = Produtividade no Período de Céu Claro e $PPBn$ = Produtividade no Período de Céu Nublado, representadas pelas equações (4) e (5), respectivamente:

$$PPBc = (107,2 + 0,36 * Qo) * \left(\frac{n}{N}\right) * cTc \quad (4)$$

$$PPBn = (31,7 + 0,219 * Qo) * \left(1 - \frac{n}{N}\right) * cTn \quad (5)$$

Em que:

n = Número de horas efetivas de brilho solar (horas/dia), obtida do acervo de dados do INMET;

N, corresponde ao Fotoperíodo [horas/dia], obtido pela equação (6):

$$N = 2 * \frac{Hn}{15} \quad (6)$$

Qo = Radiação Solar Extraterrestre [cal cm⁻² dia⁻¹], estimada pela equação (7):

$$Qo = 37,6 * D * \left(\frac{\pi}{180} * Hn * \sin(\phi) * (\delta) + \cos(\phi) * \cos(\delta) * \sin(Hn)\right) \quad (7)$$

Em que:

ϕ – Latitude (°), δ – Declinação solar (°)

D = distância relativa Terra-Sol, obtida pela equação (8):

$$D = 1 + 0,033 * \cos\left[360 * \frac{NDA}{365}\right] \quad (8)$$

NDA = Número do dia do ano (calendário juliano)

Hn = ângulo horário do nascer do Sol, dado pela equação (9):

$$Hn = \arccos[-tg(\phi) * tg(\delta)] \quad (9)$$

δ é a declinação solar, dada pela equação (10):

$$\delta = 23,45 * \sin\left[\frac{360}{365} * (NDA - 80)\right] \quad (10)$$

As correções para o efeito da temperatura cTc e cTn para a soja, planta C3 de verão, temos duas condições:

Condição 1: T entre 16,5°C e 37°C a correção será conforme equações (11) e (12):

$$cTn = 0,583 + 0,014 T + 0,0013 T^2 - 0,000037 T^3 \quad (11)$$

$$cTc = -0,0425 + 0,035 T + 0,00325 T^2 - 0,0000925 T^3 \quad (12)$$

Condição 2: T < 16,5°C ou T > 37°C a correção será conforme equações (13) e (14):

$$cTn = -0,0425 + 0,035 T + 0,00325 T^2 - 0,0000925 T^3 \quad (13)$$

$$cTc = -1,085 + 0,07 T + 0,0065 T^2 - 0,000185 T^3. \quad (14)$$

4.4.2 Produtividade Atingível

Para a obtenção da estimativa da Produtividade Atingível (PA), foi considerado a penalização da produtividade potencial (PP, kg ha⁻¹) da cultura pelo déficit hídrico em cada fase de desenvolvimento da cultura, conforme equação (15):

$$PA = [1 - Ky * \left(1 - \frac{ETr}{ETc}\right) * PP] \quad (15)$$

em que:

Ky é o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico, e diferencia-se por fase de desenvolvimento, considerando-se um Ky para cada fase fenológica, neste estudo foram as fases II (Desenvolvimento vegetativo), III (Floração/enchimento de grão) e IV (Maturação);

ETr – Evapotranspiração Real da Cultura da soja;

ETc – Evapotranspiração Potencial da Cultura da soja.

A Eficiência Climática (EC) foi determinada utilizando os valores de Produtividade Atingível (PA) e Produtividade Potencial (PP). E com base nos valores de PA e Produtividade Real (PR) obtida no campo, foi calculada a Eficiência Agrícola (EA), conforme as equações (16) e (17), respectivamente:

$$EC = \left(\frac{PA}{PP}\right) * 100 \quad (16)$$

$$EA = \left(\frac{PR}{PA}\right) * 100 \quad (17)$$

Por fim, foram determinados o yield gap por déficit hídrico (YGw) através da diferença entre PP e PA e o yield gap por manejo agrícola (YGm) através da diferença entre PA e PR.

$$YGw = PP - PA \quad (18)$$

$$YGm = PA - PR \quad (19)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Indicadores de Produtividade: Cenário Atual

Os valores das produtividades (PP, PA e PR), dos *yield gaps* (YGc, YGm), eficiências (Ec e Ea) estão apresentados na Tabela 4, considerando o cenário atual, que corresponde as condições observadas entre 1987-2016.

A produtividade potencial (PP), representa a produção máxima de uma cultura sem restrições hídricas ou nutricionais e sem ataque de pragas e doenças, ou seja, é uma

produtividade teórica, que é obtida sem nenhum estresse biótico ou abiótico, conforme Sentelhas & Battisti (2015).

A PP, para todas as classes de solo utilizadas neste estudo, foi de 3.963,3 Kg/ha, para o plantio realizado na primeira quinzena do mês de outubro; de 3.668,8 Kg/ha, para o plantio realizado na primeira quinzena do mês novembro e 3833,5 Kg/ha, se plantados na primeira quinzena do mês de dezembro. O nível de PP mais baixo para plantio em novembro está associado ao menor período de exposição solar devido ao aumento da cobertura de nuvens, com a consequente redução da temperatura do ar. Os plantios em outubro e dezembro atingiram maior nível de PP, contrário ao que ocorre em novembro, e apresentaram aumentos no período de exposição solar e o consequente aumento nas temperaturas do ar. Este fato proporciona maior atividade fotossintética bruta, maior acúmulo de massa e consequentemente, maior produtividade (NITSCHKE et al., 2019; SENTELHAS et al., 2015a). Os níveis de PP obtidos neste estudo ficaram abaixo dos estimados em outros estudos, como no oeste paranaense (GIOVANELLA E OLIVEIRA, 2023) e no estado de Goiás (GARCIA SANTOS, 2021), que encontram valores médios de produtividade potencial acima de 8000 Kg/ha, a partir do mesmo Modelo de Zona Agroecológica – FAO (MZA-FAO).

A PP pode ser penalizada se houver algum fator restritivo, neste caso a produtividade é denominada de atingível (PA), representa a máxima produtividade alcançada, também limitada pelos fatores abióticos, como radiação solar e temperatura do ar, com manejo ideal da cultura, porém, com a penalização devido a restrição hídrica, conforme estabelecido por SENTELHAS et al., 2015.

Para avaliar os efeitos da disponibilidade hídrica na produtividade da soja na região de Gerais de Balsas, o solo foi dividido em 6 classes de Água Disponível (AD). Observou-se tendência de aumento da PA, com o aumento da Capacidade de Água Disponível do Solo, variando de 1865,8 Kg/ha (para um solo de textura mais arenosa (AD01)) a 2581,9 Kg/ha (para solos de textura mais argilosa (AD06)), para plantio realizado na primeira quinzena do mês de outubro. Para plantio realizado na primeira quinzena do mês de novembro a PA variou entre 2074,3 kg/ha (AD1) a 2906,5 kg/ha (AD6). Para plantio mais tardio, na primeira quinzena do mês de dezembro, a PA, para solo com baixa capacidade de retenção de água (AD01), alcançou valor de 2447,1 Kg/ha, passando para 3195,3 Kg/ha, em solo com alta capacidade de retenção de água (AD06). Estes resultados refletem os efeitos da capacidade de retenção de água de cada solo, de forma que solos como AD6, com maior capacidade de retenção hídrica, apresentam valores mais altos de PA. O plantio mais tardio, em dezembro, apresenta maior PA, é menos

penalizado pela deficiência hídrica, uma vez que a região se encontra em pleno período úmido, quando os totais de precipitação são superiores a perda de água por evapotranspiração, porém, inviabiliza o plantio safrinha, uma vez que o término do período chuvoso na região ocorre em abril.

Portanto, conforme Johann et. al. (2016), a semeadura antecipada da soja proporciona uma melhor janela de semeadura para o milho safrinha. Outro aspecto a ser considerado, segundo Henck (2022), é que além de prejudicar a possibilidade de uma segunda safra, o plantio tardio, pelo fato de ocorrer no período mais úmido, em que há maior disponibilidade de água, favorece o surgimento de doenças na planta. Os resultados da PA para plantios em dezembro se aproximam dos resultados observados para a soja na região do oeste paranaense, segundo Giovanella e Oliveira (2023), assim como para o estado de Goiás (GARCIA SANTOS, 2021).

A Produtividade Real (PR) média, obtida da base de dados do IBGE, foi de 2215 kg/ha. No entanto, para as classes de solo AD1, AD2 e AD3, a PR é maior que a PA, resultando em valores negativos para o yield gap manejo (YGm), isto porque, teoricamente, é impossível obter uma produtividade real superior à atingível levando em consideração as maiores limitações devido a sanidade, deficiência de fertilidade, genótipo, clima etc, que representa a produtividade real que normalmente acontece em campo, portanto para essas classes de solo (AD1, AD2 e AD3) não serão discutidos esses valores. A PR, obtida para a região de estudo, é menor que a observada em região produtora do oeste paranaense e no estado de Goiás, que chega em média a 3000 Kg/ha (GARCIA SANTOS, 2021; GIOVANELLA E OLIVEIRA, 2023)

O Yield Gap climático (YGc), que representa a diferença entre a PP e a PA, variou, para plantio na primeira quinzena de outubro, de 2097,5 kg/ha, em um solo com baixa capacidade de retenção de água (AD01), para 1381,4 kg/ha, em um solo com alta capacidade de retenção de água (AD06), indicando as perdas de produtividade devido à limitação hídrica, que representaram, respectivamente, quebra de produtividade da ordem de 52,9% e 34,9%, em relação a PP, ou seja, a região apresentou Eficiência Climática (EC) da ordem de 47,1% e 65,1%. Para plantio em novembro a quebra de produtividade alcançou 43,5% da PP, representando uma perda de 1594,5 Kg/ha, para o solo com AD01, por outro lado, para o solo do tipo AD06, a quebra de produtividade alcançou 20,8% da PP, ou seja, uma perda produtividade da ordem de 762,4 Kg/ha. Em dezembro, o plantio em solo do tipo AD01, apresentou YGc da ordem de 1386,4 Kg/ha, representando 36,2% da PP, enquanto em um solo do tipo AD06 a quebra de produtividade foi da ordem de 638,2 Kg/ha, ou seja, 16,6% da PP, ou seja, EC, respectivamente, de 63,8% e 83,4%.

Com relação ao manejo agrícola, observou-se que o Yield Gap (YGm) é bem inferior ao YGc, variando de 169 Kg/ha, para plantio realizado na primeira quinzena de outubro, em um solo do tipo AD04, com capacidade de armazenamento de água de 38 mm, a 979,9 Kg/ha, para plantio realizado na primeira quinzena de dezembro, em solo com capacidade de armazenamento de água de 56 mm. A Eficiência quanto ao manejo agrícola, nestes casos, variou, respectivamente, entre 92,9% e 69,3%. Segundo Sentelhas et al. (2015), o nível ideal de EA, em relação ao manejo, é de 80% e que valores entre 60% e 80%, são considerados intermediários, segundo Battisti et al., (2018). Dessa forma, os resultados sugerem que o manejo agrícola adotado na região é fundamental para os níveis de produtividades da soja alcançada, uma vez que a perdas por manejo inadequado são baixas. De acordo com Santos (2021) o manejo agrícola é eficiente para amenizar as perdas decorrentes das condições climáticas, principalmente déficit hídrico. Esses valores mostram que o manejo tem papel importante na produtividade da soja, atuando como um controlador da produtividade.

Tabela 6 – Produtividades, quebras e eficiências considerando o cenário atual para cultura da soja com plantio em outubro, Novembro e Dezembro, para a região de Gerais de balsas

Classes do Solo	PP	PA	PR	YGc	YGm	Ec	Em	Qragua	Qrmanejo
	(Kg/ha)					(%)			
	Plantio em Outubro								
AD1(16mm)	3963,3	1865,8	2215	2097,5	-349,7	47,1	118,7	PR > PA	
AD2(22mm)	3963,3	1984,8	2215	1978,5	-230,6	50,1	111,6		
AD3(28mm)	3963,3	2203,3	2215	1759,9	-12,1	55,6	100,5		
AD4(38mm)	3963,3	2384,4	2215	1578,9	169,0	60,2	92,9	90,3	9,7
AD5(49mm)	3963,3	2511,2	2215	1452,1	295,8	63,4	88,2	83,1	16,9
AD6(56mm)	3963,3	2581,9	2215	1381,4	366,5	65,1	85,8	79,0	21,0
Plantio em Novembro									
AD1(16mm)	3668,8	2074,3	2215	1594,5	-141,1	56,5	106,8	PR > PA	
AD2(22mm)	3668,8	2303,0	2215	1365,8	87,6	62,8	96,2	94,0	6,0
AD3(28mm)	3668,8	2516,6	2215	1152,2	301,1	68,6	88,0	79,3	20,7
AD4(38mm)	3668,8	2600,7	2215	1068,2	385,2	70,9	85,2	73,5	26,5
AD5(49mm)	3668,8	2786,2	2215	882,6	570,8	75,9	79,5	60,7	39,3
AD6(56mm)	3668,8	2906,5	2215	762,4	691,0	79,2	76,2	52,5	47,5
Plantio em Dezembro									
AD1(16mm)	3833,5	2447,1	2215	1386,4	231,6	63,8	90,5	85,7	14,3
AD2(22mm)	3833,5	2622,0	2215	1211,5	406,5	68,4	84,5	74,9	25,1
AD3(28mm)	3833,5	2849,5	2215	984,1	634,0	74,3	77,7	60,8	39,2
AD4(38mm)	3833,5	2989,5	2215	844,0	774,0	78,0	74,1	52,2	47,8
AD5(49mm)	3833,5	3150,1	2215	683,4	934,7	82,2	70,3	42,2	57,8
AD6(56mm)	3833,5	3195,3	2215	638,2	979,9	83,4	69,3	39,4	60,6

Produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA), produtividade real (PR), *yield gap* climático (YGc), *yield gap* por déficit de manejo (YGm), eficiência climática (EC) e eficiência agrícola (EA), Quebra relativa a água (Qragua), Quebra relativa ao manejo (Qrmanejo).

Fonte: Autor (2024)

5.2 Indicadores de Produtividade: Cenário Futuro

No caso de cenário futuro, baseado em projeções de temperatura do ar para as próximas décadas, considerando dois cenários, um mais intermediário, denominado de RCP 4,5, e outro pessimista, denominado de RCP 8.5, foram determinadas as Produtividade Potencial (PP), a Produtividade Atingível (PA), o Yield Gap climático (YGc) e a Eficiência Climática (EC), como descrito na Tabela 5 e 6.

A PP, para todas as classes de solo para este cenário, foi de 3977,5 Kg/ha, para o plantio realizado na primeira quinzena do mês de outubro; de 3711,2 Kg/ha, para o plantio realizado na primeira quinzena do mês novembro e 3833,5 Kg/ha, não havendo tanta alteração comparado ao cenário atual.

Observou-se aumento da PA, com o aumento da Capacidade de Água Disponível do Solo, variando de 1430,27 Kg/ha (para um solo de textura mais arenosa (AD01)) a 1963,12 Kg/ha (para solos de textura mais argilosa (AD06)), para plantio realizado na primeira quinzena do mês de outubro. Para plantio realizado na primeira quinzena do mês de novembro a PA variou entre 1777,23 kg/ha (AD1) a 2448,30 kg/ha (AD6). E plantio realizado na primeira quinzena do mês de dezembro, a PA, para o solo com baixa capacidade de retenção de água (AD01), alcançou valor de 2030,68 Kg/ha, passando para 2803,76 Kg/ha em solo com alta capacidade de retenção de água (AD6). Percebe-se que mesmo ocorrendo aumento da PA em função da CAD dos solos, há uma queda da PA comparado ao cenário atual isto se dá em resposta às mudanças de temperatura provocando redução na disponibilidade hídrica dos solos consequentemente reduzindo a produtividade

Com isso o Yield Gap climático (YGc) aumentou comparado ao cenário atual, para plantio na primeira quinzena de outubro, de 2547,3kg/ha, em um solo com baixa capacidade de retenção de água (AD01), para 2014,4 kg/ha, em um solo com alta capacidade de retenção de água (AD6), indicando as perdas de produtividade devido à limitação hídrica, que representaram, respectivamente, quebra de produtividade da ordem de 60% e 50,6%, em relação a PP ou seja, a região apresentou Eficiência Climática (EC) da ordem de 36 % e 49,4%.

Para plantio em novembro a quebra de produtividade alcançou 52,1% da PP, representando uma perda de 1934,0 Kg/ha, para o solo com AD01, por outro lado, para o solo do tipo AD06, a quebra de produtividade alcançou 34% da PP, ou seja, uma perda produtividade da ordem de 1263,0 Kg/ha. Em dezembro, o plantio em solo do tipo AD01, apresentou YGc da ordem de 1827,8 Kg/ha, representando 47,4% da PP, enquanto em um solo do tipo AD06 a quebra de

produtividade foi da ordem de 1054,7 Kg/ha, ou seja, 23,3% da PP, ou seja, EC, respectivamente, de 52,6% e 72,7%

Tabela 7 – Produtividades, quebras e eficiências considerando o cenário 4.5 para cultura da soja com plantio em outubro, Novembro e Dezembro, para a região de Gerais de balsas

Plantio em Outubro, Novembro e Dezembro, para a região de Gerais de Balsas				
Classes do Solo	PP	PA	YGc	EC
	(Kg/ha)			(%)
Plantio em Outubro				
AD1(16mm)	3977,56	1430,27	2547,3	36,0
AD2(22mm)	3977,56	1444,18	2533,4	36,3
AD3(28mm)	3977,56	1575,35	2402,2	39,6
AD4(38mm)	3977,56	1741,47	2236,1	43,8
AD5(49mm)	3977,56	1922,63	2054,9	48,3
AD6(56mm)	3977,56	1963,12	2014,4	49,4
Plantio em Novembro				
AD1(16mm)	3711,27	1777,23	1934,0	47,9
AD2(22mm)	3711,27	1846,42	1864,9	49,8
AD3(28mm)	3711,27	1980,50	1730,8	53,4
AD4(38mm)	3711,27	2188,82	1522,5	59,0
AD5(49mm)	3711,27	2344,13	1367,1	63,2
AD6(56mm)	3711,27	2448,30	1263,0	66,0
Plantio em Dezembro				
AD1(16mm)	3858,45	2030,68	1827,8	52,6
AD2(22mm)	3858,45	2185,58	1672,9	56,6
AD3(28mm)	3858,45	2382,00	1476,4	61,7
AD4(38mm)	3858,45	2605,21	1253,2	67,5
AD5(49mm)	3858,45	2751,13	1107,3	71,3
AD6(56mm)	3858,45	2803,76	1054,7	72,7

Produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA), *yield gap* climático (YGc), Eficiência climática (EC)

Fonte: Autor (2024)

A PP, para o cenário 8.5, foi de 3960,6 Kg/ha, para o plantio realizado na primeira quinzena do mês de outubro; de 3716,6 Kg/ha, para o plantio realizado na primeira quinzena do mês novembro e 3864,4 Kg/ha, não havendo tanta alteração comparado ao cenário atual.

A redução da PA é mais significativa nesse cenário comparado ao atual e 4.5, mesmo considerando aumento da Capacidade de Água Disponível do Solo, variando de 1138,3 Kg/ha (para um solo de textura mais arenosa (AD02)) a 1560,6 Kg/ha (para solos de textura mais argilosa (AD06)), para plantio realizado na primeira quinzena do mês de outubro. Para plantio realizado na primeira quinzena do mês de novembro a PA variou entre 1432,7 kg/ha (AD2) a 1975,4 kg/ha (AD6). E plantio realizado na primeira quinzena do mês de dezembro, a PA, para o solo com baixa capacidade de retenção de água (AD01), alcançou valor de 1779,1 Kg/ha, passando para 2360,5 Kg/ha em solo com alta capacidade de retenção de água (AD6).

O Cenário 8.5 é considerado mais sombrio na mudança do clima, verifica-se este impacto no Yield Gap climático (YGc) aumentando a quebra comparado ao cenário atual e 4.5. Para o plantio na primeira quinzena de outubro, a quebra foi de 2707,8 kg/ha, em um solo com

baixa capacidade de retenção de água (AD1), para 2399,9 kg/ha, em um solo com alta capacidade de retenção de água (AD6), indicando as perdas de produtividade devido à limitação hídrica, que representaram, respectivamente, quebra de produtividade da ordem de 60,6% e 71,3%, em relação a PP ou seja, a região apresentou Eficiência Climática (EC) da ordem de 28,7 % e 39,9%.

Para plantio em novembro a quebra de produtividade alcançou 59% da PP, representando uma perda de a 2192,2 Kg/ha, para o solo com AD1, por outro lado, para o solo do tipo AD6, a quebra de produtividade alcançou 46,8% da PP, ou seja, uma perda produtividade da ordem de 1741 Kg/ha. Em dezembro, o plantio em solo do tipo AD1, apresentou YGc da ordem de 2085,4 Kg/ha, representando 54% da PP, enquanto em um solo do tipo AD6 a quebra de produtividade foi da ordem de 1503,9 Kg/ha, ou seja, 38,9% da PP, ou seja, EC, respectivamente, de 46% e 61,1%.

Tabela 8 – Produtividades, quebras e eficiências considerando o cenário 8.5 para cultura da soja com plantio em outubro, Novembro e Dezembro, para a região de Gerais de balsas

Classes do Solo	PP	PA	YGc	EC
	(Kg/ha)			(%)
	Plantio em Outubro			
AD1(16mm)	3960,61	1252,77	2707,8	31,6
AD2(22mm)	3960,61	1138,34	2822,3	28,7
AD3(28mm)	3960,61	1232,58	2728,0	31,1
AD4(38mm)	3960,61	1369,92	2590,7	34,6
AD5(49mm)	3960,61	1498,20	2462,4	37,8
AD6(56mm)	3960,61	1560,67	2399,9	39,4
Plantio em Novembro				
AD1(16mm)	3716,65	1524,42	2192,2	41,0
AD2(22mm)	3716,65	1432,70	2283,9	38,5
AD3(28mm)	3716,65	1571,21	2145,4	42,3
AD4(38mm)	3716,65	1681,44	2035,2	45,2
AD5(49mm)	3716,65	1860,45	1856,2	50,1
AD6(56mm)	3716,65	1975,44	1741,2	53,2
Plantio em Dezembro				
AD1(16mm)	3864,48	1779,10	2085,4	46,0
AD2(22mm)	3864,48	1781,32	2083,2	46,1
AD3(28mm)	3864,48	1999,31	1865,2	51,7
AD4(38mm)	3864,48	2140,67	1723,8	55,4
AD5(49mm)	3864,48	2304,91	1559,6	59,6
AD6(56mm)	3864,48	2360,53	1503,9	61,1

Produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA), *yield gap* climático (YGc), eficiência climática (EC)
Fonte: Autor(2024)

É perceptível que os resultados do cenário 8.5 indicam que a restrição hídrica é ainda mais crítica para a produtividade da soja do que no cenário atual e 4.5. As limitações climáticas

mais severas no cenário 8.5 resultam em menor produtividade atingível (PA), maior yield gap climático (YGc) e menor eficiência climática (Ec).

Este resultado corrobora com os dados apresentados pelo Assad et al (2020), em trabalhos baseados em resultados regionalizados com o Eta-HadGEM2-ES que levam em conta o risco agroclimático para a produção agrícola para diferentes culturas incluindo a soja, os resultados mostram que pode haver aumento do risco agroclimático nas áreas agrícolas para quase todas as lavouras; redução do potencial produtivo de baixo risco agroclimático com impactos mais relevantes para a cultura da soja. Em seu estudo para a cultura da soja, o modelo Eta-HadGEM2-ES aponta redução de 35,4% da área com baixo risco no cenário RCP4.5 e 42,8% no cenário RCP8.5 para a região do cerrado.

Observa-se que os cenário atual e cenários 4.5 e 8.5 revelam que a classe de solo AD6 (56mm) tende a ser a mais resistente em cenários críticos de deficiência hídrica, enquanto a classe AD1 (16mm) demonstra a maior vulnerabilidade. De acordo com Teixeira et al (2021) isto se deve a capacidade dos solos de reter água em sua matriz porosa e é função das suas características estruturais, físicas e mineralógicas e constitui uma característica determinante para o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas. Portanto um solo com menor capacidade de armazenamento hídrico é mais suscetível à deficiência hídrica.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos em diferentes cenários e condições climáticas oferecem uma visão das interações entre a produtividade da soja, as características do solo e a influência do manejo agrícola na região de Gerais de Balsas-MA. A produtividade atingível (PA) aumentou com a capacidade de retenção hídrica do solo, mostrando que solos com maior capacidade de retenção de água, como o AD6, apresentaram os maiores valores de PA. O plantio em dezembro mostrou-se menos penalizado pela deficiência hídrica, resultando em uma PA mais alta, mas esse benefício vem com o custo de inviabilizar a safrinha e aumentar o risco de doenças devido à maior umidade. O yield gap climático (YGc) diminuiu de outubro a dezembro, refletindo uma redução das limitações hídricas ao longo do período e eficiência climática (Ec) melhorou ao longo do período especialmente em dezembro, com a Ec variando de 47,1% a 83,4.

O manejo agrícola revelou que o yield gap de manejo (YGm) é significativamente inferior ao Yield Gap climático (YGc), variando de 169 kg/ha em outubro a 979,9 kg/ha em dezembro. E a eficiência do manejo agrícola (Em) variou entre 92,9% e 69,3%, sugerindo que

o manejo adotado na região pode ser eficaz e amenizar as perdas decorrentes de condições climáticas adversas, especialmente o déficit hídrico.

Entretanto no cenário 4.5 e 8.5 a produtividade atingível (PA) apresentou uma redução, refletindo os impactos das mudanças climáticas projetadas e YGc aumentou em relação ao cenário atual principalmente no cenário 8.5, que projeta um impacto mais severo das mudanças climáticas, a PA apresentou uma redução mais significativa.

Esses resultados destacam que as condições climáticas têm um impacto significativo na produtividade da soja, com a PA (Produtividade atingível) aumentando de outubro a dezembro devido à maior disponibilidade hídrica. A eficiência climática e de manejo varia entre os períodos de plantio e as classes de solo, ressaltando a importância de estratégias específicas para cada situação. A adoção de práticas de manejo agrícola adequadas pode mitigar parte das perdas de produtividade causadas pelas condições climáticas adversas, especialmente o déficit hídrico. Além disso, os cenários futuros projetam um aumento nas limitações hídricas e uma redução na produtividade atingível, o que reforça a necessidade de adaptação às mudanças climáticas.

7. REFERENCIAS

ALMEIDA, Thaywanne Novaes de et al. Impactos na produtividade do feijão na região Nordeste do Brasil sob condições do cenário climático RCP 4.5. 2021.

ALPINO, Tais de Moura Ariza et al. Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 27, p. 273-286, 2022.

ARMOA BÁEZ, María Soledad et al. Balanço hídrico e produtividade da soja cultivada sob diferentes níveis de déficit hídrico no Sul do Brasil. *Investigación Agraria*, v. 22, n. 1, p. 3-12, 2020.

ASSAD, Eduardo Delgado et al. Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. 2020.

BARON, C. & CLOPES, A. Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos (SARRAMET/SARRAZON) Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento. SARRA.CIRAD, França. 1996.

BATTISTI, R. Época de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DANTAS, J. P. S.; MORAES, M. F. Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159, 2018.

BERLATO, Moacir Antonio; CORDEIRO, Ana Paula Assumpção. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. *Agrometeoros*, v. 25, n. 2, 2018.

BILLERBECK, Camila; MELLO JÚNIOR, A. V. Cenários alternativos de precipitação para estudos de mudanças climáticas na bacia do rio Piracicaba. *Proceedings of the XXIII SBRH* 2019, 2019.

BISCAIA, Welington Fernando; BERTACI, Moacir José. O mercado da soja no Brasil pós-pandemia da Covid-19. **Revista Interface Tecnológica**, v. 19, n. 2, p. 641-652, 2022.

CASSETTARI, Gabriel Américo; DE QUEIROZ, Tadeu Miranda. Balanço hídrico e classificação climática na bacia do rio Jauquara, região de transição entre o cerrado e Amazônia brasileira. *Revista brasileira de climatologia*, v. 26, 2020.

CASTILLO, Ricardo et al. Agronegócio globalizado no MATOPIBA maranhense: análise da especialização regional produtiva da soja. *Espaço e Economia. Revista brasileira de geografia econômica*, n. 21, 2021.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). _Produção nacional de grãos é estimada em 312,2 milhões de toneladas na safra 2022/23_. Disponível em: Conab](<https://www.conab.gov.br/>). Acesso em: 26 maio 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Maranhão – Cresce estimativa de produção de soja e milho da safra 2022/2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4914-maranhao-cresce-estimativa-de-producao-de-soja-e-milho-da-safra-2022-2023>. Acesso em: 26 maio 2024.

COSTA, Rafaela Lisboa et al. Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de Downscaling Estatístico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. spe, p. 785-801, 2020.

CRUZ, Vinicius dos Santos; SANTOS, Maria Joelma Sousa dos. A cultura da soja no Maranhão: Desafios e possibilidades para os produtores. **X Seminário de iniciação científica e II Seminário da pós-graduação do IFNMG**, 2022.

CUNHA, Roberto César Costa; ESPÍNDOLA, Carlos José. A geoeconomia da produção de soja no sul do Maranhão: características sociais e territoriais. **Revista da ANPEGE**, v. 11, n. 16, p. 37-65, 2015.

DA SILVA ABREU, Pedro Alcantara; HERNANDEZ, Fernando Braz Tangerino. Balanço hídrico climatológico normal e sequencial do município de pereira barreto-sp como auxilio para o planejamento da agricultura irrigada. *Irriga*, v. 1, n. 3, p. 530-545, 2021.

DE SOUSA QUEIROZ, Raymyson Rhuryo et al. 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. 4-14, 2021.

DE SOUSA, Emerson Teixeira; VASCONCELLOS, Vânia Lúcia Dias; ASSAD, Eduardo Delgado. Simulação dos riscos climáticos no Distrito Federal para o plantio da soja de ciclo precoce e tardio. 2003.

DE SOUZA BRITO, Erbeson. Componentes do balanço hídrico e a dinâmica hídrica em sistemas agropecuários na Amazônia Ocidental avaliados em cenários atuais e de mudança climática. 2022.

DE VILLA, Bruna et al. Balanço hídrico climatológico: uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 6, p. e50211626669-e50211626669, 2022.

DOURADO-NETO, D. VAN LIER, Q. J.; METSELAAR, K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. *Scientia Agricola*. Piracicaba, v. 67, n. 1, jan./fev. 2010.

EMBRAPA. Zoneamento agrícola de risco climático para a soja é atualizado no Brasil. Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80143685/zoneamento-agricola-de-risco-climatico-para-a-soja-e-atualizado-no-brasil>. Acesso em: 31 jul. 2024.

F. A. Yield gap: conceitos, definições e exemplos. Informações Agronômicas - IPNI, n. GARCIA SANTOS, T. Estimativa do *yield gap* para a cultura da soja em nível de fazenda no estado de Goiás. Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, 2021.

GIOVANELLA, T. H; OLIVEIRA, F. C. Produtividade potencial e atingível da soja no oeste do Paraná: quantificando os componentes do yield gap da cultura. Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão 20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR.

HENCK, A. U. RISCO CLIMÁTICO PARA OCORRÊNCIA DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA NO BRASIL. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campo Largo, 2022.

IBGE -Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010) “Informações dos Municípios”, <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma>, Acesso em Agosto de 2024
IMESC, Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos. Agricultura Maranhense. Periodicidade: Bimestral dezembro de 2020

IPCC AR6 (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU AND B. ZHOU (Eds). Climate Change 2021:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021, 41 pp.

IPCC-WGII. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Em: PÖRTNER, H.-O. et al. (Eds.). Summary for Policymakers. Cambridge, UK and New York, NY, USA: [s.n.].

JANUARIO, Italo Ramon; DE MENEZES, Ronaldo Haroldo Nascimento; BONFIM, Osmar Evandro Toledo. Análise de risco climático para semeadura do arroz no Sul do Estado do Maranhão (Climate risk analysis for rice sowing in the South of the State of Maranhão). Revista Brasileira de Geografia Física, v. 11, n. 4, p. 1241-1250, 2018.

JOHANN, J. A.; BECKER, W. R.; URIBE-OPAZO, M. A.; MERCANTE, E. USO DE IMAGENS DO SENSOR ORBITAL MODIS NA ESTIMAÇÃO DE DATAS DO CICLO DE DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA SOJA PARA O ESTADO DO PARANÁ – BRASIL. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering, v. 36, n. 1, p. 126 - 142, 2016.

Lyra, A., Tavares, P., Chou, S.C., Sueiro, G., Dereczynski, C.P., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., Giarolla, A. 2017. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution Theor Appl Climatol.

MEIRA, Yasmim Cristina Leiros. Resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio piacó às mudanças climáticas. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. DA S.; PINTO, L. F. D. Atlas do Estado do Paraná, 2019.

NÓIA JUNIOR, R.D.S., Sentelhas, P.C., 2019. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems* 173, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012>

PEREIRA, VÂNIA ROSA, et al. "Avaliação do impacto das mudanças climáticas no risco climático da soja a partir dos cenários do CMIP6." In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 22., 2023, Natal. A agrometeorologia e a agropecuária: adaptação às mudanças climáticas: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2023. p. 2535-2545., 2023.

PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NO BRASIL. _Monitoramento Climático_. Disponível em: [\[http://pclima.inpe.br/\]](http://pclima.inpe.br/)(<http://pclima.inpe.br/>). Acesso em: 29 jul. 2024.

RICHTER, Gean Leonardo. Potencial e lacunas de produtividade em soja no Brasil: uma análise pela metodologia do “Global Yield Gap Atlas”. 2021. 160 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

RODRIGUES, Juliana Chagas. Abordagem multi-modelos para a simulação da produtividade da cultura do algodoeiro e seu uso na definição do yield gap em diferentes regiões brasileiras. 2021. 200 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

SANTOS, Thaynara Garcia et al. Estimativa do yield gap para a cultura da soja em nível de fazenda no Estado de Goiás. 2021.

SANTOS, Thaynara Garcia. _Estimativa do yield gap para a cultura da soja em nível de fazenda no estado de Goiás_. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Goiânia, 2021.

SENTELAS, P. C.; BATTISTI, R. Clima e Produtividade da Soja: Efeitos nas produtividades potencial, atingível e real. Boletim Técnico 2015/2016. Fundação Mato Grosso. Santa Cruz do Sul, RS. Editora Gazeta, 2015.

SENTELHAS, P. 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. 135, n. , p. 1394- 1411, 2015a.

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

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L. A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSÉS, F. A. Yield gap: concepts, definitions and examples (in portuguese). *Informações Agronômicas (BRASIL)*, n. 155, p. 9-12, 2015b.

SILVA, Felipe et al. Soja: do plantio à colheita. Oficina de Textos, 2022.

SOUZA, Mirelly Meres Silva et al. CALIBRAÇÃO DO MODELO DA ZONA AGROECOLÓGICA PARA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM CHAPADINHA, MARANHÃO. *Revista Contemporânea*, v. 4, n. 1, p. 560-580, 2024.

SPYRIDES, Constantino. Caracterização da variabilidade da precipitação no MATOPIBA, região produtora de soja. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 04, p. 1425-1441, 2020.

TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes et al. Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2021. Boletim técnico, v. 272, 2021.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The Water Balance. Centerton: Drexel Institute of VAN VUUREN, D.P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G.C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J-F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S.J.; ROSE, S.K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, v. 109, paper 5, 2011. doi:10.1007/s10584-011-0148-z

VIVAN, Gisele Aparecida, et al. Rendimento e rentabilidade das culturas da soja, milho e feijão cultivados sob condições de sequeiro. *Seminário: Ciências Agrárias*, 2015, 36.5: 2943-2950.