



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA – CCCh
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



LUCIANA PAULINO DA CONCEIÇÃO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E SEUS EFEITOS NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA NA REGIÃO DO MATOPIBA MARANHENSE**

Chapadina – MA

Fevereiro de 2025

LUCIANA PAULINO DA CONCEIÇÃO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E SEUS EFEITOS NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA NA REGIÃO DO MATOPIBA MARANHENSE.**

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. Patrício Gomes
Leite

Coorientadora: Ma. Maiane Rodrigues do
Nascimento.

Chapadinha – MA

Fevereiro de 2025

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

Conceição, Luciana Paulino da.

Análise da variabilidade climática e seus efeitos na
produtividade da soja na região do MATOPIBA maranhense /
Luciana Paulino da Conceição. - 2025.

77 f.

Coorientador(a) 1: Maiane Rodrigues do Nascimento.

Orientador(a): Patrício Gomes Leite.

Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do
Maranhão, Chapadinha-ma, 2025.

1. Fatores Climáticos. 2. Precipitação. 3.
Tendências. 4. El Nino e La Nina. 5. Planejamento
Agrícola. I. Leite, Patrício Gomes. II. Nascimento,
Maiane Rodrigues do. III. Título.

LUCIANA PAULINO DA CONCEIÇÃO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E SEUS EFEITOS NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA NA REGIÃO DO MATOPIBA MARANHENSE.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a coordenação do curso de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Maranhão como requisito indispensável para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Defendido e aprovado em 24 de fevereiro de 2025, pela comissão examinadora constituída pelos professores:

Patricio Gomes Leite (Orientador)
Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG)
Professor Adjunto do curso de Engenharia Agrícola (CCCh/UFMA)

Maiane Rodrigues Nascimento (Coorientadora)
Engenheira Agrícola pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA/CCCh)
Mestra em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Kamilla Andrade de Oliveira
Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG)
Professor Adjunto do curso Engenharia Agrícola (CCCh/UFMA)

Mayara Rodrigues Nascimento
Engenheira Agrícola pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA/CCCh)
Mestra em Agricultura e Ambiente pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

*Dedico este trabalho ao meu querido pai,
que sob muito sol, me fez chegar até aqui,
na sombra.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado até aqui, me amparado nos dias difíceis e me ensinado a transformar minhas dificuldades em forças para seguir em frente, sem ele nada disso seria possível.

Ao meu pai, Cícero Paulino, a minha eterna gratidão por tudo que fez por mim e por meus irmãos. Criar e educar uma família sozinho não foi uma tarefa fácil, mas você enfrentou cada desafio com coragem, dedicação e amor incondicional. Seu esforço, sacrifício e determinação nos deram não apenas sustento, mas também valores, ensinamentos e exemplo de vida a seguir, você é meu verdadeiro herói, obrigada.

À minha mãe, Maria Francisca *in memoriam*, que partiu muito cedo não me permitindo a chance de conhece-la. Saiba que a sua presença e amor me faz muita falta.

Aos meus irmãos, em especial às minhas irmãs, Antônia Paulino e Daiana Paulino, por todo o apoio em todos os momentos em que mais precisei.

Ao meu namorado, Kevin Veron, por todo o amor e companheirismo. Saiba que seu amor me salvou nos meus momentos mais difíceis, obrigada por ser meu lugar seguro e meu ponto de paz.

Aos meus amigos que fiz durante a graduação, Gabrielle Teixeira, Lavínia Sarmiento, Maria Emília Fernandes, Atacilia Mota, Divina Reis, Ana Carolina Araújo, Emanuele Karolayne Ferreira, Ronald de Sousa, Fabíola Monteles, Luiziane Sousa, Maria de Jesus e Weygon Almeida por todos os momentos de alegria e por deixarem mais leve essa intensa jornada da graduação.

À minha amiga, Jaira Honório, que tive o privilégio de conhecer durante meu estagio, sua amizade tornou meus 6 meses longe de casa muito mais felizes.

À minha coorientadora e amiga Maiane Rodrigues por toda a ajuda e orientação, seus conhecimentos e ensinamentos foram de fundamental importância para a conclusão desse trabalho.

Ao meu orientador, prof. Dr. Patrício Gomes Leite, por toda ajuda ao longo desse trabalho de conclusão de curso, agradeço por sua contribuição e paciência.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e todos os professores do curso de Engenharia Agrícola que contribuíram para a o meu aprendizado e formação.

RESUMO

A soja, é considerada a principal commodity agrícola da região do MATOPIBA, e apresenta alta sensibilidade a fatores climáticos, como temperatura e precipitação, sendo fortemente impactada por eventos extremos como El Niño e La Niña. Dessa forma, o presente trabalho visou analisar a variabilidade climática e seus efeitos na produtividade da soja na porção maranhense pertencente ao MATOPIBA. A pesquisa utilizou uma série temporal de dados meteorológicos e de produtividade da soja de (1993-2023), coletados em estações meteorológicas e bancos de dados do IBGE. Foi empregado o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) para identificar períodos secos e chuvosos, além de análises de tendências com o teste de Mann-Kendall e validação estatística pelo teste T-Student. Os resultados evidenciaram a alta variabilidade climática da região, com tendências de aumento na temperatura média e eventos de precipitação menos consistentes ao longo dos anos. Esses fatores resultaram em oscilações significativas na produtividade da soja, destacando anos críticos como 2016, marcados pela forte atuação do El Niño, que reduziu a produtividade devido ao déficit hídrico. Em contrapartida, períodos associados ao La Niña favoreceram a recuperação hídrica e, conseqüentemente, a produtividade. O estudo conclui que a interação entre os fenômenos climáticos e as práticas agrícolas é determinante para a produção de soja na região. A análise das tendências e a identificação de eventos extremos são fundamentais para o planejamento agrícola e para a adoção de estratégias de mitigação dos impactos climáticos.

Palavras-chave: Fatores Climáticos, Precipitação, Tendências, El Niño, La Niña, Planejamento Agrícola.

ABSTRACT

Soybeans are considered the main agricultural commodity in the MATOPIBA region and are highly sensitive to climatic factors such as temperature and precipitation, being strongly impacted by extreme events such as El Niño and La Niña. Thus, this study aimed to analyze climate variability and its effects on soybean productivity in the Maranhão portion of MATOPIBA. The research used a time series of meteorological and soybean productivity data from (1993-2023), collected at meteorological stations and IBGE databases. The Standardized Precipitation Index (SPI) was used to identify dry and rainy periods, in addition to trend analysis with the Mann-Kendall test and statistical validation by the Student's t-test. The results highlighted the high climatic variability of the region, with trends of increasing average temperature and less consistent precipitation events over the years. These factors resulted in significant fluctuations in soybean productivity, with critical years such as 2016 being particularly notable, marked by the strong action of El Niño, which reduced productivity due to water deficits. On the other hand, periods associated with La Niña favored water recovery and, consequently, productivity. The study concludes that the interaction between climate phenomena and agricultural practices is a determining factor for soybean production in the region. Analyzing trends and identifying extreme events are essential for agricultural planning and for adopting strategies to mitigate climate impacts.

Keywords: Climate Factors, Precipitation, Trends, El Niño, La Niña, Agricultural Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Área de estudo, MATOPIBA Maranhense	24
Figura 2. Variáveis climatológicas e produtiva para Alto Parnaíba (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	36
Figura 3. Variáveis climatológicas e produtiva para Bacabal (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	39
Figura 4. Variáveis climatológicas e produtiva para Balsas (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	42
Figura 5. Variáveis climatológicas e produtiva para Barra do Corda (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	46
Figura 6. Variáveis climatológicas e produtiva para Carolina (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	49
Figura 7. Variáveis climatológicas e produtiva para Caxias (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	52
Figura 8. Variáveis climatológicas e produtiva para Chapadinha (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	56
Figura 9. Variáveis climatológicas e produtiva para Colinas (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	59
Figura 10. Variáveis climatológicas e produtiva para Imperatriz (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cidades, estações meteorológicas escolhidas e suas coordenadas geográficas.	25
Tabela 2. Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI.....	29
Tabela 3. Tendências interanual e anual de Precipitação.....	64
Tabela 4. Tendências interanual e anual de Temperatura Média	65
Tabela 5. Tendências interanual e anual de Produtividade da Soja	66

LISTA DE SIGLAS

CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ENOS	El Niño Oscilação Sul
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MATOPIBA	Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
NEB	Nordeste Brasileiro
PAM	Produção Agrícola Municipal
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	17
3.1. Soja no Maranhão.....	17
3.2. Região MATOPIBA	18
3.3. Influência de fatores climáticos na cultura da soja.....	19
3.4. Variabilidade Climática	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Caracterização da área de estudo.....	24
4.2 Dados Meteorológicos.....	25
4.3 Dados de Produtividade.....	25
4.4 Índice de precipitação padronizada (SPI).....	26
4.5 Análise de tendências.....	29
4.6 Teste de Significância de T-Student.....	31
4.7. Produtividade da Soja.....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1. Análise agroclimática de Alto Parnaíba.....	33
5.2. Análise agroclimática de Bacabal.....	37
5.3. Análise agroclimática de Balsas	40
5.4. Análise agroclimática de Barra do Corda	43
5.5. Análise agroclimática de Carolina.....	47
5.6. Análise agroclimática de Caxias.....	50
5.7. Análise agroclimática de Chapadinha.....	53

5.8. Análise agroclimática de Colinas	57
5.9. Análise agroclimática de Imperatriz	60
5.10. Tendências de Mann Kendall para Precipitação	63
5.11. Tendências de Mann Kendall para Temperatura Média	64
5.12. Tendências de Mann Kendall para Produtividade da Soja	65
6. CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

O clima é um dos principais fatores ambientais que influenciam a variabilidade da produtividade agrícola em todo o mundo, especialmente em sistemas de sequeiro, que predominam em extensas áreas produtoras de grãos e outras culturas no Brasil (Cintra; Melo; Menezes, 2020). A produtividade agrícola está diretamente relacionada às condições climáticas, uma vez que o clima é o único fator que os produtores não podem controlar completamente, mesmo em áreas irrigadas. Dessa forma, o desempenho das lavouras está sujeito à variabilidade climática, que pode representar um risco significativo devido à ocorrência de eventos meteorológicos adversos (Oliveira, 2020).

A relação entre clima e produtividade agrícola apresenta desafios significativos, uma vez que a adaptação das culturas a um determinado ambiente depende das exigências de cada fase fenológica. No entanto, mesmo em regiões onde as culturas estão bem adaptadas, variações em fatores meteorológicos como temperatura e precipitação podem comprometer o crescimento e desenvolvimento das plantas, resultando em perdas produtivas (Ferreira, 2010). Esses impactos podem ocorrer em qualquer região, inclusive nas mais preparadas, representando um risco constante para a agricultura. Diante disso, torna-se fundamental estudar a influência das variáveis climáticas na produtividade agrícola, visando estratégias que minimizem os prejuízos decorrentes dessas oscilações.

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura altamente sensível às variações climáticas, especialmente no que se refere à precipitação e temperatura. A disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da planta, seja por déficit ou excesso, exerce grande influência na produtividade do grão, tornando a cultura vulnerável às oscilações climáticas (Reis *et al.*, 2020). Diante desse cenário, compreender a influência dessas variáveis meteorológicas sobre o desenvolvimento da soja é essencial para mitigar possíveis impactos negativos na produção. Nesse contexto, a região do MATOPIBA, que engloba o Norte e Nordeste dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, destaca-se como uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil.

Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2023), a produção de grãos nessa região deve alcançar 48 milhões de toneladas nos próximos dez anos, ocupando uma área plantada de 11 milhões de hectares. Esse crescimento será impulsionado, sobretudo, pelo aumento da produtividade, consolidando o MATOPIBA como responsável por 12,8% da produção nacional de grãos. A soja, principal cultura da região, apresenta alta rentabilidade e grande parte de sua produção é destinada à

exportação (Silva *et al.*, 2019). Portanto, considerando a forte dependência da produtividade agrícola em relação às condições climáticas, torna-se fundamental avaliar os efeitos das variáveis meteorológicas sobre a cultura da soja, especialmente em áreas estratégicas como o MATOPIBA.

Dessa forma, considerando a relevância econômica do MATOPIBA como uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil, torna-se essencial compreender como as variáveis climáticas influenciam a produtividade da soja na região. Estudos indicam que oscilações na temperatura, precipitação e disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cultura afetam diretamente seu desenvolvimento e produtividade, tornando a soja particularmente vulnerável a condições climáticas adversas (Reis *et al.*, 2020). Além disso, projeções climáticas sugerem que o aumento da temperatura média e a irregularidade das chuvas podem comprometer a estabilidade da produção agrícola, especialmente em áreas de sequeiro (Sentelhas *et al.*, 2015).

Embora haja estudos climatológicos voltados para a agricultura no MATOPIBA, ainda são escassas as pesquisas que analisam, de forma específica, os impactos das variações climáticas na produção de grãos ao longo dos últimos anos, sobretudo na porção maranhense da região, que possui a segunda maior extensão territorial dentro do MATOPIBA. Dessa forma, este estudo tem como objetivo principal analisar as variações climáticas ocorridas nas regiões maranhenses do MATOPIBA nos últimos anos e avaliar como essas mudanças influenciaram a produtividade da soja, contribuindo para o entendimento dos desafios e oportunidades que o cenário climático impõe à agricultura regional.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar a variabilidade climática na porção maranhense do MATOPIBA e sua influência na produtividade da soja ao longo do período de 1993 a 2023.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a série temporal de dados de precipitação e temperatura no período de

1993 a 2023;

- Identificar períodos secos e chuvosos da região utilizando o Índice de Precipitação Padronizada (SPI);
- Avaliar tendências nas variáveis meteorológicas ao longo do período de estudo;
- Correlacionar a produtividade da soja com as variações climáticas para identificar os impactos das condições meteorológicas na produção do grão.

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1. Soja no Maranhão

A cultura da soja foi introduzida no Maranhão através de pesquisas realizadas pela Embrapa que desenvolveu tecnologias para o cultivo do grão no bioma cerrado, atraindo produtores das regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, para a produção de soja em suas fronteiras (Feitosa *et al.*, 2023).

A expansão do cultivo da soja no cerrado maranhense teve início no Sul do estado na região de Balsas em meados de 1970. Durante a segunda metade da década de 1990, os principais municípios em termos de produção no Estado eram Tasso Fragoso, Riachão e Balsas. No início do século XXI, outros municípios ganharam destaque na produção de soja, incluindo Alto Parnaíba, São Raimundo das Mangabeiras, Sambaíba, Fortaleza dos Nogueiras e Chapadinha (Botelho, 2017).

Na região maranhense a cultura da soja é favorecida por participar no cenário do estado como um dos exportadores da commodity, da qual tem a China e Europa como os seus principais destinos (Feitosa *et al.*, 2023). O estado torna-se estratégico pois dispõe de estrutura ferroviária e portuária do Porto do Itaqui para o escoamento de grãos para exportação, o estado também é beneficiado pela proximidade com os mercados externos, dentre eles os Estados Unidos, países europeus e o Canal do Panamá, possibilitando o acesso ao mercado asiático (Buss *et al.*, 2019).

Outro fator que favorece a produção da soja no Maranhão é as condições climáticas que são ideais para o desenvolvimento da cultura. Segundo o 11º Levantamento da Safra de Grãos divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) a produção de soja no estado foi de 3,91 milhões de toneladas na safra 2022/2023, representando um aumento significativo quando comparada com a safra

anterior. No entanto, na safra 2023/2024 ocorreu uma queda na produtividade do grão no estado, devido ao déficit hídrico que causou atrasos no plantio e afetou o desenvolvimento da cultura, principalmente entre os meses de dezembro de 2023 e janeiro de 2024 (CONAB, 2024).

3.2. Região MATOPIBA

Através da expansão do cultivo da soja para as diversas regiões do país, surgiu a região denominada “MATOPIBA”, considerada a grande fronteira agrícola nacional, sendo responsável por grande parte da produção brasileira de grãos e fibras, tendo como base os sistemas de manejo adotados ao longo dos anos em outras regiões do país, compreendendo os biomas Cerrado, transição Cerrado-Caatinga e transição Amazônia-Cerrado, nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, apresentando predominância do bioma Cerrado (Santos; Vieira; Silva, 2023).

De acordo com Loayza *et al.* (2023), a região do MATOPIBA se destacou no Brasil por sua importância no crescimento da produção de soja, impulsionada pela disponibilidade de vastas áreas cultiváveis e condições climáticas específicas, o que tem levado a projeções otimistas em relação a expansão de suas áreas plantadas.

A expansão dessa região, conhecida como a nova fronteira agrícola, ocorreu devido à combinação de fatores como a topografia plana, o menor custo das terras em relação ao Sul do Brasil e o desenvolvimento de tecnologias que permitiram a adaptação da produção às condições do cerrado. Desde o início, os sistemas de cultivo adotados foram intensivos, visando aumentar a produtividade (EMBRAPA, 2024).

O Plano de Desenvolvimento Agropecuário da região foi oficializado em novembro de 2015 pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) através da portaria nº 244, após o lançamento do Plano de Desenvolvimento Agrícola para a região (Decreto Federal, 2015). A área total de MATOPIBA engloba aproximadamente 730 mil km² em 31 microrregiões e 337 municípios dos quatro estados pertencentes a região, e de acordo com a classificação do IBGE quase metade da área total (340 mil km²) correspondem a estabelecimentos agrícolas e mais da metade encontra-se no Maranhão (Barbirato; Souza, 2018).

Segundo dados da Embrapa (2024), a produção agrícola em MATOPIBA na safra 2022/2023 apresentou cerca de 4,8 milhões de hectares plantados que renderam 18,5 milhões de toneladas. Já na safra 2023/2024 a produtividade foi afetada pela falta de

chuvas e altas temperaturas, que causaram atraso no plantio, principalmente da soja. Dessa maneira, foi necessário serem feitos replantios de um percentual significativo dos plantios da oleaginosa que foram realizados a partir da primeira quinzena de setembro, devido às chuvas que foram escassas e mal distribuídas durante o período (CONAB, 2024).

Até 2050, a produção de soja deve ocupar 12 milhões de hectares a mais no Brasil, sendo MATOPIBA a região de maior crescimento, porém estudos apontam que nesse mesmo espaço de tempo as mudanças climáticas deverão causar secas cada vez mais severas no Cerrado, e o MATOPIBA é justamente a área mais suscetível à falta de chuvas, e isso tem se agravado dia após dia devido as mudanças climáticas (Sax; Angelo, 2020).

3.3. Influência de fatores climáticos na cultura da soja

A soja é uma oleaginosa altamente dependente das condições climáticas, e segundo Balbino (2020) ela será nos próximos anos a cultura mais afetada com as mudanças climáticas, chegando a perder até o ano de 2070 quase metade das áreas plantadas em decorrência do aumento da deficiência hídrica. De acordo com estudos já realizados, a perda de água das plantas pode ser justificada pelo aumento da temperatura que pode ampliar a deficiência hídrica causada por uma maior evapotranspiração da planta, gerando um maior risco para a produção da cultura (Baptista *et al.*, 2021).

A soja é um grão originário de clima temperado, porém tem uma boa adaptação a outras faixas climáticas. Para ter um melhor desenvolvimento, a cultura necessita que a temperatura esteja entre 20°C e 35°C, pois quando as condições climáticas estão abaixo ou acima dessa faixa a planta pode apresentar problemas fisiológicos ligados a floração e formação de nódulos nas raízes. A semeadura não deve ser realizada quando a temperatura do solo estiver abaixo de 20°C, uma vez que a germinação e a emergência da planta ficariam comprometidas (Adama, 2020).

Quanto a disponibilidade hídrica, a soja precisa de 450 a 800 mm de água durante todo o seu ciclo de desenvolvimento. Os períodos considerados mais críticos em relação a exigência de água para a planta são a germinação, emergência das plântulas, e a floração e enchimento dos grãos. É importante salientar que após o plantio a semente da soja precisa absorver cerca de 50% da sua massa em água para ter uma boa germinação. A oferta de água em relação a falta ou excesso durante esses estádios apresenta grande influência na produtividade da lavoura (Jacinto, 2023).

A ocorrência de eventos extremos como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) têm se transformado nos maiores limitantes da produtividade da soja no Brasil, pois esses fenômenos causam secas e altas temperaturas que tendem a se tornar mais frequentes e intensos com as mudanças climáticas. Assim, é necessário a escolha da data correta de semeadura da soja como estratégia para a redução dos efeitos climáticos extremos, buscando minimizar os impactos das fases dos ENOS (Cultivar, 2020).

3.4.Variabilidade Climática

A interação entre os fenômenos climáticos resulta em efeitos classificados como mudança climática e variabilidade climática, a mudança climática consiste em alterações de longo prazo na temperatura, precipitação e demais variáveis climatológicas, sendo um fenômeno que acompanha a Terra desde a sua origem. Já a variabilidade climática consiste na variação dos fenômenos climáticos em um período, e é determinada pela frequência de valores de temperatura e precipitação que se desviam da média. Dessa forma, eventos de anos mais quentes ou menos quentes, que reflitam em alterações das temperaturas máximas e mínimas, bem como em anos chuvosos e secos, caracterizam a variabilidade climática (IPCC, 2014).

O Brasil apresenta uma alta variabilidade climática devido a sua extensão, pois as terras brasileiras estão sob o domínio de baixas e altas latitudes, sendo um país extremamente diverso no que diz respeito à precipitação pluvial e temperaturas, tornando as suas várias regiões altamente particulares em relação a características climáticas (Siqueira, 2014).

As mudanças climáticas tornaram-se um dos maiores desafios a serem superados no meio rural em busca do desenvolvimento sustentável. As consequências dessas mudanças afetam a produtividade no campo. Sendo assim, é de fundamental importância a análise das circunstâncias geradoras dos impactos climáticos em relação a agropecuária, podendo através disso serem desenvolvidas metodologias de redução dos danos e adaptação as condições climáticas desfavoráveis (Magalhães *et al.*, 2021).

Alguns estudos já realizados buscaram compreender os impactos da variabilidade climática na produção agrícola. Em seu estudo Ferreira (2010) analisou a variabilidade climática e suas consequências para a produtividade da soja na região Sul do Brasil, utilizando modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade através de dados de precipitação e temperatura de diferentes fontes, com o objetivo de encontrar a resposta

da variabilidade climática sobre a produtividade da soja, evidenciando decréscimos e aumentos na produtividade do grão em diferentes anos, considerando as variáveis climáticas de cada ano, e as localidades estudadas.

Já Baptista *et al.* (2021) verificaram como a variabilidade climática afetou a produtividade da soja em diferentes regiões do país entre os anos de 2002 a 2016, foi incluso na pesquisa a análise da influência da temperatura oceânica do pacífico equatorial como forma de representar a intensidade do fenômeno El Niño sobre a produtividade da soja, apresentando um resultado positivo na produtividade.

3.5 El Niño e La Niña

No regime climático sazonal de uma determinada localidade, é comum observar oscilações climáticas severas que podem modificar o padrão climático esperado para um dado período. Essas variações surgem devido às mudanças na circulação atmosférica, resultantes de perturbações nos gradientes de pressão, que influenciam a formação dos ventos. Essas alterações impactam a estrutura de circulação global sobre a América do Sul, dando origem a fenômenos diversos, como El Niño e La Niña, que ocorrem em larga escala (Medeiros *et al.*, 2021).

A ocorrência do fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENOS) é caracterizado por anomalias na temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Tropical, que podem ser positivas (El Niño) ou negativas (La Niña). Diversos estudos vêm investigando a influência do ENOS na variabilidade climática, principalmente a precipitação pluviométrica, em várias regiões do mundo, permitindo compreender e formular estratégias para enfrentar os riscos associados à variabilidade climática, beneficiando a agricultura, economia e meio ambiente, favorecendo uma maior estabilidade socioeconômica de sociedades e governos (Medeiros *et al.*, 2022).

Segundo Minaki e Montanher (2019), os fenômenos El Niño e La Niña são duas fases opostas relacionadas à Temperatura da Superfície do Mar (TSM), sendo uma fase positiva, conhecida como fase quente, e uma fase negativa que consiste na fase fria. No entanto, os impactos pluviométricos do ENOS variam conforme a região afetada, de modo que não se pode associar o El Niño exclusivamente a períodos secos e o La Niña a períodos chuvosos. O El Niño – Oscilação Sul (ENOS) apresenta uma influência espacial identificável sobre as várias adversidades climáticas que ocorrem em diferentes regiões do Brasil, embora seja dinâmico e assimétrico em seus efeitos e temporalidade, e apesar

de ser considerado cíclico, o ENOS não ocorre regularmente, representado a principal fonte de variabilidade climática em curto prazo nas escalas sazonais e interanuais.

No Brasil, diversos estudos buscam estabelecer a relação dos eventos El Niño e La Niña na variabilidade climática que vem ocorrendo e se intensificando ao longo dos anos. Em um de seus estudos Rodrigues *et al.* (2017) analisaram a influência do ENOS no regime de chuvas do Nordeste que é uma das regiões mais vulneráveis aos impactos causados pela variabilidade climática, ficando comprovado que os fenômenos influenciam diretamente no regime de chuvas da região.

Após um período prolongado sob as condições do La Niña que durou até março de 2023, houve um rápido aumento da temperatura das águas do Pacífico Equatorial. Esse aquecimento levou à confirmação oficial de início das condições do El Niño em junho do mesmo ano. Nos primeiros meses, as anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) variaram entre 0,9 °C e 1,3 °C, mas em setembro e outubro já atingiam aproximadamente 1,5 °C, caracterizando uma classificação mais intensa do fenômeno El Niño (INMET, 2023). Ademais, o início da safra 2023/2024 foi afetado pela fase quente do El Niño, que trouxe atrasos no plantio da soja e demais culturas por falta de chuvas nas diferentes regiões do país, influenciando diretamente na produtividade final dos grãos.

3.6 Modelos matemáticos de análises climáticas

O clima é considerado um dos fatores determinantes na distribuição e disseminação dos seres vivos pelos territórios, pois afeta diretamente o solo e todo o bioma nele existente, assim como seu potencial de uso do solo e produção agrícola (Silva Filho *et al.*, 2021). Nesse cenário, é de fundamental importância o conhecimento da variação dos elementos climáticos, pois através disso é possível identificar se determinada cultura possui capacidade de adaptação à uma determinada região, considerando os elementos climáticos (Franco *et al.*, 2023).

Os estudos climáticos são baseados em observações meteorológicas e ao caracterizar o clima de uma região obtemos um panorama sobre o regime de chuvas, temperaturas e demais elementos que marcam suas condições naturais (INMET, 2022).

Os modelos climatológicos, que consistem em ferramentas matemáticas e computacionais, são essenciais para analisar e prever o comportamento do clima de uma determinada região ao longo do tempo. Baseando-se nas interações entre os principais

componentes do sistema climático, como a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre, esses modelos permitem compreender a variabilidade climática e seus impactos ambientais (IPCC, 2028).

Diante da complexidade dos fenômenos climáticos, diversos índices vêm sendo desenvolvidos para auxiliar no monitoramento e compreensão desses fenômenos, dentre eles o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) é frequentemente utilizado. O SPI tem por objetivo associar um valor numérico único à variável precipitação, que possa ser comparado entre regiões e em períodos do ano com climas diferenciados (INMET, 2024).

Conhecido como *Standardized Precipitation Index* (SPI), este índice é frequentemente utilizado em estudos de diversos autores, pois ele apresenta vantagens em relação aos demais índices, sendo destaque por permitir a caracterização do déficit ou excesso de precipitação em uma determinada localidade, possuindo flexibilidade temporal e uma certa simplicidade de utilização de dados (Da Silva *et al.*, 2020).

No entanto, métodos de análise de tendências vêm atraindo a atenção de diversos pesquisadores por contribuir no conhecimento do padrão das secas, colaborando para sua compreensão, assim como variações futuras. Em relação às secas, o uso de testes não paramétricos como o de Mann-Kendall entre outros, tem sido bastante útil para identificar e caracterizar as suas tendências em várias escalas de tempo (Sousa, 2024).

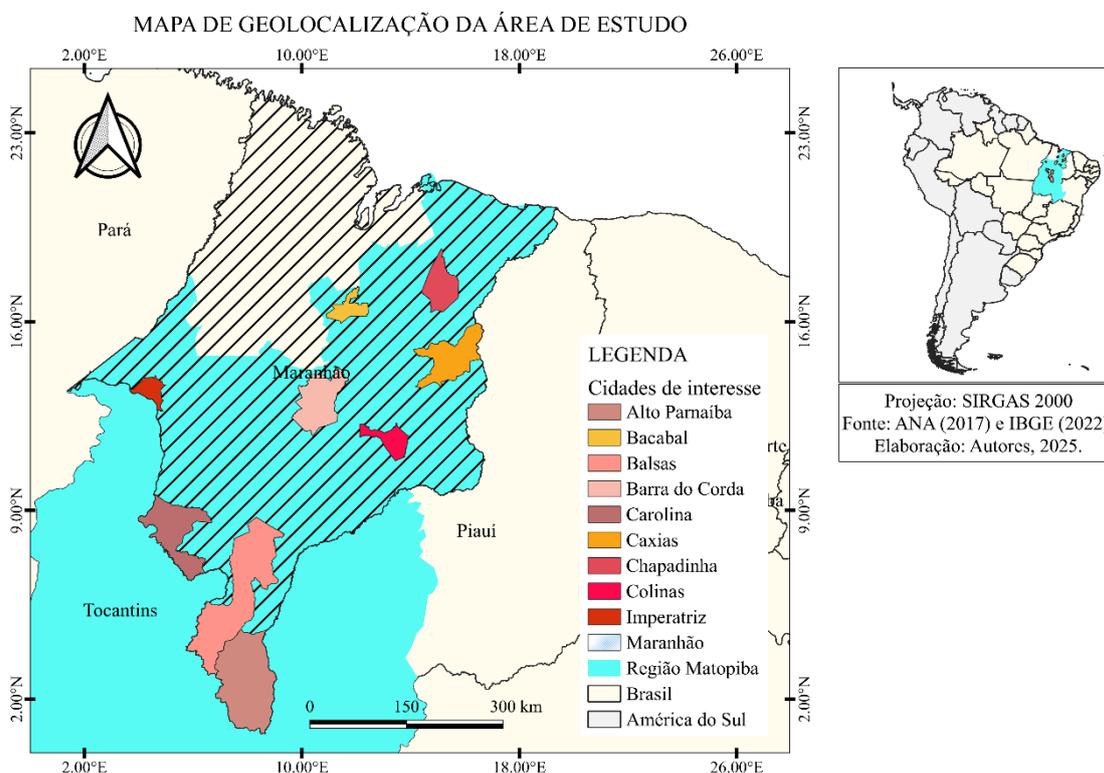
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na porção maranhense do MATOPIBA, uma região de expansão agrícola que abrange 135 municípios, o que corresponde a 33% do território total (Sousa *et al.*, 2024).

Conforme ilustrado na Figura 1, essa área está distribuída por cinco mesorregiões do estado, abrangendo 14 dos 60 municípios do Norte Maranhense, 16 dos 52 municípios do Oeste Maranhense e, 42, 44 e 19 municípios nas mesorregiões do Centro, Leste e Sul Maranhense, respectivamente (Feitosa *et al.*, 2023).

Figura 1 Área de estudo, MATOPIBA Maranhense.



Fonte: Autora, 2025.

Os municípios maranhenses que fazem parte do MATOPIBA se localizam em três biomas distintos: Amazônia, Cerrado e Caatinga. Nessas regiões, que representam a nova fronteira agrícola do estado, há predominância de clima tropical, com temperaturas

médias anuais superiores a 24°C e índices pluviométricos anuais variando entre 1500 e 2500 mm (Araújo *et al.*, 2016; Martins, Blanco, Melo, 2020; Feitosa *et al.*, 2023).

4.2 Dados Meteorológicos

Os dados de precipitação total mensal e temperatura média compensada mensal, referentes ao período de janeiro de 1993 a dezembro de 2023 (31 anos), foram obtidos através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As informações foram coletadas por meio de estações meteorológicas convencionais localizadas em cidades do MATOPIBA maranhense, apresentadas na tabela 1. A utilização de dados provenientes de estações meteorológicas convencionais garante a confiabilidade e a precisão das informações, que serão empregadas na análise das condições climáticas da região.

Tabela 1. Cidades, estações meteorológicas escolhidas e suas coordenadas geográficas.

CIDADE	CÓDIGO	LATITUDE	LONGITUDE
Alto Parnaíba	82970	-9.108	-45.948
Bacabal	82460	-4.218	-44.775
Balsas	82768	-7.529	-46.046
Barra do Corda	82571	-5.506	-45.237
Carolina	82765	-7.337	-47.459
Caxias	82476	-4.867	-43.356
Chapadinha	82382	-3.742	-43.352
Colinas	82676	-6.033	-44.233
Imperatriz	82564	-5.536	-47.478

Fonte: Autora, 2025.

4.3 Dados de Produtividade

Os dados de produtividade da soja foram obtidos através da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), por meio de pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM) que coleta anualmente informações sobre a produção agrícola do país, incluindo dados como área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das culturas (IBGE, 2024).

A análise da produtividade da soja foi realizada utilizando o rendimento médio da produção (em quilogramas por hectare, convertido em toneladas) dos nove municípios em estudo, abrangendo o período de 1993 a 2023. Para garantir a integridade da série temporal, eventuais falhas ou ausências de dados de rendimento médio de alguns municípios e anos, foram cuidadosamente preenchidas com médias, evitando subestimar ou superestimar a produtividade ao longo do período analisado.

4.4 Índice de precipitação padronizada (SPI)

A quantificação dos déficits de precipitação ao longo dos anos foi realizada por meio do Índice de Precipitação Padronizada (SPI), um indicador amplamente utilizado na análise da variabilidade da precipitação em diferentes escalas temporais. Desenvolvido por McKee *et al.* (1993), o SPI foi criado para monitorar e avaliar secas, utilizando apenas dados mensais de precipitação.

Segundo Andrade *et al.* (2023), o SPI é calculado por meio da conversão dos valores de precipitação em uma distribuição normalizada, possibilitando a comparação e definição das condições de seca em diferentes regiões. O cálculo inicia-se com um ajuste de uma função de densidade de probabilidade à distribuição da precipitação local, sendo a distribuição Gama a mais utilizada para representar dados de precipitação, devido à sua capacidade de se ajustar a dados assimétricos e positivos.

O SPI é uma ferramenta valiosa para a gestão de recursos hídricos e planejamento agrícola, especialmente em regiões como o MATOPIBA, que são suscetíveis a eventos de seca. Ao analisar o SPI em conjunto com outros indicadores climáticos e informações sobre a produção agrícola, é possível obter uma compreensão mais abrangente das condições de seca e seus impactos na região. A função de Gama é obtida pelas equações 1 e 2:

$$g(x; \alpha, \beta) x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \text{ para } x > 0$$

Equação 1.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

Equação 2.

Sendo:

$\alpha > 0$ = parâmetro de forma (adimensional);

$\beta > 0$ = parâmetro de escala (mm);

$x > 0$ = quantidade de precipitação (mm);

$\Gamma(\alpha)$ = função gama.

A estimativa dos parâmetros α e β pode ser feita utilizando o método de verossimilhança através das equações 3, 4 e 5.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right)$$

Equação 3.

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

Equação 4.

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

Equações 5.

Sendo:

\bar{x} = média aritmética da precipitação pluvial (mm);

n = número de observações de precipitação.

Após serem estimados os parâmetros α e β , calcula-se a distribuição de probabilidade acumulada de um evento de precipitação num dado período de tempo. A distribuição de probabilidade acumulada é obtida pela equação 6:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx$$

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

Equação 6.

A função Gama não admite valores nulos, porém pode conter valores de $x = 0$. Nesses casos, para a probabilidade cumulativa mista de precipitação é determinada pela equação 7:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Equação 7.

Sendo:

$H(x)$ = distribuição de probabilidade cumulativa;

q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros);

$G(x)$ = distribuição cumulativa teórica.

De acordo com Andrade *et al.* (2023), o SPI apresenta valores positivos quando a precipitação supera o valor médio de longo prazo, e se torna negativo quando a precipitação diminui e fica abaixo da média. Além disso, é um índice relativamente simples de usar em comparação com outros índices de seca, pois requer apenas uma única série de dados de precipitação de longo prazo.

O índice é obtido através da equação 8:

$$SPI = Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_i}$$

Equação 8.

Sendo:

X_i = precipitação do período selecionado durante o ano i ; \bar{X}_i = precipitação média de longo prazo; σ_i = desvio padrão para o período selecionado.

De acordo com a classificação do SPI, a seca ocorre quando o valor é negativo, e termina quando o valor do SPI se torna positivo, permitindo que seja caracterizado não somente as secas, mas também os períodos mais úmidos (Silva, 2022). A classificação do SPI é dada de acordo com a tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI.

Valores de SPI	Classes
< -2,00	Seca Extrema
-1,99 a -1,50	Seca Severa
-1,49 a -1,00	Seca Moderada
-0,99 a -0,49	Seca Leve
-0,48 a 0,49	Quase normal
0,50 a 0,99	Chuva Leve
1,00 a 1,49	Chuva moderada
1,50 a 1,99	Chuva Severa
> 2,00	Chuva Extrema

Fonte: Adaptado de McKee *et al.* (1993); Santos *et al.* (2017).

4.5 Análise de tendências

Na pesquisa foi utilizada a análise de tendência da precipitação total, temperatura média e produtividade da soja para verificar o comportamento das tendências ao longo da série histórica em estudo.

Para isso, foi utilizado o teste não paramétrico proposto por Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), que tem como objetivo analisar e identificar tendências referente a uma determinada série temporal de dados.

Neste trabalho, algumas variáveis não apresentavam uma série completa de 31 anos, devido à algumas estações meteorológicas que foram desativadas e dessa forma impossibilitando a coleta dos dados dos últimos anos de alguns dos municípios em estudo (variáveis de precipitação e temperatura, estações Alto Parnaíba: período de dados 1993/2021, Caxias: período de dados 1993/2022). Contudo, é importante utilizar essas séries mesmo com ausência de anos e aplicar o teste de Mann-Kendall nas mesmas, sendo possível utilizar o preenchimento de falhas com a média da série temporal.

O teste de Mann-Kendall é considerado não paramétrico por não fazer distinção quanto a sua forma de distribuição (Cabral; Lucena, 2020). De acordo com Fernandes *et al.* (2022), a equação do teste é dada por:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{signal}(x_j - x_i)$$

Equação 9.

Em que S corresponde ao total das contagens de $(x_j - x_i)$, x_j é o valor inicial após o x_i , e (n) é o número de dados da série temporal. Quando o valor de S é positivo, indica que a tendência também é positiva, e o valor de S negativo indica uma tendência decrescente (Nascimento, 2023).

Para cada par de dados atribui-se os seguintes valores da equação:

$$\text{signal} = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

Equação 10.

Quando o número de dados (n) é alto, a distribuição de probabilidade S tende para uma distribuição normal, apresentando média zero e variância calculada por:

$$\text{VAR} = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q tp(tp-1)(2tp+5) \right]$$

Equação 11.

Em que: (tp) corresponde ao número de dados com valores iguais em certo grupo, (q) é o número de grupos que apresentam valores iguais na série de dados e em um grupo p. A estatística do teste de Mann-Kendall baseia-se no valor da variável ZMK, obtido através da equação:

$$Z_{MK} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{s - 1}{\sqrt{Var(S)}}, se S > 0 \\ 0, se S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}}, se S < 0 \end{array} \right\}$$

Equação 12.

A presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal é avaliada usando-se o valor Z, para testar a hipótese nula, ou seja, que nenhuma tendência existe. Valores positivos de ZMK indicam tendências crescentes, e valores negativos indicam tendências decrescentes. Para testar tendências crescentes ou decrescentes em um nível significativo α , a hipótese nula é rejeitada quando o valor absoluto de Z for maior que $Z_{1-\alpha/2}$, sendo obtido utilizando a tabela de distribuição normal (Fuzzo *et al.*, 2024). Para o estudo adotou-se o nível de significância de $\alpha = 0,05$ ou 5%.

4.6 Teste de Significância de T-Student

Para a validação dos dados foi utilizado o teste de significância T-Student, e através dele foi possível verificar se os valores das tendências obtidas por Mann-Kendall apresentavam significância estatística.

Testes paramétricos se dividem em dois grupos, sendo eles os testes de amostras independentes e os testes de amostras emparelhadas, porém também podem ser aplicados em casos de amostra única (Lapa, 2021).

O teste T-Student é um teste de significância de grande importância, principalmente quando utilizado em análises de pesquisas da área da meteorologia, para assim, estimar e validar dados (Nascimento, 2023).

De acordo com Bussab e Morettin (2010); Almeida Júnior (2017), o uso do teste t de Student é adequado para testar variáveis que seguem uma distribuição normal com média μ e variância σ^2 desconhecida.

A estatística do teste é dada por:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s \sqrt{n}} \sim tn - 1$$

Equação 13.

Em que: \bar{x} corresponde a média amostral, μ_0 é o valor usado para ser comparado com a média na hipótese nula, s corresponde ao desvio padrão da amostra e n é o tamanho da amostra. Seguindo a distribuição t de Student com $n-1$ graus de liberdade, através da equação 14.

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

Equação 14.

O comportamento de grandes amostras é verificado pela equação 15:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\bar{x} - \mu_0}{s} \sqrt{n} = \infty$$

Equação 15.

É possível observar que à medida que o tamanho da amostra cresce, a estatística do teste também cresce, concluindo, conseqüentemente, que a média amostral é diferente da média populacional que está sendo testada.

4.7. Produtividade da Soja

Para o cálculo da produtividade da soja, foram utilizados o conjunto de dados da plataforma MapBiomas Coleção 9 (2024), que corresponde a área de soja plantada. Utilizou-se esta base para extrair dados quantitativos sobre a área plantada de soja nas cidades analisadas abrangendo o período de 1993 a 2023. Assim como também dados do IBGE: este sistema proporcionou a obtenção dos dados de rendimento médio da soja nas cidades produtoras. O tratamento de dados consistiu em preenchimento de falhas: Para as cidades que apresentaram falhas nos dados de rendimento, a média dos rendimentos de anos anteriores foi utilizada para preencher essas lacunas. Nas cidades que não tinham dados de rendimento disponíveis, foram utilizados os rendimentos de cidades vizinhas produtoras de soja, aplicando o método de "vizinho mais próximo" para garantir a precisão dos dados.

A produtividade da soja foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Rendimento Médio} \times \text{Área Plantada}}{1000}$$

Equação 16.

Em que:

- Rendimento Médio foi o rendimento médio da soja em quilogramas por hectare (kg/ha).
- Área Plantada foi a área total em hectares (ha) dedicada ao cultivo de soja.

Após a aplicação dos métodos de preenchimento e substituição dos dados ausentes de produtividade da soja, foram gerados gráficos para o período de 1993 a 2023. Os resultados foram analisados para identificar tendências e padrões ao longo dos anos, considerando as variáveis climáticas que poderiam influenciar a produção.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise agroclimática de Alto Parnaíba

A precipitação média anual (Figura 2 a) apresentou picos de 144,15 mm em 2004 e 154,00 mm em 2009. No entanto, uma queda acentuada na ocorrência foi observada em 2007, com 82,86 mm, e novamente em 2014, com 85,39 mm. Esses anos coincidem com a atuação moderada do fenômeno El Niño em 2006-2007, que pode ter contribuído para a redução da precipitação (CPTEC, 2025). A partir de então, o gráfico demonstrou valores consistentemente baixos em comparação aos anos anteriores. Assim como identificado por Silva (2022) e Bodas Terassi *et al.* (2018) ao associarem a redução da chuva a atuação do fenômeno El Niño.

Conforme apontam Nascimento *et al.* (2024), é possível identificar o comportamento da variabilidade climática utilizando uma série robusta de dados. O regime de pluviometria é influenciado pela presença de fenômenos como El Niño e La Niña, que permitem identificar eventos considerados extremos, como as chuvas intensas. Essa particularidade foi analisada em seu estudo para o município de São Luís, no estado do Maranhão, no período de 1974 a 2022.

Quanto à temperatura média (Figura 2 b), de acordo com o gráfico, revelou um aumento gradual ao longo do tempo, atingindo um pico de 26,7 °C em 1998. Em 2011, ocorreu uma queda de nível para 25,9 °C, mas a partir de 2012, a temperatura elevou-se novamente, alcançando um ápice de 27,46 °C em 2016. Esse aumento pode estar relacionado à forte presença de El Niño em 2015-2016, que frequentemente causa elevações de temperatura em várias regiões (CPTEC, 2025). Embora não tenham sido observadas quedas acentuadas, o aquecimento se manteve constante ao longo da série.

De acordo com Barbosa (2022) a influência do ENOS, que, por meio das variações na circulação de Walker, intensifica a subsidência de ar sobre o Nordeste Brasileiro (NEB) e o estado do Maranhão durante o La Niña, enquanto a deficiência no caso do El Niño. Essas alterações na subsidência estão diretamente relacionadas às variações na temperatura do ar, com a La Niña contribuindo para um resfriamento e o El Niño, para um aquecimento das temperaturas na região.

De acordo com o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), foram notadas oscilações regulares entre condições secas e úmidas (Figura 2 c). Secas severas e extremas foram registradas em 2008 (-2,39 mm), 2017 (-1,99 mm) e 2021 (-2,48 mm), porém em 2017 foi um ano de ocorrência do La Niña com atuação moderada, conforme apontado pelo CPTEC. Períodos chuvosos ocorreram em 2004 (2,71 mm) e 2010 (2,69 mm), anos em que o La Niña pode ter influenciado as chuvas, promovendo condições mais úmidas conforme Madeco *et al.* (2010). Esses comportamentos destacam a variabilidade climática da região, que pode impactar diretamente a agricultura local.

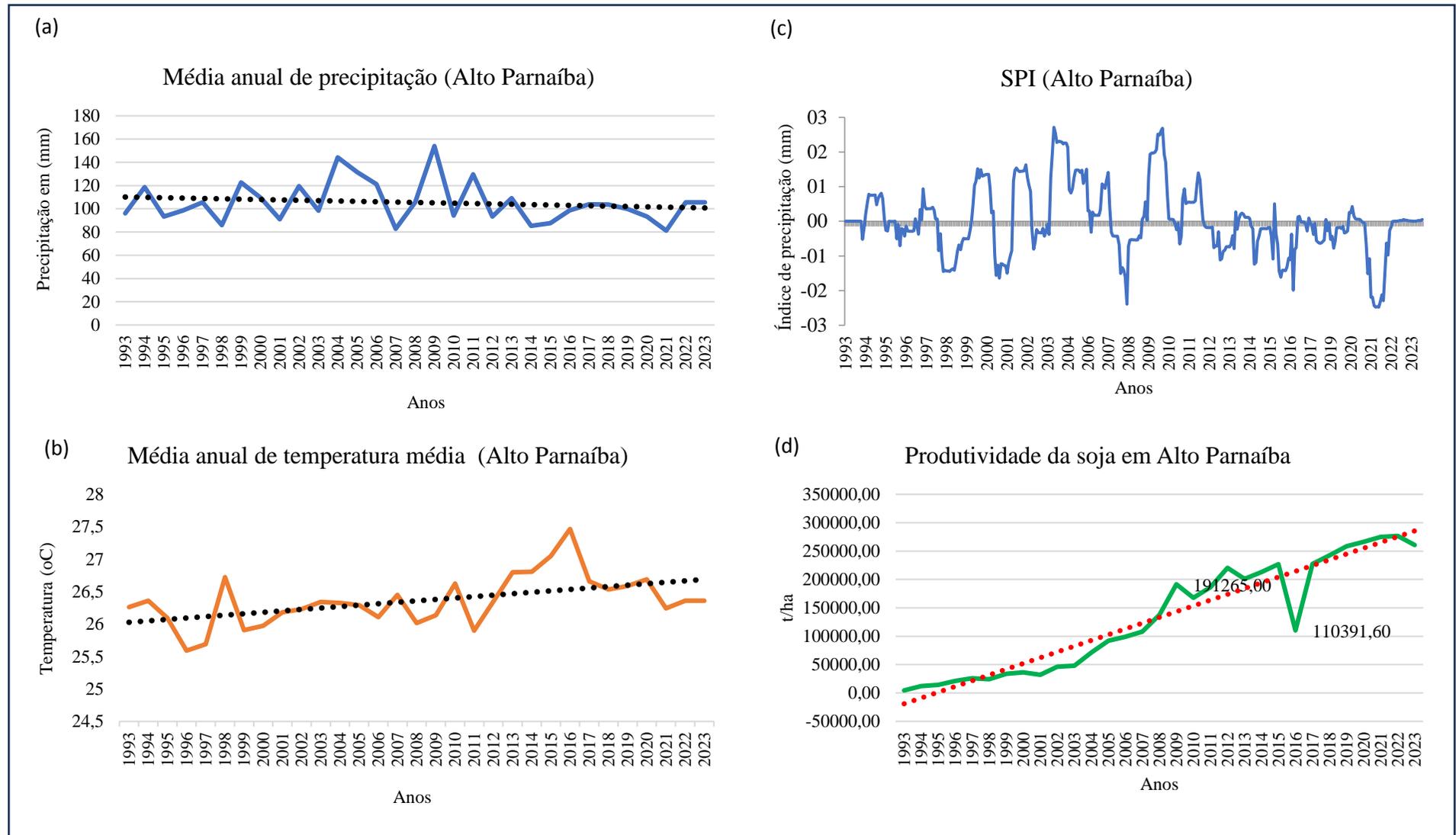
Para Nascimento *et al.* (2017) na maioria das situações, as características de El Niño e La Niña estão associadas a períodos secos e chuvosos, respectivamente, no Maranhão, especialmente na região Norte. O SPI se destaca como uma ferramenta poderosa para identificação de eventos extremos de chuvas no estado.

A produtividade da soja ao longo da série mostrou um crescimento gradual, com uma alta de 191.265,00 t/ha em 2009 na cidade de Alto Parnaíba (Figura 2 d). Contudo, em 2016, foi identificada uma queda significativa, com a produtividade registrada em 110.391,60 t/ha, resultando em uma redução de aproximadamente 80.872,4 t/ha. Esse declínio pode estar relacionado ao fenômeno de El Niño com intensidade forte e moderada respectivamente em relação aos anos 2009 e 2016, que frequentemente causa estresse hídrico. A partir do ano seguinte, a produtividade começou a aumentar novamente. Ao analisar o gráfico de produtividade, observou-se que em 2016 a média anual estava na faixa de 100.000,00 t/ha, coincidindo com a ocorrência de seca, o que

sugere que a escassez de água pode ter afetado a safra de soja naquele ano. Apesar das temperaturas elevadas, a interação entre os fenômenos climáticos e a disponibilidade de água provavelmente teve implicações negativas no crescimento da produtividade.

Para Santos (2023) a produtividade da soja é altamente influenciada por fatores climáticos. Entender os efeitos desses fatores é fundamental para avaliar o comportamento na produção de soja. Além disso, essa compreensão permite o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes, que podem mitigar os impactos adversos e otimizar o rendimento das atividades. Assim, a análise climática se torna uma ferramenta crucial para garantir a sustentabilidade da produção agrícola.

Figura 2. Variáveis climatológicas e produtiva para Alto Parnaíba (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



Fonte: Autora, (2025).

5.2. Análise agroclimática de Bacabal

A análise da precipitação média anual (figura 3 a) evidenciou em 2008 um índice elevado de 208 mm, enquanto 2011 registrou 180,16 mm, caracterizando assim anos de alta umidade. Esses anos coincidem com a atuação do fenômeno de intensidade moderada do La Niña (CPTEC, 2025), que pode ter contribuído para o aumento das chuvas, corroborando com Januario (2021) que identificou que o período mais prolongado de chuvas ocorreu entre os anos de 2008 e 2009, especialmente de janeiro a abril, com eventos relacionados ao La Niña. Em contrapartida, observou-se uma queda significativa em 2012, com apenas 104,6 mm, e uma leve recuperação em 2016, que apresentou 108,88 mm. O ano de 2016 também foi afetado pela forte atuação do El Niño, o que pode ter influenciado a variabilidade na precipitação. Notando-se assim uma pequena recuperação na precipitação em anos subseqüentes em relação à disponibilidade hídrica.

Em Santos *et al.* (2020) os resultados alcançados demonstraram que a região vem enfrentando extremos climáticos, com aumento das temperaturas diurnas e noturnas, além de variações no volume de chuvas, que oscilam entre aumento e diminuição em diferentes localidades. Essas mudanças afetaram a biodiversidade, a agricultura e a saúde das comunidades, necessitando de estratégias de adaptação e mitigação.

No que diz respeito à temperatura média anual (figura 3 b), os anos de 2010 e 2016 foram marcados por elevações significativas, com 28,89 °C e 28,9 °C, respectivamente, indicando um aquecimento acentuado. Esses aumentos podem estar relacionados a eventos climáticos extremos frequentemente associados ao La Niña (CPTEC, 2025). Por outro lado, as quedas ocorreram em 1997, com 27,17 °C, e em 2022, com 26,67 °C. O aumento das temperaturas médias, especialmente em 2016, pode estar associado a eventos climáticos extremos que impactam diretamente na agricultura.

De acordo com Joseph *et al.* (2021) os aumentos observados ocorreram principalmente relacionados às atividades antrópicas na região, como desmatamento e urbanização, com alguns eventos de El Niño (EN) e La Niña (LN) contribuindo para as tendências climáticas. Esses resultados também refletiram a temperatura em Bacabal, indicando que as mudanças climáticas locais foram em grande parte influenciadas por ações antropogênicas.

A análise do SPI (figura 3 c) revelou a ocorrência de seca severa em 1993 (-1,69 mm), e secas extremas em 2013 (-2,91 mm) e 2016 (-2,62 mm). O ano de 2016 foi particularmente crítico, possivelmente acometido por condições climáticas associadas a

forte atuação do El Niño. Em contraste, 2008 foi um ano marcado por condições de chuvas extremas, com um SPI positivo de 2,27 mm, período acometido por chuva extrema. Após 2016, as secas apresentaram intensidade reduzida, enquanto os períodos úmidos não demonstraram níveis tão elevados até 2023, sugerindo uma estabilização nas condições climáticas.

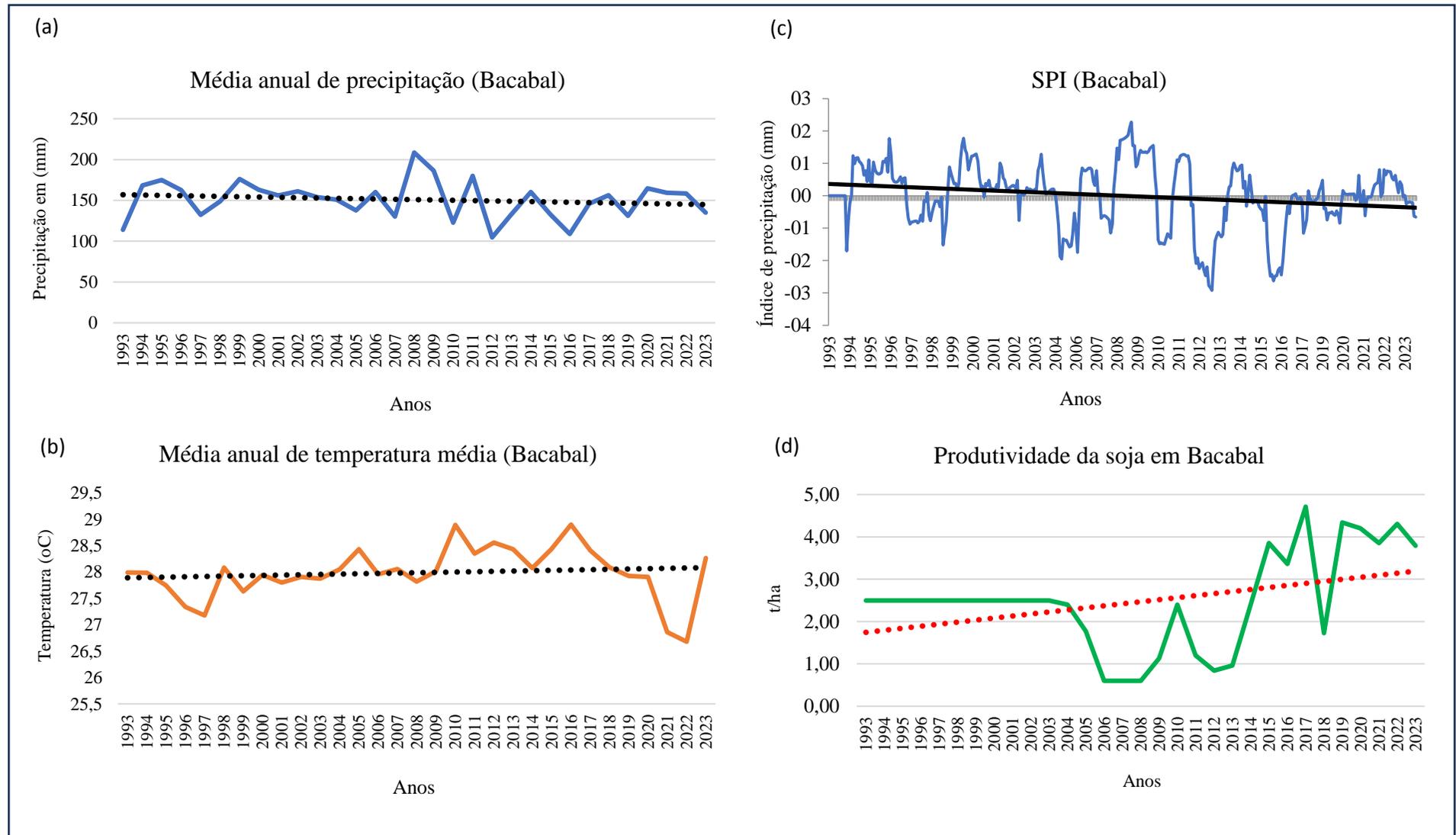
De acordo com Januario (2021), o maior período sequencial de chuvas, conforme o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), ocorreu entre os anos de 2008 e 2009, especialmente de janeiro a abril, eventos que estavam associados ao fenômeno La Niña. Esses resultados, evidenciaram a influência do La Niña nas variações climáticas da região.

A produtividade da soja (figura 3 d) apresentou um crescimento consistente até 2004, mantendo-se acima de 2 t/ha. No entanto, em 2005, houve uma queda para 1,77 t/ha, que perdurou até 2015, quando a produtividade aumentou para 3,85 t/ha. O maior índice foi registrado em 2017, com 4,71 t/ha. Esse aumento em 2017 pode ser atribuído a condições climáticas mais favoráveis após os efeitos do La Niña e a recuperação dos recursos hídricos (CPTEC, 2025). Em 2018, a produtividade caiu novamente para 1,73 t/ha, mas se recuperou em 2019, superando 4 t/ha. Esses resultados indicam que, apesar das flutuações climáticas, a soja pode ter sido resiliente a variações nas condições de temperatura e precipitação, embora sua produtividade possa ser vulnerável a secas severas e extremas.

Os resultados indicaram que as variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, exerceram um impacto direto na produtividade da soja. As condições de alta umidade em anos como 2008 e 2011, aliadas a temperaturas elevadas em 2010 e 2016, podem ter favorecido a produção agrícola, potencialmente influenciadas por fenômenos como La Niña. Por outro lado, as secas severas e a diminuição da precipitação observadas em anos críticos demandam atenção, pois podem comprometer a produção agrícola futura.

De acordo com Farias Filho *et al.* (2019) a agricultura desempenhada na região de Bacabal está diretamente interligada com o desempenho pluviométrico que ocorre na região em determinadas épocas do ano.

Figura 3. Variáveis climatológicas e produtiva para Bacabal (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



5.3. Análise agroclimática de Balsas

A precipitação média anual (figura 4 a) apresentou variações significativas ao longo dos anos. Em 1999, observou-se um pico com um registro de 129,60 mm. No entanto, anos secos foram registrados, como em 1993, com apenas 79,66 mm, e em 1998, com 60,29 mm. Entre esses extremos, houve pequenas oscilações nos valores, mantendo-se entre 80 e 130 mm até 2015, quando ocorreu uma nova queda para 60,01 mm. Em 2020, a precipitação recuperou-se, atingindo 143,55 mm, o que sugeriu uma recuperação hídrica após períodos críticos, com a influência potencial do fenômeno La Niña, que frequentemente traz chuvas mais abundantes para a região (CPTEC, 2025).

Em Ramos *et al.* (2021), reportou-se que o regime pluviométrico de Balsas é influenciado por tendências e sistemas meteorológicos que modulam as estações secas e chuvosas. O estudo também classificou Balsas como um município que está abaixo da média do estado, conforme os resultados apresentados em seu trabalho.

A temperatura média anual (figura 4 b) também apresentou padrões de variação. O ano de 1996 marcou o menor valor da série, com 26,19 °C. Picos de temperatura foram observados em 1998, com 27,61 °C, e em 2016, com 28,61 °C, indicando um aquecimento significativo. Contudo, em 2020, houve uma leve queda para 27,22 °C, seguida por um aumento em 2023, que registrou 28,31 °C. Essa dinâmica demonstrou correlação com as variações na precipitação, e mesmo em anos chuvosos, como 2020, podem possivelmente ter influenciado a temperatura.

Em um estudo de Rodrigues (2022) ao realizar o zoneamento do estado do Maranhão entre os meses de janeiro e junho, foi demonstrado que todas as cidades produtoras de soja são adequadas ao desenvolvimento de doenças como a ferrugem asiática. Isso ocorre em razão dos índices elevados de ocorrências, juntamente com as faixas de temperatura ideais que se mantêm ao longo do ano.

O SPI (figura 4 c) revelou uma alternância entre períodos de secas e chuvosos. Em 1998, registrou-se uma seca extrema de -3,12 mm, enquanto 2000 apresentou um período considerado como chuva severa com 1,96 mm. Após isso, observou-se uma oscilação entre períodos úmidos, com valores entre 0,50 mm a de 1,49 mm, tidos como chuva leve e moderada, e quedas significativas, como em 2006 com uma seca extrema de -2,20 mm. Em 2015 e 2016, novas secas foram registradas, com seca extrema -2,07 mm e seca severa -1,96 mm, respectivamente. A partir de 2020, as condições começaram a se estabilizar, com recuperação dos períodos chuvosos, mantendo-se entre valores

ligeiramente acima de 1 mm até o final da série, sugerindo uma possível influência de padrões climáticos mais estáveis após eventos de La Niña (CPTEC, 2025).

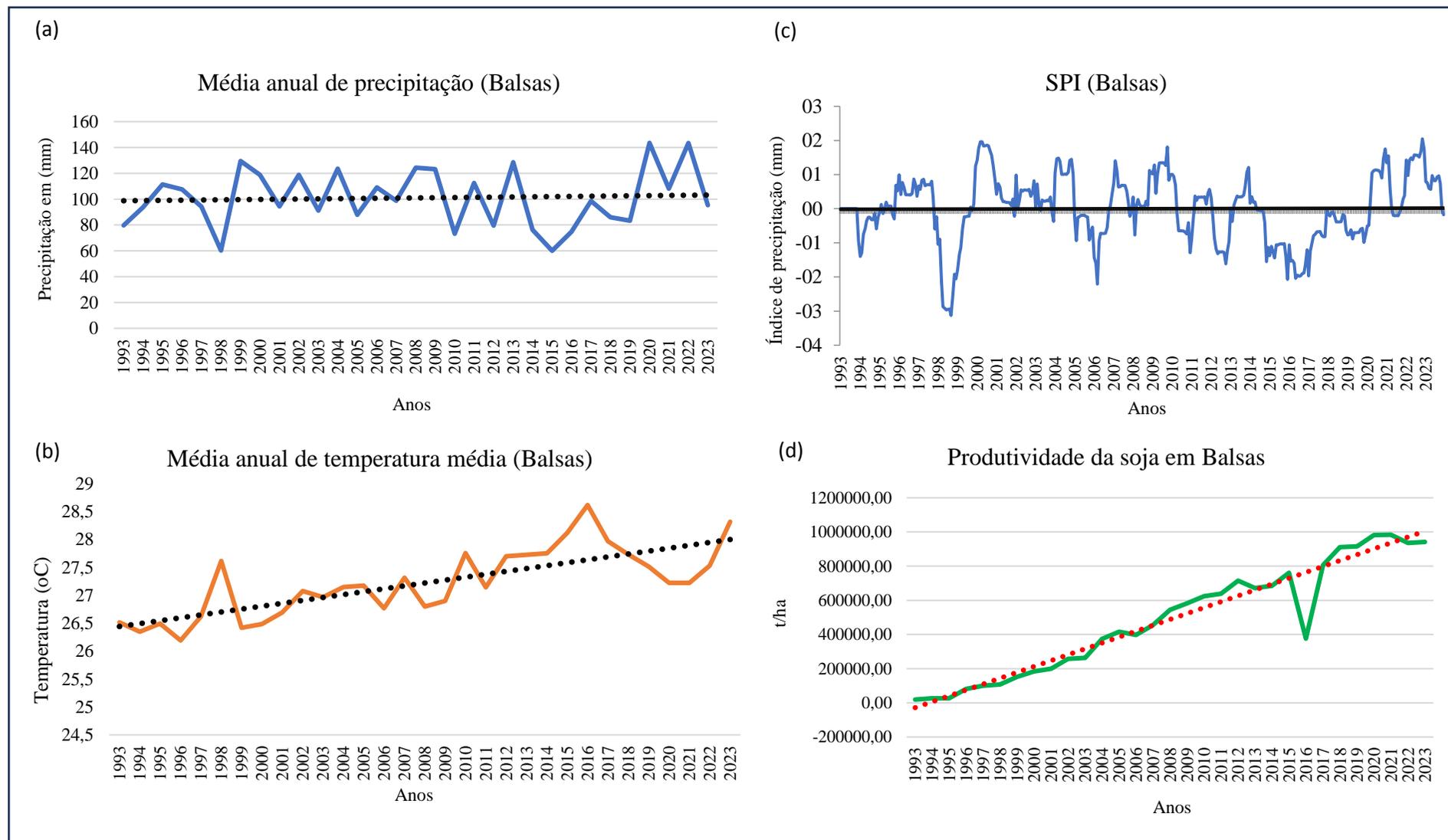
Os anos de 2000 e 2006 também foram destacados no estudo de Silva *et al.* (2022), corroborando os resultados de períodos de seca extremos e alta pluviosidade, respectivamente. Isso demonstra que o uso do SPI pode ser caracterizado como uma técnica eficaz para a análise dessas condições climáticas

A produtividade da soja (figura 4 d) apresentou um crescimento contínuo de 1993 até 2012, alcançando 715.366,80 t/ha. No entanto, em 2016, houve uma queda abrupta registrando a produtividade em 376.136,08 t/ha, possivelmente relacionada às condições climáticas desfavoráveis daquele ano. No ano seguinte, a produtividade começou a recuperar-se culminando em um pico histórico em 2020, com 982.209,91 t/ha. Esta recuperação coincide com o aumento na precipitação registrada em 2020, indicando que a disponibilidade hídrica pode ter sido um fator determinante para a alta produtividade naquele ano, com o La Niña possivelmente desempenhando um papel crucial ao trazer chuvas favoráveis.

A análise integrada das variáveis climáticas e da produtividade da soja revelou uma interdependência significativa. Anos de alta precipitação, como 2020, parecem ter favorecido a produtividade da soja, enquanto períodos de seca e temperaturas elevadas em anos como 2016 impactaram negativamente a produção. Essa dinâmica revela a importância da gestão hídrica e das práticas agrícolas adaptativas em face das variações climáticas, considerando também a influência dos fenômenos El Niño e La Niña na variabilidade climática da região.

De acordo com Rodrigues (2022) o estado do Maranhão apresenta condições climáticas específicas para a realização do manejo e produção da cultura da soja, o que facilita o monitoramento dos impactos climáticos que podem alterar as fases de desenvolvimento e fenológico da planta. O estudo concluiu que as doze cidades monitoradas apresentam alta tendência à ocorrência de ferrugem asiática, devido aos índices de temperatura e pluviosidade, favorecendo o seu desenvolvimento. Foi evidenciado que a faixa de temperatura ideal é de 28 °C, pois a doença não se desenvolve em regimes superiores a 30 °C, nem em temperaturas iguais ou inferiores a 24 °C.

Figura 4. Variáveis climatológicas e produtiva para Balsas (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



Fonte: Autora, (2025).

5.4. Análise agroclimática de Barra do Corda

A série de precipitação média anual (figura 5 a) apresentou valores variando entre 100 mm e 137 mm. No entanto, em 1998, houve uma queda significativa, com apenas 78,69 mm. A recuperação ocorreu em 2000, quando a precipitação subiu para 120,20 mm. O ano de 2009 marcou o maior pico da série, com 137,00 mm de precipitação. Contudo, em 2015, houve uma nova queda proeminente, registrando apenas 54,65 mm. A partir de 2021, a precipitação voltou a recuperar-se, alcançando 118,96 mm. Essa dinâmica sugeriu que as variações evidenciadas na precipitação possivelmente podem estar exercendo influência diretamente nos padrões climáticos da região, especialmente influenciadas por eventos como El Niño e La Niña.

Segundo Viana *et al.* (2021) as características do El Niño são registradas desde 1877, com eventos intensos em 1982-83 e 1997-98, que geraram vários declínios climáticos. Assim como reitera Patrocínio (2008), esses eventos estão ligados a secas prolongadas no Nordeste brasileiro, afetando as condições climáticas e as precipitações na região.

Em relação à temperatura média mensal (figura 5 b), entre 1994 e 1996, as temperaturas médias foram as mais baixas da série, variando de 25,6 °C a 25,7 °C. Em 1998, observou-se um aumento significativo, com a temperatura atingindo 27,6 °C. O ano de 2000 registrou uma das menores temperaturas desde o início da análise, com 25,98 °C. Após isso, a temperatura começou a subir, culminando em um pico histórico em 2016, com 28,5 °C. Porém, em 2021, a temperatura apresentou uma queda para 26,85 °C. Essas variações de temperatura podem estar correlacionadas com os padrões de precipitação, especialmente em anos de seca, influenciados por fenômenos climáticos como El Niño (CPTEC, 2025).

Em Santos *et al.* (2019) ao avaliarem a relação entre os ENOS, variações de temperatura na Bacia Amazônica revelaram que, durante os eventos de El Niño, as médias mensais de frequência tendem a diminuir. Em contrapartida, há um aumento significativo na evapotranspiração e na temperatura, o que contribui para a ocorrência de secas na região.

O SPI (figura 5 c) revelou um pico de umidade em 2000, com um índice de 2,49 mm, caracterizado como chuva extrema, e períodos úmidos variando entre pouco mais de 1 mm e 2 mm, ou seja, chuva moderada e chuva extrema, respectivamente. O ano de 2003 registrou uma seca moderada de -1,47 mm, enquanto 2008 teve outra seca moderada de -

1,30 mm. A maior seca da série foi registrada em 2016, com -2,68 mm, indicando um déficit hídrico extremo. Após 2016, até 2020, o SPI permaneceu em variações de seca, mas em 2020 houve um leve período úmido de 0,42 mm, que continuou até 2023. Essas oscilações no SPI refletiram a disponibilidade hídrica e suas implicações na região, com a influência de padrões climáticos globais, como El Niño e La Niña, potencialmente exacerbando a situação.

Barroso *et al.* (2022) destacam que a região de Barra do Corda se distingue por ser acometida por eventos extremos de chuva e seca. Essa constatação resultou da análise de uma série temporal de 47 anos com dados pluviométricos, que evidenciaram a variabilidade climática acentuada na região.

De acordo com o gráfico (figura 5 d), entre 1993 e 1996, a produtividade da soja foi de 1.772,10 t/ha. No entanto, em 1997, a produtividade caiu drasticamente, sendo registrada com 2,71 t/ha. Em 2017, houve uma recuperação significativa, estando com 12.358,40 t/ha, mas em 2019, a produtividade caiu novamente, registrando 1.034,88 t/ha. Essas variações na produtividade da soja possivelmente poderiam estar relacionadas às variações climáticas, como a precipitação e a temperatura, especialmente em anos críticos de seca, influenciadas por fenômenos climáticos como El Niño.

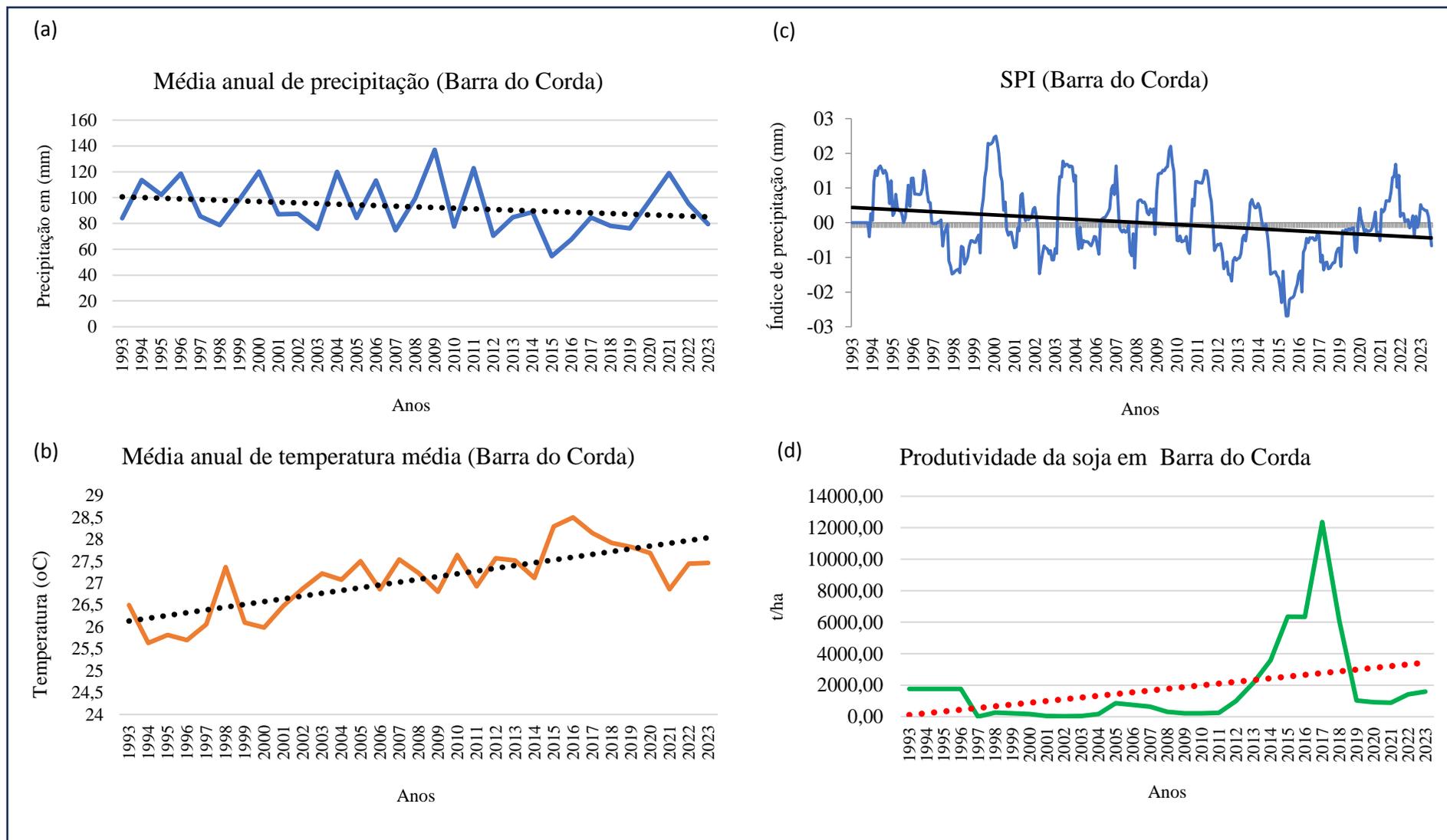
Para Silva *et al.* (2020) a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica total anual confirma características climáticas peculiares, estando os padrões de chuva associados tanto com as condições das estações do ano e anomalias climatológicas quanto com as condições de relevo e vegetação e distância do litoral das regiões do Nordeste Brasileiro.

Os resultados climáticos em consonância com a produtividade da soja revelaram uma interdependência significativa entre as variáveis. As oscilações na precipitação e na temperatura, especialmente em anos como 2016 e 2015, impactariam diretamente a produtividade da soja. A recuperação da precipitação em 2021 e os picos de produtividade em anos anteriores destacaram a importância do papel da gestão hídrica e das práticas agrícolas adaptativas em resposta às condições climáticas, considerando também os efeitos dos fenômenos El Niño e La Niña.

Conforme Araújo (2024) e Reis *et al.* (2020) ao investigarem a influência do El Niño Oscilação Sul (ENOS) e da temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical sobre a variabilidade da produtividade da soja no Matopiba, considerando tanto as condições climáticas favoráveis quanto as desfavoráveis. Os resultados indicaram que, em um cenário com chuvas favoráveis, a produtividade da soja tende a aumentar,

enquanto em um cenário seco desfavorável, essa produtividade diminui. Assim, diferentes cenários climáticos podem impactar os padrões espaciais de risco agrícola.

Figura 5. Variáveis climatológicas e produtiva para Barra do Corda (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



5.5. Análise agroclimática de Carolina

A série de precipitação média anual (figura 6 a) em Carolina apresentou variações significativas, com médias frequentemente acima de 100 mm. Em 1998, houve uma queda para 100,40 mm, mas em 2011, a precipitação aumentou consideravelmente, atingindo 190,18 mm. Contudo, em 2015, observou-se outra redução, com 103,58 mm. O maior pico da série foi registrado em 2020, com 222,13 mm, o que indica um ano de condições hídricas excepcionais influenciadas por fenômenos climáticos como o La Niña. Essa dinâmica sugeriu que, apesar de algumas mudanças, o comportamento da chuva geral foi de aumento em anos recentes.

Barroso (2020) e Cerqueira (2020) destacam que é fundamental compreender as características meteorológicas relacionadas às precipitações para monitorar a evolução, ou retrocesso, das chuvas ao longo do mês. Esse acompanhamento permite realizar comparações entre os períodos chuvosos e secos, além de analisar as séries históricas nas regiões ou municípios onde as chuvas estão concentradas. No estado do Maranhão, muitos municípios enfrentam problemas significativos devido à seca ou ao excesso de chuvas. Eventos extremos, sejam eles de chuvas excessivas ou de escassez, podem impactar severamente a vida das pessoas, afetando a agricultura, o abastecimento de água e a saúde pública. Portanto, a compreensão dessas dinâmicas climáticas é crucial para a implementação de políticas de gestão de recursos hídricos e para a adaptação das comunidades às mudanças climáticas.

A temperatura média anual (figura 6 b) também demonstrou variações significativas. Em 1998, a temperatura foi de 27,73 °C, seguida por uma queda em 2000 para 26,48 °C. Em 2016, a temperatura elevou-se para 28,04 °C, estabelecendo um pico histórico na série. Este aumento pode estar relacionado a condições atmosféricas influenciadas por El Niño (CPTEC, 2025). Em 2022, a temperatura registrou 27,09 °C, indicando uma ligeira queda em relação a 2016. A série apresentou um comportamento de elevação nas temperaturas médias, refletindo possíveis mudanças climáticas.

Ao realizar o zoneamento climático do estado do Maranhão, Rodrigues (2022) aponta aumento e variação da temperatura ao longo do ano, destacando a influência de características de atuação de fenômenos meteorológicos.

O SPI (figura 6 c) iniciou com pequenas variações, apresentando períodos de seca consideradas baixas. Em 1998, registrou-se uma seca extrema de -2,68 mm, e em 2008, outro pico negativo de -2,40 mm. Em contrapartida, 2011 foi um ano de período úmido,

com um SPI de 2,40 mm, ocasionando chuvas extremas, que podem ter sido influenciadas pelo fenômeno La Niña que ocorreu de forma moderada, tendendo a causar condições mais úmidas em algumas regiões (CPTEC, 2025). O maior pico de umidade na série ocorreu em 2020, com 2,91 mm, evidenciando chuva extrema. Esses dados indicaram uma alternância entre períodos de seca e umidade, com uma recuperação visível em anos com maior precipitação.

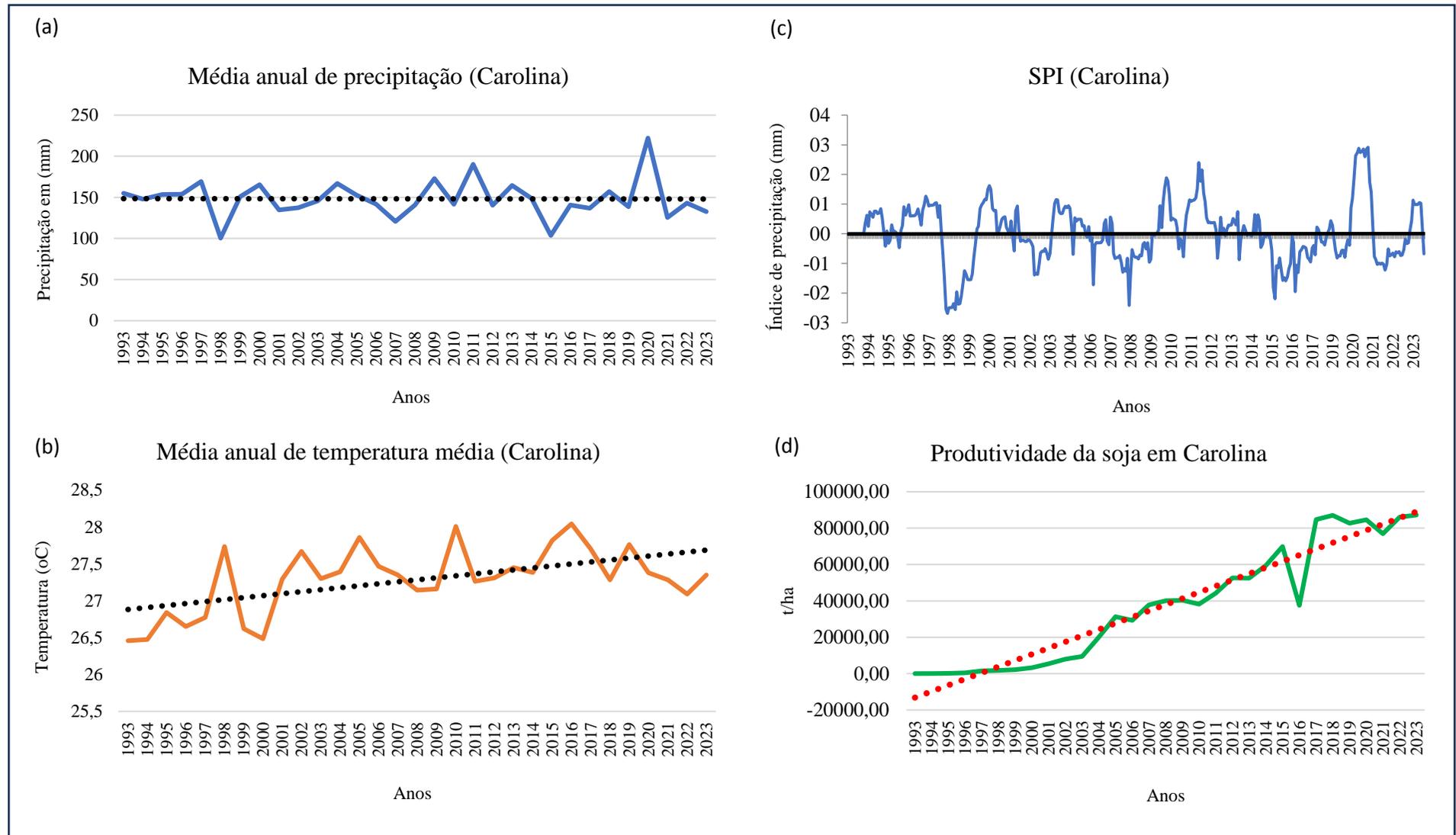
Resultados semelhantes foram evidenciados por Silva (2022), que, ao utilizar a técnica SPI para identificação de períodos secos e chuvosos, constatou o mesmo comportamento em relação a períodos considerados extremos em Carolina.

A produtividade da soja em Carolina (figura 6 d) apresentou uma trajetória de crescimento ao longo dos anos. Entre 1993 e 1996, a produtividade foi de 37,62 t/ha. A partir de então, observou-se um aumento contínuo, com um registro notável de 69.858,36 t/ha em 2015. No entanto, em 2016, houve uma queda abrupta, resultando em 37.448,96 t/ha. A recuperação foi rápida, e em 2018, a produtividade atingiu 86.973,60 t/ha, representando o maior pico de aumento da série. Essa recuperação pode ser atribuída a condições climáticas favoráveis após o impacto negativo de eventos climáticos extremos. Apesar de algumas quedas, as oscilações na produtividade não foram tão significativas em comparação com os aumentos, indicando de maneira geral um crescimento, conforme a série histórica na região.

Souza *et al.* (2022) ao verificar estudos que demonstrassem a influência da variabilidade climática no Mato Grosso, destacou que excesso de chuvas, tanto após o plantio quanto no início da colheita, prejudicou a produtividade da soja no estado. O índice de chuvas na região influenciou quantitativamente a produtividade e a qualidade dos grãos da cultura.

A análise agroclimática de Carolina revelou inter-relações importantes entre as variáveis climáticas e a produtividade da soja. Os anos de maior precipitação, especialmente em 2020, coincidiram com picos de produtividade influenciados por fenômenos como o La Niña, enquanto anos de seca, como 1998 e 2008, impactaram negativamente a produção. A tendência de aumento na temperatura média e nas precipitações em anos recentes sugeriu a necessidade de monitoramento contínuo e práticas agrícolas para enfrentar as alterações climáticas e maximizar a produtividade agrícola.

Figura 6. Variáveis climatológicas e produtiva para Carolina (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



5.6. Análise agroclimática de Caxias

A série de precipitação média anual (figura 7 a) apresentou variações significativas. Em 1998, houve uma queda acentuada, com apenas 77,00 mm, mas em 1999, a precipitação subiu para um pico de 151,81 mm. Ao longo dos anos, os valores oscilaram entre 100 mm e 145 mm, com um destaque em 2009, quando a precipitação atingiu 207,18 mm. Em 2012, outra queda foi observada, com apenas 78,56 mm, sugerindo a influência de padrões climáticos instáveis. Após esse ano, a série voltou a apresentar variações na casa dos 100 mm, indicando uma instabilidade nas condições hídricas.

Conforme aponta Borges (2020) durante a La Niña, há uma tendência de aumento das chuvas na Região Amazônica e a possibilidade de chuvas acima da média na Região Semiárida do Nordeste, embora isso dependa das condições atmosféricas específicas no Oceano Atlântico.

A temperatura média anual (figura 7 b) também exibiu uma trajetória de variação. O menor valor da série foi registrado em 1994, com 26,7 °C, enquanto um dos maiores picos ocorreu em 1998, com 28,64 °C. No ano seguinte, 1999, houve uma queda para 27,22 °C. A partir de então, entre 2002 e 2016, as temperaturas oscilaram entre 27 °C e 28 °C, indicando que ocorreu uma certa estabilidade nas médias anuais.

Segundo Ramos (2021) Caxias apresentou anualmente os efeitos adversos da circulação de massa de ar, especialmente devido a anomalias negativas associadas a episódios de El Niño. Um exemplo recente ocorreu na fase final de 2016, quando a cidade experimentou um aumento no desconforto térmico, evidenciando mudanças na temperatura física que podem ter impactado o desenvolvimento econômico local.

O SPI (figura 7 c) apresentou uma série de secas significativas, que começou com uma seca severa de -1,56 mm em 1993 e uma seca extrema de -2,94 mm em 1998. De 2000 a 2009, as secas foram mínimas, e em 2010, observou-se um pico positivo de chuvas extremas com 2,74 mm. Em 2013, a segunda maior seca extrema foi registrada, com -2,77 mm. Após isso, a série apresentou uma alternância entre períodos de secas moderadas e períodos chuvosos, refletindo uma dinâmica hídrica variável que pode ser relacionada a flutuações climáticas globais.

Ao empregar o método de SPI para verificação de eventos de secas e períodos chuvosos em Caxias, Januário (2021) destaca que, durante a série, foi fornecido cerca de

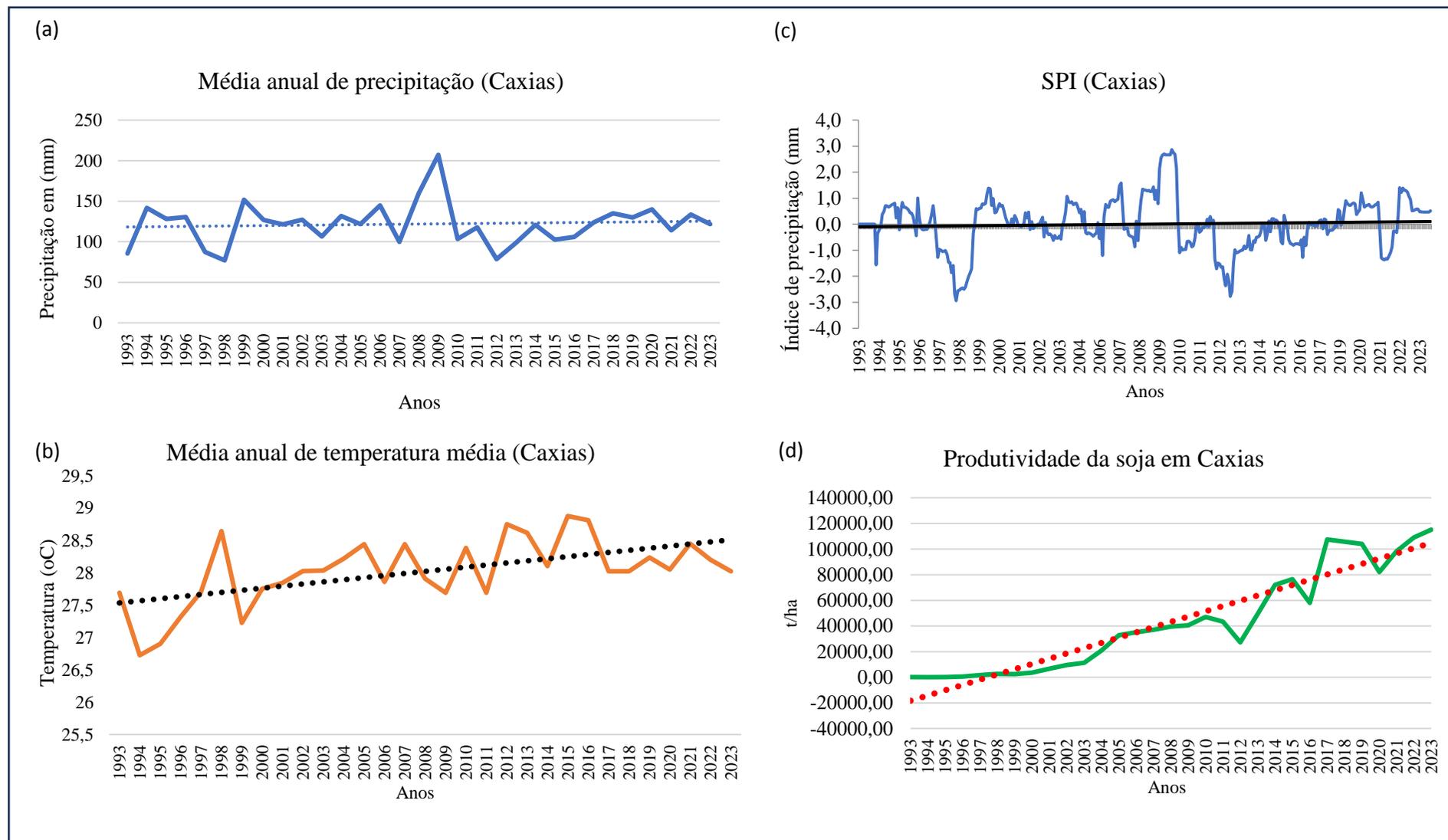
35,78% de eventos de secas, enquanto o período chuvoso correspondeu a cerca de 23,39%.

A produtividade da soja (figura 7 d) começou com cerca de 51,99 t/ha em 1993, e embora tenha apresentado crescimento ao longo dos anos, ocorreu uma queda significativa em 2012, ficando com 27.228,00 t/ha. O maior pico de produtividade da série foi registrado em 2017, com 107.476,38 t/ha, indicando um bom desempenho agrícola naquele ano. Essa trajetória sugeriu que a produtividade da soja pode estar diretamente influenciada pelas variações climáticas, especialmente pela disponibilidade de água e temperatura, associadas a fenômenos como El Niño e La Niña.

Segundo Araújo *et al.* (2021) o clima no município apresenta como principal característica, uma irregularidade ao longo dos anos analisados. Em seu estudo a série histórica revelou uma constante oscilação devido à atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que causa instabilidade no Nordeste Brasileiro (NEB). Essa instabilidade está relacionada ao posicionamento e à intensidade da ZCIT no Oceano Atlântico Equatorial, influenciando a qualidade e a intensidade do período chuvoso na região.

A análise agroclimática evidenciou uma interdependência entre as variáveis climáticas e a produtividade da soja. Anos de elevada precipitação, como 1999 e 2009, correlacionaram-se com maiores níveis de produtividade, enquanto os anos de seca, como 1998 e 2012, impactaram negativamente a produção. A estabilidade nas temperaturas médias, apesar de algumas alterações, sugeriu que outros fatores, como a gestão hídrica e investimentos de produção, também podem ter desempenhado um papel crucial na determinação da produtividade agrícola. A compreensão dessas dinâmicas mostrou-se essencial para a adaptação e planejamento de práticas agrícolas sustentáveis.

Figura 7. Variáveis climatológicas e produtiva para Caxias (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



5.7. Análise agroclimática de Chapadinha

A série de precipitação média anual (figura 8 a) apresentou variações significativas, com valores entre 100 mm e 162 mm. Em 2008, registrou-se um pico de 191,64 mm, enquanto o ano de 2015 teve uma precipitação bem abaixo da média, com 88,11 mm. O maior pico da série ocorreu em 2020, com 209,69 mm, o que pode estar associado a um padrão de aumento nas precipitações influenciado pelo fenômeno La Niña nos anos finais da análise.

O comportamento pluviométrico corrobora com os resultados identificados por Silva (2022), destacando que a média anual de Chapadinha é notoriamente intensificada devido a atuação de sistemas e fenômenos meteorológicos os quais ocorrem principalmente nos primeiros meses do ano, correspondentes a estação chuvosa no município.

A temperatura média anual (figura 8 b) oscilou entre 26 °C e 27 °C ao longo da série. A menor temperatura registrada foi de 26,63 °C, enquanto o pico ocorreu em 2016, atingindo 28,04 °C. O ano de 1998 também apresentou um pico significativo de 27,65 °C. A média geral da temperatura foi de 27 °C, sugerindo um leve aumento nas temperaturas em anos mais recentes, possivelmente exacerbado por mudanças climáticas globais.

Vieira (2022) destaca que a temperatura exerce influência em todas as regiões do estado do Maranhão, contudo enfatiza que essa variável consegue influenciar em cerca de 71% a região Leste do estado a qual Chapadinha está situada, revelando que quanto maior a temperatura mais seco o ar se torna.

Conforme o SPI (figura 8 c), a maior parte da série foi caracterizada por períodos secos, com valores de SPI variando entre -1,25 mm e 1,77 mm, ocasionando chuvas moderadas e severas. Os anos de 2010 (-2,09 mm), 2013 (-3,12 mm) e 2015 (-2,11 mm) foram marcados por secas extremas. No entanto, em 2019, observou-se um período úmido, culminando no maior pico da série em 2020, com 2,21 mm. Essa transição para um período mais úmido pode ter sido influenciada por condições climáticas associadas ao La Niña, impactando positivamente a produtividade agrícola.

Januario (2021) e Silva (2022) observaram por meio do SPI episódios de secas e chuvas extremas nessa região. Eles utilizaram séries temporais robustas para enfatizar esses padrões de comportamento na região analisada.

A produtividade da soja (figura 8 d) teve seu início com 50,96 t/ha em 1993, com um crescimento notável até 2010, onde atingiu 33.669,00 t/ha. Apesar de um leve aumento em 2012 (39.711,60 t/ha), o maior pico da série foi registrado em 2017, com 132.418,00 t/ha. A produtividade manteve uma tendência de crescimento contínuo até o final da série, sugerindo que as melhorias nas condições climáticas e práticas agrícolas, possivelmente influenciadas por eventos climáticos, como El Niño e La Niña, podem ter contribuído para esse aumento.

Santos *et al.* (2023) identificaram que a produtividade da região, apresentou um crescimento entre 2003 e 2019. Destacou que em 2005, considerado um ano de seca, a produtividade foi de 2.580 kg/ha, próximo da média. Altas precipitações em 2018 causaram queda na produtividade evidenciando que anos chuvosos resultaram, em média, em uma perda de 68%, mas evidências indicam que a produtividade conseguiu se manter próximo a média de 2.622,2 kg.

Observou-se que, anos de maior precipitação como 2020, coincidiram com picos de produtividade, sugerindo uma relação positiva entre as condições hídricas e a produção de soja. Além disso, o aumento gradual da temperatura média anual pode ter favorecido o crescimento da soja, apesar de algumas oscilações de produtividade em anos específicos. As secas severas, no entanto, destacaram a vulnerabilidade da produção agrícola às condições climáticas extremas. A análise refletiu as interações entre as variáveis climáticas e a produtividade da soja, destacando tanto os desafios quanto as oportunidades apresentadas pelas mudanças nas condições climáticas ao longo do tempo.

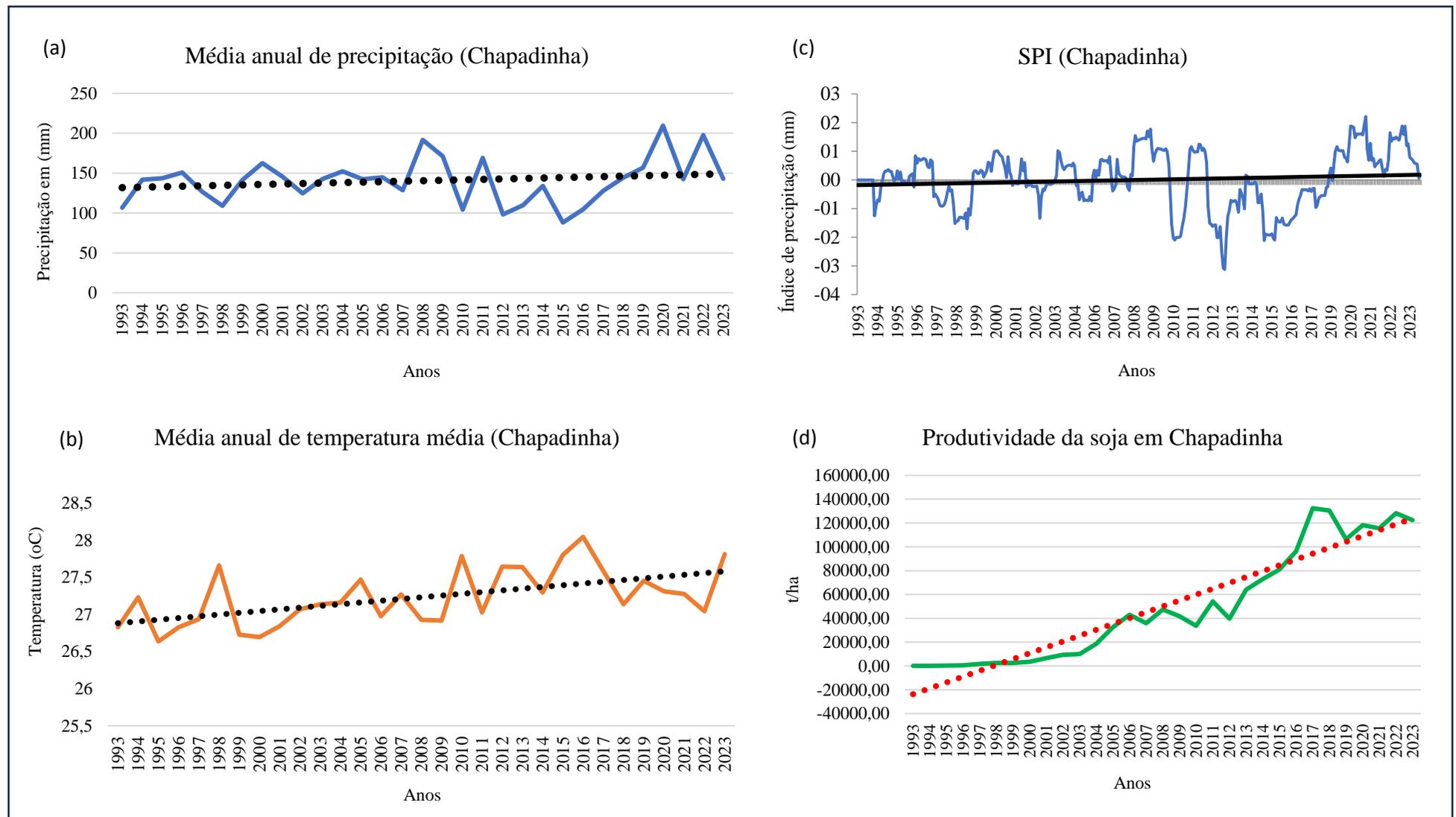
A temperatura, o fotoperíodo e a disponibilidade hídrica são os elementos climáticos com maior poder de afetar o desenvolvimento e a produtividade da soja. Conforme Costa *et al.* (1994), Farias *et al.* (2007) e Oliveira (2022), regiões onde as temperaturas variam entre 20 °C e 30 °C são as quais melhor a soja se adapta sendo 30 °C a temperatura mais favorável ao seu desenvolvimento. Quanto ao solo, temperaturas entre 20 °C e 30 °C são as mais adequadas para a semeadura, sendo entre 17 °C e 25 °C as temperaturas que proporcionam uma emergência mais rápida e de maneira uniforme.

Soares (2020) destaca que o cerrado oferece condições desenvolvidas para o cultivo de commodities, como a soja, considerando fatores como temperatura, distribuição de chuvas, luminosidade e topografia.

No que diz respeito às mudanças climáticas, Rodrigues (2018) verificou que a região do MATOPIBA demonstra uma tendência de elevação da temperatura, provavelmente impulsionada por fatores globais, como o aumento da concentração de

CO₂ na atmosfera, e por fatores regionais, como a alteração da vegetação devido à ação humana. Além disso, há evidências de um aumento na duração da estação seca na região, assim como um maior número de estimativas e eventos climáticos extremos, o que afeta cidades como Chapadinha, no Maranhão.

Figura 8. Variáveis climatológicas e produtiva para Chapadinha (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



Fonte: Autora, (2025).

5.8. Análise agroclimática de Colinas

A precipitação média anual (figura 9 a) apresentou uma variação significativa, com valores que oscilaram entre 41 mm e 145 mm. Em 1998, houve uma drástica queda de 74,10 mm, resultando em um intervalo de precipitação entre 90 mm e 100 mm até 2008. O maior pico da série foi registrado em 2009, com 145,20 mm, enquanto 2015 apresentou o menor valor, com 41,33 mm. Essa alternância entre anos de alta e baixa precipitação, possivelmente influenciada por eventos de El Niño e La Niña, pode ter impactado diretamente a disponibilidade de chuvas (CPTEC, 2025).

De acordo com Araújo (2024) dentro das cidades que compõem a região Matopiba, Colinas no Maranhão é uma das cidades com menores médias de precipitação no Maranhão, contudo é classificada como uma das maiores quando comparada a outras cidades em estados produtores de soja como Carinhanha na Bahia.

As temperaturas médias (figura 9 b) também mostraram variações notáveis. Um pico de alta temperatura foi registrado em 1998, atingindo 27,59 °C, enquanto em 2000 foi registrada a média de temperatura mais baixa da série, com 26,06 °C. Notou-se oscilações em 2006, 2009 e 2011, em que as temperaturas ficaram em torno de 26 °C. Em 2016, foi registrado o maior pico de temperatura de toda a série, com 27,64 °C, marcando um aumento significativo. Essa elevação de temperatura, especialmente em anos críticos, pode ter contribuído para o estresse hídrico, exacerbado por padrões climáticos como a forte atuação do El Niño, afetando a produtividade das culturas.

De acordo com Joseph *et al.* (2021) foram confirmadas tendências de aumento da temperatura nas regiões de transição entre a Amazônia e outros biomas, como observadas em cidades como Colinas, no Maranhão. De acordo com os resultados, nas últimas décadas, ocorreram alterações significativas no número de dias e noites quentes, e atualmente, todos os dias do ano apresentam temperaturas máximas superiores a 20 °C.

O gráfico de SPI (figura 9 c) evidenciou que a maior parte da série foi caracterizada por períodos chuvosos, com picos de chuvas severas significativos em 1997 (1,69 mm) e 2000 (1,74 mm). No entanto, também foram registrados períodos secos, com a maior seca extrema em 2015 (-3,12 mm), que persistiu até 2016 (-3,02 mm). Esse período seco, possivelmente correlacionado a condições climáticas extremas, estendeu-se até 2019, quando as condições úmidas retornaram, culminando em um índice de chuva moderada de 1,34 mm em 2022. A alternância entre períodos úmidos e secos sugeriu a

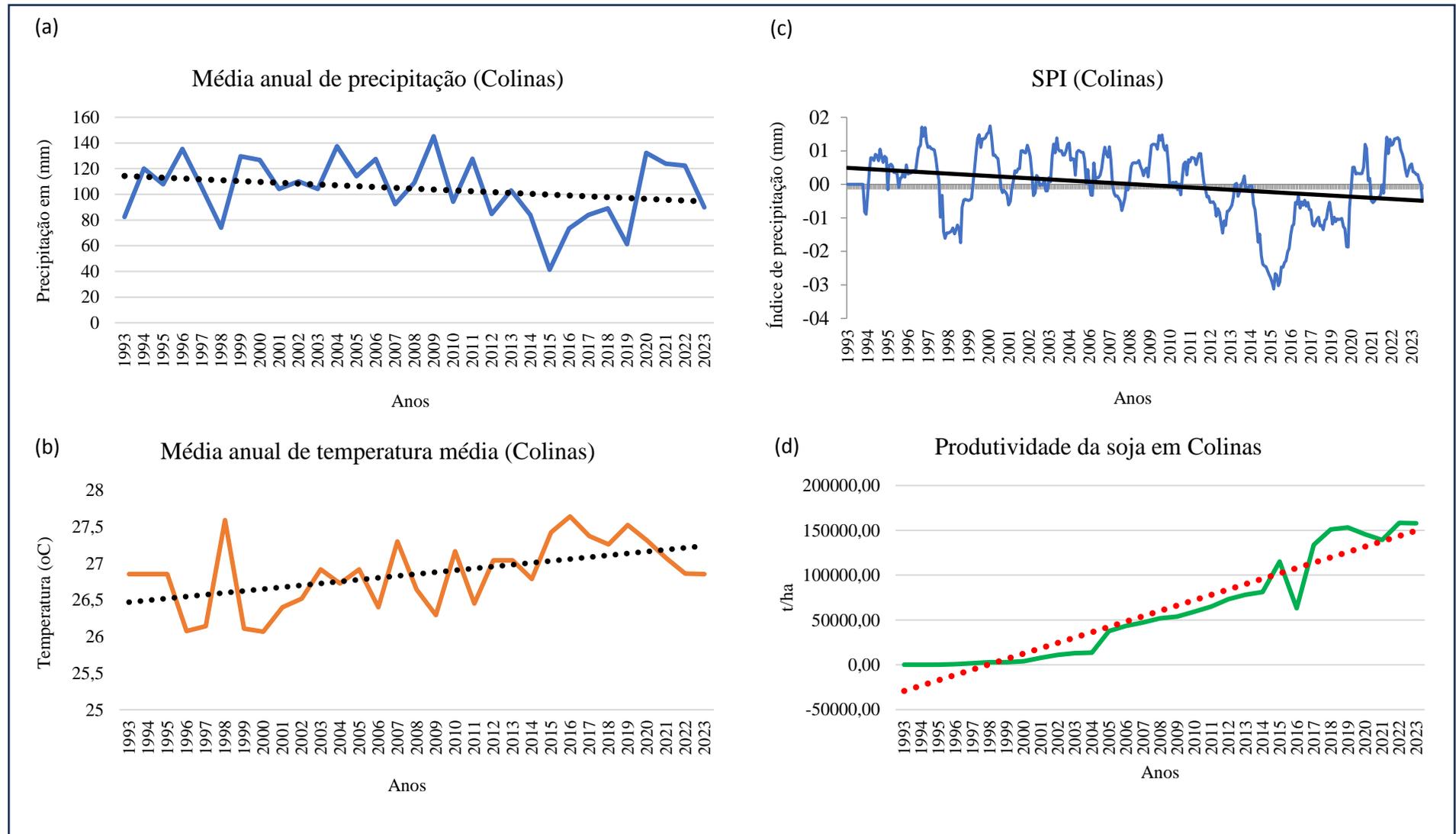
necessidade de estratégias de manejo que considerem essas oscilações, para garantir a segurança hídrica e a produtividade das culturas.

Januario (2021), Silva (2022) e Santos *et al.* (2023) identificaram períodos secos e chuvosos semelhantes aos resultados alcançados para Colinas, a partir do comportamento da precipitação identificados por influência de anomalias atmosféricas.

A produtividade da soja (figura 9 d) mostrou um crescimento contínuo ao longo da série, começando com 59,87 t/ha em 1993. Em 2015, houve um pico positivo significativo, alcançando 115.232,40 t/ha, seguido por uma queda em 2016 para 63.188,40 t/ha. Contudo, a recuperação foi rápida, com 150.986,50 t/ha em 2018, e atingindo o maior pico da série em 2022, com 158.288,51 t/ha. Essa recuperação acentuada sugere que, apesar das adversidades climáticas, as práticas agrícolas adotadas, juntamente com a capacidade de adaptação às variações climáticas, podem ter contribuído para a resiliência e aumento da produtividade.

Silva (2023) destaca que, a partir dos dados pluviométricos, é possível observar a relação entre a disponibilidade hídrica e as taxas de crescimento ou diminuição da produção agrícola no Leste Maranhense. O autor aponta que houve uma mudança significativa na variação anual nos anos de 2012, 2015 e 2019, com uma diferença aproximada de 50% em relação aos anos anteriores. Além disso, eventos como o El Niño exacerbaram a variabilidade anual das chuvas, impactando a produtividade das culturas de grãos.

Figura 9. Variáveis climatológicas e produtiva para Colinas (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



5.9. Análise agroclimática de Imperatriz

A série de precipitação média anual (figura 10 a) apresentou o maior pico em 1996, com 187,50 mm. Entre 1997 e 2005, a precipitação variou entre 99,24 mm e 116,74 mm, indicando um padrão de estabilidade relativa. Em 2015, houve uma queda acentuada, com a precipitação reduzida a 65,98 mm. Essa redução pode ter sido influenciada pelo fenômeno El Niño de forte intensidade (CPTEC, 2025), que costuma provocar períodos de seca em várias regiões. No entanto, em 2017, a série se recuperou, com valores variando de mais de 120 mm a 158 mm. Essa variação na precipitação determina que a região experimentou períodos de escassez seguidos por uma recuperação.

Para Nascimento *et al.* (2015) o comportamento pluviométrico do Sul do Maranhão também é influenciado pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que gera chuvas intensas ao longo de uma faixa que se estende do noroeste da Amazônia até o Atlântico Sul Central. Além da ZCAS, a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e os Sistemas Frontais também são úteis para a formação de chuvas na região, impactando a dinâmica climática local e setores como a agricultura e o abastecimento

De acordo com o gráfico (figura 10 b), entre 1993 e 2001, a temperatura média anual se manteve em torno de 27 °C, com um pico notável em 2005 de 28,22 °C. Em 2011, houve uma queda para 27,44 °C, seguida por um novo aumento em 2015, alcançando 28,47 °C. O ano de 2015, coincidente com um evento El Niño, pode ter contribuído para essa elevação. No entanto, em 2018, a temperatura caiu novamente para 27,54 °C. Essas oscilações de temperatura podem ter influenciado no desenvolvimento das culturas, especialmente em anos de altas temperaturas que podem ter aumentado o estresse hídrico.

Silva *et al.* (2024) destaca que o comportamento pluviométrico e térmico em Imperatriz pode estar intrinsicamente interligado, sua análise identificou que em períodos de baixo índice de precipitação a temperatura média aumenta, em contrapartida ocorre o contrário em períodos mais chuvosos.

No gráfico de SPI (figura 10 c), o início da série foi marcado por períodos chuvosos, com o maior índice registrado em 1996, de 2,99 mm de chuvas extremas. Entretanto, em 1998, o SPI caiu para -1,69 mm, indicando um início de seca severa, possivelmente relacionado ao fenômeno El Niño. Após anos de variações entre períodos chuvosos e secos, a maior seca extrema foi em 2015, com -2,58 mm. De 2017 até o final

da série, os valores oscilaram entre períodos de chuvas moderadas de 1,26 mm e secas severas de -1,56 mm, evidenciando alternâncias entre umidade e seca ao longo da série.

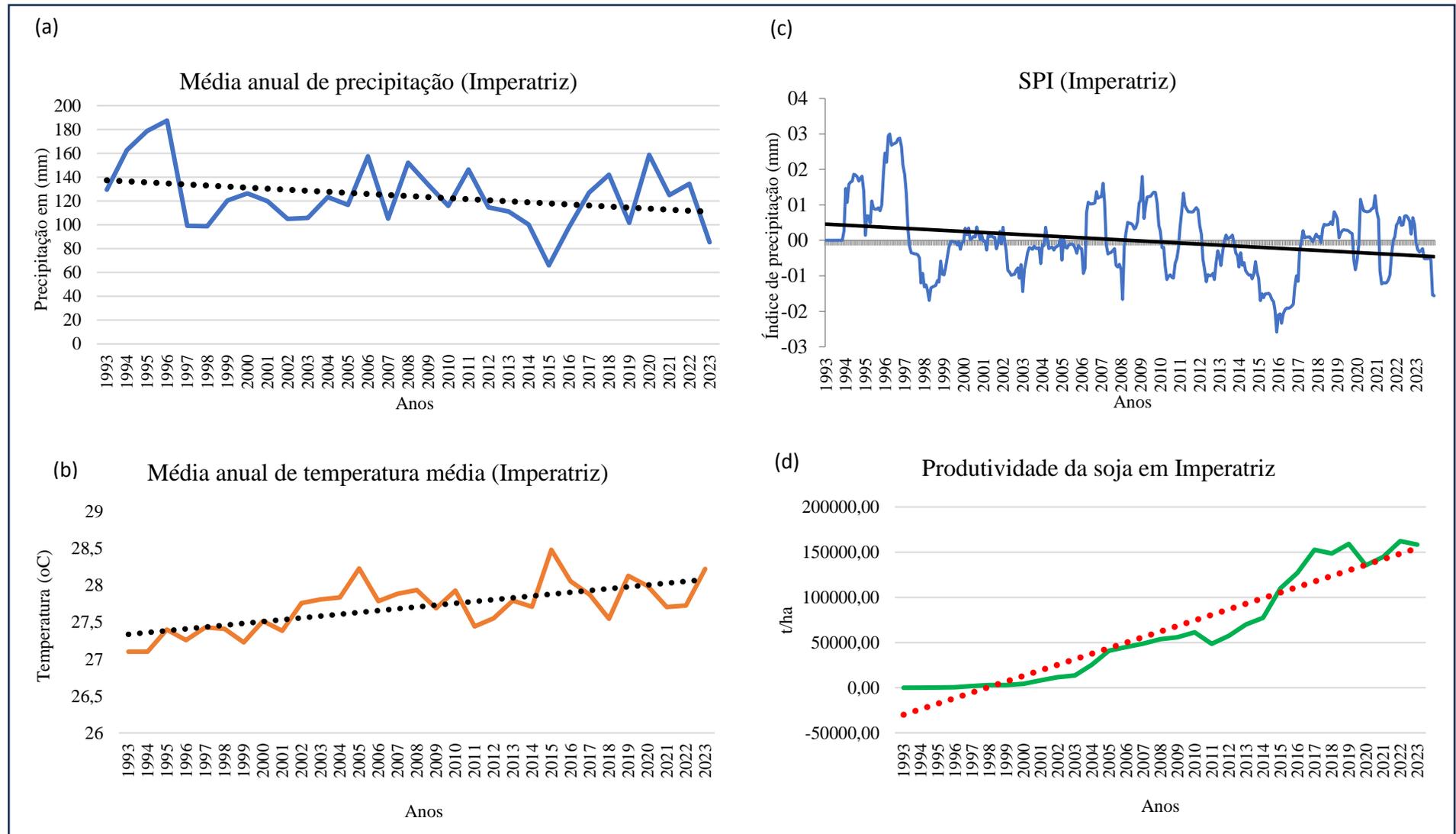
Nascimento *et al.* (2015) utilizou o SPI como uma ferramenta eficaz para quantificar eventos secos e chuvosos na microrregião de Imperatriz – MA, entre 1985 e 2013, e constatou que a região apresentou mais eventos secos do que chuvosos. A variabilidade desses eventos extremos esteve relacionada à frequência ENOS, que influenciou significativamente as chuvas. O SPI também identificou secas severas, especialmente no final da série, e chuvas intensas no final da década de 1980.

A produtividade da soja (figura 10 d) começou em 61,84 t/ha em 1993, demonstrando um crescimento contínuo ao longo dos anos, culminando no maior pico da série em 2022, com 162.218,52 t/ha. Esse aumento progressivo da produtividade sugere que, apesar dos desafios climáticos enfrentados, as práticas agrícolas puderam, de alguma forma, se adaptar e se ajustar para melhorar a produtividade.

De acordo com Braga *et al.* (2024) a partir de 1995, observou-se um crescimento exponencial, sinalizando uma transformação estrutural na economia local. Essas mudanças refletem diretamente fatores econômicos e industriais que impactam a região.

Os resultados demonstraram a relação intrínseca entre as variáveis de precipitação, temperatura e SPI, e a produtividade da soja. As variações observadas em anos compatíveis entre essas variáveis indicaram a importância de adaptações nas práticas agrícolas em resposta às mudanças climáticas, incluindo os efeitos de fenômenos como El Niño e La Niña.

Figura 10. Variáveis climatológicas e produtiva para Imperatriz (a) Média anual de precipitação (b) Média anual de temperatura média (c) Índice de precipitação normalizado pelo desvio padrão e (d) Produtividade da soja.



Fonte: Autora, (2025).

5.10. Tendências de Mann Kendall para Precipitação

Os dados de precipitação revelaram tendências de redução em várias cidades, conforme indicado pela análise de Mann-Kendall (tabela 3). Alto Parnaíba, Barra do Corda, Colinas e Imperatriz apresentaram diminuições de tendências totais significativas de -2,5849 mm, -3,4719 mm, -2,8358 mm e -3,0757 mm ao longo do período analisado, respectivamente. Essas reduções indicam um cenário de seca progressiva, que pode comprometer seriamente a agricultura local e o abastecimento hídrico. Por outro lado, algumas cidades, como Balsas, Caxias e Chapadinha, mostraram aumentos leves nas chuvas, com incrementos de 0,7478 mm, 0,9042 mm e 1,7992 mm, respectivamente. Embora esses aumentos sejam positivos, eles são moderados e podem não ser suficientes para contrabalançar as perdas nas áreas mais afetadas. A tendência geral sugere a necessidade de estratégias de adaptação e gestão hídrica para mitigar os impactos da redução da precipitação.

Os resultados da diminuição do regime pluviométrico corroboraram com Santos *et al.* (2020) e Silva (2022) em relação às tendências de Mann-Kendall. Essas análises revelaram uma tendência significativa de redução nas precipitações ao longo do tempo, relativamente a possíveis alterações climáticas na região. Além disso, os dados sugeriram que fatores ambientais e antropogênicos poderiam ter contribuído para essa diminuição, impactando a disponibilidade de água e os ecossistemas locais.

Campos e Chaves (2020) observaram que a distribuição espacial das tendências nas séries de incidência indicou que as reduções mais significativas ocorreram nas porções central e oeste do bioma. Essas observações foram consistentes com outros estudos, demonstrando que o bioma apresentou uma variabilidade climática importante nos últimos anos. Concomitante à mudança climática global, a possibilidade de efeitos do desmatamento sobre o Cerrado pareceu ser relevante, pois mais da metade da vegetação nativa do bioma foi convertida para outros usos.

De acordo com o teste t Student realizado, todas as nove estações do estudo apresentaram significância estatística a nível de 5% para as variáveis de precipitação, temperatura e produtividade, validando que existe diferença entre as médias, e isso indica que a variabilidade climática influenciou na produtividade da soja na região em estudo ao longo dos 31 anos.

Tabela 3. Tendências interanual e anual de Precipitação.

Cidade	Tendência Interanual	Tendência para toda série	Status da Tendência	Teste T
Alto Parnaíba	-0,0833 mm/ano	-2,5849 mm	Diminuindo	Com significância
Bacabal	-0,0611 mm/ano	-1,8961 mm	Diminuindo	Com significância
Balsas	0,0241 mm/ano	0,7478 mm	Aumentando	Com significância
Barra do Corda	-0,1119 mm/ano	-3,4719 mm	Diminuindo	Com significância
Carolina	-0,0022 mm/ano	-0,0684 mm	Diminuindo	Com significância
Caxias	0,0291 mm/ano	0,9042 mm	Aumentando	Com significância
Chapadinha	0,0580 mm/ano	1,7992 mm	Aumentando	Com significância
Colinas	-0,0914 mm/ano	-2,8358 mm	Diminuindo	Com significância
Imperatriz	-0,0992 mm/ano	-3,0757 mm	Diminuindo	Com significância

Fonte: Autora, 2025.

5.11. Tendências de Mann Kendall para Temperatura Média

As análises de temperatura média (tabela 4), utilizando o teste de Mann-Kendall, indicaram um aumento consistente em todas as cidades. Barra do Corda e Balsas apresentaram as maiores elevações de 1,9652 °C e 1,6090 °C, respectivamente. Este aquecimento regional é preocupante, pois pode agravar a frequência e a intensidade de eventos climáticos extremos, como secas e ondas de calor.

Cidades como Alto Parnaíba, Imperatriz, Colinas e Carolina também mostraram aumentos moderados, entre 0,6827 °C e 0,8308 °C, evidenciando um padrão de aquecimento contínuo. A tendência de aumento da temperatura reforça a urgência de ações para reduzir a vulnerabilidade das comunidades e a necessidade de práticas agrícolas mais resilientes, especialmente diante das mudanças climáticas em curso.

Em Santos *et al.* (2021) e Vieira (2022), foram identificadas tendências de aumento de temperatura para todo o estado do Maranhão, indicando uma situação alarmante para a climatologia da região. Esses estudos destacam que as elevações nas temperaturas médias podem ter implicações sérias para a agricultura, saúde pública e ecossistemas locais. Além disso, Joseph *et al.* (2021) confirmam essas tendências, reforçando a urgência de estratégias de adaptação e mitigação diante das mudanças climáticas.

Tabela 4. Tendências interanual e anual de Temperatura Média

Cidade	Tendência Interanual	Tendência para toda série	Status da Tendência	Teste T
Alto Parnaíba	0,0220 °C/ano	0,6827 °C	Aumentando	Com significância
Bacabal	0,0064 °C/ano	0,1987 °C	Aumentando	Com significância
Balsas	0,0519 °C/ano	1,6090 °C	Aumentando	Com significância
Barra do Corda	0,0633 °C/ano	1,9652 °C	Aumentando	Com significância
Carolina	0,0268 °C/ano	0,8308 °C	Aumentando	Com significância
Caxias	0,0324 °C/ano	1,0070 °C	Aumentando	Com significância
Chapadinha	0,0232 °C/ano	0,7205 °C	Aumentando	Com significância
Colinas	0,0256 °C/ano	0,7939 °C	Aumentando	Com significância
Imperatriz	0,0246 °C/ano	0,7653 °C	Aumentando	Com significância

Fonte: Autora, 2025.

5.12. Tendências de Mann Kendall para Produtividade da Soja

Os resultados em relação a produtividade da soja (tabela 5) demonstraram um crescimento consistente, conforme evidenciado pela análise de Mann-Kendall, destacando a intensificação agrícola na região. Cidades como Balsas, Imperatriz e Colinas foram identificadas como polos de grande expansão, com aumentos extraordinários de 1067.452,9745 t/ha, 190.446,9004 t/ha e 184.796,9949 t/ha, respectivamente. Esses resultados refletem não apenas investimentos tecnológicos, mas também a expansão das áreas cultivadas. Embora Alto Parnaíba e Bacabal tenham apresentado crescimentos mais moderados de 92,0233 t/ha e 1,4937 t/ha, isso pode indicar limitações decorrentes da falta de recursos ou investimentos. A tendência de aumento da produtividade, embora positiva, deve ser acompanhada de perto, considerando as mudanças climáticas que podem afetar a sustentabilidade da produção agrícola a longo prazo.

Rocha e Ottati (2023) constataram que a produção de culturas agroalimentares está se concentrando nos municípios que produzem soja ou nas proximidades, principalmente nas mesorregiões Oeste e Sul do estado. Além disso, as análises revelaram um aumento na produtividade das culturas de milho, algodão e soja, resultado da adoção de novas tecnologias, técnicas de produção mais eficientes e insumos modernos, além das vantagens de infraestrutura fornecidas pelos polos produtores de soja.

Tabela 5. Tendências interanual e anual de Produtividade da Soja

Cidade	Tendência Interanual	Tendência para toda série	Status da Tendência	Teste T
Alto Parnaíba	2,9685 t/ano	92,0233 t/ano	Aumentando	Com significância
Bacabal	0,0482 t/ano	1,4937 t/ano	Aumentando	Com significância
Balsas	34.433,9669 t/ano	1067.452,974 t/ano	Aumentando	Com significância
Barra do Corda	110,8008 t/ano	3.434,8245 t/ano	Aumentando	Com significância
Carolina	3.405,9463 t/ano	105.584,3356 t/ano	Aumentando	Com significância
Caxias	4.105,0844 t/ano	127.257,6151 t/ano	Aumentando	Com significância
Chapadinha	4.918,3966 t/ano	152.470,2957 t/ano	Aumentando	Com significância
Colinas	5.961,1934 t/ano	184.796,9949 t/ano	Aumentando	Com significância
Imperatriz	6.143,4484 t/ano	190.446,9004 t/ano	Aumentando	Com significância

Fonte: Autora, 2025.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo destacaram a influência significativa da variabilidade climática na produtividade da soja em diferentes municípios da região do MATOPIBA maranhense. A metodologia utilizada no estudo demonstrou-se adequada, combinando ferramentas como o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), o teste de Mann-Kendall e análises estatísticas de validação com o teste t Student, que possibilitaram identificar padrões relevantes da variabilidade climática e suas consequências para a produtividade da soja em todos os municípios analisados.

Fenômenos como El Niño e La Niña impactaram diretamente as variáveis meteorológicas, especialmente a precipitação e a temperatura, refletindo-se de forma evidente nos rendimentos agrícolas.

A análise da precipitação revelou que a disponibilidade pluviométrica apresentou variações expressivas entre os municípios. Em Alto Parnaíba, foi registrada seca extrema em 2021, com SPI de -2,48 mm, o que impactou severamente a produtividade. Em Bacabal, o SPI alcançou 2,27 mm em 2008, um dos anos mais úmidos, favorecendo o desenvolvimento da soja. Balsas também demonstrou um comportamento crítico em anos de seca, como 1998, com precipitação média de apenas 60,29 mm, enquanto em 2020 houve recuperação hídrica, com média de 143,55 mm. Chapadinha, por sua vez, apresentou SPI positivo de 2,21 mm em 2020, indicando um período favorável para a agricultura. Em Carolina, períodos úmidos foram observados em 2011, com SPI de 2,40 mm, enquanto Colinas teve oscilações significativas, com SPI negativo em 2015 (-3,12 mm) e recuperação em 2020. Imperatriz também enfrentou seca extrema em 2016, com impactos diretos na produção agrícola.

As temperaturas médias aumentaram ao longo do período de estudo em todas as cidades analisadas. Em 2016, um dos anos mais críticos, Alto Parnaíba apresentou temperatura média de 27,46 °C, enquanto Balsas alcançou 28,61 °C, valores que intensificaram o estresse hídrico. Em Carolina, o aumento foi progressivo, chegando a 28,04 °C em anos de El Niño, refletindo uma tendência de aquecimento que impacta diretamente os ciclos produtivos da soja.

A produtividade da soja acompanhou essas variações climáticas, evidenciando picos em anos favoráveis e quedas em períodos críticos. Alto Parnaíba registrou uma produtividade máxima de 191.265,00 t/ha em 2009, enquanto Bacabal alcançou 4,71 t/ha em 2017, ambos em anos de condições climáticas favoráveis. Por outro lado, em 2016,

Chapadinha, Imperatriz e Colinas apresentaram uma leve diminuição devido à seca extrema e ao aumento das temperaturas.

Diante dos resultados recomenda-se o fortalecimento de estratégias agrícolas mais resilientes, como a adoção de cultivares tolerantes ao déficit hídrico, o investimento em sistemas de irrigação nas áreas mais vulneráveis e a criação de plataformas regionais de monitoramento climático. Essas iniciativas podem auxiliar os agricultores na tomada de decisões mais assertivas, mitigando os impactos da variabilidade climática e assegurando a sustentabilidade da produção agrícola no MATOPIBA maranhense.

REFERÊNCIAS

- ADAMA. “Chuvas na cultura da soja: entenda como elas afetam a produção”. **Portal ADAMA**, 2020. Disponível em: <https://portaladama.com/chuvas-na-cultura-da-soja/>. Acesso em: 05 de dezembro de 2024.
- ALMEIDA JUNIOR, G. R. **Metodologia para subamostragem em grandes bancos de dados amostrais complexos para realização de testes de hipóteses**. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- ANDRADE, A. S.; BRAGA, C. C.; SOUSA, W. G.; SILVA, M. T. Trend analysis of the standardized occurrence index in the microregion of Sousa-PB. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 432-443, 2023.
- ARAUJO, L. S.; SILVA, G. B.; TORRESAN, F. E.; VICTORIA, D. C.; VICENTE, L. E.; BOLFE, E. L.; MANZATTO, C. V. Conservação da biodiversidade do estado do Maranhão: Cenário atual em dados geoespaciais. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2016.
- ARAÚJO, M. L. S. **Análise da resiliência climática da cultura de soja na região do Matopiba, Brasil (1985-2020)**. 2024. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2024.
- ARAÚJO, S. O., SOUSA, S. R. C. T., BRITO NUNES, H. K. Variabilidade pluviométrica, produção de arroz e percepção de agricultores no município de Caxias/MA. **Acta Geográfica**, p. 234-256, 2021.
- BALBINO, A. O impacto das mudanças climáticas na agricultura. **Agrosmart**, 2020. Disponível em: <https://agrosmart.com.br/blog/impacto-mudancas-climaticas-na-agricultura/>. Acesso em: 05 de dezembro de 2024.
- BAPTISTA, C. H. M. S.; OLIVEIRA, L. F.; GOMES, L.; FARIA, W. R.; MOURA, F. R. **A variabilidade climática e a produtividade da soja: uma análise para as regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil entre 2002 e 2016**. Disponível em: <https://brsa.org.br/wp-content/uploads/wpcf7-submissions/4491/Soja-ENSO-Nomes.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2024.
- BARBIRATO, F. E. L.; SOUZA, L. I. Matopiba: a expansão da agricultura em remanescentes de vegetação nativa de bioma cerrado. **Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola**, v. 7, p. 4-21, 2018.
- BARBOSA, W. L., **Sensibilidade da temperatura do ar no Estado do Maranhão a cenários de mudanças climáticas globais**. 49 f. Trabalho de conclusão de curso no departamento de Oceanografia e limnologia. Universidade Federal do Maranhão 2022.
- BARROSO, D.F.R; LIMA, A. dos S.; RAMALHO, A.V.L; PAIS, I.P; NETO, A.A.C; OLIVEIRA E OLIVEIRA, A.B; CABRAL, G. S. Determinação da pluviosidade anual

- em Presidente Dutra-MA. In: PESQUISAS NO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO: INTER. 2. São Paulo: **Strictu Senso**, 2020.
- BODAS TERASSI, P. M. D., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. D., GÓIS, G. D., GALVANI, E. Variabilidade do índice de precipitação padronizada na região norte do estado do Paraná associada aos eventos de El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 11-25, 2018.
- BORGES, A. Caracterização espaço-temporal dos regimes pluviométricos e hidrológicos do baixo rio Iguaçu (1976-2016). 2020. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, 2020.
- BOTELHO, A. C. A expansão sojícola em territórios de produtores tradicionais na microrregião de Chapadinha –Maranhão. **Revista Percorso – NEMO**, Maringá, v. 9, n. 2, p. 05-20, 2017.
- BRAGA, E. V.; FONSECA, N. S.; FERNANDES, H. G. P.; CARVALHO, I. C.; SANTOS, B. V.; NETO, A. Q.S.; SILVA, I. L.; RODRIGUES, T. C. S. ANÁLISE DAS MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA NA REGIÃO METROPOLITANA DO SUDOESTE MARANHENSE: Um estudo na interface de transição entre Cerrado e Amazônia. **Revista Tocantinense de Geografia**, [S. l.], v. 13, n. 30, p. 134–150, 2024. DOI: 10.70860/rtg.v13i30.19176. Disponível em: <https://periodicos.ufnt.edu.br/index.php/geografia/article/view/19176>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- BUSS, R. N.; MENDANHA, J. F.; SILVA, D. M.; SIQUEIRA, G. M. Infraestrutura logística de transporte e armazenagem de soja no estado do Maranhão – Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 31564-31580, 2019.
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Análises das precipitações pelos testes não paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis. **Mercator (Fortaleza)**, v. 19, p. e19001, 2020.
- CAMPOS, J. D. O., CHAVES, H. M. L. Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no Bioma Cerrado no período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 157-169, 2020.
- CERQUEIRA, H. Avaliação mensal de chuva: agosto de 2020. Disponível em. Acesso em: 20/01/2025.
- CINTRA, P. H. N.; MELO, O. F. P.; MENEZES, J. O. S. Produção agrícola: uma revisão bibliográfica sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas no Brasil. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 11, n. 1, p. 87-94, 2020.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5728-ultimo-levantamento-da-safra-2023-2024-estima-producao-de-graos-em-298-41-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 16 de dezembro de 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 11 - décimo primeiro levantamento, 2024.

COSTA, N. P.; PEREIRA, L. A. G.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, A. A.; KRZYANOWSKI, F. C. Zoneamento ecológico do estado do Paraná para a produção de sementes de cultivares precoces de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 16, n 1, p. 12-19, 1994.

CULTIVAR. “Como lidar com os impactos do clima na produtividade da soja”. **Revista Cultivar**, 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/como-lidar-com-os-impactos-do-clima-na-produtividade-da-soja>. Acesso em: 09 de dezembro de 2024.

DA SILVA, D. F.; LIMA, M. J. S.; SOUZA NETO, P. F.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ALMEIDA, H. R. R. C.; PEREIRA, M. P. S.; COSTA, R. L. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.02, p. 449-464, 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/soybean>. Acesso em: 19 de abril de 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/tema-matopiba/sobre-o-tema>. Acesso em: 16 de dezembro de 2024.

FARIAS FILHO, M. S.; MORAES JÚNIOR, J. L. S.; DE MACEDO, L. T. S.; SANTOS, A. L. ANÁLISE DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO MUNICÍPIO DE BACABAL, MA. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 806–815, 2019. DOI: 10.35701/rcgs.v21n2.533. Disponível em: [//rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/533](http://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/533). Acesso em: 21 jan. 2025.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NORMAN, N. Ecofisiologia da Soja. Circular Técnica, 48. **Embrapa**. Londrina, PR. Setembro, 2007.

FEITOSA, M. M.; SOUSA, E. C.; NASCIMENTO, L.; LEMOS, J. J. S. A soja no estado do Maranhão, Brasil: uma análise temporal da expansão e substituição das culturas alimentares. **Revista Geografares**, v. 3, n. 37, p. 114-131, 2023.

FERREIRA, D. B. **Análise da variabilidade climática e suas consequências para a produtividade da soja na região sul do Brasil**. 2010. 171 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ROMÁN, R. M. S. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **IRRIGA**, v. 28, n. 1, p. 77-92, 2023.

FUZZO, D. F. S.; ASSUNÇÃO, F. J. M.; FUZZO, B. E.; FISCHER FILHO, J. A. Tendências e padrões de variação em séries temporais de temperatura do ar e precipitação na microrregião de Frutal – MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.17, n.3, p. 1977-1991, 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados de produção agrícola. Maranhão: IBGE, 2023.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br> . Acesso em: 08 de janeiro. 2025.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais **CPTEC** - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. ENOS El Niño e La Niña. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br> . Acesso em: 24 jan. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-ni%C3%B1o-pode-causar-impactos-na-agricultura-brasileira>. Acesso em: 11 de dezembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/servicos/spi-%C3%ADndice-de-precipita%C3%A7%C3%A3o-padronizada>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET).; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Normais climatológicas do Brasil 1991-2020.** Brasília, DF: INMET, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2014) *Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [Core Writing Team, RK Pachauri e LA Meyer (eds.)] Genebra, Suíça, 151 pp.

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

JACINTO, L. O uso da água na cultura da soja. **Agin**, 2023. Disponível em: <https://www.agin.agr.br/o-uso-da-agua-na-cultura-da-soja>. Acesso em: 09 de dezembro de 2024.

JANUARIO, I. R., **Identificação de eventos extremos de precipitação para o gerenciamento de riscos no estado do Maranhão.** 2021, 71 f. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Formação de Oficiais CBMMA da Universidade Estadual do Maranhão. 2021.

JOSEPH, W., SOUZA, A. P. D., SABINO, M. Índices de extremos de temperatura do ar na Amazônia brasileira. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 52, 2021.

KENDALL, M. G., **Rank Correlation Methods**, 4th ed., Charles Griffin: London, 1975.

- LAPA, L. D. P. Testes estatísticos: breves reflexões. **Reflexões em torno de Metodologias de Investigação: recolha de dados**, v. 2, p. 73-86, 2021.
- LOAYZA, A. C. V.; REIS, M. V. S.; DE JESUS, F. R.; IPOLITO, A. L. M.; RIBEIRO, I. G. Evolução dos indicadores da produção de soja no Matopiba. **Revista Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 12, p. 27824-27845, 2023.
- MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SOUZA, F. A. S.; DANTAS, F. R. C. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba, Brasil. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010. (doi:10.4136/ambi-agua.130).
- MAGALHÃES, G. O.; DUARTE, E. R.; ZAWADZKI, F.; BERTOLINI, E.; PADUAN, F. N.; LAJÚS, C. R.; MIYASHIRO, C. F.; SAUER, A. V. Agricultura e sustentabilidade: mudanças climáticas e modificações no desenvolvimento agropecuário. **Divers@ Revista Eletrônica Interdisciplinar**, v. 14, n. 1, p. 100-112, 2021.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, v.13, n. 3, p. 245-259, 1945.
- PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 0.9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**, acessado em 15 de janeiro de 2025. através do link: [https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit&scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-lulc.js]".
- MARTINS, W. L. D.; BLANCO, C. J. C.; DE MELO, A. M. Q. Potencial erosivo das chuvas nos estados do Maranhão e Pará via análise da distribuição espacial da erosividade. **Geoambiente On-line**, n. 36, p. 1-18, 2020.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology**. 1993. p. 179-183.
- MEDEIROS, R. M.; FRANÇA, M. V.; HOLANDA, R. M.; PEREIRA, M. L. F.; ARAÚJO, W. R.; SABOYA, L. M. F. O El Niño e a La Niña e suas influências no clima de Bom Jesus Piauí–Brasil. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 2, n. 6, p. e26484-e26484, 2021.
- MEDEIROS, R. M.; SABOYA, L. M. F.; FRANÇA, M. V.; HOLANDA, R. M.; CUNHA FILHO, M.; ARAÚJO, W. R. Impactos das anomalias pluviiais nas atividades agrícolas em Alagoa Nova e Lagoa Seca-Paraíba, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e32311326608-e32311326608, 2022.
- MINAKI, C.; MONTANHER, O. C. Influência do El Niño-Oscilação Sul na precipitação em Maringá-PR, no período de 1980 a 2016. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 69, p. 266-281, 2019.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, E PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/estudo-apontamento-de-37-na-producao-de-graos-no-matopiba-em-dez-anos>. Acesso em: 21 de abril de 2024.

- NASCIMENTO, F. D. C. A. D., BRAGA, C. C., ARAÚJO, F. R. D. C. D. Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação do Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 375-386, 2017.
- NASCIMENTO, F. D. C. A., ARAÚJO, F. R. D. C. D., CAMPOS, C. Análise Dos Padrões Espaciais E Temporais Da Precipitação No Estado Do Maranhão-Brasil. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 8, n. 02, p. 422-430, 2015.
- NASCIMENTO, F. D. C. A., BRAGA, C. C., ARAÚJO, F. R. D. C. D., SILVA COSTA, E. V. Caracterização de eventos secos e chuvosos na microrregião de Imperatriz-MA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 02, p. 325-333, 2015.
- NASCIMENTO, G. V. S.; SILVA, I. W. H.; NASCIMENTO, M. B. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO ANUAL E DA QUADRA CHUVOSA PARA O MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS, MARANHÃO. **Para Onde!?**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, 2024. DOI: 10.22456/1982-0003.133034. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/paraonde/article/view/133034>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- NASCIMENTO, M. R. **Influência da variabilidade climática sobre a linha de costa, riscos e vulnerabilidades do litoral de Maceió, Alagoas**. 2023. 143 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.
- OLIVEIRA, M.S. **Perdas quantitativas de grãos na colheita mecanizada em trabalho de soja comercial durante a safra 2021/2022**. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha, Chapadinha, MA, 2022.
- OLIVEIRA, L. A. E. L.A.E. **Impactos das mudanças climáticas no risco da cultura da soja e suas implicações no seguro agrícola**. 2020. 186 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) - Escola de Economia de São Paulo, São Paulo, 2020.
- PATROCÍNIO, S.F. Previsão de secas para o Nordeste do Brasil. Fortaleza: **Funceme**, 2008.
- PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 0.9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**, acessado em 15 de janeiro de 2025. através do link: [https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit&scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-lulc.js].
- RAMOS, J.G.M. **Análise da temperatura de Caxias/MA e sua relação com a expansão urbana**. 2021. 204 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2021.
- RAMOS, L. D. J. C., SANTOS, E. S., OLIVEIRA, S. S., SILVA, T. S., SANTOS SILVA, B., GUERRA FILHO, P. A. Índice de anomalia de chuva para mesorregião Sul Maranhense. **Ciências Rurais em Foco Volume 2**, p. 24. 2021.

REIS, L. C.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Caracterização da variabilidade da precipitação no MATOPIBA, região produtora de soja. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 04, p. 1425-1441, 2020.

REIS, L.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B.; MUTTI, P.; SPYRIDES, M. H.; SILVA, P.; MAGALHÃES, T.; FERREIRA, R.; RODRIGUES, D.; ANDRADE, L. Influence of climate variability on soybean yield in MATOPIBA, **Brazil. Atmosphere**, v. 11, 1130, 2020

ROCHA, S. F.; OTTATI, A. M. A. A. DINÂMICA DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA MARANHENSE ENTRE OS ANOS DE 1973 A 2017. **Revista Econômica do Nordeste**, [S. l.], v. 54, n. 2, p. 31–51, 2023. DOI: 10.61673/ren.2023.1251. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/1251>. Acesso em: 23 jan. 2025.

RODRIGUES, B. E. L., **Zoneamento agrícola de risco climático para desenvolvimento da doença ferrugem asiática na cultura da soja**. 2022, 39 f. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Agronomia do Campus de Chapadinha. Universidade Federal do Maranhão.

RODRIGUES, L. O.; SOUZA, W. M.; COSTA, V. S. O.; PEREIRA, M. L. T. Influência dos eventos de El Niño e La Niña no regime de precipitação do Agreste de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.6, p. 1995-2009, 2017.

SANTOS, C. T. B., FILHO, W. L. F. C., ALVES, B. Estimativa da Evapotranspiração Potencial para o Cerrado Nordestino Brasileiro. 2020. Anais do I **Workshop de meteorologia e recursos naturais**, 09 a 10 de dezembro de 2019, Campina Grande, Paraíba.

SANTOS, E. S.; GUERRA FILHO, P. A.; OLIVEIRA, S. S.; SILVA, B. dos S.; VERAS, A. E. S.; SOUZA, D. A. Interannual rainfall variability and soybean yields in Mata Roma municipality, Maranhão. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, [S. l.], v. 31, n. Contínua, p. 19–30, 2023. DOI: 10.13083/reveng.v30i1.14276. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/14276>. Acesso em: 22 jan. 2025.

SANTOS, J. A. S.; VIEIRA, V. C. B.; SILVA, A. J. Análise espaço-temporal do cultivo da soja no município de Balsas - MA, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 11, p. e149121143836-e149121143836, 2023.

SANTOS, J. R. N.; ARAÚJO, M. L. S.; SILVA JÚNIOR, C. H. L.; SANTOS, J. S.; ALMEIDA, J. L.; LIMA, T. V.; SOUSA, L. V. P.; AGUIAR, P. H. M.; SILVA, F. B.. TENDÊNCIAS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA-CERRADO NO ESTADO DO MARANHÃO. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 26, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.62883. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14203>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SANTOS, S. R. Q.; BRAGA, C. C.; SANSIGOLO, C. A.; SANTOS, A. P. P. Determinação de Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 111-122, 2017.

SANTOS, T. S. - **Estimação da produtividade de soja a partir de modelo agrometeorológico com base em inteligência artificial**. 2023, 89 p - Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal-SP, 2023.

SAX, SARAH.; ANGELO, MAURÍCIO. Crise climática pode acabar com a expansão da soja no Cerrado. **Mongabay**, 2020. Disponível em: <https://brasil.mongabay.com/2020/06/crise-climatica-pode-acabar-com-a-expansao-da-soja-no-cerrado/>. Acesso em 16 de dezembro de 2024.

SILVA FILHO, A. L.; SANTOS JUNIOR, W. M.; COSTA, V. C.; MARQUES FILHO, J. P. Classificação climática de Köppen aplicada em Unidades de Conservação: estudo de caso no Parque Estadual do Mendanha (PEM) e na área de proteção ambiental Gericinó-Mendanha (APAGM). **Humboldt-Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. e58446- e58446, 2021.

SILVA, J. L. B., DE ALBUQUERQUE MOURA, G. B., SILVA, M. V., SOUZA, R. V., GUEDES, P. M. O. L., DE FRANÇA, Ê. F., HOZANA, A. Inferência Exploratória de Dados Espaço-Temporal da Precipitação Pluviométrica no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 05, p. 2019-2036, 2020.

SILVA, R. G. **Caracterização da produção de grãos de soja (Glycine max (L.) Merrill) e milho (Zea mays) na mesorregião Leste Maranhense e capacidade estática das unidades armazenadas**. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha, Chapadinha, 2023.

SILVA, T. S. **Análise da variabilidade pluviométrica e espaço-temporal para diferentes mesorregiões do estado do Maranhão**. 2022. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2022.

SILVA, T. S., **Análise da variabilidade pluviométrica e espaço-temporal para as diferentes mesorregiões do estado do Maranhão**. 89 f. Trabalho de conclusão de curso no Centro de Ciências de Chapadinha curso de Engenharia Agrícola do Campus de Chapadinha, no departamento de engenharia agrícola, Universidade Federal do Maranhão 2022.

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M. Produtividade da soja na região do Matopiba sob mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.1, p. 8-14, 2019.

SILVA, V. T., SILVA, T. C., SILVA, A. R. ANÁLISE DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS À ENCHENTES E INUNDAÇÕES: o caso da sub-bacia hidrográfica do Riacho Bacuri no município de Imperatriz-MA. **Anais do congresso XX Congresso Nacional de Geografia Física Aplicada**. 2024.

SIQUEIRA, Beatriz. **Dinâmicas das chuvas e suas diferentes escalas no estado de São Paulo**. 2014. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Ourinhos, 2014.

SOARES, I. G., SANTOS, L. C. A., SZLAFSZTEIN, C. F. Aspectos fisiográficos da bacia hidrográfica do Rio Preto–MA: uma ferramenta para a gestão ambiental. **Ciência Geográfica**, v. 24, n. 3, p. 1105-1128, 2020.

SOUSA, W. G. **Cenários futuros da deficiência hídrica na região do MATOPIBA**. 2024. 107 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2024.

SOUSA, W. G.; SILVA, M. T.; SIQUEIRA, M. S.; GOMES, H. B.; OLIVEIRA, G.; SILVA, T. G. F.; CAVALCANTI, E. P. Variabilidade espaço temporal da seca meteorológica nas microrregiões do MATOPIBA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.17, n.1, p. 01-21, 2024.

SOUZA, M. F., MASSUQUINI, Z.; DALLACORT, R.; TERÇAS-TRETTEL, ACP; ZACARELI, MF de S. Influência das variações climáticas na produção de grãos do estado de Mato Grosso. Tangará da Serra: UNEMAT, 2022. v. 01, 15h. (**Boletim Técnico Grupo de Estudos em Geotecnologias Aplicadas às Mudanças Climáticas e Agricultura Digital**) 2022.

VIANA, J. S, GOMES, A. M. N., Haroldo, R., de MENEZES, N., PALARETTI, L. F. EFEITO DE TEMPERATURAS TÉRMICAS NO NÚMERO DE GERAÇÕES DE COCHONILHAS PARA O ANO DE EL NIÑO NO MARANHÃO. p. 31. **Boletim Informativo – Superintendência de Gestão Ambiental Vol 04**| Nº 01 | 2021 ISSN 2596-0741 Janeiro – Fevereiro – Março Distribuição Digital SÃO LUÍS - MA www.aga.uema.br 2021.