



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA  
CURSO DE AGRONOMIA**

**BIANCA ALVES SILVEIRA**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO  
E VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA REGIÃO NORDESTE (2013 – 2023)**

**FORTALEZA  
2025**

BIANCA ALVES SILVEIRA

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO E  
VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA REGIÃO NORDESTE (2013 – 2023)

Monografia submetida ao curso de Graduação em Agronomia, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro(a) Agrônomo(a).

Orientador: Prof. Dr. Vitor Hugo Miro Couto Silva.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S586a Silveira, Bianca Alves.

Análise estatística da relação entre a produtividade do milho e variáveis climáticas na Região Nordeste (2013 - 2023) / Bianca Alves Silveira. – 2025.  
38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Vitor Hugo Miro Couto Silva.

1. Milho. 2. Clima. 3. Produtividade agrícola. I. Título.

CDD 630

---

BIANCA ALVES SILVEIRA

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO E  
VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA REGIÃO NORDESTE (2013 – 2023)

Monografia submetida ao curso de Graduação em Agronomia, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro(a) Agrônomo(a).

Aprovada em: 28/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Vitor Hugo Miro Couto Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cicero Francisco de Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Ms. Ivan de Oliveira Holanda Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais e meus avós.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por seu amor e bondade, por estar ao meu lado nos momentos dificeis e me ajudar a concluir este curso, perseverando diante das dificuldades enfrentadas ao longo desta jornada.

Agradeço a minha família por me manter firme nessa caminhada, aos meus pais, Ayrton Silveira que sempre foi amoroso, me apoiando e ajudando a trilhar o caminho certo e minha mãe, Regiane Alves, por todo seu amor e carinho, sendo um exemplo de força na vida, por ter investido nos meus estudos ao longo dos anos. A minha avó, Francisca Maria, que me criou e cuidou como uma mãe, sempre me acolheu com palavras de amor e ajudou a superar as adversidades da vida e meu avô, José de Jesus (*in memoriam*), por ter sido presente na minha criação e me ensinado a dar valor ao trabalho. Ao meu tio, Rogério Alves, que mesmo sendo reservado, é presente na minha vida e fundamental para a conclusão dessa etapa. Agradeço ao meu irmão, Luiz Gustavo, que desde seu nascimento trouxe amor e felicidade a minha vida.

Sou grata a minha companheira de vida, Ildete Campelo e toda sua família, que além de me dar amor e carinho desde o começo dessa jornada, me ajudou a persistir nessa caminhada mesmo em momentos dificeis e que junto a minha família é um dos pilares principais dessa conquista e que sem seu suporte eu não teria persistido. Obrigada a Joana Campelo e ao Francisco de Assis, por me acolherem em sua casa em uma parte dessa jornada e me cuidarem como uma filha.

Aos meus tios, mesmo os que estão distantes foram peças fundamentais para essa conclusão, em especial a minha Tia Gleice, que também teve seu papel de mãe na minha vida, sendo amorosa em momentos dificeis e me lembrando o quanto lutei para chegar até aqui e a Tia Roseane por ajudar meus pais, cuidando de mim durante minha infância e estando presente durante minha vida. Aos meus tios, Raquel e Kaique, por me ouvir, aconselhar e trazer a leveza dos bons momentos. Agradeço aos meus amigos de infância e primos, os de sangue e os de coração, que sempre me apoiaram e fizeram parte de todas as fases da minha vida, principalmente a Maria Eduarda Rocha, Giullia Rocha, Tayana Rocha, Laysa Veras, Yasmim Mota, Kevin Silveira.

Sou grata também aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins durante deste período, Rafael Vítor, Marcela Agostinho, Márcia Cruz, Marcelle Sousa, Valesca Farias, Bianca Silva, Paloma Maia, Pedro Américo, Tatiane Maria, Cláudio Santos, Emanuel Magalhães, Raiane, Raul Felipe, Libério Feitosa.

Agradeço as minhas cachorras, Cora, Doce de Leite e Bethova, por me receberem

em casa com alegria todos os dias, mesmo nos dias bons e ruins.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vitor Hugo Miro Couto Silva, pela orientação impecável, pelas críticas construtivas e por me conduzir com paciência e clareza ao longo deste percurso acadêmico.

Agradeço aos avaliadores da banca, Prof. Dr. Cicero Francisco de Lima e Ms. Ivan de Oliveira Holanda Filho.

Aos professores do curso de Agronomia, pela dedicação e pelo compromisso em compartilhar conhecimento com seriedade e entusiasmo, aos servidores e funcionários em especial a Margareth, Roberta e Gisele.

A todos os profissionais e a instituições que, direta ou indiretamente, contribuíram com este trabalho, seja por meio de dados, informações ou incentivo.

“O início é a parte mais importante do trabalho.” (PLATÃO, 427-347 A.C).

## **RESUMO**

Este trabalho analisou a influência de variáveis climáticas, pluviosidade e temperatura média anual, sobre o rendimento do milho na Região Nordeste do Brasil, no período de 2013 a 2023. A pesquisa adotou abordagem quantitativa, com uso de dados secundários do IBGE e INMET. As análises incluíram estatística descritiva, correlação de Pearson e regressão linear múltipla, com uso do software R Studio. Os resultados revelaram que a pluviosidade tem impacto positivo e estatisticamente significativo sobre a produtividade do milho, enquanto a temperatura mostrou relação negativa, embora de baixa magnitude prática. O modelo linear ajustado apresentou um  $R^2$  de 0,03 e o logarítmico de 0,11, indicando que os fatores climáticos explicam apenas parte da variabilidade da produtividade. Conclui-se que, apesar da importância do clima, fatores como manejo, tecnologia e políticas públicas desempenham papel crucial na produtividade agrícola regional. Recomenda-se a implementação de estratégias integradas, incluindo irrigação, desenvolvimento de cultivares resistentes e fortalecimento da assistência técnica.

**Palavras-chave:** milho; clima; produtividade agrícola.

## **ABSTRACT**

This study analyzed the influence of climatic variables — annual rainfall and average temperature — on maize yield in the Northeast Region of Brazil from 2013 to 2023. The research adopted a quantitative approach using secondary data from IBGE and INMET. The analyses involved descriptive statistics, Pearson correlation, and multiple linear regression, performed using R Studio software. Results indicated a statistically significant positive effect of rainfall on maize productivity, while temperature showed a negative relationship, although with low practical magnitude. The adjusted linear model presented an  $R^2$  of 0.03, and the logarithmic model reached 0.11, suggesting that climatic factors explain only a small portion of yield variability. It is concluded that, despite the relevance of climate, factors such as crop management, technology, and public policies play a crucial role in regional agricultural productivity. Integrated strategies are recommended, including irrigation, development of resilient cultivars, and strengthening of technical assistance.

**Keywords:** maize; climate; agricultural productivity

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Imagem da *interface* do *software* RStudio..... 24

Figura 2 – Mapas de produtividade do milho (2013-2023) ..... 26

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Gráfico da Regressão Linear Múltipla (2013-2023) ..... 33

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Descrição das variáveis utilizadas .....	23
Tabela 2 – Top 10 municípios com maior média de produtividade .....	27
Tabela 3 – Top 10 maiores crescimentos relativos.....	27
Tabela 4 – Top 10 maiores declínios relativos .....	28
Tabela 5 – Top 10 municípios com maior variabilidade na produtividade .....	29
Tabela 6 – Correlação - Produtividade x Temperatura x Pluviosidade .....	30
Tabela 7 – Coeficientes do modelo de regressão linear .....	31
Tabela 8 – Coeficientes do modelo de regressão logarítmica.....	32

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DSSAT	Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MATOPIBA	Região composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
PAM	Pesquisa Agrícola Municipal
RCP	Caminho de Concentração Representativo
SARRAZON	Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos
SciELO	Biblioteca Eletrônica Científica Online
SEALBA	Região composta pelos estados de Sergipe, Alagoas e Bahia

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	14
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	16
2.1	<b>Efeitos Climáticos sobre a Produtividade do Milho no Brasil e no Nordeste .....</b>	16
2.2	<b>Impactos Climáticos Simulados e Estratégias de Adaptação para o Cultivo do Milho no Nordeste Brasileiro .....</b>	17
2.3	<b>Seca, Risco Climático e Variabilidade da Precipitação: Implicações para o Cultivo do Milho no Nordeste Brasileiro .....</b>	19
2.4	<b>Produção e Mercado de Milho: Panorama Nacional e Regional .....</b>	20
3	<b>METODOLOGIA .....</b>	22
3.1	<b>Fundamentação Teórica .....</b>	22
3.2	<b>Área de Estudo e Natureza dos dados .....</b>	22
3.3	<b>Coleta, Manipulação e Análise de Dados .....</b>	23
3.4	<b>Régressão Linear Múltipla .....</b>	24
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	25
5	<b>CONCLUSÃO .....</b>	35
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	36

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o milho consolidou-se como uma cultura estratégica para a segurança alimentar e a economia brasileira, ocupando posição de destaque tanto na produção interna quanto nas exportações. Entretanto, a Região Nordeste, embora possua importante tradição de cultivo, enfrenta desafios crescentes decorrentes da variabilidade climática, como o aumento das temperaturas médias, irregularidade pluviométrica e eventos extremos (secas e chuvas intensas), que podem comprometer o rendimento da cultura e a renda dos produtores.

O problema de pesquisa deste trabalho concentra-se em compreender como os principais fatores climáticos, temperatura média anual e pluviosidade média anual, interferem na produtividade do milho no Nordeste brasileiro, ao longo do período de 2013 a 2023. Observa-se que, apesar de avanços tecnológicos e expansão de área, os rendimentos têm apresentado alta variabilidade espacial e temporal, sugerindo influência significativa das condições climáticas.

A justificativa para esta pesquisa reside na necessidade de gerar conhecimento aplicado que auxilie no planejamento agrícola regional e na formulação de políticas públicas voltadas à adaptação climática. Entender a sensibilidade do milho às variáveis climáticas na região permitirá orientar práticas de manejo, seleção de cultivares e investimentos em tecnologias, reduzindo riscos produtivos e fortalecendo a resiliência dos sistemas agrícolas nordestinos.

### Objetivo geral

- Estudar a interferência dos efeitos climáticos (temperatura e pluviosidade) sobre a produtividade do milho na Região Nordeste do Brasil, no período de 2013–2023.

### Objetivos específicos

- Revisar a literatura sobre mudanças climáticas e produtividade do milho, com foco no semiárido nordestino;
- Coletar e organizar, em nível municipal, dados de rendimento de milho (IBGE PAM) e variáveis climáticas (INMET), interpolados para municípios sem estação;
- Realizar estatística descritiva para caracterizar padrões espaciais e temporais de produtividade;
- Avaliar correlações de Pearson entre rendimento, pluviosidade e temperatura;
- Ajustar modelos de regressão linear múltipla para quantificar o efeito conjunto das variáveis climáticas no rendimento;

### Hipóteses

1. Qual é a relação entre a pluviosidade média anual e o rendimento do milho na Região Nordeste? Espera-se que haja uma correlação positiva, indicando que anos com maiores volumes de chuva favorecem o aumento da produtividade.

2. Qual é o efeito da temperatura média anual sobre o rendimento do milho na Região Nordeste? Pressupõe-se que exista uma correlação negativa, ou seja, que elevações na temperatura média reduzam o rendimento médio da cultura.

Por fim, este trabalho está organizado em cinco capítulos: no Capítulo 2, apresenta-se o referencial teórico sobre clima e produtividade do milho; o Capítulo 3 descreve a metodologia de coleta, interpolação e análise dos dados (2013–2023) usando técnicas estatísticas aliadas ao software R Studio; no Capítulo 4 são expostos os resultados, mapas de produtividade, estatística descritiva, correlações e modelos de regressão, acompanhados de discussão crítica; e, finalmente, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões, limitações do estudo e recomendações para pesquisas futuras e políticas públicas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Efeitos Climáticos sobre a Produtividade do Milho no Brasil e no Nordeste

Os efeitos das mudanças climáticas na produção agrícola brasileira têm sido objeto de muitos estudos nos últimos anos, especialmente em relação ao milho, uma das principais culturas de grãos do país. As previsões mais recentes sugerem que, sem adaptações tecnológicas ou estruturais, o crescimento das temperaturas e a irregularidade das chuvas provavelmente reduzirão consideravelmente a produtividade agrícola até 2030. Essa tendência é particularmente alarmante para culturas como o milho, que é altamente sensível às condições de temperatura e umidade. Estudos com base em modelos climáticos globais e regionais mostram que, embora alguns grãos como soja possam ter impactos moderados, o milho tende a sofrer perdas severas de produtividade, com destaque para regiões como o Nordeste brasileiro, onde os déficits hídricos são mais frequentes (World Bank, 2013).

Condições climáticas adversas, como secas, chuvas intensas e temperaturas extremas, são consideradas fatores importantes que reduzem a produtividade do milho, principalmente nas safras de verão e “safrinha”. Na “safrinha”, por exemplo, o plantio tardio torna a cultura mais vulnerável à seca no outono e ao perigo de geadas em regiões mais altas, abrangendo áreas do semiárido no Nordeste. Além disso, fenômenos como granizo e vento forte, embora menos comuns, também foram identificados como responsáveis por perdas na produção. Esses eventos contribuíram para a elevada sinistralidade observada em programas de seguro agrícola destinados a pequenos e médios produtores. (Gonçalves; Farias; Sibaldelli, 2019).

Estudos econométricos têm reforçado a associação negativa entre variáveis climáticas e a produtividade do milho. Por exemplo, aumentos nas temperaturas máximas e mínimas tendem a prejudicar diretamente o desenvolvimento fisiológico da planta, comprometendo processos como fotossíntese, floração e enchimento de grãos. Além disso, a deficiência hídrica é apontada como um fator de estresse relevante, pois leva ao fechamento dos estômatos, redução da assimilação de carbono e menor crescimento vegetativo. Por outro lado, o aumento da precipitação pluviométrica, desde que bem distribuído, tem um impacto positivo na produtividade, conforme observado em regiões com histórico de restrição hídrica, como o semiárido nordestino (Lisbinski, 2025).

De acordo com Streck e Alberto (2006), são limitadas as vantagens no aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera sobre o milho. Quando esse aumento acontece de forma

isolada, pode resultar em ganhos modestos de rendimento; no entanto, com adição de 2°C na temperatura média do ar, esses ganhos são rapidamente anulados. A partir desse momento, os efeitos prejudiciais do aquecimento global provavelmente superarão os possíveis benefícios fisiológicos oferecidos pelo CO<sub>2</sub>. Esses achados destacam a importância de reconhecer o milho como uma cultura extremamente suscetível ao aquecimento global, o que demanda a implementação de cultivares mais resistentes ao calor e à seca, além de aprimoramentos no manejo da água e do solo.

Portanto, o Nordeste brasileiro é especialmente afetado por esses impactos devido à sua alta variabilidade nas chuvas interanuais e à grande exposição ao estresse térmico. Além das estimativas de queda na produtividade, os estudos apontam uma diminuição na área cultivável de baixo risco e alto potencial produtivo, o que resulta em uma pressão extra sobre os recursos naturais e sistemas de produção já vulneráveis. Assim, medidas de adaptação se tornam essenciais, como políticas públicas focadas no fortalecimento da assistência técnica, incentivo ao desenvolvimento de tecnologias adaptadas e expansão do seguro agrícola para os agricultores vulneráveis da região. (Souza, 2018; World Bank, 2013).

## **2.2 Impactos Climáticos Simulados e Estratégias de Adaptação para o Cultivo do Milho no Nordeste Brasileiro**

Pesquisas recentes baseadas em modelos agrometeorológicos alertam para um cenário crítico: o aquecimento global pode reduzir significativamente a área cultivável e a produtividade do milho na região Nordeste do Brasil. Utilizando os modelos SARRAZON e DSSAT, foram avaliados os impactos de diferentes níveis de aumento na temperatura média (1,5 °C, 3 °C e 5 °C), conforme projeções do IPCC. Os dados revelaram que, conforme as temperaturas sobem, há uma drástica redução nas zonas de baixo risco climático e uma expansão das áreas classificadas como médio e alto risco para o cultivo do milho, sobretudo no período de novembro a março. Essas mudanças representam uma ameaça direta à segurança alimentar e à sustentabilidade econômica da agricultura de sequeiro no Nordeste. (Campos, 2010).

A aplicação do modelo DSSAT para prever a produtividade do milho em Juazeiro (BA) indicou uma redução significativa no rendimento médio conforme as temperaturas aumentam. Com as condições climáticas atuais, a produção prevista foi de 2.055 kg/ha. Contudo, em um cenário de aumento de 1,5 °C, esse número diminuiu para 1.807 kg/ha; com uma elevação de 3 °C, caiu para 1.553 kg/ha; e, no caso de um aquecimento de 5 °C, reduziu-

se para apenas 1.187 kg/ha. Essa redução está relacionada tanto à aceleração do ciclo da cultura devido ao calor quanto ao aumento do consumo de água por meio da evapotranspiração, o que agrava a falta de água em momentos críticos do crescimento. Mesmo no cenário mais extremo, a atividade continuou sendo lucrativa, embora com uma eficiência econômica reduzida, especialmente em sistemas agrícolas que adotam poucas tecnologias. (Campos, 2010).

Esses resultados são corroborados por outros estudos que empregam variados modelos climáticos e agrícolas. Por exemplo, uma pesquisa realizada com o modelo AquaCrop simulou os efeitos das mudanças climáticas na produtividade e na necessidade de água do milho em várias sub-regiões do Nordeste. Os autores notaram que, nos cenários mais pessimistas (RCP8.5 entre 2071–2099), a produtividade no regime de sequeiro pode cair em mais de 60% em certas regiões. As medidas de adaptação analisadas, como o uso de cultivares de ciclo mais longo e irrigação, mostraram-se eficientes na redução parcial das perdas. No entanto, isso exigiu um aumento considerável na demanda por água, com um aumento previsto de até 140% no consumo hídrico nas áreas com maior potencial para expansão da irrigação. (Martins; Tomasella; Dias, 2019).

As estratégias de manejo adaptativo também foram estudadas por Magalhães et al. (2019), onde realizou-se simulações com distintas combinações entre a profundidade das raízes e a presença de restos culturais no solo. Os dados obtidos indicaram que sistemas com maior desenvolvimento radicular (entre 0,5 m e 0,7 m) aliados a uma cobertura vegetal mais densa sobre o solo apresentaram melhor desempenho na retenção de umidade e na atenuação dos efeitos negativos causados pela redução das chuvas. Esse tipo de prática agrícola contribuiu para a diminuição de até 30% nas perdas de produtividade em áreas caracterizadas por clima árido e elevadas temperaturas. As simulações ainda mostraram que a radiação solar exerce influência positiva sobre a produção, mas em condições de déficit hídrico severo, como ocorre em Araçuaí (MG), o excesso de radiação intensifica a evapotranspiração, afetando negativamente o processo fotossintético.

Além disso, estudos realizados no semiárido paraibano demonstram que a produtividade do milho não depende exclusivamente do volume anual de chuvas, mas sim da forma como essas precipitações se distribuem ao longo do ciclo da cultura. Em municípios como Sumé (PB), a análise de séries históricas evidência que a irregularidade temporal das chuvas compromete significativamente a produção, sobretudo em áreas manejadas pela agricultura familiar. Além da variabilidade climática, aspectos como características do solo, práticas de manejo e qualidade das sementes utilizadas também se destacam como elementos determinantes na resposta produtiva da cultura. Tais constatações reforçam a importância de

adotar uma abordagem integrada e multidimensional na análise da resiliência do milho frente às mudanças climáticas. (Porto et al., 2018).

### **2.3 Seca, Risco Climático e Variabilidade da Precipitação: Implicações para o Cultivo do Milho no Nordeste Brasileiro**

Nas áreas semiáridas do Brasil, especialmente no Nordeste, a prática agrícola é fortemente impactada por eventos climáticos extremos, sendo a irregularidade das chuvas e as secas prolongadas elementos que aumentam os riscos produtivos, sobretudo em sistemas de sequeiro. No caso do milho, uma cultura amplamente cultivada na região, observa-se uma alta dependência de condições hídricas estáveis. Quando ocorrem falhas na regularidade das precipitações ou períodos secos durante fases críticas, como a reprodução, os prejuízos à produtividade são expressivos. Além disso, essas adversidades podem elevar os custos operacionais, comprometendo a viabilidade econômica das lavouras e a segurança alimentar de pequenos produtores. (Vasconcelos et al., 2019).

Simulações climáticas de longo prazo reforçam o caráter heterogêneo dos impactos da seca entre os municípios nordestinos. Em cenários futuros com base na projeção RCP 8.5, observa-se tendência de intensificação dos eventos extremos e agravamento da vulnerabilidade socioeconômica regional. As perdas projetadas de produtividade agrícola, especialmente nas culturas de milho e feijão, variam substancialmente entre os estados, com efeitos mais severos observados no Norte do semiárido. Essa heterogeneidade se reflete nos efeitos diferenciados sobre o Produto Regional Bruto (PRB) e nas dinâmicas migratórias, onde as regiões mais afetadas tendem a apresentar perda populacional e maior pressão sobre os serviços públicos locais (Pimenta, 2020).

De acordo com análises quantitativas, os municípios com menor nível de mecanização e maior dependência da agricultura familiar são mais vulneráveis às variações no regime de chuvas. Nessas localidades, onde o acesso à irrigação é limitado, a produtividade do milho tende a oscilar significativamente conforme a distribuição pluviométrica. Observou-se, por exemplo, que em anos de estiagem, municípios como Ourinhos (SP), Espírito Santo do Turvo e Santa Cruz do Rio Pardo registraram perdas expressivas nessa cultura. Em contrapartida, a cana-de-açúcar, por estar vinculada a sistemas de produção mais tecnificados e ao setor do agronegócio, demonstrou maior estabilidade produtiva frente às adversidades climáticas. (Fernanda da Silva; Prela-Pantano; Lima Sant'Anna Neto, 2008).

Outro aspecto relevante é o risco atuarial associado à produção de milho em novas fronteiras agrícolas, como o Matopiba. A avaliação dos coeficientes de variação da produtividade demonstra que essa cultura apresenta maior instabilidade em comparação à soja, sendo mais exposta a riscos climáticos. O Índice de Sinistralidade em diversas microrregiões excede o limite aceitável de 65%, indicando fragilidade no mercado de seguros rurais para essa cultura. Essa condição compromete a eficácia de políticas públicas de subvenção ao seguro agrícola e evidencia a necessidade de abordagens mais detalhadas e territorializadas na gestão do risco (Dal Pozzo et al., 2024).

Em conclusão, os efeitos da variabilidade das chuvas de ano para ano afetam não só a produção, mas também a área cultivada e a produtividade física das culturas. No Ceará, o estudo de séries históricas de 1987 a 2016 mostrou que os anos de El Niño, ligados a uma redução na precipitação e má distribuição das chuvas, coincidiram com anomalias negativas na produção e produtividade do milho. Em contrapartida, os anos de La Niña, caracterizados por uma precipitação mais constante, contribuíram para o crescimento da produção. Esses dados evidenciam a forte conexão entre os fenômenos climáticos oceânicos e o rendimento agrícola na região, destacando a relevância do acompanhamento climático e da implementação de estratégias adaptativas no planejamento agrícola do semiárido nordestino. (Vasconcelos et al., 2019).

## **2.4 Produção e Mercado de Milho: Panorama Nacional e Regional**

A produção de milho no Brasil tem apresentado expansão expressiva nas últimas décadas, impulsionada por melhorias tecnológicas, aumento de área cultivada e mudanças nos sistemas de cultivo. Dados históricos demonstram que entre 1976/77 e 2015/16 a produção nacional cresceu cerca de 245%, passando de 19 para 66 milhões de toneladas, com estimativas posteriores superando os 90 milhões de toneladas. O cultivo se divide em duas safras: a primeira, tradicionalmente no verão, e a segunda, a “safrinha”, que se tornou responsável por mais de 60% da produção nacional. O crescimento da safrinha foi favorecido pela prática da sucessão com a soja e pelo uso de cultivares híbridos de alto rendimento, especialmente no Centro-Oeste, que hoje lidera em volume de produção (Souza et al., 2018).

A configuração regional da produção de milho no Brasil sofreu alterações substanciais nas últimas décadas, deixando de se concentrar majoritariamente na região Sul. A partir dos anos 2000, o Centro-Oeste passou a ocupar posição de destaque, especialmente o estado de Mato Grosso, que lidera em área plantada e volume de colheita. Esse avanço está

fortemente relacionado à incorporação de tecnologias agrícolas modernas e ao crescimento da fronteira produtiva, com destaque para práticas como o plantio direto, o uso de híbridos geneticamente modificados e adubações voltadas à eficiência do sistema. Por outro lado, as regiões Norte e Nordeste, embora tenham registrado avanços relevantes em termos percentuais de produtividade, ainda apresentam os menores patamares absolutos. Isso se deve, principalmente, às restrições climáticas, limitações dos solos e ao predomínio de técnicas de cultivo com baixo nível tecnológico. (Artuzo et al., 2019).

As disparidades na produtividade do milho em diferentes regiões brasileiras estão diretamente ligadas a aspectos ambientais e estruturais, como clima, tipo de solo, nível de mecanização e organização fundiária. Enquanto estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentam maiores rendimentos médios, frequentemente superiores a 6 toneladas por hectare, áreas do Nordeste, como o Ceará, Pernambuco e Paraíba, registram índices mais baixos. Esse contraste decorre, em grande parte, da escassez hídrica e da instabilidade no regime de chuvas, que comprometem o desempenho das lavouras. Contudo, experiências desenvolvidas no agreste de estados como Bahia e Sergipe demonstram que a adoção de variedades mais resilientes e de técnicas agrícolas acessíveis pode resultar em produtividades expressivas, mesmo em contextos de alta limitação climática, superando, em alguns casos, 9 mil kg/ha (Oliveira et al., 2010).

O milho também desempenha papel central na agricultura familiar. No Brasil, a maior parte dos estabelecimentos que cultivam milho pertence a esse segmento, caracterizado por sistemas de produção diversificados, com baixa mecanização e foco na subsistência. A produtividade nessa categoria é limitada por restrições de acesso a insumos e assistência técnica, mas práticas como adubação orgânica, controle biológico e uso de variedades crioulas adaptadas ao ambiente local têm mostrado potencial para melhorar o rendimento e a segurança alimentar (Cruz et al., 2011). A dualidade entre grandes produtores altamente tecnificados e pequenos agricultores de baixa produtividade é um traço marcante do setor.

Por fim, no que diz respeito ao mercado, o milho é essencial tanto para o consumo interno, principalmente como base da alimentação animal, quanto para a exportação. O Brasil é o terceiro maior produtor e segundo maior exportador mundial do grão. Nos últimos anos, os preços internos têm apresentado forte valorização, impulsionados por demanda internacional aquecida, especialmente da China, e pela oscilação cambial. O Nordeste brasileiro acompanha essas tendências, com destaque para os polos produtivos emergentes do Matopiba e Sealba. Nessas regiões, a combinação de áreas de expansão agrícola, infraestrutura logística em

melhoria e maior tecnificação tem favorecido o crescimento da produção e da inserção nos mercados interno e externo (Coêlho, 2021).

### **3 METODOLOGIA**

A presente pesquisa tem por finalidade analisar os efeitos de variáveis climáticas sobre a produtividade do milho na Região Nordeste do Brasil, ao longo do período de 2013 a 2023. Para isso, adotou-se uma abordagem metodológica de caráter quantitativo e descritivo, com o uso exclusivo de dados secundários. A investigação orientou-se pela aplicação de técnicas estatísticas, aliadas a ferramentas computacionais de manipulação e análise de dados, com vistas a construir uma análise robusta e regionalmente representativa da relação entre clima e produtividade agrícola.

#### **3.1 Fundamentação Teórica**

A etapa inicial consistiu em uma ampla pesquisa bibliográfica, cujo propósito foi embasar teoricamente os fundamentos do estudo e fornecer diretrizes metodológicas adequadas para a condução das análises. Foram utilizados mecanismos de busca científica como Google Acadêmico, SciELO, Portal de Periódicos da CAPES e o repositório institucional da Embrapa, de onde se extraiu literatura especializada a respeito da cultura do milho no Nordeste, bem como estudos correlatos que abordassem a variabilidade climática e modelagem estatística da produtividade agrícola. Essa fundamentação respaldou tanto a seleção das variáveis quanto a estratégia de análise adotada.

#### **3.2 Área de Estudo e Natureza dos dados**

O recorte espacial delimitado contempla todos os municípios situados nos nove estados que compõem a Região Nordeste, abrangendo, assim, uma diversidade significativa de condições edafoclimáticas, socioeconômicas e produtivas. Ao todo, consideraram-se os dados referentes a 1.794 municípios. Já o recorte temporal estabelecido compreende um intervalo de onze anos consecutivos, de 2013 a 2023. Essa série histórica foi escolhida com o intuito de possibilitar uma análise longitudinal suficientemente ampla para a identificação de padrões e anomalias, respeitando a disponibilidade dos dados mais recentes em fontes oficiais.

As variáveis analisadas foram selecionadas com base na literatura e na viabilidade de obtenção dos dados em escala municipal. A variável dependente foi o rendimento médio do milho, expressa em quilogramas por hectare (kg/ha), obtida junto à Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), divulgada anualmente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As variáveis independentes corresponderam à temperatura média anual, medida em graus Celsius (°C), e à pluviosidade média anual, expressa em milímetros (mm), cujos valores foram extraídos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 1 – Descrição das variáveis utilizadas

Variável	Unidade	Tipo	Natureza	Fonte
Rendimento médio do milho	kg/ha	Quantitativa contínua	Secundária	IBGE – PAM
Pluviosidade média anual	mm	Quantitativa contínua	Secundária	INMET / interpolação
Temperatura média anual	°C	Quantitativa contínua	Secundária	INMET / interpolação
Dummy de safra (2013–2023)	—	Qualitativa binária	Derivada	Criada a partir do banco de dados

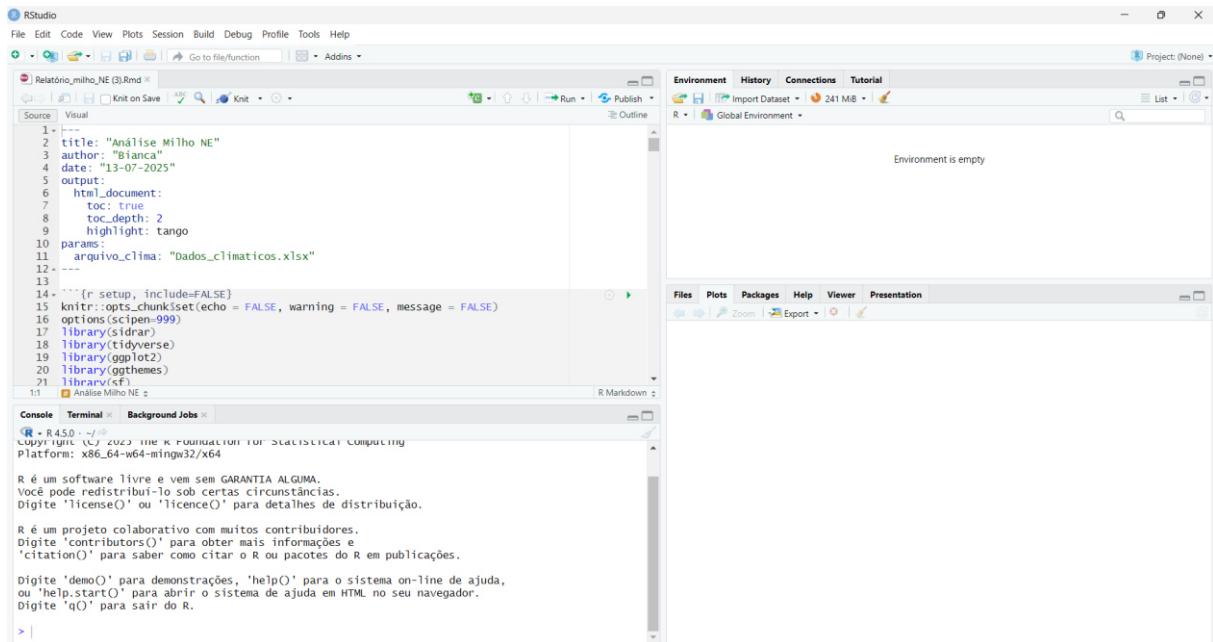
Fonte: Elaborada pela autora.

No entanto, como nem todos os municípios nordestinos possuem estações meteorológicas instaladas, foi necessário proceder à estimativa dos dados climáticos para localidades sem cobertura direta. Para tanto, utilizou-se a técnica de interpolação espacial, aplicada sobre os dados observados em pontos com estação, com base nas coordenadas geográficas de cada município.

### 3.3 Coleta, Manipulação e Análise de Dados

Todo o processo de coleta, limpeza e análise estatística dos dados foi conduzido no ambiente de programação R Studio (Figura 1), utilizando pacotes especializados como sidrar, tidyverse, ggplot2, ggthemes, sf, geobr, readxl, writexl, plotly, report e kableExtra. A opção por esta ferramenta justifica-se por sua robustez, capacidade de automatização de tarefas e ampla aceitação na comunidade científica.

Figura 1 - Imagem da interface do software RStudio.



Fonte – Software Rstudio (2025).

Com os dados devidamente consolidados e organizados em um único banco, procedeu-se à padronização das variáveis e à identificação e tratamento de valores ausentes, outliers e inconsistências. Também foi realizada a criação de variáveis dummies correspondentes a cada ano da série, com o objetivo de isolar os efeitos temporais fixos e facilitar a interpretação dos modelos estatísticos. Por exemplo, para cada ano entre 2013 e 2023, foi criada uma variável dummy binária, que assume valor 1 quando a observação pertence ao ano correspondente, e 0 nos demais casos.

As análises estatísticas foram iniciadas por meio da estatística descritiva, buscando caracterizar o comportamento das variáveis ao longo do tempo e entre os municípios. Foram calculadas médias, valores máximos e mínimos, além de coeficientes de variação, o que permitiu identificar variações espaciais e temporais na produtividade do milho, bem como padrões climáticos predominantes. Em seguida, aplicou-se o coeficiente de correlação de Pearson para avaliar a associação linear entre as variáveis independentes (temperatura e pluviosidade) e a variável dependente (rendimento do milho).

### 3.4 Regressão Linear Múltipla

Com base nos pressupostos da teoria da regressão linear, foi estruturado um modelo de regressão multivariada com variáveis explicativas contínuas (pluviosidade e temperatura) e

dummies anuais como variáveis indicadoras. O modelo geral pode ser representado pela equação 1:

$$\hat{Y}_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_{i,t} + \beta_2 \cdot T_{i,t} + \sum_{k=2014}^{2023} \gamma_k \cdot D_k + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

onde:

- $\hat{Y}_{i,t}$  representa o rendimento médio de milho no município  $i$  no ano  $t$ ;
- $P_{i,t}$  e  $T_{i,t}$  são os valores de pluviosidade e temperatura média anual, respectivamente;
- $D_k$  são as variáveis dummy para os anos de 2014 a 2023 (2013 é a base de comparação);
- $\varepsilon_{i,t}$  representa o termo de erro aleatório.

Considerando a transformação logarítmica aplicada tanto à variável resposta quanto às explicativas contínuas, definiu-se um modelo de regressão múltipla log-log que incorpora pluviosidade e temperatura médias anuais, além de variáveis dummy para controlar efeitos de cada exercício. A forma geral deste modelo é apresentada na equação 2:

$$\ln(\hat{Y}_{i,t}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(P_{i,t}) + \beta_2 \cdot \ln(T_{i,t}) + \sum_{k=2014}^{2023} \gamma_k \cdot D_k + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

onde:

- $\ln(\hat{Y}_{i,t})$  corresponde ao logaritmo do rendimento médio de milho no município  $i$  no ano  $t$ ;
- $\ln(P_{i,t})$  e  $\ln(T_{i,t})$  são os logaritmos da pluviosidade e da temperatura médias anuais, respectivamente;
- $D_k$  são variáveis indicadoras para cada ano de 2014 a 2023 (sendo 2013 a categoria de referência);
- $\varepsilon_{i,t}$  denota o termo de erro aleatório.

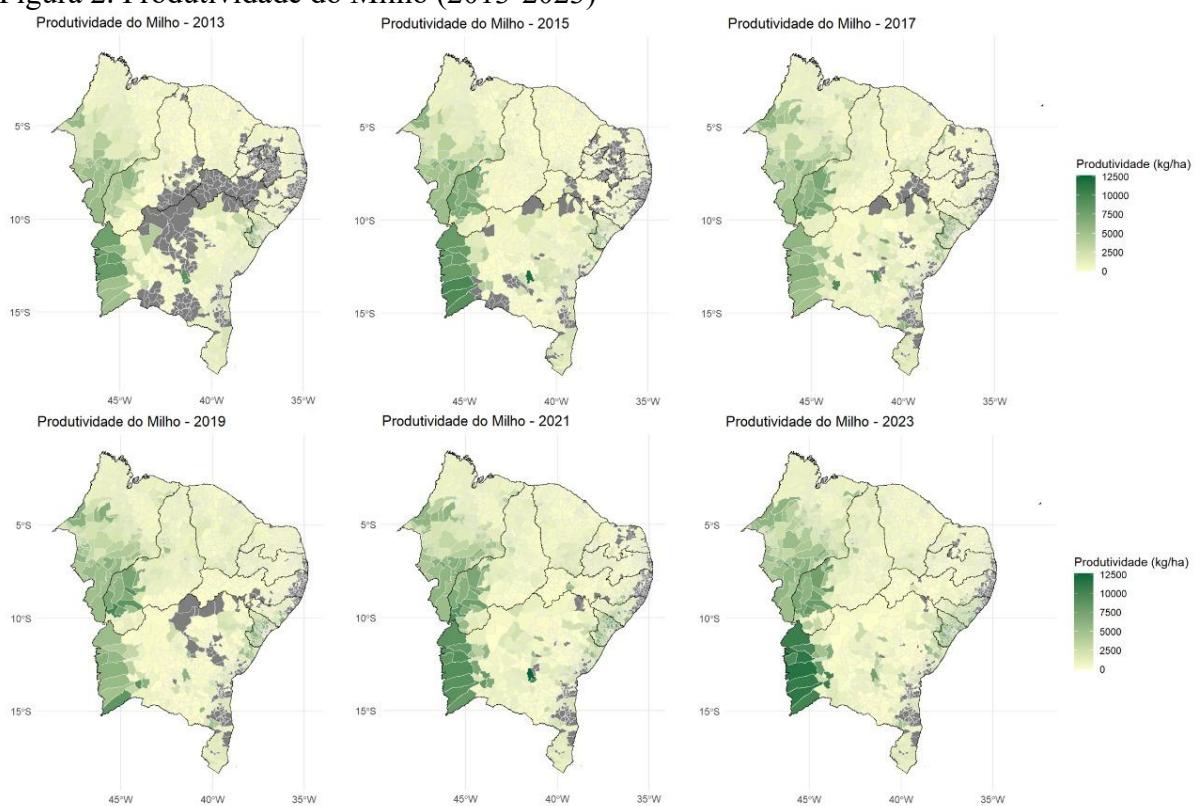
Nesse arranjo log-log, os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  representam elasticidades, ou seja, a variação percentual esperada no rendimento quando as variáveis climáticas sofrem variação percentual unitária, ao passo que as dummies capturam mudanças estruturais específicas de cada ano.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste segmento, serão apresentados e discutidos os resultados das análises estatísticas realizadas para avaliar a relação dos efeitos climáticos sobre a produtividade de milho no nordeste brasileiro no período de 2013 a 2023.

Os mapas visuais para os anos selecionados (2013, 2015, 2017, 2019, 2021, 2023) mostram a distribuição espacial do rendimento do milho em kg/ha na região NE, como visto na Figura 2.

**Figura 2. Produtividade do Milho (2013-2023)**



Fonte: Elaborado pela autora.

Observando os mapas de produtividade de milho no Nordeste brasileiro, verifica-se que as áreas de maior rendimento, representadas pelas cores mais escuras na escala verde, correspondentes a valores entre  $7\ 500\ kg\ ha^{-1}$  e  $12\ 500\ kg\ ha^{-1}$ , concentram-se predominantemente na porção oeste da região, especialmente em municípios do oeste da Bahia e do sul do Piauí. Por sua vez, a maior parte do Nordeste apresenta rendimentos inferiores com cores claras, abaixo de  $2\ 500\ kg\ ha^{-1}$  ou  $5\ 000\ kg\ ha^{-1}$ . Ademais, não se observa tendência visual clara de alterações significativas na distribuição espacial das áreas de alto rendimento ao longo dos anos analisados, indicando estabilidade relativa na localização geográfica dessas áreas. Todavia na região mais central do Nordeste é possível observar o surgimento de municípios,

que antes não apresentavam nenhuma produtividade, representados em cor cinza, porém vieram a apresentar uma pequena produtividade ao longo dos anos.

A lista abaixo destaca os municípios que, em média ao longo do período analisado (2013-2023), obtiveram os maiores rendimentos de milho (Tabela 2).

Tabela 2. Top 10 municípios com maior média de produtividade

Município	Média (kg/ha)
Mucugê - BA	8619,55
São Desidério - BA	8315,36
Barreiras - BA	8282,09
Formosa do Rio Preto - BA	7989,91
Luís Eduardo Magalhães - BA	7936,27
Correntina - BA	7743,09
Cocos - BA	7658,64
Jaborandi - BA	7603,09
Gilbués - PI	7498,46
Riachão das Neves - BA	7037,18

Fonte: PAM/IBGE, 2025

A maioria desses municípios está localizada na Bahia, com um município no Piauí. Os valores de média de rendimento para esses municípios são bastante altos, variando de aproximadamente 7000 kg/ha a mais de 8600 kg/ha. Isso indica a existência de polos de alta produtividade na região NE, concentrados no oeste da Bahia e sul do Piauí, provavelmente beneficiados por condições climáticas, solo, manejo ou tecnologia mais adequados para a cultura do milho em larga escala.

Na Tabela 3, são identificados municípios que tiveram os maiores aumentos percentuais no rendimento ao longo do período.

Tabela 3. Top 10 maiores crescimentos relativos

Município	Variação Relativa (%)
Caracol - PI	6700,00

Município	Variação Relativa (%)
São Félix do Coribe - BA	5753,89
São João da Canabrava - PI	5042,86
Anísio de Abreu - PI	4900,00
São Braz do Piauí - PI	4318,18
Tamboril do Piauí - PI	4135,29
Santa Helena - PB	3788,89
Cocal de Telha - PI	3776,19
Santo Inácio do Piauí - PI	3650,00
São José do Piauí - PI	3500,00

Fonte: PAM/IBGE, 2025

É notável que muitos desses municípios pertencem ao Piauí, apresentando crescimentos relativos extremamente elevados, na faixa de aproximadamente 3 500 % a 6 700 %. Porém, embora um índice de crescimento relativo elevado seja, em princípio, favorável, é fundamental levar em conta o ponto de partida, nos municípios com rendimento inicial muito baixo, próximo de zero, podem exibir aumentos percentuais gigantescos a partir de incrementos absolutos modestos na produtividade. Portanto, um alto crescimento relativo não implica necessariamente em um elevado rendimento absoluto, sendo necessário também analisar a média de produtividade para obter uma visão completa do cenário.

Na Tabela 4, mostra a lista dos municípios que sofreram as maiores quedas percentuais no rendimento

Tabela 4. Top 10 maiores declínios relativos

Município	Variação Relativa (%)
Tanquinho - BA	-99,88
São Vicente - RN	-99,68
Ichu - BA	-99,52
Capela do Alto Alegre - BA	-98,81

Município	Variação Relativa (%)
Riachão do Jacuípe - BA	-98,81
Baixa Grande - BA	-98,67
Várzea da Roça - BA	-98,62
Mairi - BA	-98,57
Barra - BA	-98,53
Santaluz - BA	-98,40

Fonte: PAM/IBGE, 2025

Analisando a tabela acima, é possível observar que todos os municípios citados são dos estados da Bahia e Rio Grande do Norte, apresentando um declínio acentuado de produtividade. Esse cenário indica uma quase completa paralisação ou falência massiva da produção de milho nesses locais em algum momento do período analisado. As causas para quedas tão drásticas podem ser diversas, incluindo secas severas, ataques de pragas ou doenças, mudanças no uso da terra ou ainda problemas socioeconômicos que tornaram inviável a continuidade da cultura.

São listados na Tabela 5, os municípios onde a produtividade de milho variou mais significativamente de um ano para outro, medido pelo desvio padrão da produtividade.

Tabela 5. Top 10 municípios com maior variabilidade na produtividade

Município	Desvio Padrão (kg/ha)
Ibicoara - BA	4358,91
São Félix do Coribe - BA	3693,75
Mucugê - BA	3455,73
Santana - BA	3321,39
Landri Sales - PI	3321,11
Macaparana - PE	3277,50
Anadia - AL	3255,38
São Joaquim do Monte - PE	3211,68

Município	Desvio Padrão (kg/ha)
Barreiras do Piauí - PI	3182,47
Wanderley - BA	2619,17

Fonte: PAM/IBGE, 2025

Os valores de desvio padrão apresentados acima, se mostraram altos, entre aproximadamente 2600 e 4300 kg/ha, especialmente quando comparados às médias de produtividade da maioria dos municípios da região, como mostrado na Figura 2, onde as médias parecem ser inferiores a 5000 kg/ha na maioria das áreas. A alta variabilidade indica que a produção de milho é altamente instável nesses locais, o que dificulta o planejamento e aumenta o risco para os produtores. Essa instabilidade pode ser causada por grande sensibilidade às condições climáticas anuais como a pluviosidade, temperatura ou outros fatores que apresentam alta variabilidade.

As correlações entre produtividade de milho, temperatura do ar, pluviosidade média anual e os anos, são listados na Tabela 6.

Tabela 6. Correlação - Produtividade x Temperatura x Pluviosidade

VARIÁVEIS	CORRELAÇÃO
rendimento	1.00
pluviosidade	0.06
temperatura	-0.06

Fonte: Elaborada pela autora.

A correlação entre rendimento e pluviosidade foi positiva e estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ), porém muito fraca apresentando o valor de  $r = 0,06$ , indicando uma tendência sutil de aumento na produtividade com mais precipitação, mas sem impacto prático relevante. A correlação com a temperatura é igualmente fraca, porém negativa com valor  $r = -0,06$ , sugerindo uma leve queda no rendimento com o aumento térmico. Apesar da significância estatística, ambas as relações apresentam baixa relevância prática.

A Tabela 7, apresenta os coeficientes estimados do modelo de regressão linear aplicado para avaliar os fatores que influenciam o rendimento do milho ao longo dos anos analisados.

Tabela 7. COEFICIENTES DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR

TERMO	ESTIMATIVA	ERRO PADRÃO	VALOR-t	p-VALOR	GRAU DE SIGNIF.
Intercepto	1.205,8017	231,4950	5,209	< 0,0001	***
Pluviosidade	0,4820	0,0437	11,027	< 0,0001	***
Temperatura	-27,5055	8,4290	-3,263	0,0011	**
Ano 2014	70,5557	50,7239	1,391	0,1643	Ns
Ano 2015	151,7269	51,7930	2,929	0,0034	**
Ano 2016	27,7620	52,2330	0,532	0,5951	Ns
Ano 2017	273,0548	50,8688	5,368	< 0,0001	***
Ano 2018	256,3210	50,9854	5,027	< 0,0001	***
Ano 2019	344,6542	50,8922	6,772	< 0,0001	***
Ano 2020	614,3704	50,9456	12,059	< 0,0001	***
Ano 2021	519,7895	51,0747	10,177	< 0,0001	***
Ano 2022	526,8291	52,6992	9,997	< 0,0001	***
Ano 2023	583,6843	51,5312	11,327	< 0,0001	***

<b>Estatísticas do Modelo:</b>	
Erro padrão residual	1.369
Graus de liberdade dos resíduos	17.062
R <sup>2</sup> (R-quadrado)	0,0279
R <sup>2</sup> ajustado	0,0272
Estatística F (F-statistic)	40,84
<b>p-valor (da estatística F)</b>	<b>&lt;0,001</b>

Fonte: Elaborada pela autora.

Notas:

- Grau de significância: “\*\*\*” p < 0,001; “\*\*” p < 0,01; “\*” p < 0,05; “.” p < 0,1; “ns” não significativo.
- Os anos são tratados como variáveis fatoriais (efeitos fixos).

No modelo de regressão apresentado na Tabela 7, o valor de R<sup>2</sup> ajustado é de 0,03, isso significa que as variáveis incluídas no modelo como pluviosidade, temperatura e os efeitos dos anos, explicam apenas 3% da variabilidade total no rendimento do milho. Já a pluviosidade demonstrou efeito estatisticamente significativo e positivo ( $\beta = 0,48$ ; p < 0,001), indicando que cada unidade adicional de pluviosidade está associada a um aumento de 0,48 kg/ha no rendimento. Todavia, a temperatura mostrou um efeito estatisticamente significativo e negativo ( $\beta = -27,51$ ; p = 0,001), revelando que cada grau a mais está relacionado a uma redução média de 27,51 kg/ha na produtividade. Além disso, muitos dos efeitos dos dummies de ano foram positivos e significativos em comparação ao ano base, como por exemplo o ano de 2013, sugerindo uma tendência de aumento na produtividade ao longo do período analisado, mesmo após o controle dos efeitos lineares da pluviosidade e temperatura. Esse padrão pode indicar avanços tecnológicos, melhorias nas práticas de manejo ou outros fatores não explicados pelas variáveis ambientais simples incluídas no modelo.

Os coeficientes estimados do modelo de regressão logarítmica, exibidos na Tabela 8, foram construídos com o objetivo de investigar a relação entre variáveis climáticas, pluviosidade e temperatura, e a produtividade do milho, considerando também os efeitos fixos dos anos analisados.

Tabela 8. COEFICIENTES DO MODELO DE REGRESSÃO LOGARÍTMICA

TERMO	ESTIMATIVA	ERRO PADRÃO	VALOR-t	p-VALOR	GRAU DE SIGNIF.
Intercepto	1,530	0,601	2,544	0,01096	*
Pluviosidade	0,571	0,020	29,076	< 0,0001	***
Temperatura	0,265	0,172	1,540	0,1237	ns
Ano 2014	0,133	0,040	3,292	0,0010	***
Ano 2015	0,078	0,041	1,887	0,05912	.
Ano 2016	-0,076	0,042	-1,820	0,06877	.
Ano 2017	0,315	0,041	7,755	< 0,0001	***
Ano 2018	0,477	0,041	11,735	< 0,0001	***
Ano 2019	0,499	0,041	12,306	< 0,0001	***
Ano 2020	0,853	0,041	20,987	< 0,0001	***
Ano 2021	0,655	0,041	16,090	< 0,0001	***
Ano 2022	0,887	0,043	20,752	< 0,0001	***
Ano 2023	0,680	0,041	16,466	< 0,0001	***

**Estatísticas do Modelo:**

Erro padrão residual	1,093
Graus de liberdade dos resíduos	17.062
R <sup>2</sup> (R-quadrado)	0,0981
R <sup>2</sup> ajustado	0,0975
Estatística F (F-statistic)	154,7
p-valor (da estatística F)	< 0,0001

Fonte: Elaborada pela autora.

Notas:

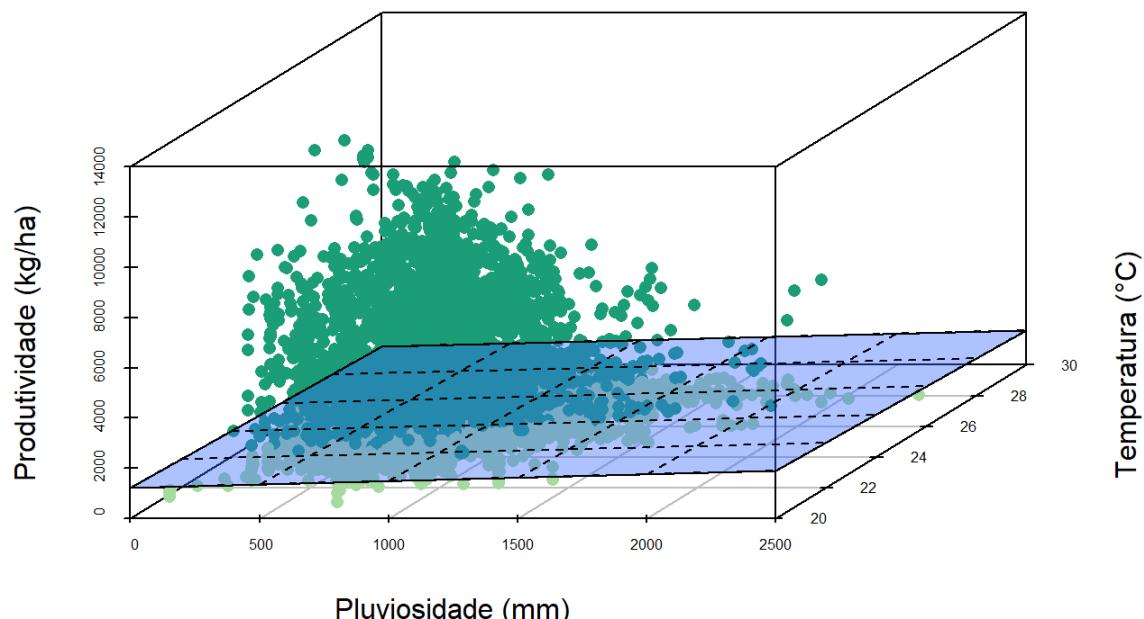
- Significância: “\*\*\*” p < 0,001; “\*\*” p < 0,01; “\*” p < 0,05; “.” p < 0,1; “ns” não significativo.
- Os anos são tratados como variáveis fatoriais (efeitos fixos).

O modelo apresentado na Tabela 8, revelou um R<sup>2</sup> ajustado de 0,0975, o que explica 9,75% da variabilidade total no rendimento, representando uma melhoria em relação ao modelo anterior (Tabela 7), em termos de poder explicativo, embora ainda seja considerado fraco. A pluviosidade manteve um efeito estatisticamente significativo e positivo ( $\beta = 0,571$ ; p < 0,001), coerente com o resultado da regressão linear, reforçando a associação entre maior volume de chuva e aumento na produtividade. Já a temperatura apresentou um efeito positivo, porém estatisticamente não significativo ( $\beta = 0,265$ ; p = 0,1237), sugerindo que, neste modelo, não há evidência suficiente para afirmar que a temperatura tem um impacto linear consistente no

rendimento após o controle das demais variáveis. Essa divergência em relação ao primeiro modelo pode estar relacionada a diferenças na definição das variáveis ou na estrutura do modelo, destacando que as conclusões sobre efeitos individuais podem ser sensíveis à especificação adotada. Por fim, os efeitos dos dummies de ano continuam na maioria positivos e estatisticamente significativos em relação ao ano base, reforçando a tendência de aumento da produtividade ao longo do tempo, independentemente das variações de temperatura e pluviosidade.

A relação entre as variáveis explicativas (pluviosidade e temperatura) e a variável dependente (produtividade) é apresentada no Gráfico 1, logo abaixo.

Gráfico 1. Regressão Linear Múltipla (2013-2023)



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme ilustra a superfície de regressão tridimensional (Figura 1), observa-se que a produtividade do milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) tende a aumentar progressivamente com o acréscimo da pluviosidade (mm), enquanto se reduz à medida que a temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ ) eleva-se. Em regiões de pluviosidade mais elevada, acima de 1 000 mm, a maior concentração de pontos encontra-se acima de 6 000  $\text{kg ha}^{-1}$ , ao passo que, para temperaturas superiores a 26  $^{\circ}\text{C}$ , ocorre decréscimo da produtividade, posicionando os pontos de dispersão abaixo da superfície de ajuste. A inclinação positiva do plano em relação ao eixo da pluviosidade e a inclinação negativa em relação ao eixo da temperatura confirmam visualmente as estimativas de coeficiente obtidas

(pluviosidade = 0,4820; temperatura = -27,5055), indicando impacto simultâneo e oposto desses fatores climáticos sobre o rendimento médio do milho no período de 2013 a 2023.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou, para o período de 2013 a 2023, de que modo a variação média anual de pluviosidade e de temperatura afeta o rendimento do milho no Nordeste brasileiro ao longo dos anos. A análise estatística indicou que o volume de chuvas tem efeito positivo e robusto sobre a produtividade, enquanto o aumento da temperatura média, quando avaliado pelo modelo linear, mostrou-se associado a perdas na produção. Ainda que a força dessas relações seja moderada, elas se mostram consistentes e estatisticamente relevantes.

Os modelos de regressão revelaram que apenas uma pequena fração da variabilidade do rendimento é explicada pelas variáveis climáticas, cerca de 3 % no ajuste linear e 11 % na forma logarítmica. Esse baixo poder explicativo sugere que aspectos como práticas de cultivo, escolha de cultivares híbridas, manejo do solo e políticas de apoio desempenham papel decisivo na capacidade produtiva. A correlação de Pearson confirmou as tendências de precipitação e temperatura, porém com coeficientes que indicam relevâncias práticas reduzidas.

Diante disso, consideram-se confirmadas as hipóteses de influência positiva da pluviosidade e de influência negativa da temperatura sobre o rendimento do milho, ainda que o efeito térmico mostre menor consistência em abordagens não lineares. Esses achados ressaltam a necessidade de complementar estratégias climáticas com ações que atuem diretamente na capacidade de adaptação do sistema agrícola, indo além da análise puramente meteorológica.

Propõe-se, portanto, políticas integradas de incentivo à irrigação eficiente, com uso de microaspersão e cisternas, ao desenvolvimento e difusão de cultivares tolerantes ao calor e à seca, ao fortalecimento da assistência técnica e extensão rural, e ao aprimoramento dos mecanismos de seguro agrícola com critérios regionais que contemplem pequenos produtores. Adicionalmente, recomenda-se a expansão de redes de monitoramento meteorológico para alertas antecipados e linhas de crédito com juros diferenciados para tecnologias climáticas inteligentes. Futuras pesquisas podem explorar interações entre variáveis socioeconômicas e edafoclimáticas, bem como modelagens espaciais mais detalhadas, a fim de orientar ações públicas ainda mais eficazes.

## REFERÊNCIAS

ARTUZO, Felipe Dalzotto; FOGUESATTO, Cristian Rogério; MACHADO, João Armando Dessimon; OLIVEIRA, Letícia de; SOUZA, Ângela Rozane Leal de. O POTENCIAL PRODUTIVO BRASILEIRO: UMA ANÁLISE HISTÓRICA DA PRODUÇÃO DE MILHO. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 515–540, 2019. DOI: 10.17765/2176-9168.2019v12n2p515-540. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/5327>. Acesso em: 19 maio. 2025.

CAMPOS, João Hugo Baracuy da Cunha. **Impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no Nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica**. 2010. 93 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1876>. Acesso em: 20 maio 2025.

COÊLHO, Jackson Dantas. Milho: produção e mercados. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2021. (Caderno Setorial ETENE, ano 6, n. 182, ago.). Disponível em: <s1dspp01.dmx.bn:8443/s482-dspace/handle/123456789/910>. Acesso em: 20 maio 2025.

CRUZ, J. C. et al. Produção de milho na agricultura familiar. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 45 p. (Embrapa Milho e Sorgo. **Circular técnica**, 159). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/905143/1/circ159.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.

DAL POZZO, Beatriz Salandin; FROTA, Marisa Guilherme da; ALMEIDA, Gabriele Silva de; OZAKI, Vitor Augusto; MARTINS, Gilson. ANÁLISE DO RISCO DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO NA REGIÃO DO MATOPIBA. **Revista Econômica do Nordeste**, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 63–85, 2024. DOI: 10.61673/ren.2024.1576. Disponível em: <https://www.bnbn.gov.br/revista/ren/article/view/1576>. Acesso em: 20 maio. 2025.

DE SOUZA, Aguinaldo Eduardo; DOS REIS, João Gilberto Mendes; RAYMUNDO, Julio Cesar; PINTO, Roberta Soral. ESTUDO DA PRODUÇÃO DO MILHO NO BRASIL: REGIÕES PRODUTORAS, EXPORTAÇÃO E PERSPECTIVAS. **South American Development Society Journal**, [S. l.], v. 4, n. 11, p. 182, 2018. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v4i11p182-194. Disponível em: <https://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/150>. Acesso em: 6 maio. 2025.

FERNANDA DA SILVA, Daniela; PRELA-PANTANO, Angélica; LIMA SANT' ANNA NETO, João. VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NA REGIÃO DO MEDIO PARANAPANEMA, SP. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 3, 2008. DOI: 10.5380/abclima.v3i0.25431. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25431>. Acesso em: 20 maio. 2025.

GONCALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R. Eventos climáticos adversos e seus impactos para as culturas de soja, milho e trigo no Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2019. 48 p. (Embrapa Soja. **Documentos**, 420). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1117026>. Acesso em: 6 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Agrícola Municipal – PAM**, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 10 abr. 2025.

LISBINSKI, Fernanda Cigainski. Variabilidade climática na produção de milho, trigo e soja. **Revista de Política Agrícola**, [S. l.], v. 33, p. e01974, 2025. Disponível em: <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1974>. Acesso em: 20 maio. 2025.

MAGALHÃES, B. G. et al. *Mitigating the effects of future climate on maize productivity. Agrometeoros*, v. 27, n. 2, p. 259–270, dez. 2019. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1121217>. Acesso em: 20 maio 2025.

MARTINS, Minella; TOMASELLA, Javier; DIAS, Cássia. **Impacto das mudanças climáticas na produtividade e demanda hídrica do milho no Nordeste brasileiro**. 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/334466107\\_IMPACTO\\_DAS\\_MUDANÇAS\\_CLIMATICAS\\_NA\\_PRODUTIVIDADE\\_E\\_DEMANDA\\_HIDRICA\\_DO\\_MILHO\\_NO\\_NORDESTE\\_BRASILEIRO](https://www.researchgate.net/publication/334466107_IMPACTO_DAS_MUDANÇAS_CLIMATICAS_NA_PRODUTIVIDADE_E_DEMANDA_HIDRICA_DO_MILHO_NO_NORDESTE_BRASILEIRO). Acesso em: 20 maio 2025.

OLIVEIRA, I. R. de et al. Potencialidade produtiva do milho no Nordeste baiano e Agreste sergipano no ano agrícola de 2009. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2010. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. **Comunicado Técnico**, 110). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/884895>. Acesso em: 19 maio 2025.

PIMENTA, Bruno Proença Pacheco. **Mudanças climáticas e secas no Brasil: uma análise espacial integrada a partir de modelos IEBC e monitoramento climático no semiárido brasileiro**. 2020. Dissertação (Mestrado em Teoria Econômica) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. DOI: 10.11606/D.12.2020.tde-15102020-101650. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.12.2020.tde-15102020-101650>. Acesso em: 16 jul. 2025.

PORTO, Halanna Campos; et al. Influência climática na produção de milho (*Zea mays L.*) no município de Sumé-PB. In: CONGRESSO NACIONAL DE DEFESA DOS DIREITOS DA PESSOA COM DEFICIÊNCIA E DODOS, 2018, Campina Grande. Anais [...]. Campina

Grande: **Realize Editora**, 2018. Disponível em:  
<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/50721>. Acesso em: 19 maio 2025.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Viena: **R Foundation for Statistical Computing**, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SOUZA, Bruno Santos de. **Mudanças climáticas no Brasil: efeitos sistêmicos sobre a economia brasileira provenientes de alterações na produtividade agrícola**. 2018.

Dissertação (Mestrado em Teoria Econômica) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. DOI: 10.11606/D.12.2018.tde-15102018-113337. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.12.2018.tde-15102018-113337>. Acesso em: 19 maio 2025.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 9, p. 1351–1359, set. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000900002>. Acesso em: 20 maio. 2025.

VASCONCELOS, T. S. et al. Variabilidade Pluviométrica no Ceará e suas Relações com o Cultivo de Milho, Feijão-Caupi e Mandioca (1987-2016). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 431–438, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786343053>. Acesso em: 19 maio 2025.

WORLD BANK GROUP. *Brazil - impacts of climate change on Brazilian agriculture: Brasil - impactos das mudanças climáticas na produção agrícola brasileira*. Washington, DC: **World Bank Group**, 2013. Disponível em:  
<http://documents.worldbank.org/curated/en/364151468237586291>. Acesso em: 04 jun. 2025.