Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

INTERAÇÃO ENTRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO ESTADO DO CEARÁ

Interaction between climate change and agricultural production in the state of Ceará

Interacción entre cambio climático y producción agrícola en el estado de Ceará

Moisés Dias Gomes de Asevedo
Universidade Federal do Ceará (UFC)
moisesdga@gmail.com

Kilmer Coelho Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)
kilmer@ufc.br

Wesley Leitão de Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)
wesleyleitao@gmail.com

Resumo: Existe um amplo debate sobre as mudanças climáticas e quais impactos ela pode ocasionar para a produção agrícola, e com isso se faz necessário compreender como as variabilidades climáticas afetam os sistemas produtivos do estado do Ceará, que, por sua vez, ocupa posição de destaque no Brasil. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo principal o de verificar o efeito das mudanças climáticas na produção agrícola do estado do Ceará. As metodologias utilizadas foram a análise de agrupamentos hierárquicos para verificar os *clusters* climáticos, a análise de discriminante para confirmar os devidos grupos e, por fim, o método de regressão por dados em painel para aferir o efeito dos agrupamentos climáticos na produção agrícola das lavouras permanentes, temporárias e na pecuária. Os resultados mostraram quatro grupos climáticos distintos. A análise de regressão retrata a significância estatística para o *cluster* 1, como cenário propício para produção agrícola de lavouras permanentes e rebanho, porém nenhum dos outros agrupamentos climáticos impactaram na

produção, revelando que a produção agrícola nessas localidades, mesmo que em condições mais abruptas que o primeiro, mostraram-se resilientes a mudanças climáticas.
Palavras-chave: Produtividade Agrícola. Análise de Agrupamentos. Análise de Discriminante. Dados em Painel.

Abstract: Extensive debate surrounds climate change and the potential impacts it may have on agricultural production. In this regard, it is essential to understand how climate variability affects the productive systems of the state of Ceará, which holds a prominent position in Brazil. In this regard, this research aimed to evaluate the impact of climate change on agricultural production in the state of Ceará. The methodological approach consisted of a hierarchical clustering technique to identify climatic clusters, discriminant analysis to validate the identified groups, and, finally, panel data regression to assess the effect of these climatic clusters on the agricultural production of permanent and temporary crops, as well as livestock. The analysis identified four distinct climatic clusters. The regression analysis revealed that Cluster 1 was statistically significant, representing a favorable context for the production of permanent crops and livestock. In contrast, the remaining climatic clusters did not exhibit a significant effect on agricultural output, indicating that production in these regions, although subjected to more challenging conditions than Cluster 1, displayed notable resilience to climate change.
Keywords: Agricultural Productivity. Cluster Analysis. Discriminant Analysis. Panel Data.

Resumen: Existe un amplio debate sobre el cambio climático y sus posibles impactos en la producción agrícola. Por lo tanto, es necesario comprender cómo la variabilidad climática afecta los sistemas de producción del estado de Ceará, que ocupa una posición destacada en Brasil. Por eso, el objetivo principal de este estudio fue evaluar el efecto del cambio climático en la producción agrícola en el estado de Ceará. Las metodologías utilizadas fueron el análisis jerárquico de conglomerados para identificar los conglomerados climáticos, el análisis discriminante para confirmar los grupos apropiados y, finalmente, la regresión de datos de panel para evaluar el efecto de los conglomerados climáticos en la producción agrícola de cultivos permanentes y temporales, así como en la ganadería. Los resultados revelaron cuatro conglomerados climáticos distintos. El análisis de regresión demostró significancia estadística para el conglomerado 1, como un escenario favorable para la producción agrícola de cultivos permanentes y ganadería. Sin embargo, ninguno de los demás conglomerados climáticos afectó la producción, lo que demuestra que la producción agrícola en estas localidades, a pesar de experimentar condiciones más extremas que el primero, demostró resiliencia al cambio climático.
Palabras clave: Productividad Agrícola. Análisis de Conglomerados. Análisis Discriminante. Datos de Panel.

Submetido em: 16/09/2024
Aceito para publicação em: 03/06/2026
Publicado em: 24/07/2026

1. INTRODUÇÃO

O problema das mudanças climáticas é amplamente debatido na literatura científica devido aos impactos adversos sobre os sistemas naturais e socioeconômicos. Segundo o sexto relatório de avaliação elaborado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change's* (IPCC, 2023), as perdas e danos se estendem à disponibilidade hídrica e à produção de alimentos, à saúde e ao bem-estar, às cidades, às infraestruturas e à biodiversidade e aos ecossistemas. Especificamente, o relatório alerta para impactos de média confiabilidade na oferta de água física na produção agrícola, setor que representa o pilar da segurança alimentar fundamental global.

A produção agrícola, por sua natureza, é altamente dependente das condições climáticas, sendo vulnerável tanto ao excesso quanto à escassez de chuvas e às variações de temperatura. Essa sensibilidade torna o setor sujeito a incertezas e riscos, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Nesse contexto, torna-se essencial compreender como a agricultura pode se adaptar a cenários de variabilidade climática, desenvolvendo mecanismos de mitigação e aumento da resiliência — entendida como a capacidade de sistemas socioeconômicos e ambientais resistirem e se recuperarem de eventos extremos (IPCC, 2021; Matos, 2023).

O Brasil desempenha papel de destaque na produção agrícola mundial, sendo o quarto maior produtor agrícola global, responsável por cerca de 8% da produção de alimentos mundial (CEPEA, 2024). Entretanto, a distribuição dessa produção é heterogênea, e o Nordeste apresenta desafios específicos decorrentes do regime irregular de chuvas, dos longos períodos de seca e das elevadas temperaturas (INSA, 2024). Essas condições tornam a agricultura regional fortemente dependente de estratégias de adaptação e manejo sustentável da água.

O estado do Ceará, terceiro maior produtor agregado da região (IBGE, 2023), destaca-se na produção de milho, tomate e banana, além de figurar entre os maiores produtores e exportadores de melão do país (IPECE, 2024). Contudo, apesar de sua relevância econômica, o estado enfrenta restrições hídricas severas, o que suscita o seguinte questionamento: qual o impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola municipal no estado do Ceará?

O presente estudo é abrangente por contemplar todos os 184 municípios cearenses ao longo de 14 anos (2007–2020), integrando informações climáticas e produtivas. Sua relevância

reside na escassez de estudos que analisam simultaneamente os efeitos das variabilidades climáticas sobre diferentes tipos de produção agrícola e pecuária em nível municipal. O trabalho avança ao aplicar uma abordagem multivariada combinando análise de agrupamentos, discriminante e regressão em painel, permitindo compreender de forma integrada a influência das mudanças climáticas sobre os sistemas produtivos e suas capacidades de resiliência.

O presente trabalho se fundamenta teoricamente em estudos como o de Chandrasiri *et al.* (2023), que quantificaram os impactos das variáveis climáticas nas diferentes fases do cultivo do arroz no Sri Lanka, por meio de um painel entre 1981 e 2019, apontando efeitos não lineares significativos da temperatura e da precipitação sobre o rendimento agrícola.

Outro estudo que embasa a pesquisa é o de Bunn *et al.* (2019), que examinou como as alterações climáticas ameaçam a produção de cacau em Gana, evidenciando que o aumento da temperatura reduzirá a área apta ao cultivo, exigindo estratégias de adaptação específicas. Em escala regional, destaca-se o trabalho de Penha, Miyamoto e Maia (2022), que analisou os impactos das secas na produção agropecuária municipal do Rio Grande do Norte, identificando a presença de agrupamentos climáticos com efeitos distintos sobre a produtividade.

Diante desse contexto, o objetivo geral deste estudo é verificar o efeito das mudanças climáticas na produtividade agrícola do estado do Ceará. Os objetivos específicos são: (a) identificar quais municípios cearenses apresentam características climáticas semelhantes; (b) verificar se os grupos climáticos identificados estão devidamente discriminados; e (c) analisar o efeito dos agrupamentos climáticos nas produções agrícolas do estado.

Para atingir esses objetivos, foram utilizadas as técnicas de análise de agrupamentos hierárquicos, análise discriminante e regressão com dados em painel, técnicas que permitem examinar a heterogeneidade, tanto espacial quanto temporal, das condições climáticas e produtivas.

O presente artigo está estruturado em quatro seções, além desta introdução: a segunda seção descreve a metodologia, apresentando as fontes de dados e os métodos utilizados; a terceira seção traz os resultados; a quarta traz as discussões desses resultados; e, por fim, a quinta seção apresenta as considerações finais e as referências utilizadas.

2. METODOLOGIA

2.1. Natureza e fonte dos dados

Os dados secundários foram coletados junto à Pesquisa Agrícola Mensal (PAM), organizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2024) – e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2024). Os dados climáticos, por sua vez, foram obtidos da National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA (2024) – e do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

A base de dados compreende os 184 municípios cearenses no decorrer do período de 2007 a 2020. A escolha do período se deu por conta da disponibilidade de dados climáticos para todas as estações climáticas disponíveis para o estado do Ceará no Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

Os dados de cada município e o período de análise foram empilhados para a aplicação da análise de agrupamentos e discriminante e, por fim, a regressão.

Quadro 1- Descrição e fonte das variáveis usadas no modelo.

Variáveis Dependentes			
Variável	**Descrição**	**Medição**	**Fonte**
RMLP	Rendimento Médio da produção de Lavouras Permanentes	Quilogramas por hectare	IBGE (2024)
RMLT	Rendimento Médio da produção de Lavouras Temporárias	Quilogramas por hectare	IBGE (2024)
RH	Rebanho por hectare	Cabeças por hectare	IBGE (2024)
Variáveis Independentes			
DP	Densidade Populacional	Pessoas por hectare	IBGE (2024)
Variáveis Climáticas Independentes			
Prec	Precipitação Pluviométrica	Milímetros	NOAA (2024)
Temp	Temperatura Média	Graus Celsius	NOAA (2024)
DSC	Dias sem chuva	Contagem	INMET (2024)
Vel	Velocidade média do vento	Metros por segundo	INMET (2024)
PA	Pressão Atmosférica	Milibares	INMET (2024)
URA	Umidade Relativa do Ar	Percentual	INMET (2024)
RS	Radiação Solar	Quilojoule por metro quadrado	INMET (2024)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os dados referentes às estações, organizados juntos ao INMET (2024), não possuem disponibilidade para todos os municípios, e sim por estações. Para tal, foi feito um método de interpolação de dados pelo inverso da distância ponderada, também conhecido como método IDW (Inverse of Distance Weighted).

O método IDW determina valores por meio combinação linear ponderada de um conjunto de dados da amostra, em que se assumem pesos atribuídos a esse ponto determinado em função da distância inversa, pressupondo que os municípios mais próximos são mais parecidos do que os mais distantes (Gomes, Zaidan e Rocha, 2022).

O cálculo se dá mediante a ponderação do valor a ser interpolado pelo peso atribuído a cada um dos municípios que possuem estações meteorológicas, conforme mostra a equação (1):

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z_I d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^{n} d_i^{-p}} \qquad (1)$$

Em que: Z_0 é o valor a ser interpolado, Z_i é o valor medido no ponto i, d é a distância do município a ter o valor interpolado ao município com estação, n é o número de pontos usado no cálculo e p é o expoente da distância, que será o valor 2, que tem sido o padrão utilizado para esse tipo de estudo.

2.2. Análise de agrupamento

Para identificar os diferentes grupos formados com características climáticas semelhantes, foi feita uma análise de agrupamentos, também conhecida como análise de *cluster*, uma vez que ela tem como função agregar observações com características semelhantes (Hair Jr *et al.*, 2009).

Desta forma, essa agregação se dará pelas variáveis climáticas tratadas na base de dados, que são precipitação, temperatura média, dias sem chuva, velocidade média do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar, para assim montar grupos de municípios que as possuem mesmas características no que concerne ao clima e tempo.

A ligação de municípios iguais se dá mediante a distância euclidiana quadrática, que, conforme Fávero *et al.* (2009), é dada pelo quadrado da diferença entre as variáveis que compõem o grupo, conforme mostra a equação (2):

$$d^2(X_{il}, X_{ik}) = \sum_{i=1}^{6}(X_{il} - X_{ik})^2 \quad (2)$$

em que: Xi é a i-ésima variável climática e l e k representam os municípios estudados num determinado ano. Vale salientar que esses grupos são formados pela menor distância, uma vez que se trata de uma medida de dissimilaridade. A escolha dessa medida se deu uma vez que se pretendia agrupar grupos homogêneos em relação às suas condições climáticas.

O algoritmo utilizado foi o método de Ward, que também é conhecido como "Mínima Variância" em que forma grupos com maior homogeneidade interna, considerando a diferença dos tamanhos dos *clusters*, em que a combinação de cada grupo se dá minimizando a soma interna de quadrados (Hair Jr *et al.*, 2009).

Os grupos formados serão gerados a fim de verificar o comportamento dos municípios em relação às variabilidades climáticas, bem como saber quais municípios possuem variações semelhantes. Posteriormente, refletir-se-á sobre quais políticas e atividades necessárias deverão ser implementadas em cada um dos grupos. A seguir, será feita uma análise de discriminante de forma a confirmar a existência desses grupos formados na análise de agrupamentos.

2.3. Análise de Discriminante

Para verificar se os grupos determinados na análise de agrupamentos estão realmente designados, foi feita uma análise de discriminante que consiste em uma técnica da estatística multivariada utilizada para asseverar determinados objetos, sendo, portanto, uma técnica de classificação (Fávero *et al.*, 2009).

O primeiro passo foi aplicar o teste de Lambda de Wilks para verificar se há diferença de média entre os grupos, cuja equação da estatística do teste é feita conforme a equação abaixo:

$$Lambda\ de\ Wilks = \frac{SQEd}{SQT}, \quad (3)$$

em que: SQE é a soma dos quadrados dos erros dentro dos grupos, e SQT é a soma dos quadrados totais.

Em seguida foi feito um teste Box's M de igualdade entre matrizes de covariâncias dos grupos e um teste de significância das funções discriminantes por meio do teste de Lambda de Wilks pelo Qui-Quadrado.

Por fim, foi feita uma análise da função discriminante com os coeficientes padronizados e a elaboração da matriz estrutural. Para tal, cria-se uma função discriminante linear de Fischer, que, para o presente trabalho, será disposto conforme a equação:

$$Cluster_{it}=a_{1t}\,Prec + a_{2t}Temp + a_{3t}\,DSC + a_{4t}\,Vel + a_{5t}\,PA + a_{6t}\,URA + a_{7t}Rad, \quad (4)$$

em que: Prec é a precipitação, Temp é a temperatura, DSC são os dias sem chuva, Vel é a velocidade, PA é a pressão atmosférica, URA é a umidade relativa do ar, Rad é a radiação e ait são os coeficientes. Por existirem 4 grupos climáticos, três funções discriminantes serão geradas, porém a função que concentrar a maior variância explicada será considerada.

Por fim, será gerada uma matriz de resultados de classificação para verificar se todas as predições da análise de discriminante estão de acordo com os grupos formados na análise de agrupamento.

2.4. Modelo de regressão por dados em painel

Para verificar o efeito dos agrupamentos climáticos nas produções agrícolas, será feito um painel de efeito fixo que, segundo Baltagi (2005), é utilizado ao observar a existência de dados que combinam séries longas com cortes transversais, conforme mostram as equações (5), (6) e (7):

$$RMLP_{it} = \beta_1 DP_{it} + \sum_{j=1}^{4} \beta_j Cluster_{it} + C_i + \varepsilon_{it}, \quad (5)$$

$$RMLT_{it} = \beta_1 DP_{it} + \sum_{j=1}^{4} \beta_j Cluster_{it} + C_i + \varepsilon_{it}, \quad (6)$$

$$RH_{it} = \beta_1 DP_{it} + \sum_{j=1}^{4} \beta_j Cluster_{it} + C_i + \varepsilon_{it}, \quad (7)$$

em que: RM_{it} é o rendimento médio da produção das lavouras, DP_{it} é a densidade populacional, Reb_{it} é o rebanho do município, $Cluster_{it}$ são os agrupamentos climáticos que foram transformados em variáveis binárias.

Uma vez estimado o modelo referente ao painel, foi realizado o teste de Chow, testando opções entre a hipótese nula com modelo pooled e a hipótese alternativa com o modelo de efeitos fixos. Uma vez confirmada a hipótese alternativa, o teste de Hausman é executado.

O teste de Hausman confere o poder de decisão entre o uso do modelo de efeitos fixos e de aleatórios, comparando os parâmetros obtidos em cada um dos modelos mencionados. A estatística do teste é obtida a partir da seguinte equação:

$$H = (\beta_{EA} - \beta_{EF})'(\sum EF - \sum EA)^{-1}(\beta_{EA} - \beta_{EF}), \quad (8)$$

em que: β_{EA} e β_{EF} são os vetores de coeficientes estimados para efeitos aleatórios e fixos, respectivamente, e $\sum_{EF}$ e $\sum_{EA}$ são as matrizes de covariância dos modelos de efeitos fixos e aleatórios, respectivamente.

A hipótese nula do teste diz que os estimadores de efeitos fixos e de efeitos aleatórios não diferem. Com a hipótese nula rejeitada, o modelo de efeitos aleatórios não é adequado e é preferível empregar o modelo de efeitos fixos.

Uma vez aceita a hipótese nula, será realizado o teste do multiplicador de Lagrange proposto por Breusch e Pagané, que verifica a melhor opção entre o modelo *pooled* " e o modelo de efeitos aleatórios, sendo hipóteses nula e alternativa, respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Análise descritiva dos dados

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis analisadas.

Tabela 1- Estatísticas Descritivas.

Variável	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
Rendimento Médio da produção de Lavouras Permanentes	62,97	55,12	0,88	0,009	600,666
Rendimento Médio da produção de Lavouras Temporárias	61,81	46,92	0,76	0,058	283,115
Rebanho por hectare	386340	662530	1,71	349,7279	8612162
Precipitação Pluviométrica	861,38	278,49	0,32	289,45	1987,77

Variável	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	Mínimo	Máximo
Temperatura Média	26,93	0,81	0,03	24,3	29,09
Dias sem chuva	276	40	0,14	129	365
Pressão Atmosférica	964,67	48,71	0,05	627,92	1014,03
Velocidade Média do Vento	2,60	0,58	0,22	0,11	5,01
Radiação Solar	916,93	607,49	0,66	0	6124,35
Umidade Relativa do Ar	66,15	7,33	0,11	30,07	92,37
Densidade Populacional	119,81	617,40	5,15	6,40	8530,82

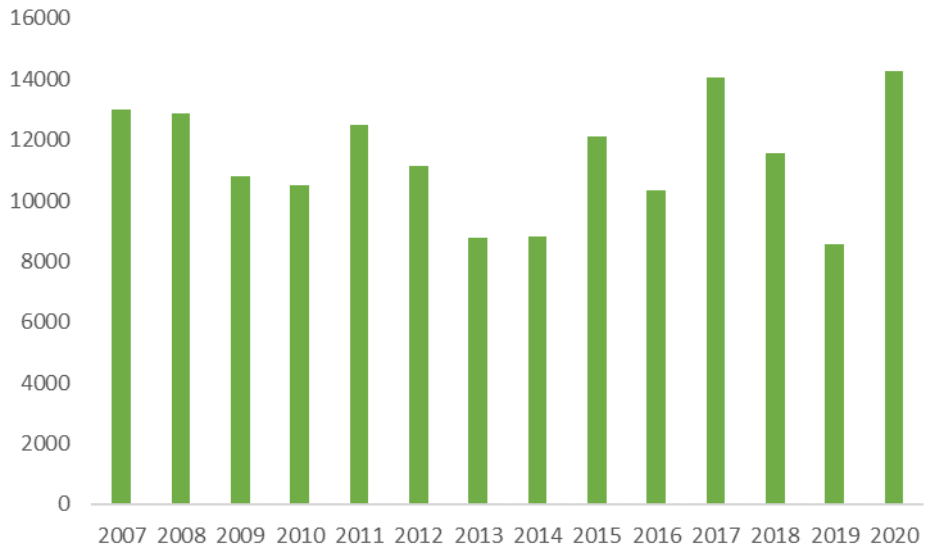
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Observa-se que, com exceção da densidade populacional e do rebanho, todas as variáveis apresentaram desvios-padrão menores que a média, indicando homogeneidade nos dados. A temperatura e a pressão atmosférica tiveram baixa variação, o que sugere condições climáticas relativamente estáveis entre os municípios.

Destaca-se que o Ceará apresenta, em média, 276 dias sem chuva, revelando um desafio significativo para a produção agrícola, dada a limitação do regime pluviométrico. A precipitação média de 861 mm é ligeiramente superior ao índice de 800 mm informado pelo INSA (2023).

A Figura 1, a seguir, mostra a evolução do rendimento da produção agrícola das lavouras temporárias.

Figura 1 - Rendimento da Produção agrícola das lavouras temporárias do estado do Ceará de 2007 a 2020 (toneladas por hectare).

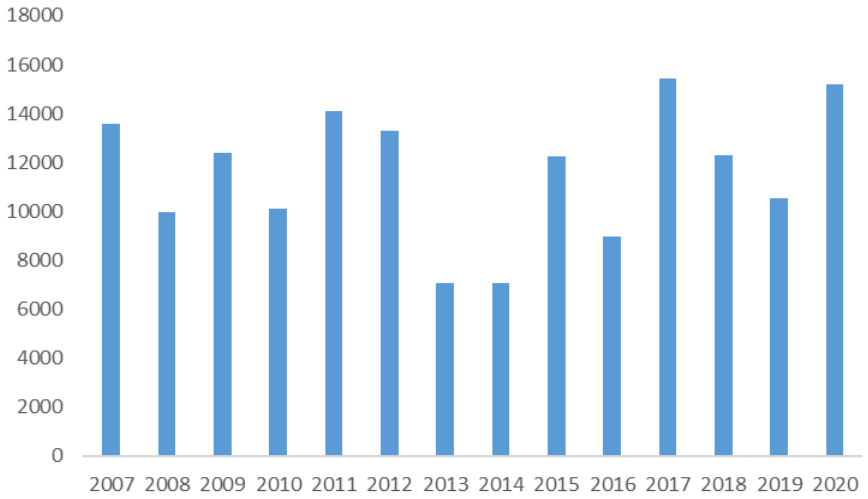


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 1 exibe picos de evolução da produção em 2017 e 2020. Destaca-se também o menor volume de produção em 2019. Além disso, evidencia-se que 2020 teve um bom volume de produção a despeito da pandemia da COVID.

A Figura 2 apresenta a evolução da produção agrícola das lavouras permanentes.

Figura 2 - Rendimento da Produção agrícola das lavouras permanentes do estado do Ceará de 2007 a 2020 (toneladas por hectare).



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 2 mostra um cenário semelhante ao mostrado nas lavouras temporárias, porém os períodos de baixas foram os de 2013 e 2014, o que mostra dificuldade de produção nesse período.

A seguir, a Figura 3 apresenta um gráfico da evolução do rebanho no estado do Ceará.

Figura 3 - Rebanho por hectare do estado do Ceará de 2007 a 2020.

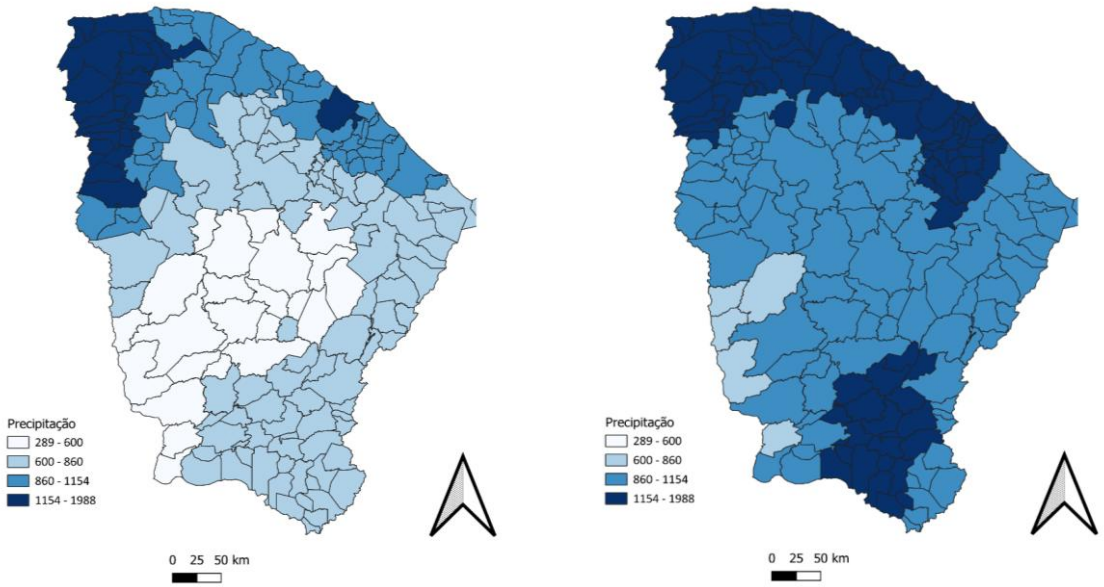


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 3 mostra um grande volume de cabeças de gado nos anos de 2008 e 2019, porém a produção diminuiu bruscamente no ano de 2020, chegando a um patamar próximo ao de 2007.

A Figura 4, a seguir, trata-se de um mapa mostrando a diferença entre a precipitação pluviométrica acumulada do estado do Ceará dos anos de 2007 e 2020, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - Precipitação Pluviométrica dos municípios no estado do Ceará entre os anos de 2007 e 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

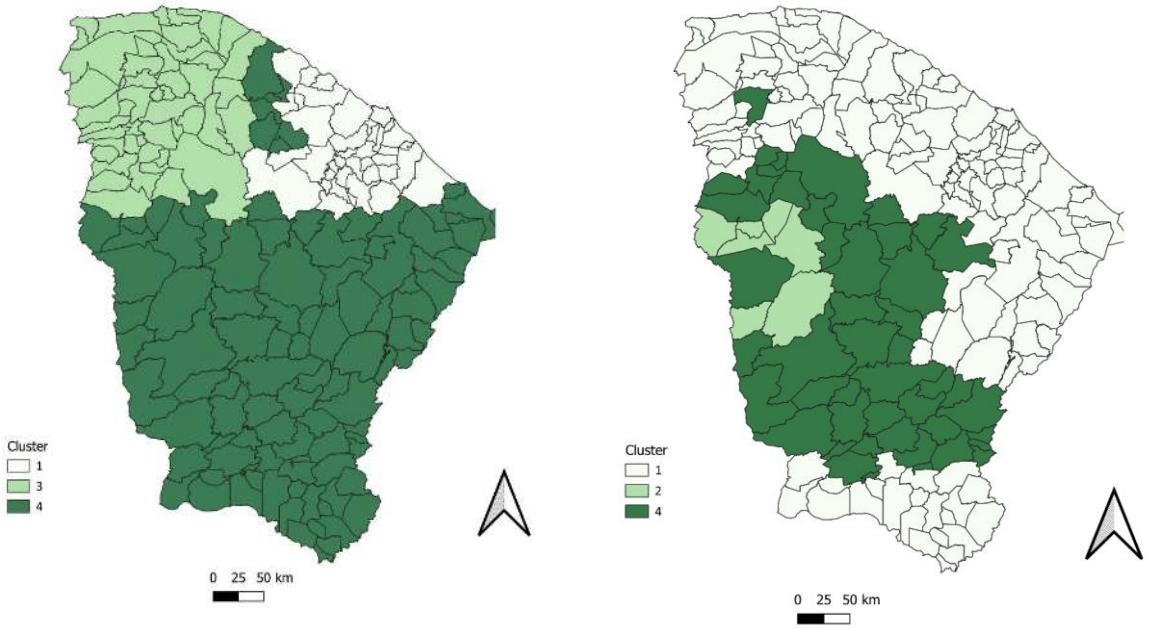
A Figura 4 mostra a precipitação acumulada dos municípios cearenses nos anos de 2007 e 2020. Nota-se maior concentração de chuvas na região Norte do estado — especialmente no Maciço de Baturité, Vale do Acaraú e litoral — e menor precipitação nas regiões do Sertão Central e do Vale do Jaguaribe.

Em 2007, a pluviosidade esteve predominantemente concentrada no norte do Ceará, com destaque para os municípios do Vale do Acaraú e parte do Maciço de Baturité. Em contraste, em 2020 verifica-se um padrão mais homogêneo de distribuição das chuvas, com quase todos os municípios apresentando precipitação acima da média estadual, sendo os maiores volumes registrados no litoral oeste, no norte do estado e no Vale do Cariri.

3.2. Agrupamento dos municípios com características semelhantes

A análise de agrupamentos identificou quatro clusters climáticos distintos, apresentados na Figura 5. Vale salientar que um município pode migrar de um grupo para outro dependendo dos regimes climáticos a que está sujeito em determinado ano.

Figura 5 - Agrupamento climático dos municípios no estado do Ceará para os anos de 2007 e 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O agrupamento 4 predominou tanto no primeiro quanto no último ano analisado, indicando que boa parte dos municípios cearenses está inserida em condições mais secas e semiáridas.

A Tabela 2 apresenta as médias das variáveis climáticas por agrupamento.

Tabela 2 - Distribuição das médias das variáveis climáticas por agrupamento.

Cluster	Quantidade	Precipitação Pluviométrica	Temperatura Média	Dias sem chuva	Pressão Atmosférica	Velocidade Média do Vento	Radiação Solar	Umidade Relativa do Ar
1	1377	974,41	27,08	261,71	975,13	2,70	827,79	70,77
2	84	754,41	26,69	217,38	744,95	1,82	582,04	45,01
3	46	1125,45	26,95	278,22	992,88	2,81	5086,92	68,86
4	1069	712,83	26,75	297,63	967,24	2,52	878,63	61,75

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O grupo 1, mais numeroso, apresentou as maiores temperaturas médias e regimes pluviométricos superiores à média, além de alta umidade relativa do ar. O grupo 2, localizado principalmente na região de Crateús, mostrou baixos níveis de precipitação e ventos fracos. O grupo 3 apresentou valores elevados de precipitação e fortes ventos, características típicas da Serra da Ibiapaba. Já o grupo 4, concentrado nas regiões do Cariri, Sertão Central e Vale do Jaguaribe, apresentou os menores índices de pluviosidade e cerca de 300 dias sem chuva por ano.

3.3. Análise de discriminante dos grupos definidos

A análise discriminante foi utilizada para verificar a adequação dos grupos formados. O teste de igualdade de médias (Tabela 3) indicou que todas as variáveis climáticas possuem poder de discriminação significativo entre os grupos ($p < 0,05$). A variável com maior poder discriminatório foi a umidade relativa do ar, com o menor valor de Lambda de Wilks.

Tabela 3 - Teste de Igualdade de Grupos.

Variável	Lambda de Wilks	F	df1	df2	Sig.
Precipitação	0,773	251,889	3	2572	0,000
Temperatura	0,957	38,384	3	2572	0,000
Dias sem Chuva	0,740	300,524	3	2572	0,000
Velocidade Média do Vento	0,304	1959,070	3	2572	0,000
Pressão Atmosférica	0,915	80,038	3	2572	0,000
Umidade Relativa do Ar	0,135	5484,291	3	2572	0,000
Radiação Solar	0,365	1491,387	3	2572	0,000

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O teste de Box M (Tabela 4) rejeitou a hipótese nula de igualdade entre matrizes de covariância, confirmando a distinção entre os grupos.

Tabela 4 - Teste de Box M.

Teste Box M	
Estatística do Teste	5028,807
Approx.	58,060
df1	84
df2	80198,191
Sig.	0,000

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Tabela 5 mostra que a primeira função discriminante explicou 61,6% da variância total, com correlação canônica de 0,936.

Tabela 5 - Autovalores e teste de Lambda de Wilks.

Função	Autovalores	% de Variância	Correlação Canônica	Lambda de Wilks	Significância
1	7,105	61,6	0,936	0,014	0,000
2	3,533	30,6	0,883	0,116	0,000
3	0,904	7,8	0,689	0,525	0,000

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os coeficientes padronizados da função de Fischer (Tabela 6) indicaram que a umidade, os dias sem chuva e a temperatura foram as variáveis mais relevantes na diferenciação dos grupos.

Tabela 6 - Coeficientes Discriminantes.

	Padronizado	Não Padronizado
Precipitação Pluviométrica	0,137	0,001
Temperatura Média	0,251	0,317
Dias sem chuva	-0,263	-0,008
Velocidade média do vento	0,019	0,001
Pressão Atmosférica	-0,243	-0,439
Umidade Relativa do Ar	1,061	0,005
Radiação Solar	-0,175	-0,039
Constante		-8,199

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A matriz estrutural (Tabela 7) confirmou que a umidade relativa do ar apresentou a maior correlação com a função discriminante (r = 0,945).

Tabela 7 - Matriz Estrutural

Variável	Correlação
Umidade Relativa do Ar	0,945
Pressão Atmosférica	0,048
Velocidade Média do Vento	0,017
Radiação Solar	0,019
Dias sem chuva	0,008
Precipitação Pluviométrica	0,049
Temperatura Média	-0,001

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, a Tabela 8 mostra as variáveis que melhor discriminam cada um dos grupos.

Tabela 8 - Coeficientes da Função de Classificação.

	Cluster			
	1	**2**	**3**	**4**
Precipitação Pluviométrica	0,048	0,057	0,059	0,046
Temperatura Média	39,463	46,179	45,987	39,443
Dias sem chuva	-0,271	-0,224	-0,415	-0,247
Pressão Atmosférica	1,118	0,753	1,120	1,108
Velocidade média do Vento	-12,233	-16,811	-21,500	-13,190
Umidade Relativa do Ar	0,029	0,032	0,124	0,030
Radiação Solar	-0,720	-1,932	-1,668	-1,098
Constante	-1037,839	-847,661	-1384,054	-1006,404

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Tabela 8 revela que a temperatura foi fator determinante para encaixar em cada um dos grupos, tendo poder discriminatório maior no segundo grupo. A velocidade do vento, por sua vez, foi a variável que conferiu menor poder de discriminação, sendo menor no terceiro grupo.

Por fim, a Tabela 9 mostra que 88,3% das classificações foram corretamente previstas, indicando elevada precisão dos agrupamentos formados.

Tabela 9 - Resultados da Classificação.

Grupo		**Predito**				**Total**
		1	**2**	**3**	**4**	
Original	1	92,5	0,1	0,0	7,4	100,0
	2	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
	3	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0
	4	17,4	0,7	0,6	81,4	100,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

4.4. Análise do efeito dos agrupamentos climáticos na produção agrícola do estado do Ceará

Foram estimados três modelos de regressão com os *clusters* transformados em variáveis binárias, tendo como variáveis dependentes o rendimento médio das lavouras permanentes (RMLP), lavouras temporárias (RMLT) e rebanho (RH), consoante mostra a Tabela 10. Os valores entre parênteses são os p-valores.

Tabela 10 - Modelo de Regressão Estimado.

Variáveis Independentes	**Variáveis Dependentes**		
	RMLP	**RMLT**	**RH**
DP	-0,0 (0,727)	-0,046 (0,255)	73,72 (0,000)
Cluster 1	7,335 (0,021)	1,099 (0,689)	270100,6 (0,006)
Cluster 2	23,855 (0,135)	-2.021 (0,142)	-29,789 (0,804)
Cluster 3	11,758 (0,179)	8,104 (0,283)	0*
Cluster 4	0*	0*	123343,3 (0,211)
Constante			182911,5 (0,058)
Teste de Hipótese			
F	2,05 (0,084)	1,03 (0,388)	15,62 (0,000)
Breusch-Pagan	0,00 (1,000)	0,00 (1,000)	1410,19 (0,000)
Hausman	4,35 (0,361)	0,3495 (4,44)	23,72 (0,000)
Efeito Estimado	Fixo	Fixo	*Pooled*

*Omitido pela colinearidade

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Dois dos modelos foram de efeitos fixos (RMLP e RMLT), indicando heterogeneidade individual entre os municípios, enquanto o modelo do rebanho ajustou-se melhor como painel pooled.

A densidade populacional apresentou coeficiente significativo e positivo no modelo do rebanho, sugerindo que o aumento populacional está associado ao crescimento do número

de cabeças por hectare. O *cluster* 1 apresentou efeito positivo e significativo sobre o rendimento das lavouras permanentes e da pecuária, enquanto os demais agrupamentos não apresentaram impacto estatisticamente relevante na produtividade.

Alguns *clusters* foram omitidos pela multicolinearidade, desta forma, eles se tornarão padrão de comparação dentro da análise.

5. DISCUSSÕES

Os resultados revelaram a existência de quatro agrupamentos climáticos no estado do Ceará, refletindo a heterogeneidade regional em termos de precipitação, temperatura e umidade. A predominância do agrupamento 4, composto por municípios do semiárido, confirma a forte influência das condições áridas sobre a agricultura regional. Essa segmentação é coerente com o estudo de Penha, Miyamoto e Maia (2022), que identificaram padrões semelhantes de agrupamentos climáticos no Rio Grande do Norte, com implicações diretas sobre a produtividade agrícola.

A análise discriminante mostrou que a umidade e a temperatura foram as variáveis com maior poder de distinção entre os grupos, o que era esperado para uma região marcada por escassez hídrica e altas temperaturas médias. Essa constatação reforça os achados de Bunn *et al.* (2019), que destacaram o papel da temperatura na limitação da área cultivável em regiões tropicais, e de Chandrasiri *et al.* (2023), que evidenciaram efeitos não lineares da temperatura sobre o rendimento agrícola no Sri Lanka. Além disso, destaca-se o valor predito por volta de 88%, confirmando que cada grupo está devidamente definido pelas variáveis climáticas.

Os resultados do painel mostraram que apenas o agrupamento 1 impactou positivamente a produtividade das lavouras permanentes e da pecuária, enquanto os demais *clusters* não apresentaram significância. Esse achado sugere que condições climáticas mais favoráveis, com precipitação acima da média e temperaturas moderadas, são determinantes para culturas de ciclo longo e para o desenvolvimento animal. Por outro lado, a ausência de significância nos demais agrupamentos pode indicar resiliência produtiva, em que a adoção de práticas adaptativas tem amenizado os efeitos climáticos adversos.

Nas lavouras temporárias, a ausência de significância estatística dos agrupamentos climáticos sugere que a produção de culturas de ciclo curto tem sido sustentada por

estratégias adaptativas, especialmente por meio do ajuste do calendário agrícola. A adequação do período de plantio e colheita às janelas pluviométricas reduz a exposição aos riscos climáticos, permitindo que a produtividade se mantenha relativamente estável mesmo sob diferentes regimes climáticos. Esse resultado indica que os produtores cearenses têm adotado práticas compatíveis com a elevada variabilidade climática regional, como o escalonamento do plantio e a priorização de culturas de ciclo curto, o que contribui para a resiliência produtiva das lavouras temporárias.

Esses resultados estão em consonância com Penha, Miyamoto e Maia (2021), que observaram que mesmo regiões sob estresse hídrico podem manter produção estável mediante estratégias de manejo adequadas. Em contrapartida, diferem parcialmente de Chandrasiri *et al.* (2023), cujos achados indicaram declínio na produtividade agrícola sob condições de seca prolongada, o que sugere maior vulnerabilidade dos cultivos asiáticos analisados em comparação com o contexto cearense.

De modo geral, as análises confirmam que a variabilidade climática exerce influência significativa sobre a agricultura, embora existam evidências de adaptação nos municípios cearenses. A combinação de abordagens multivariadas (agrupamento, discriminante e painel) permitiu compreender como diferentes condições climáticas se relacionam com os níveis de produtividade e apontam para a necessidade de políticas públicas regionais de apoio técnico e tecnológico voltadas à convivência com o semiárido.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidenciou que a variabilidade climática exerce influência significativa sobre a produtividade agrícola do Ceará, especialmente nas lavouras permanentes e na pecuária. A heterogeneidade espacial identificada reforça que os impactos das mudanças climáticas são diferenciados dentro do próprio estado, dependendo das condições microclimáticas e da capacidade adaptativa de cada município.

A principal contribuição científica deste trabalho está na integração de três abordagens multivariadas — análise de agrupamentos, discriminante e regressão em painel — para compreender a relação entre clima e produtividade. Essa combinação metodológica permitiu identificar grupos climáticos com comportamentos distintos e confirmar, de forma empírica,

a existência de resiliência produtiva em regiões semiáridas.

Em termos institucionais, os resultados oferecem subsídios para políticas públicas voltadas ao fortalecimento da agricultura adaptativa, com ênfase em assistência técnica, manejo eficiente de recursos hídricos e estratégias de convivência com o semiárido. As evidências apresentadas reforçam a necessidade de políticas regionais integradas que considerem a diversidade climática interna do Ceará como elemento estratégico de planejamento agrícola.

Assim, o estudo contribui para o avanço da literatura sobre mudanças climáticas e produção agrícola em contextos semiáridos, consolidando a importância de análises empíricas regionais como instrumento de formulação de políticas de resiliência e sustentabilidade.

7. RECOMENDAÇÕES

Para futuros trabalhos, sugere-se expandir a análise para o Nordeste e o Brasil, segmentar também por biomas, bem como detalhar o efeito dos agrupamentos climáticos por culturas e analisar como cada município pode priorizar sua cultura dadas as suas condições climáticas.

Outra possibilidade seria captar séries temporais mais longas, verificando tendências climáticas de longo prazo e eventos extremos mais recorrentes.

Um futuro estudo pode incorporar indicadores de acesso a crédito rural, assistência técnica, irrigação e adoção de tecnologias de convivência com o semiárido, para entender melhor os fatores de resiliência produtiva.

REFERÊNCIAS

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **PIB do Agronegócio Brasileiro.** Disponível em https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx. Acesso em 16 de fevereiro de 2024.

BALTAGI, Badi Hani. **Econometric analysis of panel data.** 3 ed. John Willey & Sons Ltda, 2005.

BUNN, Christian; LÄDERACH, Peter; QUAYE, Amos; MUILERMAN, Sander; NOPONEN, Martin R.A.; LUNDY, Mark. Recommendation domains to scale out climate change adaptation in cocoa production in Ghana. **Climate Services**, v. 16, p. 100123-100134, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100123

CHANDRASIRI, Chamila Kumari; TSUSAKA, Takuji W.; HO, Tien D. N.; ZULFIQAR, Farhad; DATTA, Avishek. Impacts of climate change on paddy yields in different climatic zones of Sri Lanka: a panel data approach. **Asia-Pacific Journal of Regional Science**, v. 7, n. 2, p. 455-489, 2023. https://doi.org/10.1007/s41685-022-00264-5

Intergovernmental Panel on Climate Change's. **Climate Change 2021 - The Physical Science Basis.** Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Acesso em: 16 de fevereiro de 2024.

Intergovernmental Panel on Climate Change's. **Climate Change 2023 - Synthesis Report**. 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/. Acesso em: 16 de fevereiro de 2023.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia; SILVA, Fabiana Lopes da; CHAN, Betty Lilian **Análise de dados – Modelagem multivariada para tomada de decisões.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

GOMES, Francisco Carlos Moreira; ZAIDAN, Ricardo Tavares; ROCHA, Cezar Henrique Barra. Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2448-2462, 2022. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/253224/41889. Acesso em 6 de setembro de 2024.

HAIR JR.; Joseph F.; BLACK, William C.; BABIN, Barry J.; ANDERSON, Rolph E.; TATHAM, Ronald L. **Análise multivariada de dados.** tradução Adonai Schlup Sant'Anna. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal.** Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas. Acesso em 6 de setembro de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção Agrícola Municipal.** Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas. Acesso em 6 de setembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Dados Históricos.** Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos. Acesso em 6 de setembro de 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTRATÉGIA ECONOMIA DO CEARÁ – IPECE. **IPECEDATA.** Disponível em: http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/. Acesso em 31 de dezembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO - INSA. **O Semiárido brasileiro.** Disponível em: https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro. Acesso em 8 de setembro de 2024.

MATOS, Pedro Andrade. Juntos por um futuro sustentável: construindo uma agenda de mudanças climáticas entre Brasil e África. **Revista Tempo do Mundo**, n. 31, p. 285-318, 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/13261/1/Tempo_Mundo_31_artigo10_juntos_por_um_futuro.pdf. Acesso em 6 de setembro de 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. **Climate Data Online.** Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/. Acesso em 6 de setembro de 2024.

PENHA, Thales Augusto Medeiros; MIYAMOTO, Bruno César Brito; MAIA, Alexandre Gori. Mudanças Climáticas e o Impacto na Produção Agropecuária no Rio Grande Do Norte. **Revista de Estudos Sociais**, v. 23, n. 47, 2022. Disponível em: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8286188. Acesso em 6 de setembro de 2024.