



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO EM GEOGRAFIA

DENIZE MONTEIRO DOS ANJOS

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À OCORRÊNCIA DE SECAS
AGRÍCOLAS USANDO DADOS CENSITÁRIOS, SENSORIAMENTO REMOTO E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

JOÃO PESSOA

2025

DENIZE MONTEIRO DOS ANJOS

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À OCORRÊNCIA DE SECAS
AGRÍCOLAS USANDO DADOS CENSITÁRIOS, SENSORIAMENTO REMOTO E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a obtenção do título de Doutor.

Área de Concentração: Gestão de Território e Análise Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

JOÃO PESSOA
2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A599i Anjos, Denize Monteiro dos.

Identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de secas agrícolas usando dados censitários, sensoriamento remoto e análise multicritério / Denize Monteiro dos Anjos. - João Pessoa, 2025.

120 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva Da Silva.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Seca agrícola. 2. Escassez de Água. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Google Earth Engine. I. Da Silva, Richarde Marques da Silva. II. Título.


UFPB/BC

CDU 551.577.38(043)


DENIZE MONTEIRO DOS ANJOS

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À OCORRÊNCIA DE
SECAS AGRÍCOLAS USANDO DADOS CENSITÁRIOS,
SENSORIAMENTO REMOTO E ANÁLISE MULTICRITÉRIO**


O presente trabalho em nível Doutorado foi avaliado e aprovado, em 27/06/2025,
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Documento assinado digitalmente
 **RICHARDE MARQUES DA SILVA**
Data: 27/06/2025 15:41:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Richarde Marques da Silva
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA**
Data: 27/06/2025 16:46:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima
Examinador interno

Documento assinado digitalmente
 **VALERIA RAQUEL PORTO DE LIMA**
Data: 27/06/2025 18:05:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Valéria Raquel Porto de Lima
Examinadora externa

Documento assinado digitalmente
 **VANINE ELANE MENEZES DE FARIAS**
Data: 27/06/2025 16:24:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Vanine Elane Menezes de Farias
Examinadora externa

Documento assinado digitalmente
 **ERICA CRISTINE MEDEIROS MACHADO**
Data: 28/06/2025 11:23:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Érica Cristine Medeiros Machado
Examinadora externa

Dedico esta pesquisa primeiramente a Deus, ao meu mentor espiritual, a minha mãe Elisabeth, a meu companheiro Danilo e a minha amada filha Maria Carolina.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela minha saúde e pela saúde da minha família. Aos meus pais, Walter Alves (*in memoriam*) e principalmente minha mãe Elisabeth Monteiro, meu espelho, guerreira por tudo que enfrentou por nós e aos meus irmãos Diniz, Divanize e Diva. Gratidão por todo o apoio.

À minha família. Danilo, meu esposo, companheiro de todas as jornadas, grande amor da minha vida, e Maria Carolina, minha filha, minha joia mais preciosa. Aos meus mentores espirituais, agradeço a todos pela inspiração emanada nos momentos difíceis, sei que nunca estive só nessa jornada.

Ao professor Dr. Richarde Marques da Silva, pela orientação e paciência desde o início e principalmente por ser uma pessoa humana que coloca amor em tudo o que faz de forma ética e profissional.

À Universidade Federal da Paraíba e a todos os professores da Pós-Graduação em Geografia, pela oportunidade de fazer parte desta instituição e pelo aprendizado durante as aulas remotas no período mais difícil que enfrentamos: a pandemia do COVID-19.

Aos meus colegas da turma do doutorado, pela convivência, mesmo que remotamente, mas sempre havendo muito companheirismo e auxílios nas dúvidas durante o processo.

Às minhas queridas amigas professoras lindas, Daina, Fernanda e Maíra pelas boas conversas, risadas e incentivos.

A todas as mulheres negras pesquisadoras e cientistas, que seguem firmes em suas trajetórias em meio aos desafios de um sistema ainda marcado por desigualdades. Sigamos em frente!

AXÉ PARA QUEM FOR DE AXÉ!

GRATIDÃO!

RESUMO

As mudanças climáticas têm cada vez mais impactado os ecossistemas e as atividades econômicas, especialmente na região Nordeste do Brasil, onde a irregularidade das chuvas intensifica a ocorrência de secas agrícolas. Este estudo teve como objetivo central identificar áreas com maior risco à seca agrícola tendo como foco as culturas de milho, feijão-caupi e mandioca, para o período de 2001 a 2022, baseado na aplicação do Índice de Risco de Seca Agrícola (IRSA). O IRSA mede o risco à seca agrícola variando de 0 (muito alto) e 1 (muito baixo). A metodologia adotou o uso de dados climáticos (precipitação, evapotranspiração e temperatura) obtidos via satélite *MODIS* e *CHIRPS*, além de dados do Censo Agropecuário (SIDRA/IBGE), processados com apoio do *Google Earth Engine* e *QGIS*. Com base no método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), foi desenvolvido o IRSA, que permitiu mapear espacialmente os níveis de risco nas diferentes microrregiões. Nesta pesquisa, o IRSA foi aplicado às microrregiões do estado da Paraíba e integrou dados de sensoriamento remoto, censitários e o Método de Análise Hierárquica – *AHP*. Para a realização desse estudo, foram utilizados dados de temperatura (*MODIS*), evapotranspiração (*MODIS*) e precipitação (*CHIRPS*) estimados por sensoriamento remoto e de área colhida em hectares (SIDRA/IBGE). A validação estatística do índice foi realizada por meio das curvas *Receiver Operating Characteristic* (ROC) e da *Area Under the Curve* (AUC), utilizando 3.000 pontos regulares extraídos dos mapas *raster* para cada cultura. A análise espacial indicou que as mesorregiões do Sertão Paraibano e Borborema apresentaram os maiores riscos de seca agrícola, destacando-se o ano de 2012 como o mais crítico. As microrregiões de Patos, Piancó, Sousa, Catolé do Rocha, Seridó Oriental e Ocidental foram as mais afetadas ao longo da série histórica. Em contrapartida, as microrregiões Cajazeiras, Sousa, Patos, Piancó, Itaporanga e Serra do Teixeira foram as que apresentaram os menores riscos à seca agrícola. A cultura do milho demonstrou maior resiliência em relação à seca, enquanto a mandioca foi a mais afetada. Os mapas gerados com base na média dos 21 anos indicaram que cerca de 32,80% da área total estudada apresentou risco moderado, com predomínio de pixels na faixa de 0,58 a 0,84, indicando risco baixo a muito baixo. Os resultados demonstraram excelente desempenho para indicar padrões de risco espacial que podem orientar ações futuras, com valores de *AUC* variando entre 0,97 e 0,99, indicando alta capacidade de discriminação do modelo entre áreas com e sem seca agrícola. Este trabalho comprova a eficiência da integração de métodos geoespaciais e multicritério na avaliação do risco de seca agrícola, fornecendo subsídios técnicos para gestão territorial, planejamento agrícola e políticas públicas de mitigação da seca no semiárido paraibano.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; MODIS; CHIRPS; Escassez de Água; Google Earth Engine.

ABSTRACT

Climate change has increasingly impacted ecosystems and economic activities, especially in the Northeast region of Brazil, where irregular rainfall intensifies the occurrence of agricultural droughts. This study's main objective was to identify areas at greatest risk of agricultural drought, focusing on corn, cowpea, and cassava crops, for the period 2001 to 2022, based on the Agricultural Drought Risk Index (IRSA). The IRSA measures agricultural drought risk, ranging from 0 (very high) to 1 (very low). The methodology used climate data (precipitation, evapotranspiration, and temperature) obtained via MODIS and CHIRPS satellites, as well as data from the Agricultural Census (SIDRA/IBGE), processed with support from Google Earth Engine and QGIS. Based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, the IRSA was developed, which allowed spatial mapping of risk levels in different microregions. In this study, the IRSA was applied to microregions of the state of Paraíba and integrated remote sensing, census, and Hierarchical Analysis Method (AHP) data. This study used temperature (MODIS), evapotranspiration (MODIS), and precipitation (CHIRPS) data estimated by remote sensing, as well as harvested area in hectares (SIDRA/IBGE). Statistical validation of the index was performed using Receiver Operating Characteristic (ROC) and Area Under the Curve (AUC) curves, using 3,000 regular points extracted from raster maps for each crop. Spatial analysis indicated that the Sertão Paraibano and Borborema mesoregions presented the highest risks of agricultural drought, with 2012 standing out as the most critical year. The microregions of Patos, Piancó, Sousa, Catolé do Rocha, Seridó Oriental, and Ocidental were the most affected throughout the historical series. In contrast, the Cajazeiras, Sousa, Patos, Piancó, Itaporanga, and Serra do Teixeira microregions presented the lowest risk of agricultural drought. Corn crops demonstrated greater resilience to drought, while cassava was the most affected. Maps generated based on the 21-year average indicated that approximately 32.80% of the total studied area presented moderate risk, with a predominance of pixels in the 0.58 to 0.84 range, indicating low to very low risk. The results demonstrated excellent performance in identifying spatial risk patterns that can guide future actions, with AUC values ranging from 0.97 to 0.99, indicating high discrimination capacity of the model between areas with and without agricultural drought. This work demonstrates the efficiency of integrating geospatial and multicriteria methods in assessing agricultural drought risk, providing technical support for territorial management, agricultural planning, and public policies for drought mitigation in the semiarid region of Paraíba.

Keywords: Remote Sensing; MODIS; CHIRPS; Water Scarcity; Google Earth Engine.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de comparação paritária	48
Tabela 2 – Escala de importância dos critérios	48
Tabela 3 – Valores de consistência aleatória (CA) em função da ordem da matriz (N)	50
Tabela 4 – Normalização das variáveis utilizadas no cálculo IRSA.....	51
Tabela 5 – Faixas de desempenho para a Curva AUC.....	55
Tabela 6 – Matriz paritária com valores de importâncias.....	68
Tabela 7 – Tabela síntese dos valores de IRSA para as culturas analisadas	83
Tabela 8 – Áreas da série temporal do índice de Risco de Seca Agrícola	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Revisão de estudos de modelos e índices para risco de seca.....	45
Quadro 2 – Características dos critérios no processo de normalização	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Duração e impactos da seca	20
Figura 2 – Fases fenológicas do feijão	24
Figura 3 – Ciclo fenológico da mandioca	26
Figura 4 – Ciclo fenológico no milho	27
Figura 5 – Esquema do processo de evapotranspiração (ET)	29
Figura 6 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos	37
Figura 7 – Localização e distribuição das microrregiões da Paraíba	38
Figura 8 – Código para reclassificar as áreas.....	54
Figura 9 – Distribuição média da precipitação nas microrregiões paraibana no período de 2001 a 2022	59
Figura 10 – Distribuição média da temperatura nas microrregiões paraibana no período de 2001 a 2022	60
Figura 11 – Distribuição média da evapotranspiração nas microrregiões paraibana no período de 2001 a 2022	62
Figura 12 - Cultura do feijão-caupi nas microrregiões paraibanas entre os anos 2001 e 2022.....	64
Figura 13 – Cultura do milho nas microrregiões paraibanas no período de 2001 a 2022	65
Figura 14 – Cultura da mandioca nas microrregiões paraibanas do período de 2001 a 2022.....	67
Figura 15 – Valores do IRSA da cultura do feijão-caupi nas microrregiões da Paraíba dos anos de 2001 a 2022.....	71
Figura 16 – Variabilidade temporal do IRSA da cultura do feijão-caupi nas mesorregiões da Paraíba, entre os anos de 2001 e 2022.....	73
Figura 17 – Valores do IRSA da cultura do milho nas microrregiões da Paraíba entre os anos de 2001 e 2022.....	75
Figura 18 – Variabilidade temporal do IRSA para a cultura de milho para as microrregiões agrupadas por mesorregiões da Paraíba entre os anos de 2001 e 2022	77
Figura 19 – Valores do IRSA da cultura da mandioca nas microrregiões da Paraíba nos anos de 2001 a 2022.....	80

Figura 20 – Variabilidade temporal do IRSA para a cultura de mandioca para as microrregiões agrupadas por mesorregiões da Paraíba entre os anos de 2001 e 2022	81
Figura 21 – Estatísticas do índice de IRSA para o feijão-caupi (A) e milho (B) entre os anos de 2001 e 2022 para as microrregiões Paraibanas	86
Figura 22 – Estatística básicas do índice IRSA para a cultura de mandioca entre os anos de 2001 e 2022 para as microrregiões da Paraíba.....	88
Figura 23 – Gráfico da predominância de pixels das áreas na série temporal do índice de Risco de Seca Agrícola	92
Figura 24 – Gráfico da curva ROC para validação do IRSA.....	94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

AHP	Analytic Hierarchy Process (Método de Análise Hierárquica)
ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
ASEBAL	Automated Surface Energy Balance Algorithm for Land
AUC	Area Under the Curve (Área sob a Curva)
CA	Consistência Aleatória
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CISCT	International Conference on Innovative Sustainable Computational Technologies
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
ET	Evapotranspiração
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura)
FPR	False Positive Rate (Taxa de Falsos Positivos)
GEE	Google Earth Engine
GIS	Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICT	Índice de Condição de Temperatura
ICV	Índice de Condição de Vegetação
INSA	Instituto Nacional do Semiárido

IRSA	Índice de Risco de Seca Agrícola
IVAS	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
IVR	Índice de Vegetação por Razão
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MIN	Ministério da Integração Nacional
MOD11A1	Produto MODIS de Temperatura da Superfície Terrestre
MOD16A2	Produto MODIS de Evapotranspiração
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NEB	Nordeste do Brasil
NIR	Infravermelho Próximo
NRSA	Níveis de Risco à Seca Agrícola
PAM	Produção Agrícola Municipal
PDSI	Palmer Drought Severity Index (Índice de Severidade de Seca de Palmer)
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
ROC	Receiver Operating Characteristic
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPI	Standardized Precipitation Index (Índice Padronizado de Precipitação)
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TVDI	Temperature-Vegetation Dryness Index

UAF	Unidade Agrícola Familiar
VIS	Faixa Visível do espectro eletromagnético
ZARC	Zoneamento Agrícola de Risco Climático

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	HIPÓTESE	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo Geral.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos.....	18
2.1	SECAS: SUAS CARACTERÍSTICAS E FORMAS	19
2.2	AS SECAS NO NORDESTE	21
2.3	CULTURAS DE SEQUEIROS E O ZONEAMENTO AGRÍCOLA DE RISCO CLIMÁTICO DO ESTADO DA PARAÍBA	22
2.4	CULTURA DO FEIJÃO	23
2.5	CULTURA DA MANDIOCA.....	24
2.6	CULTURA DO MILHO	26
2.7	PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA.....	28
2.8	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	28
2.9	CENSO AGROPECUÁRIO DO BRASIL.....	30
2.10	ÍNDICES DE SECA A PARTIR DE DADOS GEOESPACIAIS	31
2.11	ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS	33
2.12	VULNERABILIDADE AMBIENTAL RELACIONADA À SECA	35
3	MATERIAS E MÉTODOS	37
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	38
3.1.1	Clima	39
3.1.2	Vegetação	39
3.1.3	Solos	40
3.1.4	Setores econômicos.....	40
3.2	O ÍNDICE DE RISCO DE SECA AGRÍCOLA.....	41
3.3	DADOS CENSITÁRIOS: ÁREA COLHIDA	41
3.4	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS OBTIDAS POR SENSORIAMENTO REMOTO	42
3.4.1	Temperatura	43
3.4.2	Evapotranspiração.....	44
3.4.3	Precipitação.....	44
3.5	MÉTODO HIERÁRQUICO ANALÍTICO	45
3.5.1	Definições das importâncias baseadas na literatura.....	45

3.5.2	Hierarquização dos critérios a partir da matriz paritária.....	47
3.5.3	Importância e pesos definidos	49
3.5.4	Cálculo da Razão de Consistência	49
3.6	REAMOSTRAGEM DOS PIXELS E NORMALIZAÇÃO DE CRITÉRIOS 50	
3.7	CÁLCULO DAS ÁREAS PREDOMINANTES POR PIXELS DO IRSA ..	53
3.8	ANÁLISES ESTATÍSTICAS E TESTES DE EFICIÊNCIA	55
3.8.1	Característica de Operação do Receptor	56
3.8.2	Área Sob a Curva	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO.....	58
4.2	ANÁLISE ESPACIAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE	59
4.3	ANÁLISE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	61
4.4	ANÁLISE ESPACIAL DA ÁREA COLHIDA DAS CULTURAS DE FEIJÃO- CAUPI, MILHO E MANDIOCA	63
4.5	CONSISTÊNCIA DOS PESOS UTILIZADOS PARA CADA VARIÁVEL	67
4.6	ESPACIALIZAÇÃO DO IRSA	68
4.6.1	Variabilidade espaço-temporal das secas agrícolas e sua influência na área colhida do feijão-caupi	68
4.6.2	Variabilidade espaço-temporal das secas agrícolas na área colhida de milho	74
4.6.3	Variabilidade espaço-temporal das secas agrícolas para a cultura de mandioca	78
4.7	ESTATÍSTICAS DA ANÁLISE TEMPORAL DO IRSA.....	84
4.8	ÁREAS DE PREDOMINÂNCIA DE PIXELS POR MICRORREGIÕES ...	90
4.9	VALIDAÇÃO DO ÍNDICE DE IRSA	93
5	DISCUSSÃO: VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO IRSA.....	96
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
7	RECOMENDAÇÕES.....	100
	REFERÊNCIAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural que pode ocorrer em diferentes regiões do planeta, afetando negativamente as atividades econômicas e o abastecimento de água para a população (IPCC, 2023). No Brasil, o fenômeno é especialmente recorrente na região Nordeste (NEB), onde se localiza a maior parte da área classificada como semiárido — uma sub-região caracterizada por baixas precipitações, alta evapotranspiração e longos períodos de estiagem.

A delimitação oficial do Semiárido é feita pelo Ministério da Integração Nacional (MIN) (atualmente sob o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional), com base em critérios como índice pluviométrico anual, índice de aridez e risco de seca. Ao longo dos anos, observa-se um crescimento no número de municípios inseridos nessa delimitação, o que tem gerado discussões sobre os critérios utilizados, se são estritamente climáticos ou se também refletem a necessidade de acesso a políticas públicas específicas para mitigação dos efeitos da seca (Brasil, 2017; Santos; Aquino, 2016).

Esse cenário é ainda mais preocupante nos estados da federação que estão inseridos em quase sua totalidade dentro da região semiárida, como é o caso da Paraíba, que possui aproximadamente 90% do seu território dentro da região semiárida (Brasil Neto et al., 2022). A Paraíba apresenta historicamente um cenário preocupante em relação a eventos de seca recorrentes (Frade et al., 2024). Segundo dados da CODEVASF (2022), 140 dos 223 municípios paraibanos — o que corresponde a aproximadamente 65% do estado — estão expostos a secas.

A seca afeta o abastecimento de água e o setor agropecuário. A vulnerabilidade socioeconômica agrava os impactos, exigindo políticas públicas eficazes, como a construção de cisternas, barragens e incentivos à agricultura resistente (Dantas et al., 2020). Do ponto de vista econômico, o setor agropecuário desempenha um papel fundamental na economia e no desenvolvimento regional, pois é responsável pela geração de empregos, pelo fortalecimento das cadeias produtivas e pela dinamização da economia regional (Cuenca; Mandarin, 2007). O setor agropecuário abrange atividades como a agricultura familiar, a produção de grãos, frutas, leite e a criação de animais. Além disso, contribui para o abastecimento interno e a exportação de produtos. Esse setor é uma das principais fontes de renda no Estado da Paraíba (Lima et al., 2021). Conforme o Censo Agropecuário de 2017, aproximadamente 48% da

população rural da Paraíba utiliza produção agrícola para subsistência, destinando o restante para atividades comerciais (IBGE, 2017).

O clima controla inúmeros processos físicos e socioeconômicos (Silva et al., 2024) e a produção agropecuária não é diferente. A atividade agropecuária apresenta elevada sensibilidade às variações climáticas, cujos impactos se expressam de maneira heterogênea, em função das especificidades ambientais e das distintas características regionais (Cuenca; Mandarino, 2007). Entre as culturas mais adaptadas às condições do semiárido estão o milho, o feijão-caupi e a mandioca (Pereira; Lombardi Neto, 2004). De acordo com Mishra e Singh (2010), a ocorrência prolongada de condições climáticas estáveis, aliada ao aumento das temperaturas e à redução da umidade do solo aquecido, compromete significativamente a germinação das sementes, repercutindo negativamente sobre a produtividade agrícola e sobre os diversos elos da cadeia produtiva.

Devido à importância de se entender o comportamento de culturas agrícolas e à influência de períodos de seca para a economia regional, estudos em escala regional são vitais para monitorar as condições climáticas e sua influência na produção agrícola, baseado em indicadores de seca agrícola (Cuenca; Mandarino, 2007). Esses estudos identificam áreas mais afetadas, permitindo o planejamento de políticas públicas que promovam a convivência com a seca.

O monitoramento das secas em escala regional por meio de imagens orbitais é fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos e para a tomada de decisões estratégicas (Souza, 2018). Os índices de seca são amplamente utilizados para quantificar e classificar os níveis de severidade desses eventos. Padronizados em escalas temporais e espaciais, esses índices possibilitam a comparação das condições de umidade entre diferentes regiões (Rossato et al., 2017). A análise das secas pode considerar variáveis como frequência, duração, severidade e recorrência, aspectos que contribuem para uma compreensão mais precisa dos eventos monitorados e auxiliam no planejamento de estratégias de mitigação de seus impactos potenciais (Junqueira et al., 2020). Ao longo dos anos, diversos pesquisadores têm empregado esses índices para monitorar e compreender a dinâmica das secas em distintos contextos climáticos e geográficos, evidenciando suas vantagens como ferramentas analíticas e operacionais.

Diversos agentes sociais como órgãos governamentais Instituto Nacional do Semiárido (INSA), Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA),

Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), organizações internacionais como a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), instituições de pesquisa como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), as universidades públicas, ONGs como a Articulação Semiárido Brasileiro (Asa Brasil) e até o setor privado discutem e propõem políticas públicas que, mesmo externas ao desenvolvimento social direto, podem minimizar os impactos socioambientais da seca. Essas ações consideram as especificidades do NEB, como a disposição orográfica dos regimes de chuva e a influência do fenômeno climático El Niño, que afeta principalmente a região conhecida como Polígono das Secas, sujeita a frequentes crises de escassez hídrica (Santos; Aquino, 2016).

As condições climáticas agravadas por essas características, aliadas ao uso irracional dos recursos naturais, intensificam os desequilíbrios ambientais e comprometem o bem-estar social (Marengo et al., 2016). Atualmente, estudos baseados em dados de satélite para avaliar o risco de seca agrícola têm sido aplicados, possibilitando o monitoramento de variações climáticas como temperatura, evapotranspiração e o tipo de cobertura vegetal (Souza, 2018). Esses avanços foram possíveis graças ao sensoriamento remoto, que viabilizou estudos em escalas regionais e globais (Oliveira et al., 2022).

A partir do avanço de produtos de sensoriamento remoto orbital, pode-se destacar o uso de índices espectrais utilizados na análise da vegetação (Sausen; Lacruz, 2015), pois fornecem imagens de diferentes resoluções espaciais, espectrais e temporais, permitindo a captura de informações sobre a superfície terrestre em escala regional ou global (Duft; Picoli, 2018). Além disso, a integração entre diferentes produtos de sensoriamento remoto, como de chuva, temperatura e evapotranspiração fornecem informações para o monitoramento de eventos de seca (Brito et al., 2022).

Nesse sentido, essa pesquisa destaca a importância das microrregiões paraibanas como recorte espacial deste estudo pela elevada representatividade do Semiárido no estado da Paraíba, onde cerca de 90% do território se encontra inserido nessa região climática (Clemente, 2021). Esse contexto torna o estado um cenário propício para investigar os impactos das secas agrícolas sobre culturas de sequeiro, como o milho, a mandioca e o feijão-caupi, que possuem grande importância socioeconômica para as populações locais. A seca agrícola afeta diretamente o

rendimento das culturas, gerando perdas econômicas significativas (Fontaine et al., 2014).

Dessa forma, as ferramentas de geoprocessamento, associadas às técnicas do sensoriamento remoto, vêm sendo bastante utilizadas no monitoramento da ocorrência de seca na região do NEB (Falcão, 2013). Diante disso, esta pesquisa tem a finalidade de compreender, no decorrer de uma análise temporal de 21 anos, como a seca impactou nas culturas agrícolas do feijão-caupi, do milho e da mandioca, que são culturas de sequeiro de grande importância econômica para as comunidades do Nordeste.

A aplicação do AHP nesta pesquisa tem como objetivo desenvolver mecanismos que resultem em um mapeamento eficiente do risco de seca agrícola, possibilitando que os órgãos responsáveis possam planejar, junto à sociedade, estratégias de convivência com longos períodos de estiagem. Além disso, busca auxiliar na definição das melhores épocas para o plantio e cultivo agrícola, bem como fortalecer estudos regionais sobre a seca agrícola que já vêm sendo desenvolvidos no meio acadêmico-científico.

1.1 HIPÓTESE

Atualmente, não há iniciativas de políticas públicas ou ações governamentais que correlacionem o comportamento da produção agrícola nas microrregiões paraibanas, que combinem dados censitários de áreas colhidas, produção agrícola e variáveis climáticas com as secas agrícolas. A partir dessas explanações, surge o seguinte questionamento: É possível integrar dados de evapotranspiração, temperatura, precipitação e dados de áreas colhidas de culturas de sequeiros para avaliar níveis de seca agrícola nas microrregiões paraibanas? Desta forma, ressalta-se a relevância dessa pesquisa no fornecimento de bases geográficas para a divulgação de dados com o propósito de oferecer elementos para a compreensão atualizada da realidade territorial das microrregiões paraibanas.

Portanto, a hipótese desse estudo é que a integração de dados de precipitação, evapotranspiração e temperatura derivados de sensoriamento remoto com dados censitários de culturas agrícolas permite a construção de um índice capaz de identificar espacialmente as microrregiões paraibanas mais vulneráveis a secas agrícolas frente à variabilidade climática no Estado da Paraíba.

1.1 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Identificar áreas suscetíveis à ocorrência de secas agrícolas no Estado da Paraíba, especialmente para as culturas de feijão-caupi, milho e mandioca.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar a área colhida das culturas do feijão-caupi, mandioca e do milho das microrregiões paraibanas entre 2001 e 2022;
- Analisar a variabilidade espacial da temperatura, precipitação, evapotranspiração nas microrregiões da Paraíba para o período de 2001 a 2022;
- Avaliar a metodologia multicritério para analisar a influência dos fatores climáticos e da área colhida nas secas agrícolas;
- Desenvolver e aplicar um índice de risco de seca agrícola para avaliar a suscetibilidade das culturas de feijão-caupi, milho e mandioca frente às secas agrícolas nas microrregiões paraibanas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SECAS: SUAS CARACTERÍSTICAS E FORMAS

As secas são fenômenos climatológicos que caracterizam a ausência, escassez e instabilidade de precipitações pluviométricas pela irregularidade da distribuição das estações chuvosas (Nys et al., 2016). Segundo Marengo et al. (2016), as secas estão presentes em todas as regiões brasileiras e afetam a produção agrícola e o fornecimento de água.

Diferentes fatores influenciam na ocorrência da seca e podem ser identificados a partir da duração até a sua extensão espacial, destacando também que as atividades antrópicas, a predominância da vegetação de cada região são fatores que podem influenciar para uma menor disponibilidade dos recursos hídricos (Wilhite; Svoboda, 2000; Boken, 2005).

A seca é um fenômeno que pode se apresentar em quatro formas: a meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica (Blain; Brunini, 2007). A precipitação abaixo da média traz consequências como a baixa disponibilidade de recursos hídricos e alterações na capacidade dos ecossistemas.

A seca meteorológica é muitas vezes definida por um período de duração ou intensidade de precipitação. De acordo com sua localidade ou região, essa é a definição mais usada para se identificar a seca meteorológica (Fernandes et al., 2009; Sausen; Lacruz, 2015). A ocorrência da seca agrícola é acarretada pela indisponibilidade dos recursos hídricos do solo, resultando no estresse das culturas agrícolas e da saúde da vegetação em uma determinada região de acordo com momento e período investigado (Mishra; Singh, 2010; Panu; Sharma, 2014; Sausen; Lacruz, 2015).

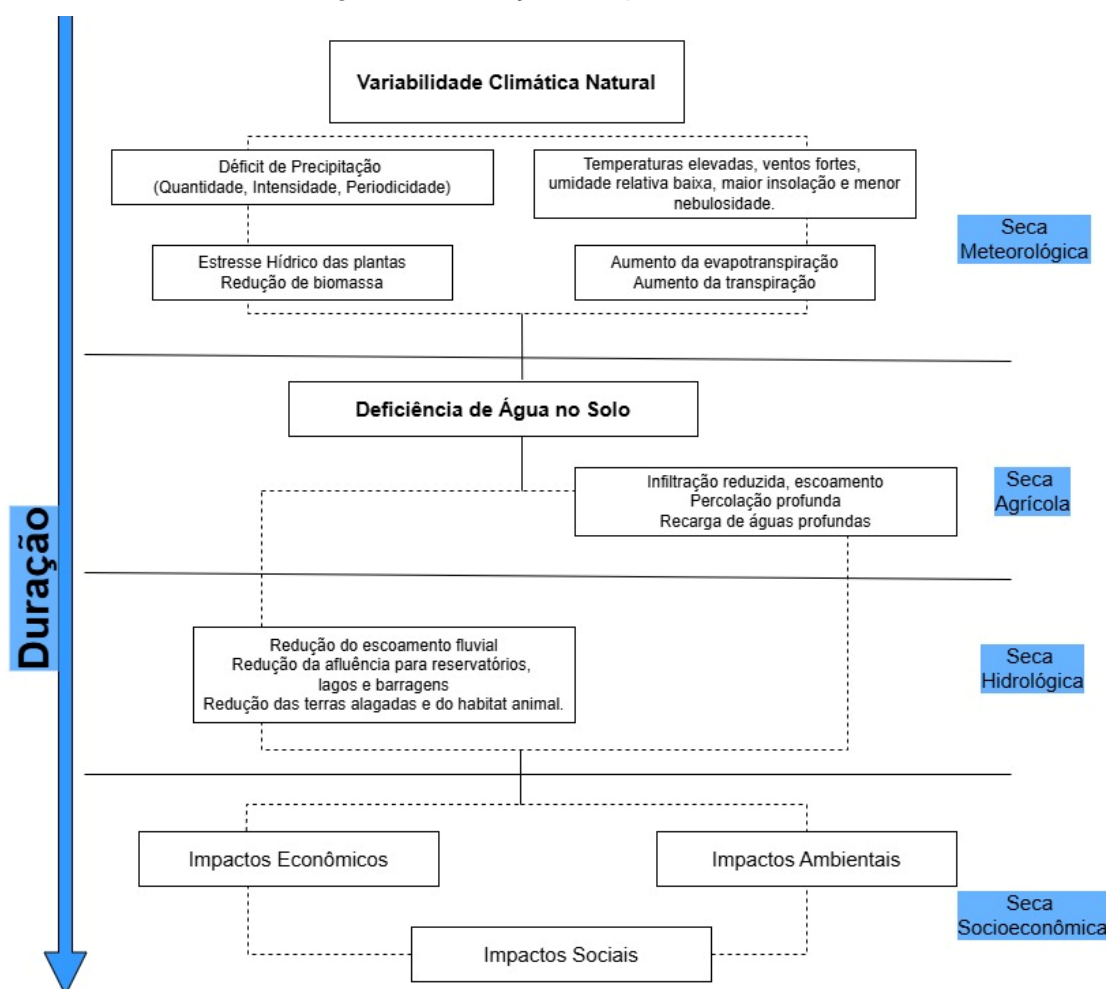
A seca hidrológica tem origem a partir do déficit no volume de água disponível na superfície e nos lençóis de água subterrâneo. É avaliada conforme o volume dos rios, reservatórios, lagos e lagoa, comprometendo seus usos múltiplos. Para a identificação da ocorrência da seca hidrológica, é prioritário verificar a disponibilidade dos recursos hídricos para o consumo humano e a taxa de consumo (Blain; Brunini, 2005; WMO, 2006; Sausen; Lacruz, 2015).

A seca socioeconômica é uma consequência da seca hidrológica e está relacionada com a escassez da água física. A falta desse recurso afeta primeiramente a saúde, o bem-estar e a qualidade de vida das pessoas. Esse tipo de seca, quando

inicia, afeta a oferta e a demanda de bens e serviços (Fernandes et al., 2009; Sausen; Lacruz, 2015).

O esquema apresentado na Figura 1 ilustra as evoluções temporais das características da seca. O processo começa com a seca meteorológica, que dá início a uma série de eventos que culminam em uma seca agrícola. Caso o período de seca se estenda por um longo período, ela evolui para uma seca hidrológica, afetando a afluência de água para reservatórios e lagos. Por fim, a seca socioeconômica se instala impactando os setores sociais, ambientais e econômicos.

Figura 1 – Duração e impactos da seca



Fonte: Adaptado de Fernandes et al. (2009)

De acordo com Sausen e Lacruz (2015), as diferentes categorias da seca são dadas pelas formas como elas ocorrem e as regiões que são mais frequentes. Na região do NEB, este fenômeno se apresenta com maior frequência e intensidade na

região do semiárido, provocando a descaracterização da vegetação e impactos socioeconômicos nessas áreas (Marengo et al., 2016).

2.2 AS SECAS NO NORDESTE

O Nordeste do Brasil (NEB) abrange 18,27% do território brasileiro, e nele está localizada a região semiárida, delimitada em 2024 pelo Ministério da Integração Nacional (MIN), com aproximadamente 1.335.298 km², e cerca de 23 milhões de habitantes (12% da população brasileira) (SUDENE, 2024).

Nesta região, encontra-se o Polígono das Secas, área que compreende aproximadamente 1.108.435 km². As regiões que pertencem a essa área têm as mesmas características, como chuvas irregulares, temperaturas elevadas e clima seco (SUDENE, 2024).

De acordo com Marengo et al. (2016), a falta de uma política de planejamento do uso e do consumo consciente dos recursos hídrico no NEB para que a região semiárida se torne mais vulnerável às secas desencadeia situações como a falta de água potável, riscos para a segurança alimentar, crise energética e hídrica para a população residente nessa região. É importante ressaltar que o desequilíbrio na distribuição das chuvas no NEB se deve às características locais relacionadas ao clima, ao relevo predominante e à posição geográfica (Clemente, 2021)

Os danos das secas também impactam prejuízos nas áreas cultiváveis e na pecuária e, por consequência, a perda da vida humana devido à fome e às doenças, bem como o êxodo rural de grande parte de famílias que viviam nessas áreas afetadas para a região do sudeste do Brasil (Gutiérrez et al., 2014).

O desempenho dos setores agrícolas depende das condições climáticas e ambientais para medir sua capacidade de produção (Araújo et al., 2013). A agricultura do Nordeste é caracterizada em sua grande parte pela produção das agriculturas de sequeiros e pelo setor avícola, mas o setor das culturas depende da regularidade de distribuição da pluviosidade (Silva et al., 2009).

De acordo com Campos et al. (2008), a dependência do recurso hídrico para as plantações vegetais é um fator importante para o planejamento agrícola, pois é necessário avaliar, por meio do monitoramento, as áreas que podem plantar e colher determinadas culturas de sequeiro, como feijão-caupi, milho, mandioca, sorgo, algodão e amendoim, entre outras. A avaliação do limite hídrico das culturas agrícolas necessita serem avaliadas nas diversas fases fenológicas, desde a fase de

germinação, passando pelo desenvolvimento, floração, formação do crescimento dos grãos ou frutos até atingir a maturação e a colheita (Araújo et al., 2013).

A interpretação de dados climáticos para determinar a taxa de evapotranspiração é realizada pela análise do crescimento inicial e desenvolvimento das culturas. A partir dessas informações geradas pelo setor agrícola, são tomadas decisões, que permitem determinar o melhor período de plantio e colheita, como controlar a previsão das safras e o tipo de cultura que pode se adaptar a determinadas regiões (Campos et al., 2008).

2.3 CULTURAS DE SEQUEIROS E O ZONEAMENTO AGRÍCOLA DE RISCO CLIMÁTICO DO ESTADO DA PARAÍBA

As culturas de sequeiro, como feijão, milho, mandioca e sorgo são fundamentais na agricultura paraibana, pois há uma predominância do clima semiárido no estado. Essas culturas são adaptadas à baixa disponibilidade hídrica, e o uso de práticas agrícolas específicas podem levar à maximização da produtividade em períodos de escassez dos recursos hídricos (Silva et al., 2002).

O cultivo de alimentos de sequeiro é amplamente praticado no Nordeste, especialmente na região semiárida. Essas culturas dependem exclusivamente das chuvas para o seu desenvolvimento e são, em sua maioria, realizadas por Unidades Agrícolas Familiares (UAF). Elas desempenham um papel crucial na geração de renda, na segurança alimentar e na ocupação de agricultores, principalmente aqueles envolvidos na agricultura familiar (Lemos et al., 2020).

Na Paraíba, culturas de sequeiro como arroz, feijão, mandioca e milho têm grande representatividade entre os familiares agricultores, de acordo com dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019). As principais culturas de subsistência cultivadas no Nordeste estão entre as que mais sofrem as variabilidades dos eventos climáticos (Cirino et al., 2015; Dantas et al., 2020).

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) é uma ferramenta essencial que auxilia na mitigação dos impactos provocados por eventos climáticos adversos. Ele oferece informações previstas sobre as áreas de maior risco, facilitando o planejamento estratégico da produção agrícola e promovendo decisões mais assertivas e sustentáveis (Alves et al., 2015). O ZARC é um componente indispensável para gestão sustentável e proporciona resultados relevantes para a

redução das ocorrências de perdas de safra, redução dos saldos deficitários na produção agrícola.

A identificação de culturas adaptadas às condições edafoclimáticas predominantes no Nordeste é essencial, pois aumenta as chances de sucesso nas colheitas, beneficiando tanto pequenos quanto grandes agricultores ao reduzir os impactos dos riscos climáticos (Jones; Thornton, 2003; Jarvis et al., 2008). O zoneamento agrícola, por sua vez, é uma ferramenta estratégica voltada para a mitigação dos principais riscos que as culturas podem enfrentar ao longo do ciclo produtivo, desde o plantio até a colheita, promovendo maior segurança e eficiência na atividade agrícola (Zullo Júnior et al., 2006).

2.4 CULTURA DO FEIJÃO

O feijão é um alimento de grande importância na alimentação das famílias brasileiras, é indispensável para a população urbana ou rural. É uma das principais fontes de proteína vegetais dos países mais carentes das regiões tropicais e subtropicais, os países em desenvolvimento responsáveis por 87% do consumo e 89% da produção mundial de feijão (Martins, 2021).

O feijão-caupi, pertence à classe *Dicotyledonea*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (Maréchal et al., 1978) é mais conhecido como feijão-macassar ou feijão-de-corda no NEB, é uma das principais culturas agrícola desta região, sendo considerado fonte de renda alternativa e alimento de subsistência para sua população, além de ser uma leguminosa bem adaptada às condições edafoclimáticas do NEB, ou seja, se adapta aos climas quente, úmido e semiárida. Serve também como alternativa de alimentação animal (Fancelli; Dourado, 1997).

O ciclo fenológico do feijão é composto por duas fases observadas na Figura 2. A fase vegetativa é composta pelas etapas de germinação (V0), período de absorção da água: emergência (V1) começa a aparecer no nível do solo; aparecimento das folhas primárias (V2); aparecimento das primeiras folhas com formatos trifoliar (V3) e aparecimento de novas folhas com formato trifoliar (V4), com as gemas e nós inferiores. A fase reprodutiva é composta pelas etapas: pré-floração (R5), primeiro boto floral; abrem-se as flores (R6): formação das primeiras vargens (R7); enchimentos das vargens, crescimento das sementes (R8), e maturação, vargens começam a secar e estão prontas para a colheita (R9). O ciclo da cultura tem duração

em torno de 70 a 110 dias, de acordo com as condições climáticas (Silva; Wander, 2013).

Figura 2 – Fases fenológicas do feijão



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2018)

No Nordeste brasileiro, o feijão-caupi ocupa 60% das áreas cultivadas. A produção dessa leguminosa é composta por pequenos agricultores em sistemas de cooperativas e ao nível de subsistência (Andrade Júnior *et al.*, 2007). Segundo o IBGE, (2021) a previsão é que cultivo feijoeiro no Brasil tenha um aumento na produção com relação aos anos anteriores no Paraná (7,5%), na Bahia (36,9%), em São Paulo (1,2%), em Goiás (8,0%), no Piauí (72,6%), em Santa Catarina (22,9%), no Rio Grande do Sul (13,5%) e na Paraíba (110,2%) e declínio em Minas Gerais (-7,1%), bem como no Ceará (-9,7%).

No NEB, pequenos produtores rurais recorrem aos sistemas de cultivos agrícolas chamados múltiplos usos e utilizam os recursos disponíveis para fazer o consórcio do plantio de feijão-caupi e mandioca. Esse tipo de sistema apresenta algumas vantagens sobre a monocultura, como maior estabilidade da produção, melhor aproveitamento da terra, além de contribuir para a redução da erosão e o controle de plantas daninhas.

2.5 CULTURA DA MANDIOCA

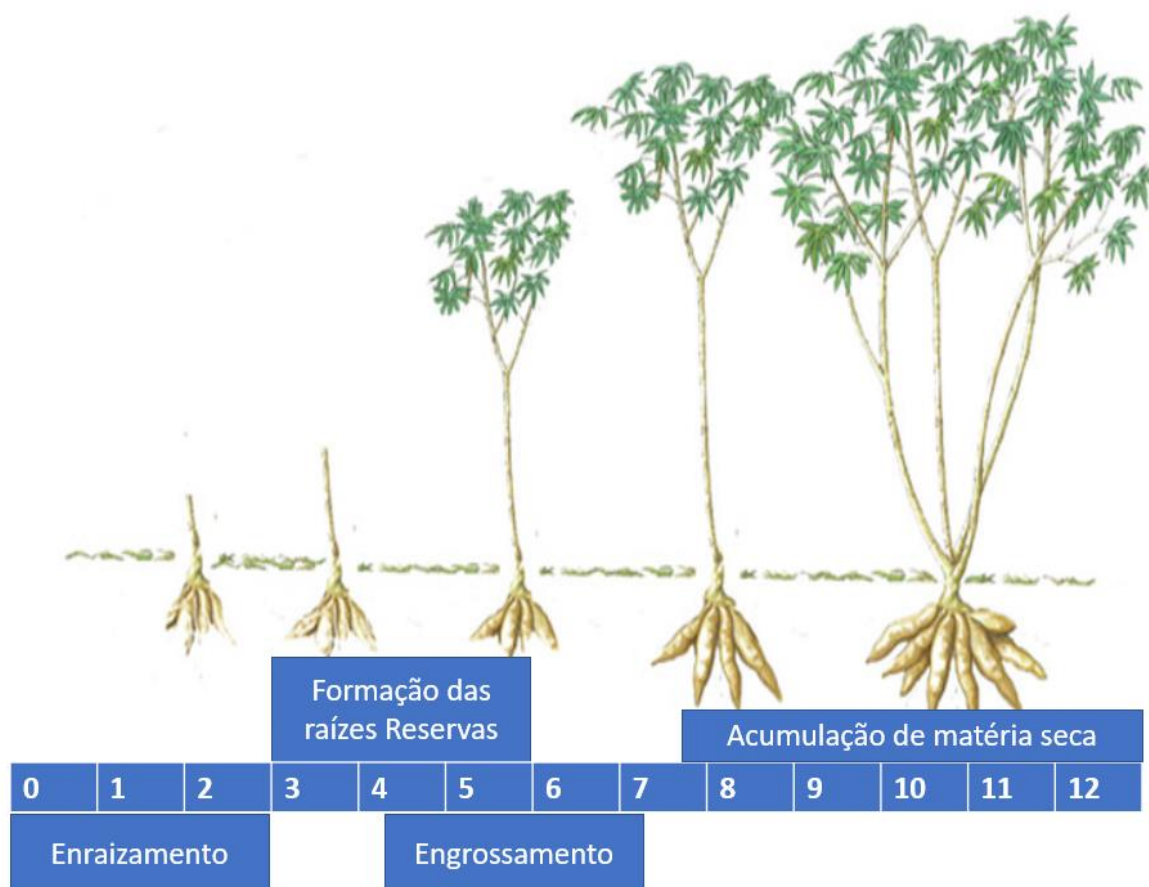
A cultura da mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) tem grande importância socioeconômica no mundo, por ser uma das principais fontes de carboidratos para a população de países em desenvolvimento. A mandioca é uma cultura Nativa da América do Sul, cultivada em todas as regiões brasileiras, e se destaca pela sua capacidade de aproveitamento destinada para alimentação humana e animal, bem

como serve de matéria-prima em inúmeros produtos industriais derivados da mandioca (Alves, 2006).

Para o cultivo da mandioca, a temperatura ideal está entre 18° e 30°, com precipitações anuais de 500 a 700 mm, ideal para as regiões semiáridas, é tolerante a solos pobres com condições climáticas adversas, é cultivada em diferentes tipos de sistemas de produção em regiões com períodos secos e frios prolongados. Sua colheita varia de 18 a 24 meses, em regiões subtropicais, o cultivo é restrito à época mais quente do ano setembro a outubro e março a abril (Santos et al., 2011).

O ciclo fenológico da mandioca pode ser observado na Figura 3. Nos primeiros meses, consiste na brotação das manivas plantadas e, com sete dias após o plantio, ocorre o aparecimento das primeiras raízes. Na segunda fase, observa-se a formação do sistema radicular e a transformação das raízes adventícias em raízes fibrosas. Essa fase dura em média 75 dias. Na terceira fase, ocorre o desenvolvimento da parte aérea da espécie. Esta fase tem duração de 80 a 90 dias.

Na quarta fase, ocorre o engrossamento das raízes de reserva. A partir dessa fase, acontece uma elevada translocação de substâncias de reserva até as raízes e divididas entre folhas e raízes. Finalmente, na quinta fase, a planta perde suas folhas (dormência) para finalizar sua atividade vegetativa e ocorrerá a migração do amido para as raízes de armazenamento. A mandioca tem um ciclo de 12 meses e pode retornar seu crescimento vegetativo logo após esse tempo (Ternes, 2002; Alves, 2006).

Figura 3 – Ciclo fenológico da mandioca

Fonte: Adaptado de Hernández (2014)

As mudanças climáticas influenciaram diretamente no cultivo agrícola, as chuvas irregulares são um dos fatores que contribuem para a baixa produtividade nos últimos anos na região Nordeste (CONAB, 2021). Segundo Lima *et al.* (2011), é importante conhecer a necessidade hídrica das culturas através da evapotranspiração, pois, através dessas análises, sabem-se a quantidade e o fornecimento de água e como dimensionar a irrigação de cada espécie.

2.6 CULTURA DO MILHO

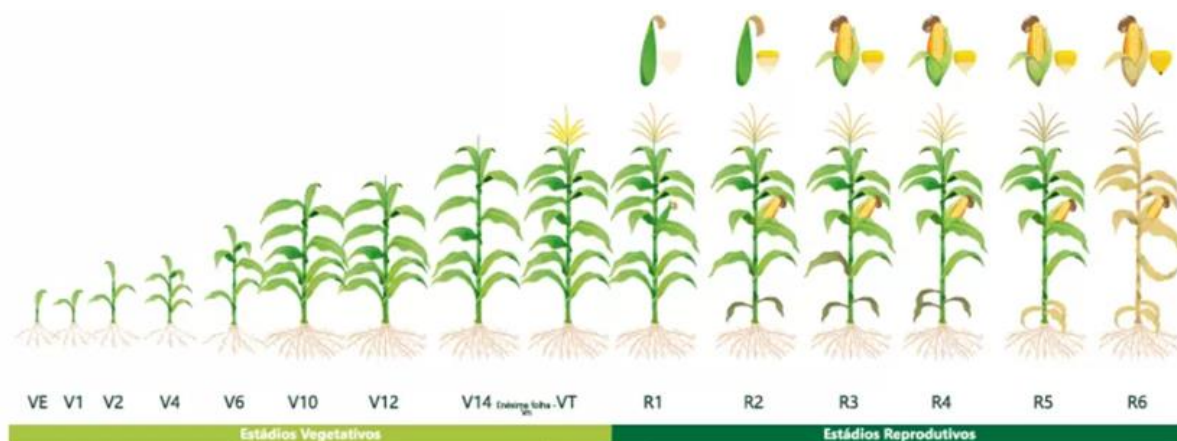
O milho cientificamente conhecido como *Zea mays L.* é um dos cereais mais cultivados e estudados em todo o mundo, possui importância econômica e estratégica pelas suas diversas formas de utilização, entre elas, o uso como insumo na produção de proteína animal, na alimentação humana e na produção de biocombustíveis (CONAB, 2022).

O cultivo do milho na Paraíba é influenciado pelas condições climáticas da região, que apresenta um clima semiárido com chuvas irregularmente distribuídas durante o ano. O período de chuvas ocorre geralmente entre os meses de fevereiro a junho, possibilitando duas épocas de plantio: a primeira safra, plantada no início do ano, e a segunda safra, plantada após a colheita da primeira, entre os meses de junho a agosto (Cruz et al., 2011).

As variações das condições ambientais, como a temperatura e a precipitação precisam ser bem distribuídas para que a cultura do milho atinja seu rendimento máximo em suas fases fenológicas, a pluviosidade preferencialmente tem que ser entre 500 e 800 mm. É importante ressaltar que eventos de estiagem prolongada podem prejudicar a floração e a formação dos grãos (Rossato et al., 2017).

Os estádios fenológicos de acordo com a Figura 4 podem ser subdivididos em subperíodos, definidos como o tempo decorrido entre duas fases consecutivas. Na vegetativa, ocorre a germinação, a brotação, o florescimento, o espigamento e a reprodutiva ligada diretamente à maturação do grão (EMBRAPA, 2006).

Figura 4 – Ciclo fenológico no milho



Fonte: Kluthcouski (2000)

A cultura do milho é uma atividade fundamental na economia da região nordeste, inclusive na Paraíba. O tempo de cultivo varia de acordo com as condições climáticas, com duas safras principais: a safra das águas e a variação da temperatura relacionada à segunda safra (Francelli; Dourado, 2000). As mudanças climáticas são uma ameaça ao cultivo, mas os agricultores estão adotando práticas agrícolas sustentáveis para enfrentá-las e garantir a continuidade do cultivo do milho na região do NEB que enfrenta grandes períodos de instabilidade climática (Lima et al., 2016).

2.7 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA

As variações dos regimes de precipitação e temperatura no território brasileiro são amplamente diversificadas pelas características distintas dos climas predominantes em cada região. O Nordeste destaca-se por apresentar pequenos períodos de estações chuvosas, variando o clima do NEB que vai do semiárido seco ao tropical úmido no litoral (Marengo et al., 2018).

A compreensão da disponibilidade dos recursos hídricos no Nordeste brasileiro, fortemente influenciada pela variabilidade das chuvas, depende diretamente da análise dos padrões de precipitação. Esses estudos são fundamentais para o cálculo do balanço hídrico, o que contribui para um gerenciamento mais eficiente da agricultura e da geração de energia. Além disso, são indispensáveis para a compreensão de eventos extremos, como secas e inundações, cujos impactos são significativos tanto no aspecto social quanto climático (Blacutt et al., 2015).

A combinação dos dados de precipitação e temperatura com as técnicas de sensoriamento remoto pode avaliar de forma mais precisa a situação de seca em uma determinada região. Essas informações são essenciais para lidar com os impactos da seca, como a escassez de água e as consequências para a agricultura, meio ambiente e segurança alimentar (Paiva et al., 2011).

A utilização do mapeamento da temperatura e a precipitação têm contribuído para auxiliar na estimativa da evapotranspiração, principalmente os métodos utilizando técnicas de sensoriamento remoto que têm se mostrando úteis, por conseguirem propiciar a sua estimativa em áreas com grande heterogeneidade e dimensão (Bezerra; Silva; Ferreira, 2008).

2.8 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evaporação (E) corresponde à perda improdutiva de água na forma de vapor da superfície dos oceanos, lagos, solos e vegetação, enquanto a transpiração (T) ocorre pela transferência de nutrientes com a água da raiz até as folhas para a atmosfera, pelos estômatos na forma de vapor de acordo com a Figura 5 (Rind et al., 1990). A evapotranspiração ocorre através dos fenômenos desses dois processos, ela é importante para a determinação da eficiência do uso da água (Singh et al., 2011).

Figura 5 – Esquema do processo de evapotranspiração (ET)



Fonte: Santos (2020)

Segundo observado por Schlesinger e Jasechko (2014), 10% da umidade da atmosfera derivam-se do processo transpiração e os 90% são provenientes do processo de evaporação de diferentes corpos d'água. Para a irrigação das culturas agrícolas, é importante avaliar o solo e a capacidade de água que ele pode armazenar. A evapotranspiração pode ser estudada como um processo simultâneo da evaporação, e a transpiração é influenciada pelas fases fenológicas da vegetação, pelas condições de manejo do solo e principalmente pelas condições climáticas (Teixeira, 2000; Pereira et al., 2002).

Algumas características da vegetação têm influência no processo de análise da evapotranspiração, como o tipo das folhas, a estrutura interna da planta com relação ao transporte de água, o tamanho da raiz, a distribuição dos estômatos, que são

fatores determinantes para se avaliar a capacidade hídrica de todas as espécies de culturas durante as fases de desenvolvimento (Pereira et al., 2002; Taiz; Zeiguer, 2006). De acordo com pesquisas realizadas por Goulart (2011), a partir do monitoramento da evapotranspiração das culturas agrícolas, podem-se estabelecer valores inferiores a 4,5 mm³ em determinado período como sendo seco.

Para medir a evapotranspiração em grandes escalas, é importante avaliar o clima e os efeitos antropogênicos nos ecossistemas naturais e agrícolas (Huete, 2002). Existem métodos para medir ET em escala de campo, mas esses métodos não podem ser extrapolados para áreas maiores, existindo grandes incertezas devido à heterogeneidade espacial e temporal gerando lacunas de dados. Os dados de imagens orbitais podem ser muito úteis, ao fornecerem informações espacial e temporalmente com possibilidades de estudo em escalas regionais e globais para estudar a estimativa de ET (Running, 2017).

2.9 CENSO AGROPECUÁRIO DO BRASIL

O Censo Agropecuário é realizado em todo o território nacional e abrange tanto a produção de grande escala quanto as pequenas propriedades familiares. O censo foi feito pela primeira vez em 1920 e tem periodicidade decenal, com exceção de alguns períodos que contaram com censos intercalados. O Censo Agropecuário mais recente, realizado em 2017, trouxe um retrato detalhado da agricultura brasileira e serviu como um dado de referência para políticas de desenvolvimento rural e investimentos no setor agropecuário (IBGE, 2017).

O Censo Agropecuário é o principal produto com informações sobre os levantamentos da estrutura e produção agrícola do Brasil. Os resultados do levantamento, de âmbito nacional servem de base aos estudos, análises e projeções sobre o setor agropecuário, tornando-se uma ferramenta de acompanhamento que auxilia as políticas públicas, aperfeiçoando cada vez mais o processo de alocação de recursos públicos, principalmente na região Nordeste (IBGE, 2017).

Analisar a base de dados do Censo Agropecuário é fundamental para compreender as especificidades da agricultura nordestina, cuja produção agropecuária é diversificada e possui representatividade no cenário nacional, mesmo com mais de 53% de seu território situado no Semiárido (Brasil, 2018). Essa análise permite identificar potencialidades e fragilidades regionais, subsidiando estratégias

para aumentar a produtividade, melhorar a gestão dos recursos naturais e fortalecer a resiliência das atividades agrícolas frente às limitações climáticas do Semiárido.

Essa característica de diversidade influencia o desempenho das atividades produtivas com relação a ocorrências da seca, sendo o setor agropecuário o principal a ser impactado. De acordo com Martins e Magalhães (2017), o ambiente socioeconômico dos municípios é o principal afetado sobre os impactos das secas no Nordeste e Semiárido.

Na Paraíba, a agricultura pode ser considerada um setor econômico com a capacidade de transformar a vida e a economia de comunidades, muitas vezes superando uma série de dificuldades, como, por exemplo, as de natureza climática, com a necessidade de adaptações e estratégias de convivência com a estiagem (Lima; Magalhães, 2018).

Desta forma, a caracterização do setor da agricultura paraibana proporcionou o desenvolvimento de políticas públicas, permitindo a geração de melhorias nas condições de vida, geração de emprego e renda para a população que vive no meio rural e/ou que fazem uso comercial dessas práticas (Santana; Santos, 2019).

Os dados coletados no Censo Agropecuário são utilizados por diversos órgãos governamentais, universidades, pesquisadores e profissionais da área de planejamento rural e agropecuário (Silva, 2002). Esses dados são essenciais para a formulação de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento rural, como a distribuição de subsídios e a implementação de programas de assistência técnica e possibilita a estratégias de desenvolvimento rural e pesquisas no campo da geografia, economia rural e agricultura (Mapa, 2024).

2.10 ÍNDICES DE SECA A PARTIR DE DADOS GEOESPACIAIS

A combinação de dados de sensoriamento remoto com medições terrestres tem se mostrado eficaz na melhoria da caracterização espacial da seca. Estudos têm mostrado que dados de satélite podem fornecer informações valiosas em regiões sem extensas redes meteorológicas (Khandelwal et al., 2023). A utilização de dados de sensoriamento remoto, como os fornecidos pelos satélites MODIS e CHIRPS, permite monitorar variações de evapotranspiração, ocorrência de precipitações e variações de temperatura para geração de informações históricas devido à disponibilidade do banco de dados desses satélites (Running et al., 2017).

Esses dados são processados pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permite a análise espacial e a visualização de padrões de risco de seca e, ao combinar essas informações com características locais, como o tipo de solo e o uso da terra, é possível gerar mapas de risco de seca (Rossato et al., 2017).

Ao longo de 20 anos, mais de 40 tipos de índices de vegetação foram desenvolvidos para monitorar o comportamento da vegetação em diferentes fases fenológicas, muitos deles baseados em dados espectrais de satélites como o Landsat. Entre os índices de vegetação mais utilizados estão o Índice de Vegetação por Razão (IVR), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), Índice de Vegetação Realçado (IVR), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) e Índice de Condição de Vegetação (ICV), que avaliam as características das plantas através da interação com faixas do espectro eletromagnético, especialmente do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) (

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) é utilizado em vários estudos para avaliar a saúde da vegetação e as condições de seca. Muitos desses estudos podem ser integrados a outros índices, como o Índice de Condição de Vegetação (ICV) e o Índice de Condição de Temperatura (ICT), para melhorar as previsões de rendimento de culturas (Akcapinar et al., 2024).

A integração de modelos de previsão climática com análises de risco de seca permite uma avaliação mais precisa e proativa dos riscos (Saini et al., 2022). Modelos climáticos de curto, médio e longo prazo, como os baseados em dinâmicas climáticas ou em estatísticas históricas podem prever as condições climáticas futuras que influenciam o risco de seca (Sánchez et al., 2016). Ao combinar dados geoespaciais e modelos de risco, é possível identificar áreas que provavelmente estarão em risco de seca nos meses ou anos seguintes, permitindo que os agricultores e gestores públicos adotem medidas preventivas de forma mais eficaz (Wu et al., 2024).

Os modelos baseados em satélite aprimoram os sistemas de alerta precoce, fornecendo dados oportunos e precisos sobre a saúde da vegetação e a umidade do solo, permitindo uma melhor gestão agrícola e estratégias de mitigação da seca. Por exemplo, a integração do aprendizado profundo com simulações climáticas permite a previsão de longo prazo dos impactos da seca em vários cenários climáticos (Shams Eddin et al., 2024).

Os dados de sensoriamento remoto orbital atualmente podem ajudar a prever, mitigar e monitorar os diferentes tipos de seca. Vários índices usados para o monitoramento de secas foram desenvolvidos nas últimas décadas usando dados de sensoriamento remoto (Liu, 2015). Eles são calculados a partir da reflectância em diferentes bandas e podem ser obtidos de acordo com cada pixel, a depender da resolução do sensor.

As vantagens dos índices gerados a partir dos dados de sensoriamento remoto orbital sobre os índices convencionais acontecem graças à possibilidade de mapeamento e monitoramento, principalmente de grandes áreas, e podem detectar a variabilidade do comportamento das secas (Wang et al., 2004).

Técnicas e ferramentas do sensoriamento remoto estão sendo utilizadas com muita frequência para estudar diversos fenômenos em diversas escalas. O sensor MODIS vem se destacando pelo acervo de imagens e produtos disponibilizados em escala global, como no estudo de Duft e Picoli (2018), que identificaram seca agrícola em diferentes culturas.

Atualmente, com o avanço das geotecnologias, e mais precisamente do sensoriamento remoto, diversos dados robustos sobre a superfície da Terra são disponibilizados diariamente. Os dados de sensoriamento remoto são de grande utilidade para estudos que avaliam áreas afetadas por eventos hidrológicos extremos, como seca agrícola e a interferência da ação antrópica nos processos ambientais. Esses estudos podem ser empregados mediante a utilização de índices de vegetação em diferentes escalas regionais ou globais (Fernández et al., 2016; Dechant; Moradkhani, 2015). A partir desses conhecimentos e da elaboração de modelos que avaliam o comportamento das culturas agrícolas, podem ser feitos planejamentos que sejam compatíveis com a capacidade de suporte de tais culturas, viabilizando a previsão de sua produtividade (Marques et al., 2010).

2.11 ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS

A análise espacial multicritério por meio da metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é uma ferramenta poderosa para auxiliar na tomada de decisão e no estabelecimento de prioridades sobre cada decisão em problemas com multicritérios, tendo como finalidade minimizar a subjetividade de uma determinada análise. Ele permite estruturar o problema em uma orientação de objetivos, critérios e alternativas, facilitando a análise e priorização. No contexto da avaliação de risco de seca agrícola,

a AHP é fundamental por combinar dados de SR e informações sobre culturas agrícolas, atribuindo pesos relativos a fatores como incidência, temperatura e evapotranspiração (Khaleghi; Mahmoodi, 2017). Essa abordagem facilita a identificação de áreas mais vulneráveis à seca, considerando as interrelações entre os critérios.

Ao integrar vários fatores como precipitação, temperatura, uso da terra, textura do solo e relevo, a AHP auxilia na avaliação da vulnerabilidade e exposição à seca (Zhyan et al., 2021; Gao et al., 2023). Essa abordagem permite a criação de modelos abrangentes de avaliação do risco de seca que consideram todos os componentes do risco, tais como perigo, vulnerabilidade e capacidade de mitigação, levando a estratégias eficazes de mitigação da seca adaptadas a diferentes regiões, com base nas suas características específicas (Kundu et al., 2021). A utilização de técnicas de sensoriamento remoto e as ferramentas de geoprocessamento aumentam a precisão do mapeamento dos riscos à seca agrícola, permitindo a identificação de áreas sensíveis à seca e a melhoria das medidas de mitigação. A metodologia AHP, quando combinada com técnicas geoespaciais, proporciona um quadro robusto para compreender e abordar a distribuição espacial do risco de seca agrícola, crucial para aumentar a resiliência em regiões propensas à seca.

Para mapear o risco de seca agrícola usando análise espacial multicritério com a metodologia AHP, pode-se realizar uma abordagem a partir de um índice multidimensional integrando sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica (Ujjal, 2022). Essa abordagem envolve a identificação da vulnerabilidade agrícola à seca (ADV) através de índices de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, com pesos atribuídos com base na importância relativa utilizando a abordagem AHP.

Além disso, estudos destacaram a importância dos modelos híbridos de inteligência artificial na melhoria do desempenho dos modelos tradicionais de aprendizado de máquina para modelagem multivariada de secas (Running, 2017). Modelos bayesianos hierárquicos têm sido recomendados para prever secas agrícolas em regiões espacialmente diversas, capturando efetivamente variações de subgrupos e diferenças espaciais (Bendini et al., 2023). Ao combinar essas metodologias, os investigadores podem criar mapas de risco abrangentes que consideram vários fatores que contribuem para a vulnerabilidade agrícola à seca em diferentes escalas espaciais.

A metodologia AHP tem se mostrado eficaz no mapeamento do risco de seca agrícola na região semiárida do Brasil. Estudos destacaram a importância dos dados de sensoriamento remoto, como o VCI e o EVI, na identificação de áreas propensas à seca (Lima et al., 2023).

Pesquisas sobre os impactos da seca no Estado do Ceará enfatizaram a importância dos relatórios locais na compreensão dos impactos ao nível do solo, indicando a normalização de certos efeitos relacionados à seca e as limitações dos índices hidroclimáticos tradicionais no desencadeamento de respostas de emergência (Walker et al., 2023). De acordo com Menezes et al. (2021), os índices multidimensionais, ao incorporarem os determinantes sociais, fornecem uma avaliação abrangente do risco de seca agrícola, permitindo estratégias de mitigação direcionadas para as regiões semiáridas do Brasil.

2.12 VULNERABILIDADE AMBIENTAL RELACIONADA À SECA

A avaliação da vulnerabilidade das culturas agrícolas ao risco de seca é um componente essencial na modelagem de risco, que depende de fatores como a resistência das culturas à falta de água, o ciclo de crescimento e a interação com as condições climáticas (Gutiérrez et al., 2014). A vulnerabilidade ambiental relacionada com a agricultura é uma preocupação significativa em todo o mundo, conforme destacada em várias pesquisas.

A definição de vulnerabilidade frequentemente usada nos estudos climáticos é a do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2017), que a descreve como o grau em que um sistema é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos adversos das mudanças climáticas, incluindo a variabilidade e os extremos climáticos. Essa definição envolve três componentes principais: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa e, quando se trata de estudos sobre culturas de sequeiros, é importante analisar a questão de diferentes níveis de sensibilidade à seca e as regiões onde estão alocadas essas culturas com relação à disponibilidade dos recursos hídricos e às variações climáticas (Silva et al., 2013).

As variações climáticas também afetam os ecossistemas agrícolas, influenciando as vulnerabilidades a eventos climáticos externos, como chuvas fortes e secas (Chen et al., 2020). Para solucionar esses desafios, métodos inovadores como a análise de características espaciais, baseada na análise de componentes principais, têm sido propostos para avaliar a vulnerabilidade de ambientes agrícolas

com alta precisão e baixo custo (Jadhav et al., 2024). Essa análise de vulnerabilidade é **crucial** para o desenvolvimento de recomendações específicas aos agricultores. Ela permite ajustar práticas agrícolas e políticas de supervisão com base na exposição e na capacidade de adaptação das culturas ao risco de seca (Turner et al., 2003).

Estudos recentes têm destacado a importância de utilizar Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e análises espaciais para avaliar a vulnerabilidade agrícola das mudanças climáticas. As avaliações de vulnerabilidade em nível global têm identificado países e regiões mais suscetíveis a choques climáticos que afetam a agricultura, permitindo uma comparação entre diferentes áreas e ajudando na tomada de decisões a nível regional e até mesmo nacional (Senapati; Kumar, 2022).

Especificamente na agricultura, a vulnerabilidade é, muitas vezes, medida através de índices que combinam múltiplos indicadores para refletir a complexidade das interações entre exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Esses índices ajudam a identificar áreas e comunidades mais vulneráveis, informando estratégias de adaptação e mitigação para enfrentar as consequências das mudanças climáticas (Schroter et al., 2004).

Para analisar a vulnerabilidade das culturas de feijão, milho e mandioca aos índices de culturas agrícolas, pode-se utilizar uma função de produção polimórfica de índice único que relaciona a produção agrícola à temperatura, conforme demonstrado em um estudo que avalia a vulnerabilidade das mudanças climáticas (Sebo, 2023).

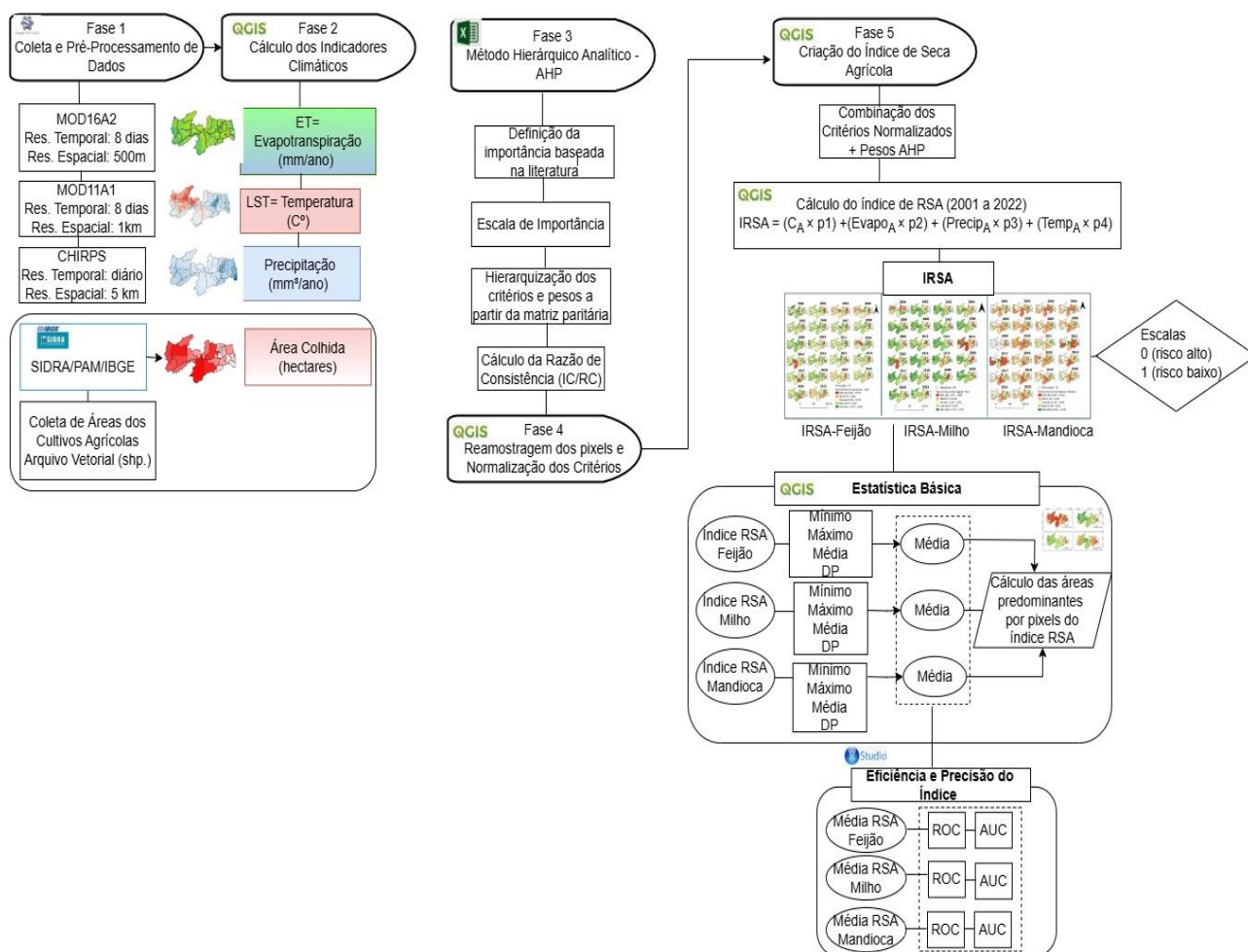
Para previsões de impactos na agricultura, é importante considerar indicadores extremos para demonstrar como a produtividade das culturas de terras secas pode fornecer informações sobre a relação entre a disponibilidade de água e o estresse agroclimático regional, conforme mostrado em um estudo que analisa os índices extremos de previsão e produtividade agrícola no Rio Grande do Norte (Vale et al., 2020). Ao integrar essas abordagens e fontes de dados, uma análise abrangente da vulnerabilidade das culturas de feijão, milho e mandioca aos índices de culturas agrícolas pode ser alcançada (FAO, 2022).

3 MATERIAS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa, adotou-se o método hipotético-dedutivo, fundamentado no uso de técnicas estatísticas, comparativas e matemáticas aplicadas à análise espacial das áreas que compõem as microrregiões da Paraíba. Segundo Gomes (2011), o uso de técnicas de análise simples e multivariada, associadas à análise seriada e espacial, possibilita a modelagem de grandes volumes de dados, além de contribuir para a representação espacial dos fenômenos geográficos estudados (Christofolletti, 1982).

Para compreender melhor a proposta deste estudo, o fluxograma na Figura 6 mostra todas as etapas da metodologia da pesquisa para a obtenção do índice de risco de seca agrícola baseado em dados de sensoriamento remoto e análise multicritério.

Figura 6 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos



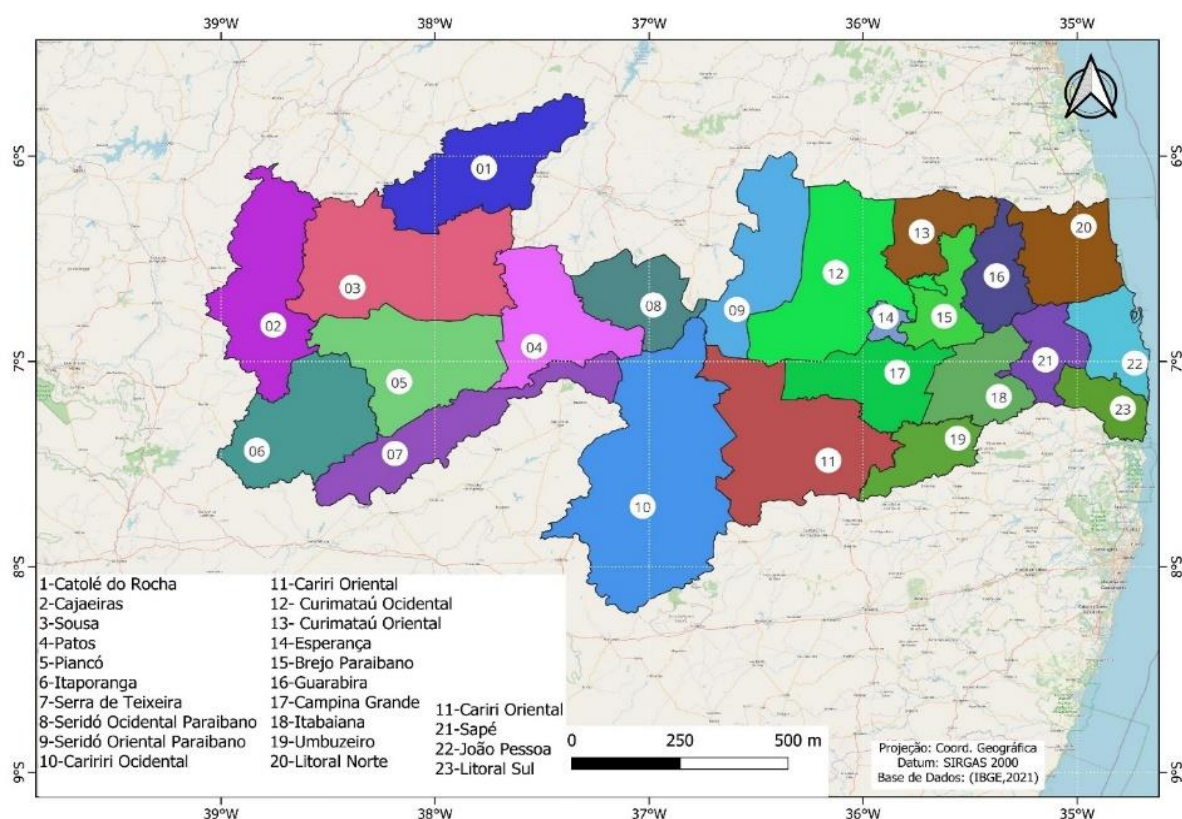
Fonte: Dados da pesquisa (2025)

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado nas 23 microrregiões no estado da Paraíba, de acordo com a divisão do IBGE de 2017. A Paraíba está situada no NEB, mais precisamente entre as coordenadas geográficas 5,87°S e 8,37°S e 38,87°O e 34,62°O (Figura 7). A Paraíba é composta por 223 municípios e possui uma população estimada de 4.030.961 habitantes, sendo que mais de 50% residem em ambientes urbanos (IBGE, 2023).

A escolha dessa escala de análise se justifica pela possibilidade de compreender as dinâmicas territoriais de forma regionalizada, considerando aspectos socioeconômicos, ambientais e produtivos que variam significativamente entre o litoral, agreste e sertão paraibanos. Cada microrregião apresenta características específicas quanto ao uso e ocupação do solo, práticas agrícolas, disponibilidade hídrica, vulnerabilidade climática e indicadores sociais, o que permite uma leitura mais precisa dos contrastes e desigualdades espaciais presentes no território estadual.

Figura 7 – Localização e distribuição das microrregiões da Paraíba



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

3.1.1 Clima

O clima do Estado da Paraíba é predominantemente tropical, com variações significativas entre o litoral, o agreste e o sertão. Na faixa litorânea, o clima é úmido e quente, com temperaturas médias anuais entre 24 °C e 28 °C e chuvas concentradas entre os meses de março e agosto (Brito et al., 2021). Na porção do agreste, a umidade diminui, e o clima torna-se semiárido, apresentando maiores variações térmicas e menor índice pluviométrico. No sertão paraibano, o clima é tipicamente semiárido quente, caracterizado por longos períodos de seca, altas temperaturas e chuvas escassas e irregulares, geralmente concentradas em poucos meses do ano (Silva et al., 2019).

De acordo com Souza et al. (2022), a região litorânea é mais amena devido à influência marítima, enquanto o interior registra maiores amplitudes térmicas. Essa irregularidade pluviométrica afeta diretamente as atividades econômicas da região, principalmente a agropecuária. Os ventos alísios e a influência do relevo contribuem para a distribuição desigual das chuvas no estado (Souza et al., 2022).

No que tange a evapotranspiração, esse fenômeno é intenso nessa região, especialmente nas áreas semiáridas, onde a combinação de altas temperaturas, baixa umidade e ventos constantes favorece a perda de água do solo e das plantas (Lima et al., 2021). Esse processo contribui para a aridez e a escassez hídrica em grande parte do território paraibano. Assim, a diversidade climática da Paraíba está intimamente ligada aos fatores geográficos, como altitude, latitude e proximidade com o oceano Atlântico.

3.1.2 Vegetação

A vegetação na Paraíba é marcada pela diversidade, refletindo as variações climáticas e geográficas do território. No litoral, predominam os remanescentes de Mata Atlântica, com espécies de grande porte, elevada biodiversidade, pois possui clima úmido, o que favorece o crescimento da vegetação (Medeiros et al., 2019). Na mesorregião do Agreste, a vegetação possui características de transição entre a mata e o semiárido, apresentando formações de caatinga arbustiva e áreas de mata seca (Silva et al., 2018). Na mesorregião do Sertão, predomina a vegetação do tipo Caatinga, que se caracteriza por ser uma vegetação típica do clima semiárido. A vegetação nessa região apresenta plantas adaptadas à escassez de água, como cactos, arbustos espinhosos e árvores de pequeno porte com folhas pequenas ou

caducas (IBGE, 2019). Essa vegetação é xerófila, ou seja, resistente à seca e desempenha papel fundamental na proteção do solo contra a erosão. A ação humana, especialmente o desmatamento e o uso inadequado do solo, tem causado degradação significativa desses biomas, exigindo medidas de conservação para garantir a sustentabilidade ambiental no estado.

3.1.3 Solos

Os solos do Estado da Paraíba apresentam grande diversidade, resultado da combinação entre relevo, clima, vegetação e material de origem. No litoral e na zona da mata, predominam os solos argilosos e férteis, como os Latossolos e os Nitossolos, favorecendo atividades agrícolas mais intensivas. No agreste, os solos são mais rasos e pedregosos, com presença de Planossolos e Neossolos, que exigem técnicas específicas para o cultivo. Já no sertão, predominam os solos do tipo Litólicos e Cambissolos, geralmente rasos, pedregosos e de baixa fertilidade natural, dificultando a agricultura sem o uso de correções e tecnologias apropriadas (Brasil, 1972). Além disso, a baixa cobertura vegetal e os períodos prolongados de seca contribuem para a degradação e a erosão dos solos, especialmente nas áreas semiáridas. A conservação dos solos paraibanos requer práticas sustentáveis, como o manejo adequado da água, a rotação de culturas e o reflorestamento, a fim de garantir sua produtividade e preservar os ecossistemas locais.

3.1.4 Setores econômicos

Um dos setores econômicos que mais se destaca no estado é o primário, composto pelos principais produtos produzidos extensivamente, como o abacaxi, a cana-de-açúcar, feijão, a mandioca, o algodão, a criação de bovinos, suínos, caprinos e ovinos, entre outros (Silva, 2014).

A agricultura do Estado da Paraíba desempenha papel fundamental na economia regional, especialmente nas zonas rural e semiárida, onde predomina a agricultura familiar. Entre as principais culturas cultivadas, destacam-se o feijão-caupi, a mandioca e o milho, que têm grande importância tanto para o consumo interno quanto para a geração de renda. O feijão-caupi, também conhecido como feijão-de-corda, é bastante adaptado às condições do semiárido, resistente à seca e amplamente cultivado no sertão e agreste. A mandioca é uma cultura versátil, cultivada em todo o estado, utilizada tanto para alimentação humana quanto para a

produção de farinha e ração animal. O milho é uma das culturas mais tradicionais, plantado em larga escala no agreste e sertão, especialmente durante o período chuvoso. Essas atividades agrícolas são impactadas pelas variações climáticas, exigindo o uso de tecnologias como sementes resistentes à seca e práticas de manejo sustentável para garantir produtividade.

3.2 O ÍNDICE DE RISCO DE SECA AGRÍCOLA

Os indicadores climáticos usados neste estudo foram temperatura da superfície, evapotranspiração (ET) e precipitação. Para a construção do Índice de Risco de Seca Agrícola (IRSA), foi empregada a funcionalidade da calculadora raster no QGIS 3.28, permitindo a integração de múltiplos critérios ambientais previamente normalizados e o uso de pesos. Para compor o índice, as variáveis consideradas foram (a) área colhida (ha), (b) evapotranspiração (ET), (c) precipitação (mm) e (d) temperatura da superfície (°C), de acordo com a Equação 1.

$$IRSA = (C_A \times p1) + (Evapo_A \times p2) + (Precip_A \times p3) + (Temp_A \times p4) \quad (Eq. 1)$$

Onde: C é a área colhida do cultivo agrícola estudado, Evapo é a evapotranspiração anual, Precip é a precipitação anual, Temp é a temperatura anual, _A é o ano da série histórica, e p são os pesos das ponderações.

Os níveis do IRSA definidos neste estudo variaram entre 0 e 1, sendo que valores mais próximos de 0 indicam seca agrícola e mais próximos de 1 indicam não ocorrência de seca. As variáveis utilizadas neste estudo foram consideradas as que mais influenciam a ocorrência e a intensidade da seca agrícola, considerando a variabilidade espacial dos dados e suas respectivas importâncias relativas. Cada uma dessas variáveis foi previamente normalizada para garantir comparabilidade em uma escala comum, evitando distorções no resultado causadas por unidades de medida distintas.

3.3 DADOS CENSITÁRIOS: ÁREA COLHIDA

Inicialmente, para a definição das culturas analisadas neste estudo, foram analisadas aquelas mais representativas na Paraíba, levando em consideração a variável área colhida (em hectares), considerando os dados da Produção Agrícola Municipal (PAM). O PAM contém informações sobre as áreas colhidas da produção

agrícola anual para todo o território nacional, bem como das suas regiões geográficas, unidades da federação, mesorregiões, microrregiões e municípios (IBGE, 2020). Os dados do PAM são obtidos via aplicação de questionários nos municípios de todo o território nacional. O banco de dados do PAM é composto por uma série temporal de 1974 aos anos atuais de culturas temporárias e permanentes (Souza, 2019; IBGE, 2021).

Após essa análise prévia, foram escolhidos os dados censitários referentes à área colhida das culturas permanentes de feijão-caupi, milho e mandioca, registrados para cada microrregião da Paraíba, para o período de 2001 a 2022. Esses dados estão disponibilizados no banco de dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA, no sítio eletrônico disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>. O SIDRA permite realizar consultas de todos os indicadores econômicos, como os dados de rendimento, inflação, indústria, comércio, serviços, agropecuária e o Produto Interno Bruto (PIB).

O banco de dados da plataforma SIDRA é alimentado por diferentes fontes, como os agentes de pesquisa do setor agrícola, incluindo agricultores, cooperativas, secretários de agricultura, extensão rural e agentes sobre as atividades agrícolas dos municípios ou região onde atua. São levantamentos realizados anualmente que geram boletins de acompanhamento e monitoramento das safras de grãos brasileiras e de atividades agrícolas. Os dados de área colhida anual de cada microrregião da Paraíba foram baixados para a construção do banco de dados utilizado neste estudo. Para a pesquisa, foram baixados dados anuais das culturas do feijão-caupi, milho e mandioca, cujo plantio corresponde a 75% das áreas cultiváveis em quase todas as microrregiões paraibanas (IBGE, 2021).

3.4 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS OBTIDAS POR SENSORIAMENTO REMOTO

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (MODIS, 2011) e do *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data* (CHIRPS) (Funk et al., 2015). Nesta pesquisa, foram inicialmente implementados scripts para selecionar e coletar as imagens dos produtos MODIS e CHIRPS, na plataforma *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick et al., 2017), a qual possui um vasto banco de dados desses produtos.

Em seguida, as imagens foram reprojetaadas em coordenadas geográficas e Datum SIRGAS 2000. Todos os processamentos das imagens de precipitação, temperatura e evapotranspiração foram realizados no GEE, uma vez que a plataforma tem sido bastante utilizada por facilitar o processamento de grandes quantidades de dados espaciais usando linguagem de programação JavaScript. Em seguida, os dados de precipitação, temperatura e evapotranspiração foram extraídos para cada microrregião da Paraíba.

3.4.1 Temperatura

Nesta pesquisa, foram usados dados de temperatura MOD11A1 versão 061 dos anos estudados, que fornecem uma média de 8 dias por pixel com uma resolução espacial de 1 km. Esse produto fornece dados com as faixas de temperatura de superfície diurnas e noturnas, sendo associadas às avaliações de controle de qualidade e com tempo de observação pelas emissividades dos tipos de cobertura da terra. Os dados de temperatura foram obtidos pelo sensor MODIS instalados a bordo dos satélites Terra e Aqua. O sensor MODIS é projetado com o intuito de coletar dados sobre a atmosfera, oceano e a superfície da terra. Os muitos dados derivados de observações do MODIS descrevem características da terra, dos oceanos e da atmosfera, que podem ser usados para estudos de processos e tendências desde uma escala local até uma escala global. O MODIS possui 36 bandas espectrais entre 0,405 e 14,385 μm , adquirindo imagens em três resoluções espaciais – 250 m, 500 m e 1.000 m, com cobertura global diária a cada 1 ou 2 dias (MODIS, 2011). Tem sido utilizado com grande frequência em estudos de monitoramento das mudanças climáticas e meteorológicas, em escalas regionais e globais, no uso e cobertura do solo e no mapeamento de secas (Teixeira et al., 2013).

A temperatura da superfície é um dos elementos climáticos de maior importância para o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Ayoade, 2012). Para a obtenção do cálculo de temperatura da superfície das áreas de estudo, foi calculada a média diária, com base na Equação 2.

$$NC = (LST_D + LST_N) / 2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: NC é a temperatura diária em graus Kelvin, LST_D é a temperatura da superfície diária diurna, e LST_N é a temperatura da superfície diária a noite.

Em seguida, a temperatura da superfície em $^{\circ}\text{C}$ foi obtida usando a Equação 3.

$$TC = (NC \times 0,02) - 273,15 \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: TC é o valor da temperatura da superfície estimada em °C para cada *pixel* no produto MOD11A2.

3.4.2 Evapotranspiração

Os dados de evapotranspiração MOD16A2 foram utilizados para analisar a influência desse fenômeno no índice de risco de seca agrícola. Para a análise da evapotranspiração (ET) na área de estudo, foi utilizado o produto MOD16A2 versão 6 com valores de pixel para a camada da ET. O ET é a soma dos fluxos de vapor de água com relação à evaporação do dossel úmido ou seco da transpiração da planta na superfície terrestre, nos períodos noturno e diurno (Los et al., 2000).

O produto MOD16A2 é composto com valores de dados de 8 dias e resolução espacial de 500 metros e fator de correção de 0,1. O MOD16A2 é baseado na lógica da equação de *Penman-Monteith*, a qual unifica as entradas de dados de reanálise meteorológica diária juntamente com produtos de dados de sensoriamento remoto do MODIS. O modelo utilizado para o produto MOD16A2 foi proposto por Mu et al. (2011).

O MOD16A2 produz imagens a cada 8 dias, gerando mensalmente 4 imagens. Para a análise da ET (mm/ano) da área, foram realizados alguns procedimentos para a conversão de kg/m²/8day para mm/dia. Os dados de evapotranspiração foram obtidos pela média anual e multiplicados pelo fator de correção (0,1), conforme a metodologia de Yang et al. (2017).

3.4.3 Precipitação

O outro produto utilizado nesta pesquisa foi o CHIRPS. Esse conjunto de dados matriciais possui dados de precipitação diária em escala global, com resolução espacial de 0,05°, com uma série temporal disponível de mais de 30 anos. O CHIRPS é construído com base em uma climatologia que incorpora informações de satélite para representar áreas com baixa densidade de medições. Ele fornece estimativas de precipitação diárias, a cada cinco dias e mensais, cobrindo o período de 1981 até o presente. Esse produto utiliza dados de estações *in situ* para criar séries temporais de chuva em grade para análise de tendências e monitoramento de precipitação. Além disso, esse produto combina dados de estações pluviométricas para gerar duas versões: uma preliminar, com latência de aproximadamente 2 dias, e uma versão final,

com latência média de cerca de 3 semanas (Funk et al., 2015). O CHIRPS utiliza um procedimento inovador de combinação de dados, que incorpora a estrutura de correlação espacial das estimativas de precipitação para atribuir pesos no processo de interpolação, para minimizar a influência de falsos zeros e de observações erradas.

3.5 MÉTODO HIERÁRQUICO ANALÍTICO

O Processo Hierárquico Analítico (AHP) foi proposto por Saaty (1990) e é uma espécie de método de análise de decisão que combina análises qualitativas e quantitativas. É feita com base na matriz de julgamento de pontuação da importância relativa dos dois ou mais indicadores, que depois são agregados, e finalmente calculados os pesos de cada fator (Hoque et al., 2020; Zarei et al., 2021).

A ordem de importância dos critérios e os pesos de cada parâmetro foram determinados com base na relevância de cada um, minuciosamente investigada em literaturas pertinentes sobre a influência na prevalência da seca.

3.5.1 Definições das importâncias baseadas na literatura

A definição dos fatores de predisposição levou em consideração a análise de trabalhos anteriores expostos no Quadro 1. Ao todo, foram avaliados 15 estudos elaborados entre 2016 e 2024, em diferentes países, abordando a metodologia do processo hierárquico analítico (AHP), variando entre os métodos qualitativos e quantitativos de acordo com Alharbi et al. (2022), Elusma et al. (2022), Silva et al. (2013), Ihinegbu e Ogunwumi (2022), Golian et al. (2015), Gonçalves et al. (2016), Hoque et al. (2021), Khaleghi e Mahmoodi (2017), Mokarram et al. (2021), Palchaudhuri e Biswas (2016), Pandey e Srivastava (2019), Saini (2022), Talhofer (2019), e Zagade e Umrikar (2022).

Quadro 1 – Revisão de estudos de modelos e índices para risco de seca

Nº	Título	Fonte	Variáveis usadas na elaboração da pesquisa
1	Assessment of Drought vulnerability through an integrated approach using AHP and Geoinformatics in the Kangsabati River Basin.	Alharbi et al. (2022)	NDVI, temperatura, relevo, e VCI

2	Agricultural drought risk assessment in the Caribbean region: The case of Haiti.	Elusma et al. (2022)	Temperatura, Precipitação, Relevo, Evapotranspiração, NDVI e Elevação.
3	Comparação entre metodologias heurísticas e bivariadas de análise de suscetibilidade a escorregamentos como método de prevenção a desastres naturais na mesorregião da Zona da Mata mineira.	Figueiredo (2021)	Declividade, NDVI, e Temperatura
4	Multi-criteria modelling of drought: A study of Brandenburg Federal State, Germany	Ihinegbu e Ogunwumi (2022)	Temperatura, precipitação, NDVI, e LULC
5	Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran	Golian et al. (2015)	Precipitação, umidade do solo, e MDE
6	Classificação de estratos florestais utilizando redes neurais artificiais e dados de sensoriamento remoto.	Gonçalves et al. (2016)	Inventário florestal, NDVI e precipitação
7	Agricultural drought risk assessment of Northern New South Wales, Australia using geospatial techniques.	Hoque (2021)	LULC, elevação, declividade, temperatura, precipitação, e umidade do solo
8	Assessment of flood hazard zonation in a mountainous area based on GIS and analytical hierarchy process.	Khaleghi e Mahmoodi (2017)	NDVI, declividade, precipitação, LULC, e MDE
9	Determining and forecasting drought susceptibility in southwestern Iran using multi-criteria decision-making (MCDM) coupled with CA-Markov model.	Mokarram et al. (2021)	LULC, evapotranspiração, precipitação, declividade, relevo, e textura dos solos
10	Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya district, India.	Palchaudhuri e Biswas (2016)	Temperatura, precipitação, evapotranspiração, umidade relativa, LULC, e cultivos agrícolas
11	Integration of microwave and optical/infrared derived datasets for a drought hazard inventory in a subtropical region of India.	Pandey e Srivastava (2019)	Temperatura, precipitação, NDVI, evapotranspiração, e LULC
12	Geoinformatics and analytic hierarchy process-based drought vulnerability	Saini (2022)	Precipitação, temperatura, evapotranspiração,

	assessment over a dryland ecosystem of north-western India.		LULC, produção agrícola, e densidade populacional
13	Šárka Spatial data quality in multi-criterial analysis for decision making process.	Talhofer (2019)	Tipos de vegetação, tipos de solo, e precipitação
14	Drought severity modeling of upper Bhima river basin, western India, using GIS–AHP tools for effective mitigation and resource management.	Zagade e Umrikar (2022)	NDVI, precipitação, profundidade do solo, LULC, e densidade de drenagem
15	Examining the drivers of forest cover change and deforestation susceptibility in Northeast India using multicriteria decision-making models.	Guria et al. (2024)	Precipitação, temperatura, evapotranspiração, NDVI, e LULC

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Dos fatores listados no Quadro 1, os mais citados para elaboração dos modelos e índices quando se trata do risco à seca, foram: (a) precipitação, (b) evapotranspiração, (c) temperatura, d) NDVI, (e) cobertura e uso do solo e (d) cultivos agrícolas.

Nessa pesquisa, os fatores foram selecionados com base na análise do levantamento bibliográfico citado acima e na disponibilidade de bases de dados que permitiram o manejo acessível das informações, favorecendo o uso de bases de ampla acessibilidade e fomentadas por órgãos governamentais.

3.5.2 Hierarquização dos critérios a partir da matriz paritária

A construção da matriz de comparação paritária teve como objetivo analisar a importância relativa dos critérios e suas respectivas classes dentro da estrutura hierárquica do modelo. Essa matriz é quadrada, com ordem igual ao número de elementos subordinados ao mesmo nível hierárquico (ou ao mesmo "nó" superior). Os elementos são dispostos na mesma sequência nas linhas e colunas.

Cada par de elementos é comparado com base em sua importância relativa, utilizando-se uma escala de julgamentos como a apresentada na Tabela 3. A comparação par a par permite identificar qual elemento é mais importante e em que grau, com base em conhecimentos técnicos, empíricos e bibliográficos.

A Tabela 1 ilustra, genericamente, uma matriz de julgamento para n alternativas (a_1, a_2, \dots, a_n), em que x_{ij} representa a importância relativa do elemento a_i em relação a a_j . A matriz é recíproca, ou seja, se $a_{ij} = 3$, então $a_{ji} = 1/3$. A diagonal principal é composta por valores iguais a 1, pois cada elemento comparado consigo mesmo tem importância igual.

Na escala de Saaty (1990), cada importância deve ser baseada na Tabela 2, buscando-se primeiro a importância conceitual e, em seguida, a conversão para a escala numérica para registrar na matriz.

Tabela 1 – Matriz de comparação paritária

	a_1	a_2	...	a_n
a_1	1	a_{12}	...	a_{1n}
a_2	$1/a_{12}$	1	...	a_{2n}
...
a_n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$...	1

Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

Tabela 2 – Escala de importância dos critérios

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra
5	Mais importante	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra
7	Muito importante	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra
9	Importância extrema	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição entre duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

3.5.3 Importância e pesos definidos

A determinação da ordem de importância dos critérios foi baseada nos julgamentos da matriz paritária e fundamentada a partir das literaturas sobre seca agrícola e conhecimento científico das características de cada microrregião. Segundo Olaseeni et al. (2021), é essencial explicitar a prioridade das variáveis analisadas. A ordem definida foi:

1ª. Ordem: Cultivos agrícolas (milho, mandioca e feijão-caupi): Fortemente sensíveis às condições climáticas, como precipitação, temperatura e umidade do solo.

2ª. Ordem: Evapotranspiração: Altas taxas indicam perda de umidade do solo, principalmente em regiões de baixa precipitação.

3ª. Ordem: Precipitação: Fundamental para a disponibilidade de água para o solo e plantas. Sua escassez é um dos principais causadores da seca.

4ª. Ordem: Temperatura: Altas temperaturas intensificam a evapotranspiração e reduzem a umidade do solo, afetando diretamente a produtividade agrícola.

3.5.4 Cálculo da Razão de Consistência

Para confirmar a coerência da intensidade de importância das matrizes de comparações paritárias e certificar que dados obedecem a uma lógica e estão se relacionados ou não, realizou-se a análise de consistência, dividida em três passos. O primeiro passo é a determinação do autovalor máximo (λ_{\max}) a partir da Eq. 4:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n T_j \times P_j \quad (\text{Eq. 4})$$

onde, T_j é o somatório da coluna j , e P_j é a prioridade calculada para o critério localizado na linha j

O segundo passo é a determinação da matriz do índice de consistência (Índice de Consistência - IC), que permite comparar quando o λ_{\max} tiver o valor igual ao número da ordem da matriz “ n ”, ou seja, número de linhas e colunas iguais. Quanto mais proximidade tiver o valor λ_{\max} com o de n , maior será a consistência do resultado. O IC é calculado usando a Eq. 5:

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (\text{Eq. 5})$$

onde, λ_{\max} é o autovalor normalizado, n é o número de ordem da matriz, e $(n - 1)$ é o número de graus de liberdade da matriz.

O terceiro passo é a determinação do cálculo da Razão de Consistência (Consistency Ratio – CR)

$$RC = IC / CA \quad (\text{Eq. 6})$$

onde, IC é o índice de consistência, e CA é o índice de consistência aleatória.

Os valores de CA são valores estabelecidos para matrizes com linhas e colunas 11 x 11 (Tabela 3). Portanto, o valor calculado na divisão das consistências pode avaliar a coerência dos pesos estabelecidos pelo grau de importância. O RC é considerado satisfatório quando o valor for menor ou igual a 0,10.

Tabela 3 – Valores de consistência aleatória (CA) em função da ordem da matriz (N)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

3.6 REAMOSTRAGEM DOS PIXELS E NORMALIZAÇÃO DE CRITÉRIOS

Para permitir a integração dos diferentes dados no processo de análise multicritério, cada produto foi representado na mesma resolução espacial, para seguir um padrão; foi possível realizar uma análise comparativa *pixel a pixel*. Para permitir a modelagem dos produtos CHIRPS e MOD11A1 (dados de precipitação e temperaturas) utilizados neste estudo, foi realizada a reamostragem dos pixels dos dados para 500 m.

Para reamostrar as imagens de satélite com diferentes resoluções espaciais, vários métodos e técnicas podem ser usados. Nesta pesquisa, foi utilizada a função Vizinho Mais Próximo, método que atribui a um novo pixel o valor do *pixel* mais próximo na imagem original (Gong; Fritsch, 2017). A reamostragem foi realizada no QGIS 3.28 utilizando a ferramenta de Reprojetar Coordenadas, na opção definir resolução do arquivo de saída.

As variáveis utilizadas na composição do IRSA foram previamente normalizadas em uma escala entre 0 (condição de maior risco) e 1 (condição ideal),

utilizando as fórmulas de normalização direta ou inversa, conforme a relação de cada variável com a seca agrícola. Para variáveis como precipitação e área colhida, em que valores mais altos indicam menor risco, foi aplicada a normalização direta. Já para variáveis como temperatura e evapotranspiração, que estão associadas a maior risco de seca quando seus valores aumentam, aplicou-se a normalização inversa, de modo que valores altos resultem em valores normalizados baixos, alinhando-se à lógica do índice IRSA e observados na Tabela 4.

A metodologia de normalização adotada neste trabalho segue a abordagem de variação linear entre valores mínimo e máximo observados para cada variável, permitindo a padronização em uma escala contínua entre 0 e 1. Essa metodologia é amplamente reconhecida na literatura e também foi aplicada por Ortega-Gaucin et al., (2021) em um estudo de avaliação do risco de seca agrícola no México, em que variáveis com relação direta ao risco foram normalizadas de forma linear crescente, enquanto aquelas com relação inversa foram normalizadas de forma decrescente.

Tabela 4 – Normalização das variáveis utilizadas no cálculo IRSA

Variável	Risco de Seca	Tipo de Normalização	Fórmula Aplicada	Peso (p)
C	Inversa ($\uparrow C \rightarrow \downarrow$ risco)	Direta	$(X - X_{\text{mín}}) / (X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}})$	p1
Evapo	Direta (\uparrow evapo $\rightarrow \uparrow$ risco)	Inversa	$(X - X_{\text{máx}}) / (X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}})$	p2
Precip	Inversa (\uparrow precip $\rightarrow \downarrow$ risco)	Direta	$(X - X_{\text{mín}}) / (X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}})$	p3
Temp	Direta (\uparrow temp $\rightarrow \uparrow$ risco)	Inversa	$(X - X_{\text{máx}}) / (X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}})$	p4

Fonte: Adaptada de Ortega-Gaucin et al. (2021)

Dessa forma, garante-se que todos os valores normalizados estejam coerentemente escalados antes da agregação ponderada, assegurando que o IRSA reflita corretamente o nível de risco. Nesse contexto, valores próximos de 0 indicam forte risco de seca agrícola, enquanto valores próximos de 1 indicam condições favoráveis à produção agrícola.

Na construção dos níveis de risco da seca agrícola nas microrregiões da Paraíba, foram obtidos dados de áreas colhidas anualmente das culturas do feijão-caupi, milho e mandioca baixados do banco de dados da PAM no site do IBGE dos anos de 2001 a 2022. Em seguida, os dados foram baixados a partir de cartogramas em formato vetorial.

Para avaliar a sensibilidade das culturas agrícolas à seca, ao longo da série histórica, foram utilizados dados vetoriais de área colhida por microrregião para cada ano analisado. Inicialmente, identificou-se, em cada microrregião, o maior valor de área colhida da série temporal (2001-2022) para as culturas de milho, feijão-caupi e mandioca. Esse valor máximo foi adotado como referência de 100% de produtividade de cada cultura. Em seguida, foi calculada a razão entre o valor de área colhida de cada ano e o valor máximo correspondente para cada microrregião, gerando um percentual de produtividade anual para cada cultura.

Este percentual foi interpretado como um indicador indireto do risco de seca agrícola, com base em abordagens que utilizam o desempenho da produção agrícola como métrica de impacto climático (Mishra; Singh, 2010; Cuenca; Mandarino, 2007). Para cada cultura, houve valores de normalização diferenciados, de acordo com a equação abaixo:

$$P_{cf} = A_i/A_{\max st} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde P_{cf} é a ponderação do cultivo, A_i é a área colhida do ano atual, e $A_{\max st}$ é a área máxima da série temporal.

A partir desses cálculos, criou-se uma coluna nos dados vetoriais com o índice de risco anual, que, posteriormente, foi rasterizado com base nessa variável, viabilizando sua integração ao ambiente de análise espacial e à aplicação do método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), conforme proposto por Saaty (1980) e utilizado em contextos similares por Mokarram (2021).

A normalização dos indicadores nessa escala única é necessária para que valores em diferentes unidades de medida possam ser agregados de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Características dos critérios no processo de normalização

Mapa para Critério	Tipo de Critério	Natureza dos Dados	Regra de Decisão
Culturas agrícolas (Feijão, Milho e Mandioca)	Relativo	Quantitativo	Exemplo: Regiões com menor % de área colhida maior riscos à seca
Evapotranspiração	Relativo	Quantitativo	Exemplo: Regiões com menor vapor de água com relação a vegetação maior riscos à seca
Precipitação	Relativo	Quantitativo	Exemplo: Regiões com menor média de precipitação maior riscos à seca
Temperatura	Relativo	Quantitativo	Exemplo: Regiões com maior temperatura maior riscos à seca

Fonte: Adaptado de Falcão (2013)

As variáveis climáticas utilizadas nesta pesquisa – temperatura, precipitação e evapotranspiração – apresentam entre si uma relação de interdependência físico-ambiental, fundamental para a compreensão do comportamento hídrico no semiárido. A precipitação fornece a umidade essencial ao solo, pois a evapotranspiração depende tanto da disponibilidade hídrica oriunda da chuva quanto das condições de temperatura e radiação solar e a temperatura, por sua vez, atua diretamente na demanda atmosférica por evaporação.

Embora tratadas como dados absolutos em termos estatísticos, essas variáveis se articulam de forma dinâmica, influenciando-se mutuamente e afetando diretamente a disponibilidade de água para as culturas agrícolas. Essa inter-relação justifica a análise conjunta para o índice de risco de seca agrícola (IRSA), pois permite uma avaliação mais precisa e integrada das condições ambientais que impactam a produtividade agrícola das microrregiões paraibanas.

3.7 CÁLCULO DAS ÁREAS PREDOMINANTES POR PIXELS DO IRSA

O cálculo das áreas predominantes por pixel foi realizado com base nas médias dos 22 anos de dados, obtidas por meio de análise estatística. Em seguida, procedeu-se à reclassificação dos valores de cada pixel das imagens, utilizando a função *r.reclass*. Nesse processo, expressões foram implementadas com base nas faixas de

valores dos pixels, que foram substituídas por classes numéricas, conforme apresentado na Figura 8 a seguir:

Figura 8 – Código para reclassificar as áreas

```
( "media@1" >= 0.067 AND "media@1" < 0.370 ) * 1 +
( "media@1" >= 0.370 AND "media@1" < 0.426 ) * 2 +
( "media@1" >= 0.426 AND "media@1" < 0.539 ) * 3 +
( "media@1" >= 0.539 AND "media@1" < 0.667 ) * 4 +
( "media@1" >= 0.667 AND "media@1" <= 0.880 ) * 5
```

Fonte: Elaborada pela autora (2024)

Cada valor reclassificado passou a representar uma categoria de risco de seca agrícola, conforme a seguinte escala: **1 – Muito Alto, 2 – Alto, 3 – Moderado, 4 – Baixo e 5 – Muito Baixo**. Em seguida, utilizou-se a funcionalidade "*Raster to Vector*" para a vetorização do *raster*, possibilitando a obtenção das áreas correspondentes a cada classe de risco. Esse procedimento foi realizado individualmente para o índice relacionado a cada cultura agrícola analisada.

As técnicas utilizadas para a realização da estatística básica aplicada à análise de imagens geoespaciais seguiram as metodologias descritas por Souza (2019), Santos e Ventorini (2017) e Falcão (2013).

Após a geração dos mapas do IRSA, os resultados foram representados por meio de uma escala cromática associada às classes de risco:

- **Verde-claro a verde-escuro** indicam áreas com ausência ou baixa incidência de seca agrícola, ou seja, regiões menos afetadas por variações climáticas;
- **Tonalidades amarelas** sinalizam áreas com ocorrência de seca agrícola moderada;
- **Tons alaranjados e vermelhos** representam regiões com alto e muito alto risco de seca agrícola, respectivamente.

Todos os processamentos cartográficos do índice IRSA foram realizados no software QGIS 3.28, utilizando a Calculadora *Raster* para os ajustes necessários. A definição dos intervalos das classes foi baseada nos critérios metodológicos propostos por Ihinegbu e Ogunwumi (2022) e Cai et al. (2023).

3.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E TESTES DE EFICIÊNCIA

Para os cálculos estatísticos dos resultados obtidos do IRSA, foi utilizada a ferramenta *Cell Statistics* (estatísticas de célula), que é usada para calcular estatísticas agregadas em uma série temporal. Essa ferramenta está disponível no plugin SAGA GIS, que integra funcionalidades de *Minimum* (retorna o valor mínimo encontrado para cada pixel na série), *Maximum* (retorna o valor máximo encontrado para cada pixel na série), *Mean* (calcula a média pixel a pixel da série temporal) e *Standard Deviation* (calcula o desvio padrão pixel a pixel, que mede a variabilidade dos valores em relação à média), todas essas funções são conectadas ao QGIS 3.28.

Para testar a eficiência da modelagem, foram usadas a *Receiver Operating Characteristic* (ROC) e a *Area Under the Curve* (AUC), extraídos os valores das médias anuais de cada um dos 22 anos analisados. A ROC e a AUC são utilizadas para avaliar o desempenho de algoritmos de classificação na previsão e na verificação de diversos fenômenos (Mas, 2013). A ROC e a AUC são ferramentas essenciais para a avaliação de modelos preditivos de risco de seca agrícola, pois permitem quantificar a capacidade de discriminação do modelo e otimizar os pontos de corte para diferentes cenários (Guria et al., 2024).

Esses métodos são particularmente úteis para validar modelos que envolvem variáveis ambientais como o risco de seca e podem ser aplicados em conjunto com dados históricos de safras e variações climáticas para testar a eficácia dos modelos gerados. A análise geoespacial, em estudos ambientais, utiliza a ROC e a AUC para melhor entender, modelar e visualizar a coleta e análise de dados a fim de certificar se esses parâmetros foram essenciais para avaliar a precisão e o desempenho de modelos em estudos ambientais envolvendo dados geoespaciais (Jaskowiak, 2022). A característica principal para o diagnóstico positivo ou negativo do modelo de predição pode ser avaliado a partir de intervalos de valores como exposto na Tabela 5.

Tabela 5 – Faixas de desempenho para a Curva AUC

Intervalo AUC	Desempenho do modelo
Entre 0,9 e 1	Excelente
Entre 0,8 e 0,9	Muito bom
Entre 0,7 e 0,8	Bom
Entre 0,6 e 0,7	Médio Abaixo

Abaixo de 0,6

Ruim

Fonte: Adaptado de Jaskowiak (2022)

3.8.1 Característica de Operação do Receptor

A curva *Receiver Operating Characteristic (ROC)* é uma ferramenta estatística que ajuda a avaliar o desempenho de um modelo de classificação binária, como a presença ou ausência de seca. A curva *ROC* expressa graficamente a relação entre a sensibilidade (taxa de verdadeiros positivos) e a especificidade (taxa de verdadeiros negativos) em diferentes pontos de corte. Neste estudo, foi utilizada a curva *ROC*, um modelo frequentemente utilizado para avaliar acurácia e precisão, para validar os resultados do IRSA. Este modelo fornece uma representação gráfica da Taxa de Verdadeiros Positivos (TPR) e da Taxa de Falsos Positivos (FPR) em diferentes limiares (Arabameri et al., 2020).

Para validar o índice proposto neste estudo, foram utilizados os resultados obtidos a partir dos dados estatísticos das médias da análise temporal dos 21 anos do IRSA obtidos para cada uma das culturas agrícolas estudadas. Foi gerada uma camada de pontos para o IRSA de cada cultura, com espaçamento de 500 m x 500 m, totalizando 3.000 pontos selecionados. Esses pontos correspondem a valores de pixels próximos de 0 (indicando alta ocorrência de seca) e de 1 (indicando baixa ocorrência) os valores nulos foram descartados da análise.

A camada de pontos foi gerada com a ferramenta “Pontos Regulares” e a filtragem dos valores nulos dos arquivos *raster* foi realizada utilizando o complemento “*Point Sampling Tool*”. Os pontos obtidos foram utilizados para avaliar a precisão e a eficiência do índice para cada cultura analisada.

3.8.2 Área Sob a Curva

A *Area Under the Curve (AUC)*, por sua vez, representa a área sob essa curva e quantifica a capacidade do modelo em discriminar corretamente entre classes distintas — quanto mais próxima de 1, melhor o desempenho do modelo. O intervalo de confiança da *AUC* indica o grau de incerteza associado a essa medida. O ponto de corte ideal é aquele que maximiza simultaneamente a sensibilidade e a especificidade, ou seja, o equilíbrio entre a correta identificação dos casos positivos e negativos (Kamilaris, 2018).

Nesse estudo, a *AUC* foi utilizada para avaliar a capacidade do IRSA em distinguir entre áreas de seca e não secas de forma eficaz. Os valores de *AUC* fornecem uma medida do desempenho do modelo em termos de sensibilidade e especificidade, em que as classificações são definidas da seguinte forma: 0,5–0,6 significa discriminação ruim; 0,6–0,7, razoável; 0,7–0,8, aceitável; 0,8–0,9, boa; e 0,9–1, excelente (Rasyid et al., 2016). As métricas de avaliação, incluindo sensibilidade, especificidade, exatidão e precisão, são quantificadas, conforme descrito na metodologia de Chowdhuri e Chakraborty (2020).

$$S = \frac{TP}{TP + FN} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$S_p = \frac{TN}{FP + TN} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$E = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde *S* é a sensibilidade, *S_p* é a especificidade, *E* é a exatidão, *P* é a precisão, *TP* se refere ao verdadeiro positivo (os pixels que são corretamente classificados como positivos, ou previsões de desmatamento), *TN* se refere ao verdadeiro negativo (os pixels corretamente classificados como negativos, ou previsões de não desmatamento) e *FP* se refere ao falso positivo (os pixels incorretamente classificados como seca). *FN* significa Falso Negativo, que se refere aos pixels incorretamente classificados como não seca.

Os cálculos foram realizados no *software* RStudio versão 4.2.1, onde foram instalados os pacotes *rstatix*, *pROC*, *reportROC* e *ggplot2*. Esses pacotes foram implementados no código para realizar uma classificação dos valores próximos dos valores dos pixels de acordo com as equações para gerar os gráficos de *ROC* e *AUC* dos níveis de risco de seca para feijão-caupi, milho e mandioca.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO

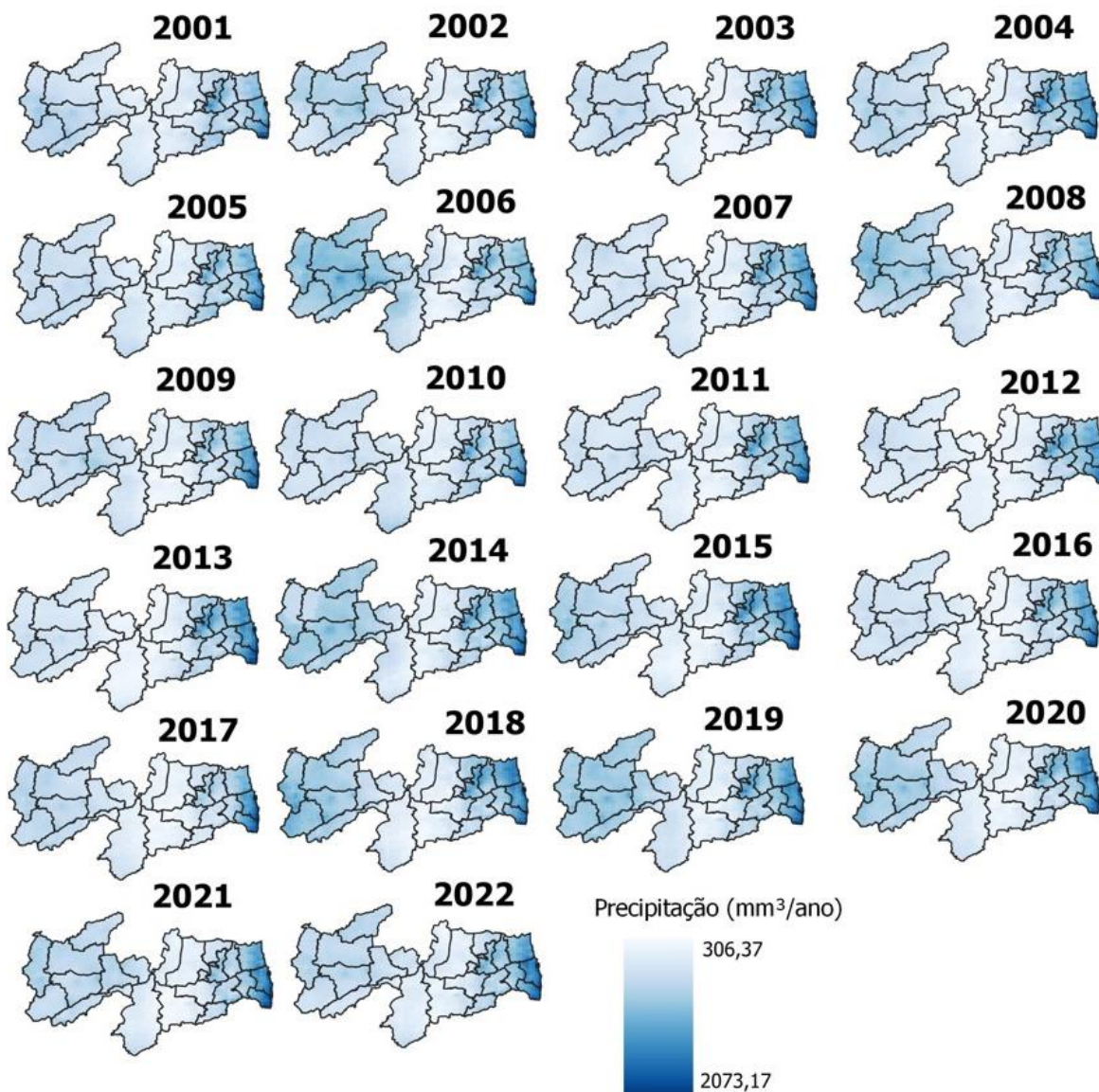
A regularidade das chuvas é uma das variáveis meteorológicas mais relevantes para a agricultura, para o abastecimento de água e para a própria sobrevivência humana. Por isso, entender como essa variável se comporta no tempo e no espaço é fundamental para identificar eventos extremos, como as secas (Santos et al., 2019).

Os dados de precipitação estimados pelo satélite CHIRPS, referentes ao período de 2001 a 2022, evidenciaram que as microrregiões de Patos, Cajazeiras, Piancó e Sousa (Figura 9) apresentaram maiores oscilações e períodos prolongados de déficit hídrico, indicando elevada vulnerabilidade às secas agrícolas. De 2012 a 2016 estão localizadas na mesorregião do Sertão Paraibano, de clima semiárido, apresentaram um regime anual de chuvas de 300 mm a 2000 mm, apresentando-se como uma região de baixa pluviosidade (Costa et al., 2015).

Nas microrregiões localizadas na área central do Estado, como Cariri e Curimataú, há alta variabilidade de precipitação, e os valores anuais estão entre 300 e 500 mm (Pereira et al., 2009), conforme mostra a Figura 9.

Nas microrregiões do Brejo Paraibano, Itabaiana, Litoral Norte, João Pessoa e Litoral Sul, as precipitações ao longo da série temporal não apresentaram alta variabilidade espacial, pois é nessas regiões onde ocorrem as maiores precipitações no Estado, por apresentarem clima tropical úmido (Sena, 2019), com média de 1700 mm/ano.

Figura 9 – Distribuição média da precipitação nas microrregiões paraibana no período de 2001 a 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

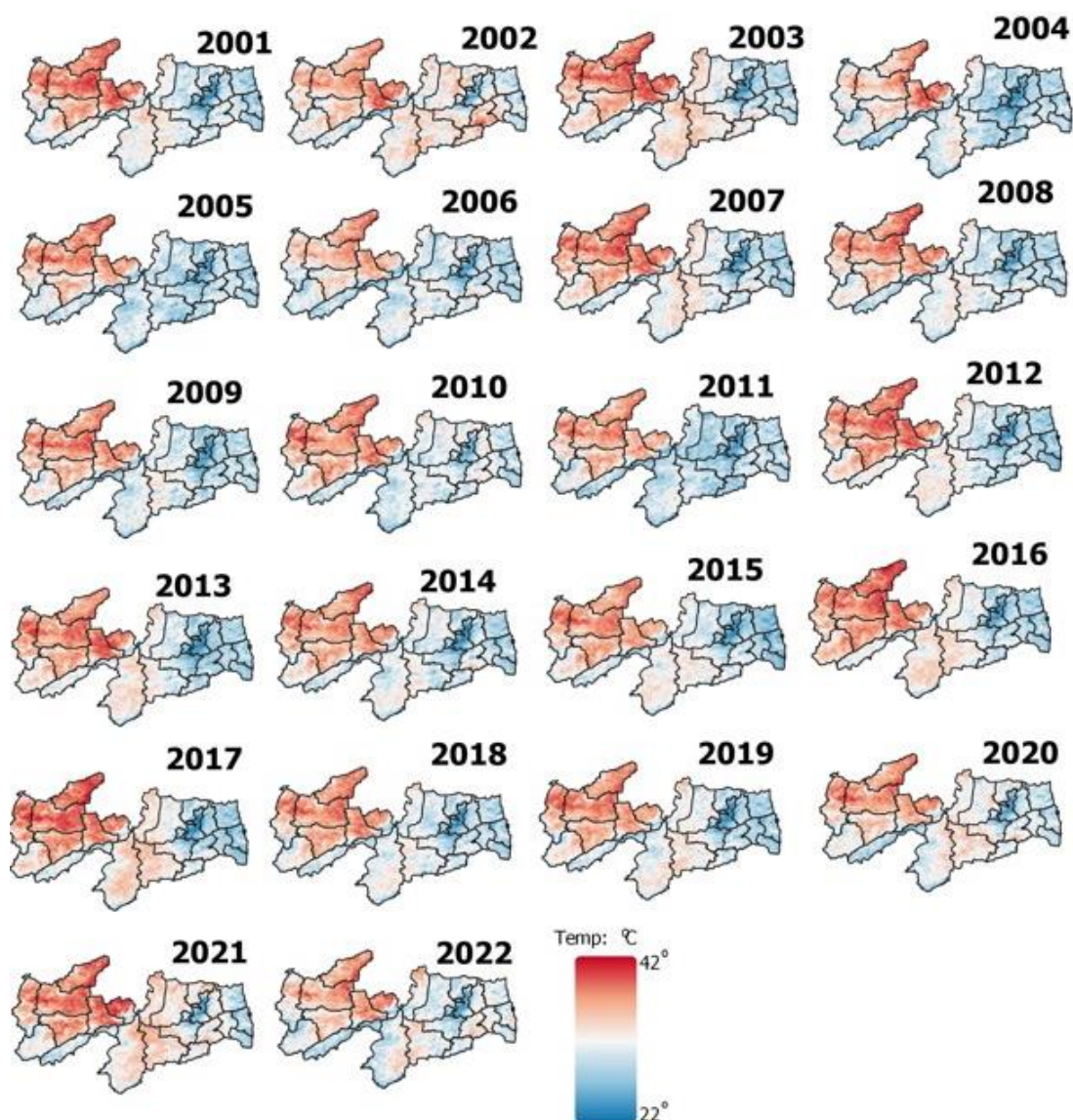
Na Paraíba, a elevada variabilidade da precipitação, aliada às altas temperaturas, intensifica os déficits hídricos, comprometendo a disponibilidade de água no solo e aumentando a vulnerabilidade das atividades agrícolas.

4.2 ANÁLISE ESPACIAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

A Figura 10 apresenta a distribuição média da temperatura nas microrregiões paraibanas, entre os anos de 2001 e 2022. As irregularidades na precipitação,

associadas às elevadas temperaturas, podem contribuir para a redução da disponibilidade hídrica e o agravamento das condições de seca.

Figura 10 – Distribuição média da temperatura nas microrregiões paraibana no período de 2001 a 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

A análise espaço-temporal da temperatura média anual nas microrregiões paraibanas observadas na Figura 10, no período de 2001 a 2022, revela padrões distintos sob forte influência da localização geográfica e das condições climáticas de cada microrregião. De acordo com a Figura 10, nas microrregiões localizadas no Sertão, onde ocorre a predominância do clima semiárido, observa-se uma persistência de valores mais elevados de temperatura nas microrregiões de Catolé do Rocha (01),

Cajazeiras (02), Sousa (03), Patos (04) e Piancó (05), ao longo de todo o período analisado, com variações que atingem a máxima de 42 °C em determinados anos.

De acordo com Cavalcanti (2006), a variabilidade de temperatura é um padrão que está presente na região Nordeste, por ter áreas mais suscetíveis ao aquecimento por sua maior continentalidade, menor cobertura vegetal e baixa pluviosidade. Observando a Figura 10, as microrregiões do Litoral paraibano e da Mata paraibana apresentam temperaturas médias anuais mais baixas, variando entre 22 °C e 26 °C. Essa distribuição espacial reflete a proximidade do litoral, responsável por evitar que ocorram os extremos de temperatura, devido à capacidade de regulação térmica do oceano e da presença de ventos úmidos (Souza, 2019).

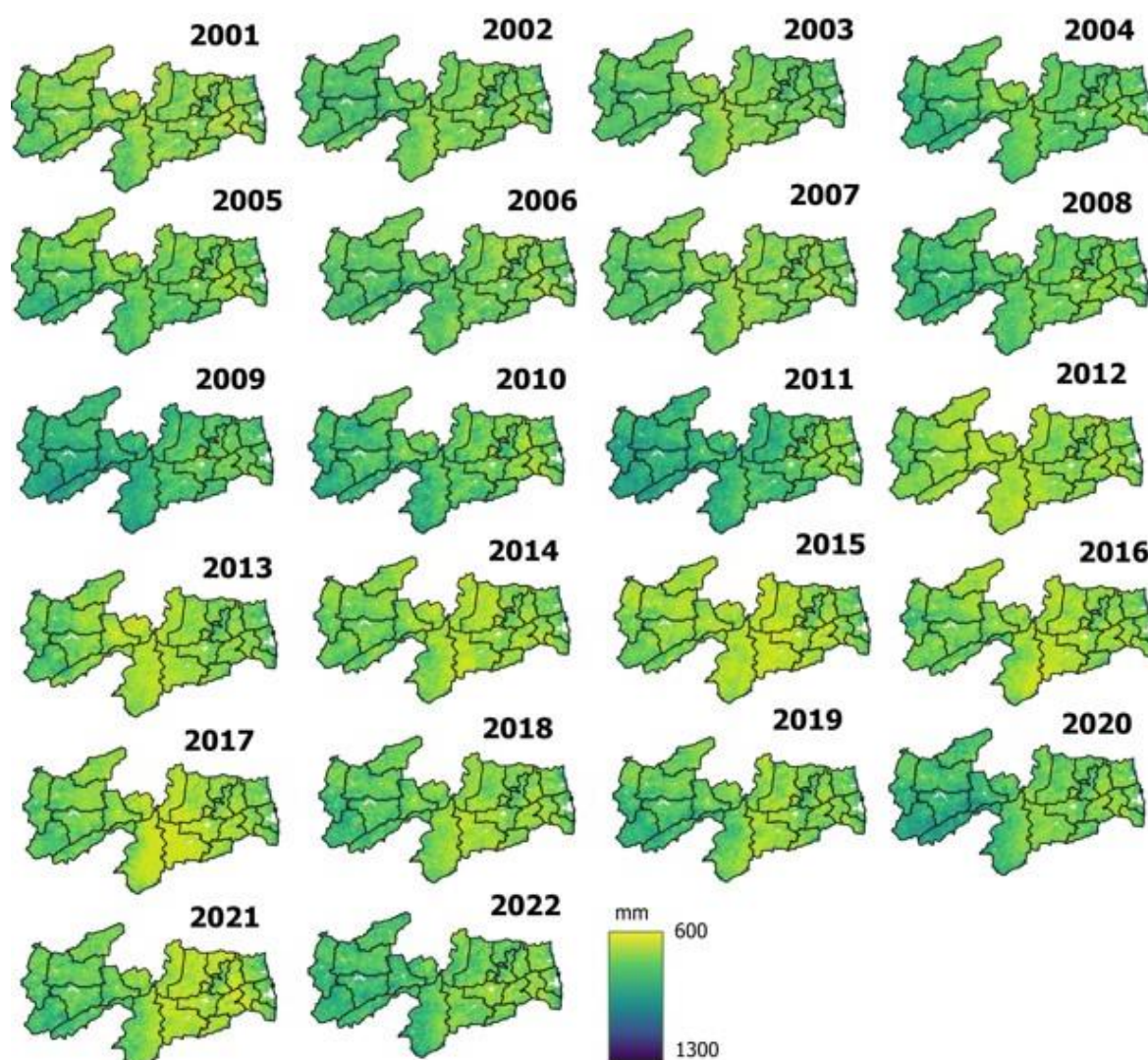
Entre os anos analisados, destacam-se os de 2012, 2015, 2016, 2017 e 2021, com elevadas médias de temperatura, sobretudo nas porções oeste e central do Estado. Esses anos coincidem com períodos de forte estiagem registrados no Semiárido Nordestino, muitos dos quais associados com a atuação de fenômenos climáticos como o El Niño (Walker et al., 2023).

A temperatura da superfície é um dos principais controladores da taxa de evapotranspiração, uma vez que influencia diretamente o fornecimento de energia disponível para o processo de transferência de água do solo e da vegetação para a atmosfera (Singh; Kogan, 2003). Dessa forma, o monitoramento simultâneo da temperatura e da evapotranspiração torna-se essencial para a avaliação do balanço hídrico regional, contribuindo para o planejamento agrícola e a mitigação dos impactos das secas prolongadas sobre os sistemas de produção agrícola dependentes da chuva (Yang et al., 2017).

4.3 ANÁLISE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A Figura 11 mostra a distribuição da evapotranspiração nas microrregiões paraibanas, entre os anos de 2001 e 2022. Os resultados revelaram uma variabilidade significativa entre os anos e entre as microrregiões paraibanas.

Figura 11 – Distribuição média da evapotranspiração nas microrregiões paraibana no período de 2001 a 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Os valores de evapotranspiração nas microrregiões do Litoral, Agreste e Brejo são altos. Os anos de 2004, 2011 e 2020 se destacaram por apresentarem uma distribuição mais homogênea e moderada da evapotranspiração, indicando condições climáticas mais amenas ou presença de cobertura vegetal mais eficiente na retenção de umidade, com destaque para áreas da zona da mata, que tendem a apresentar valores mais elevados, entre 900 e 1200mm (Francisco et al., 2017).

Nas microrregiões de Catolé do Rocha (01), Patos (04), Piancó (05), Cajazeiras (02), Sousa (03), inseridas na mesorregião do Sertão e as microrregiões do Cariri (10, 11) e Curimataú (12, 13), inseridas na mesorregião da Borborema, as taxas de

evapotranspiração são moderadas a baixa, o que pode estar relacionado à menor disponibilidade hídrica e ao predomínio de vegetação mais esparsa e adaptada à escassez de água. Essa distribuição espacial evidencia a influência direta dos padrões climáticos das microrregiões, da topografia e do uso do solo.

Ao se observar a evolução temporal da evapotranspiração, é possível identificar, na Figura 11, anos com menor intensidade, como 2012, 2015, 2016 e 2017, principalmente nas microrregiões do Seridó Ocidental (8) e Seridó Oriental (9), Cariri Ocidental (12) e Curimataú (13), localizadas na região central da Paraíba.

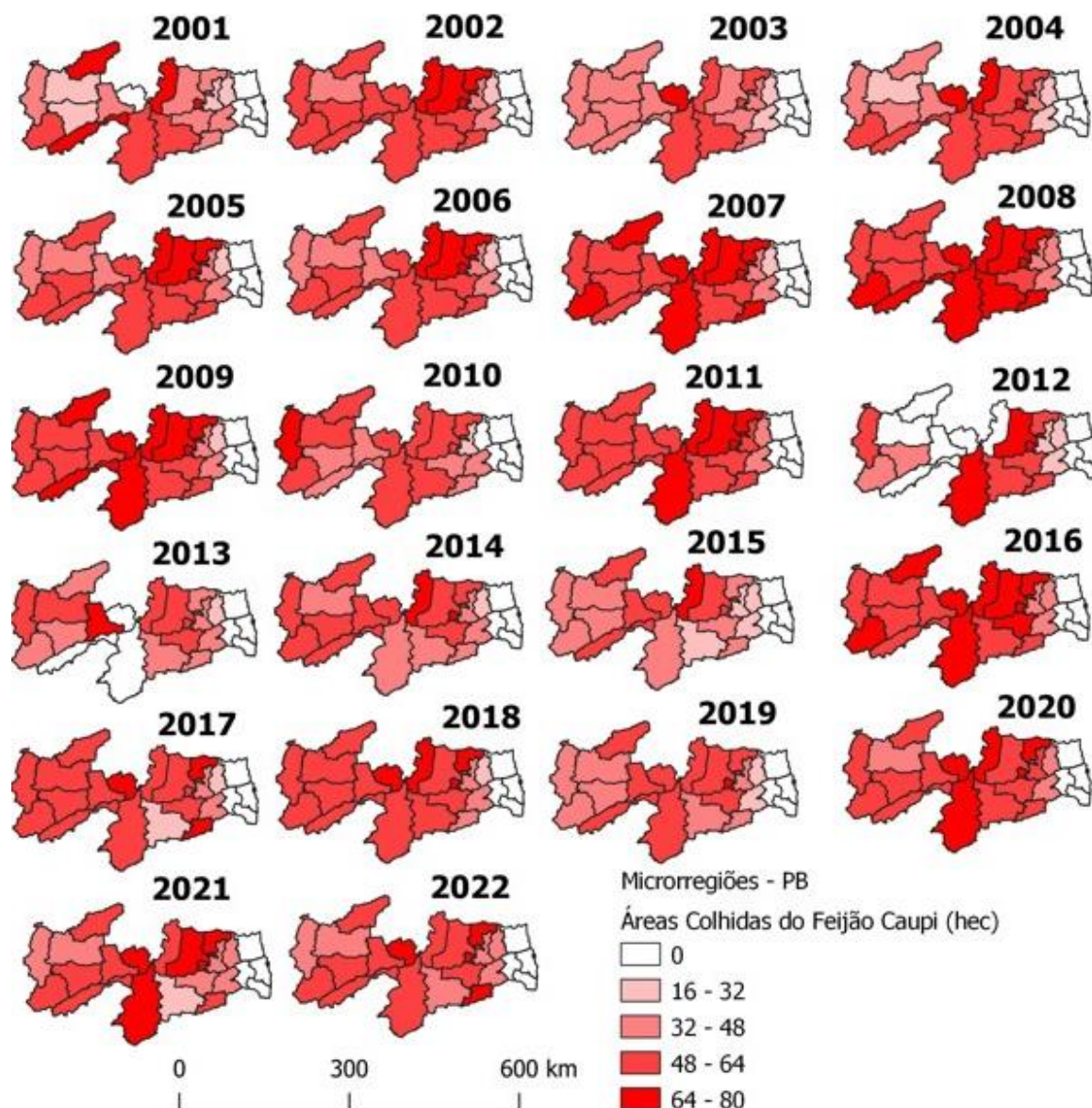
O comportamento da evapotranspiração observado ao longo dos anos constitui um importante indicador das condições ambientais e da dinâmica do ciclo hidrológico na Paraíba, especialmente quando associado às demandas agrícolas (Campos et al., 2008). Dessa forma, o monitoramento contínuo da evapotranspiração é fundamental para subsidiar práticas de manejo hídrico mais eficientes, além de permitir a elaboração de estratégias de adaptação às mudanças climáticas, em que a sustentabilidade dos sistemas agropecuários depende diretamente do equilíbrio entre oferta e demanda de água.

4.4 ANÁLISE ESPACIAL DA ÁREA COLHIDA DAS CULTURAS DE FEIJÃO-CAUPI, MILHO E MANDIOCA

A análise espacial das áreas colhidas, obtidas a partir de dados do IBGE/SIDRA, revelou dinâmicas distintas para cada cultura, refletindo as variações climáticas e a capacidade de adaptação de cada cultura nas microrregiões paraibanas.

As áreas colhidas dos anos de 2001 a 2022 do feijão-caupi especializadas, na Figura 12, apresentaram destaque para as microrregiões de Sousa (03), Patos (04) e Itaporanga (06), que apresentaram áreas colhidas mais expressivas, mesmo em anos de estiagem severa, como 2012 e 2016. Essa resiliência pode ser explicada pela cultura ter uma adaptação às condições adversas. No entanto, microrregiões como João Pessoa (22) Litoral Norte (20) e Litoral Sul (23) registraram valores baixos ao longo de todo o período, o que pode indicar que não priorizam esse tipo de cultura agrícola.

Figura 12 - Cultura do feijão-caupi nas microrregiões paraibanas entre os anos 2001 e 2022



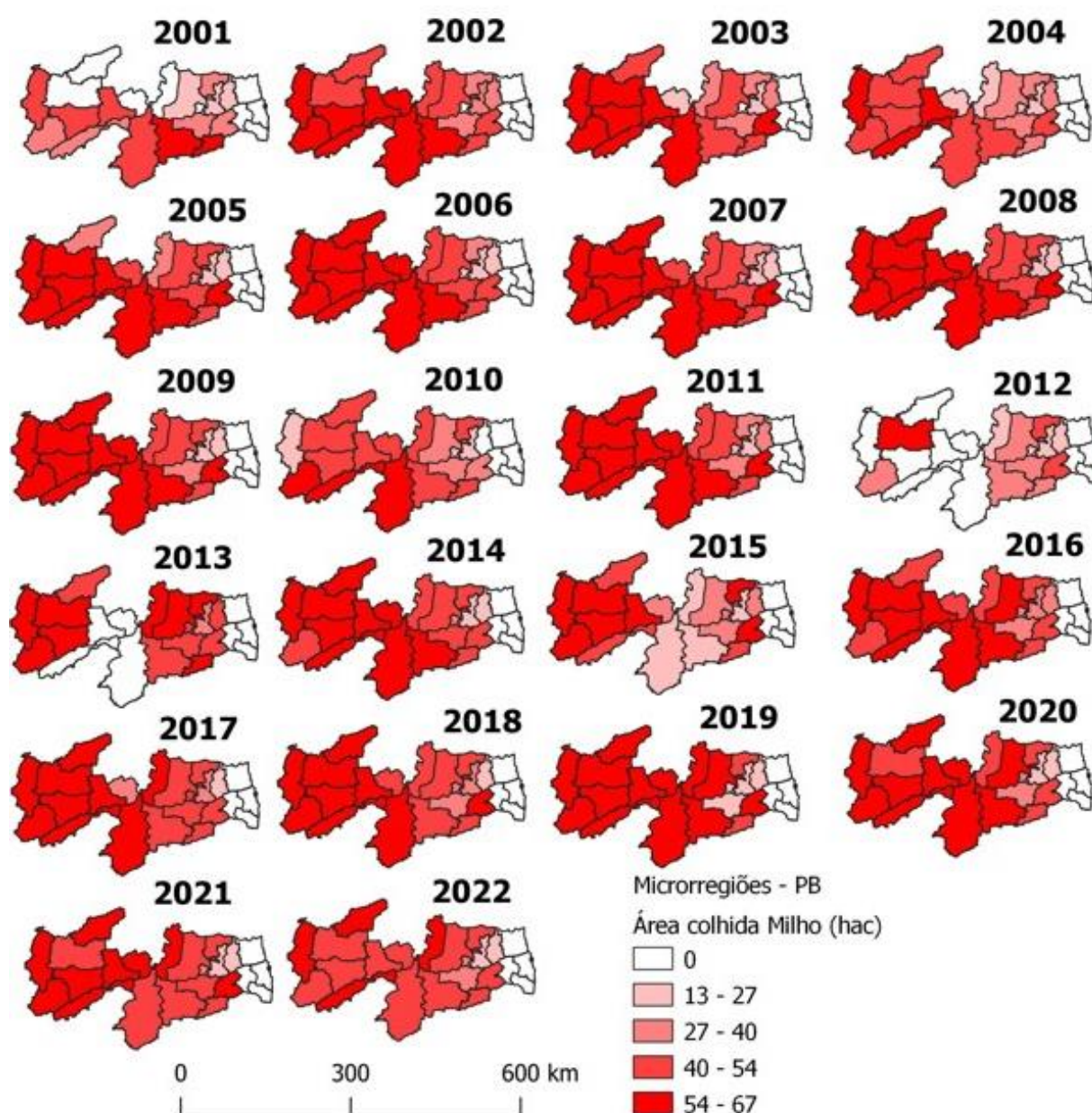
Fonte: Dados da pesquisa (2025)

De acordo com Costa et al. (2019), o feijão-caupi é tradicionalmente manejado por pequenos produtores em sistemas de agricultura familiar, o que também contribui para uma baixa adoção de tecnologias mitigadoras de seca, agravando a vulnerabilidade da cultura. O feijão-caupi destaca-se no Nordeste principalmente pela sua capacidade de adaptação ao sertão e por ser um alimento de múltiplas utilidades (Candido; Nascimento, 2021).

Para a cultura do milho (Figura 13), observou-se uma concentração das áreas colhidas nas microrregiões de Cajazeiras (02), Sousa (03) e Piancó (05). Essas

regiões apresentaram, em geral, áreas colhidas superiores a 40 ha em vários anos, inclusive durante eventos de seca. Segundo Brito et., al (2018), a persistência do cultivo de milho em anos secos deve-se à adoção de variedades mais tolerantes ou a utilização de práticas adaptadas, como plantio em épocas mais favoráveis. Por outro lado, microrregiões do Litoral como Sapé (21) e Litoral Norte (20) mantiveram áreas colhidas menores e com menor variação, o que pode indicar uma menor dependência do milho nessas localidades.

Figura 13 – Cultura do milho nas microrregiões paraibanas no período de 2001 a 2022

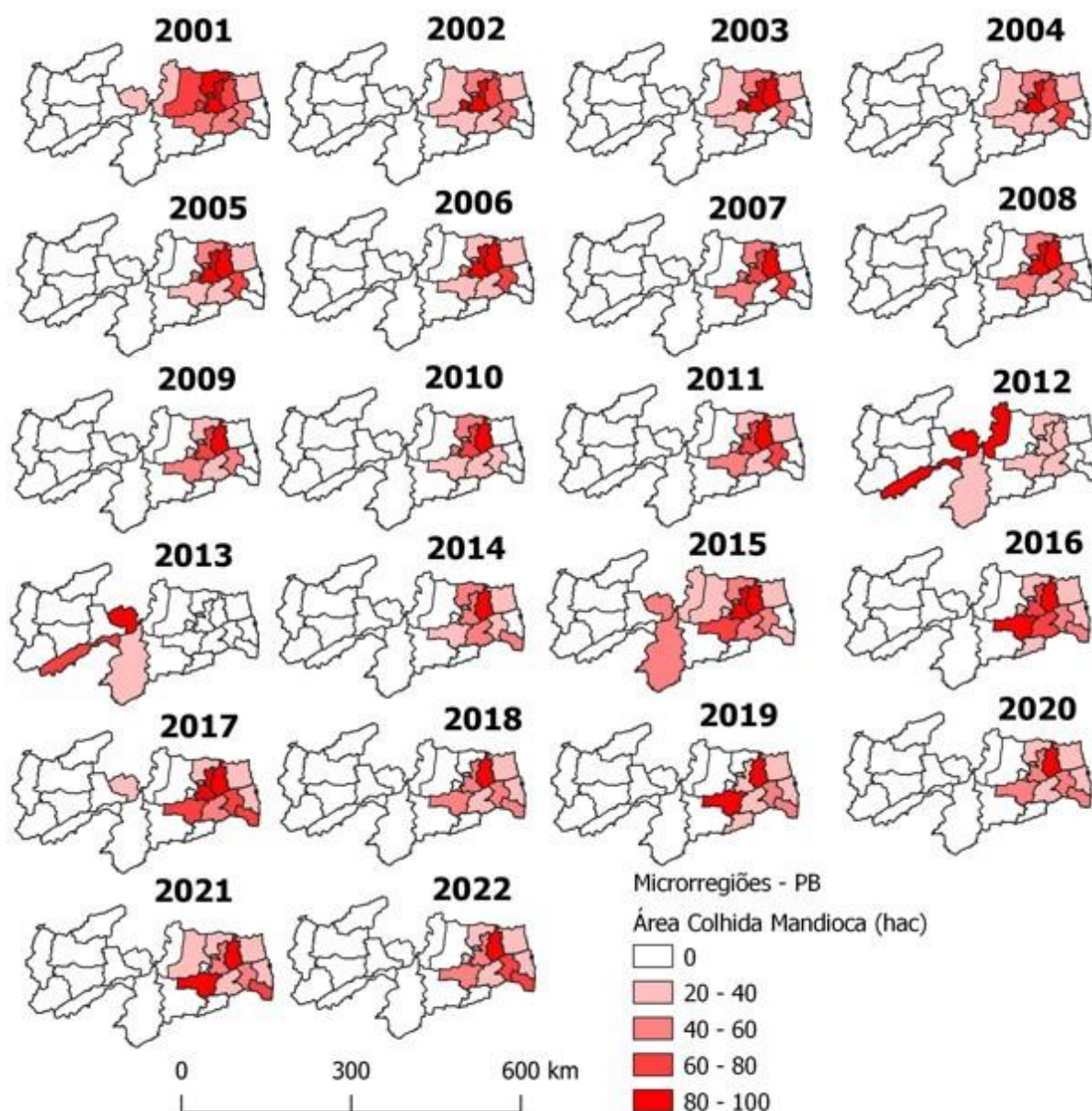


Fonte: Dados da pesquisa (2025)

A cultura da mandioca observada na Figura 14 apresentou comportamento distinto. As áreas colhidas foram mais modestas e concentradas principalmente em microrregiões como Guarabira (16), Umbuzeiro (19) e Campina Grande (17). Sua estabilidade, mesmo em anos de seca, aponta para sua rusticidade e capacidade de desenvolvimento com menor exigência hídrica. No entanto, o baixo valor de áreas colhidas em grande parte das microrregiões pode indicar uma menor prioridade econômica da cultura frente ao milho e ao feijão-caupi, que têm maior importância no sistema produtivo, quando observada em uma escala regional.

De acordo com Lima et al. (2018), a mandioca destaca-se por sua rusticidade e resiliência em ambientes adversos, sendo uma das culturas mais adaptadas às condições semiáridas. Conforme Lago et al. (2012), em estudo realizado no Brejo Paraibano, a produtividade da mandioca está fortemente associada com as práticas de manejo, como o espaçamento adequado e o uso de adubação potássica, embora a mandioca possua características que a tornam estratégica para a segurança alimentar, a ausência de práticas agronômicas adequadas limita a expansão da atividade em escala comercial, especialmente em regiões com baixos investimentos em técnicas de manejo agrícola.

Figura 14 – Cultura da mandioca nas microrregiões paraibanas do período de 2001 a 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

4.5 CONSISTÊNCIA DOS PESOS UTILIZADOS PARA CADA VARIÁVEL

A matriz de comparação paritária, de acordo com a Tabela 6, recebeu os parâmetros de acordo com a importância para suscetibilidade de risco à seca agrícola. A variável que recebeu maior peso foi o cultivo agrícola com 0,545, de acordo com as análises do conhecimento especializado da importância de cada um, bem como na literatura sobre a influência da seca. O estudo de Olaseeni et al. (2021) priorizou o cultivo, pois a área agrícola, sendo maior, indica que há menor probabilidade de seca e maior capacidade adaptativa.

Tabela 6 – Matriz paritária com valores de importâncias

	Cultivo	Evapotranspiração	Precipitação	Temperatura	Pesos
Cultivo	1,00	9,00	5,00	3,00	0,545
Evapotranspiração	0,11	1,00	4,00	3,00	0,276
Precipitação	0,14	0,25	1,00	2,00	0,116
Temperatura	0,20	0,33	0,33	1,00	0,064

Fonte: Elaborada pela autora (2024)

A partir das matrizes de comparações paritárias, foram obtidos os pesos dos fatores que contribuem para a construção dos níveis de risco da seca agrícola. A matriz apresentou consistência na determinação do autovalor, e todos os pesos foram iguais a 1. O índice de consistência e a razão de consistência (RC) obtidos foram de 0,05 e 0,06, respectivamente. Isso significa que os valores obtidos na determinação da consistência dos critérios se apresentaram inferiores a 0,1, indicando coerência nos pesos obtidos, de acordo com o método proposto por Saaty (1980).

Segundo Zhang et al. (2018), o teste de consistência é uma base vital do método de comparação de pares, que é realizado com o objetivo de garantir que o tomador de decisão esteja sendo lógico em suas comparações de pares.

4.6 ESPACIALIZAÇÃO DO IRSA

4.6.1 Variabilidade espaço-temporal das secas agrícolas e sua influência na área colhida do feijão-caupi

O estado da Paraíba está localizado na região Nordeste do Brasil, caracterizado em grande parte pelo clima semiárido. Essa condição climática é moderada por chuvas irregulares, alta evapotranspiração e longos períodos de seca. Nessa região, as culturas agrícolas de sequeiro, como o feijão-caupi, desempenham um papel fundamental na segurança alimentar e na economia rural das microrregiões. As áreas mapeadas correspondem a zonas vulneráveis a secas frequentes. Nessas zonas, a prática agrícola depende quase exclusivamente das precipitações sazonais, o que torna as culturas especialmente sensíveis aos déficits hídricos.

A análise dos cultivos agrícolas e o uso de informações como o vigor das culturas durante seu ciclo e a duração desse ciclo são elementos cruciais para a elaboração de modelos e índices que expressem as condições das lavouras. Para esta pesquisa, foi observado o comportamento dos ciclos a partir dos Zoneamentos Agrícolas de Risco Climático (Brasil, 2021) de cada cultura realizadas pelo IBGE.

Formaggio e Sanches (2017), ao realizarem estudos sobre a seca e como as culturas são atingidas pelo fenômeno, enfatizam a importância de conhecer a dinâmica fenológica ao longo do ciclo de uma cultura agrícola para obter informações agrícolas a partir de imagens orbitais, pois as análises com técnicas de sensoriamento remoto possibilitam identificar o padrão de diversos tipos de cultivo agrícola ao longo do tempo.

A Figura 15 apresenta os valores do Índice de Risco à Seca Agrícola (IRSA) para a cultura do feijão-caupi nas microrregiões da Paraíba, entre os anos de 2001 e 2022. O IRSA é um indicador padronizado que varia de 0 a 1, sendo classificado conforme os seguintes intervalos: Muito Alto risco ($0,06 \leq \text{IRSA} < 0,20$), Alto risco ($0,20 \leq \text{IRSA} < 0,40$), Moderado ($0,40 \leq \text{IRSA} < 0,60$), Baixo ($0,60 \leq \text{IRSA} < 0,80$) e Muito Baixo risco ($0,80 \leq \text{IRSA} \leq 1,00$). Valores próximos de zero indicam maior risco de seca agrícola, enquanto valores mais próximos de 1 refletem maior resiliência das culturas às condições de estiagem.

A análise temporal possibilitou identificar os anos em que diversas microrregiões apresentaram risco elevado de seca agrícola, destacando-se principalmente 2001, 2003, 2004, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020 e 2022, com predominância das classes Muito Alto e Alto risco ($\text{IRSA} < 0,40$). Esses resultados demonstram a sensibilidade da cultura do feijão-caupi às oscilações climáticas, principalmente à baixa precipitação e à elevada demanda evaporativa da atmosfera.

Estudos realizados por Lima et al. (2023), que utilizaram índices como VCI, VHI, TCI e NDVI no semiárido paraibano, identificaram que os anos de 2014 a 2020 foram críticos para a seca agrícola e meteorológica, especialmente nas microrregiões do Cariri Ocidental, Cariri Oriental, Curimataú Ocidental, Curimataú Oriental e Brejo Paraibano, corroborando os resultados obtidos neste estudo. De forma semelhante, Ding et al. (2020) reforçam que a seca, tanto agrícola quanto meteorológica, compromete significativamente o desenvolvimento da vegetação, sendo os índices de sensoriamento remoto ferramentas eficazes no monitoramento dessas condições.

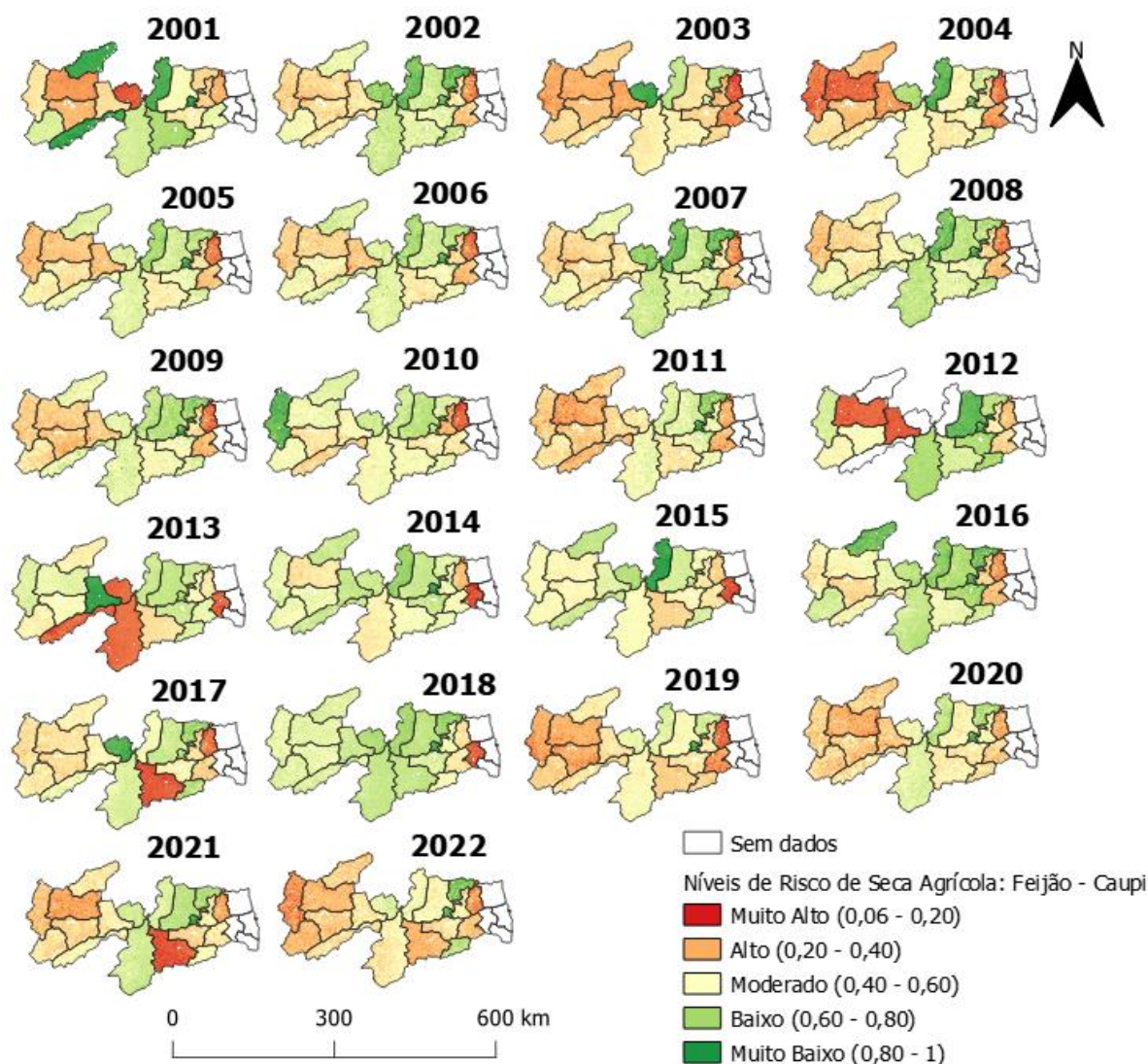
Observa-se que as microrregiões com maior produção histórica de feijão-caupi, como Cariri Ocidental, Curimataú Ocidental, Sertão de Patos e Piancó também apresentaram elevados valores de risco em anos críticos como 2004, 2012 e 2016, segundo os dados do IRSA. Essa sobreposição entre áreas produtivas e áreas

vulneráveis intensifica a importância do monitoramento climático contínuo, bem como da adoção de práticas agrícolas adaptativas e estratégias de gestão da seca.

Ainda que o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) classifique essas microrregiões como aptas ao cultivo do feijão-caupi em determinados períodos do ano, a recorrência de secas prolongadas compromete a produtividade, reforçando a necessidade de considerar a variabilidade interanual das chuvas no planejamento agrícola.

Nas microrregiões do Brejo Paraibano, Guarabira e Esperança, inseridas em uma zona de transição climática entre o semiárido e o subúmido, com precipitação média anual entre 700 e 1.200 mm, os valores de IRSA foram relativamente mais altos, indicando menor risco de seca agrícola e maior suporte para a produção do feijão-caupi em diversos anos. O estágio de desenvolvimento de uma cultura depende da disponibilidade da água, mas também da demanda evaporativa da atmosfera. Assim, o valor absoluto do consumo de água pode variar em função das condições climáticas de cada região, do ano e da época de semeadura (Pereira et al., 2002).

Figura 15 – Valores do IRSA da cultura do feijão-caupi nas microrregiões da Paraíba dos anos de 2001 a 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

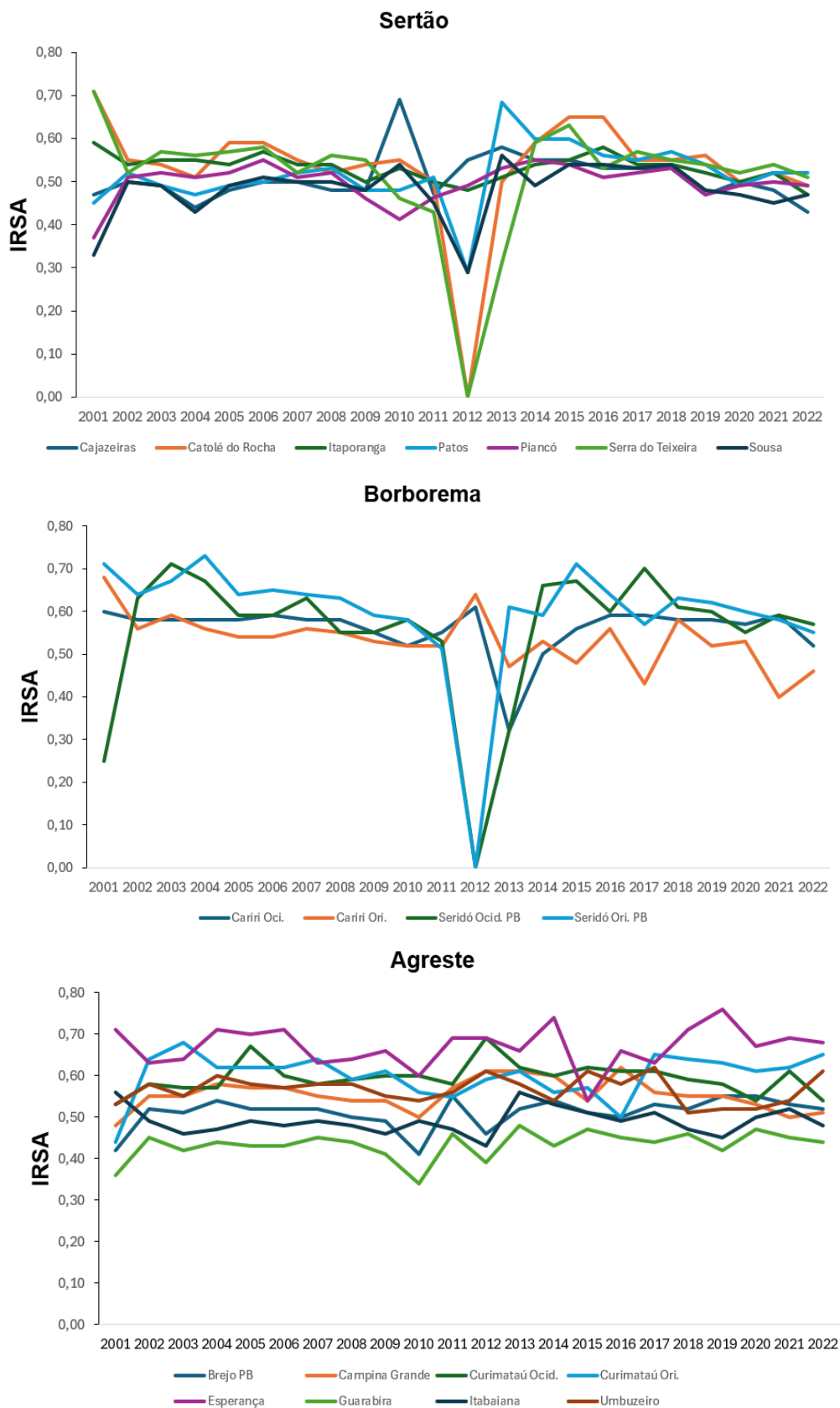
A Figura 16 apresenta a variabilidade temporal do Índice de Risco de Seca Agrícola (IRSA) para a cultura do feijão-caupi nas mesorregiões da Paraíba, entre os anos de 2001 e 2022. Observa-se que as microrregiões localizadas no Sertão Paraibano evidenciam os valores mais extremos do IRSA. Destaca-se a microrregião de Patos com um pico abrupto em 2013, contrastando com Catolé do Rocha, que apresentou forte queda em 2012, indicando condições críticas de seca agrícola. Apesar das oscilações, nota-se uma tendência de recuperação dos valores após 2012 na maioria das microrregiões sertanejas.

Na mesorregião da Borborema, as microrregiões do Seridó Oriental, Seridó Ocidental, Cariri Oriental e Cariri Ocidental sofreram acentuadas quedas no IRSA,

sobretudo em 2012, ano amplamente reconhecido por sua severidade climática. O Seridó Oriental, em especial, apresenta os valores mais baixos no período, com leve recuperação nos anos seguintes. A amplitude das variações sugere instabilidades nos fatores ambientais e climáticos, interferindo diretamente no desempenho das culturas de sequeiro.

Em contraste, a mesorregião do Agreste apresenta um comportamento relativamente mais estável. Microrregiões como Esperança e Brejo Paraibano destacam-se por manterem níveis consistentemente elevados de IRSA ao longo dos anos, sinalizando maior resiliência agrícola. No entanto, Umbuzeiro apresentou quedas pontuais em 2009 e 2017. A menor amplitude de variação nas microrregiões sugere um cenário socioambiental mais equilibrado em relação às demais regiões da Paraíba.

Figura 16 – Variabilidade temporal do IRSA da cultura do feijão-caupi nas mesorregiões da Paraíba, entre os anos de 2001 e 2022



4.6.2 Variabilidade espaço-temporal das secas agrícolas na área colhida de milho

Os resultados apresentados na Figura 17 mostram os valores do IRSA aplicados à cultura do milho nas microrregiões da Paraíba, no período de 2001 a 2022. A série histórica revela a ocorrência de períodos críticos de seca agrícola, os quais impactaram diretamente a área colhida no estado, especialmente em anos como 2012 e 2013.

Ao longo da série temporal, observa-se o predomínio das classes “Baixo” (0,60–0,80) e “Muito Baixo” (0,80–1,00) risco em grande parte das microrregiões (tons de verde), sugerindo condições climáticas relativamente favoráveis para o cultivo do milho. No entanto, os anos de 2012 e 2013 se destacam por apresentarem ampla extensão territorial sob risco “Muito Alto” (0,07–0,20) e “Alto” (0,20–0,40), sobretudo nas microrregiões do Sertão e do Cariri, refletindo secas severas que afetaram intensamente a produção agrícola no semiárido paraibano.

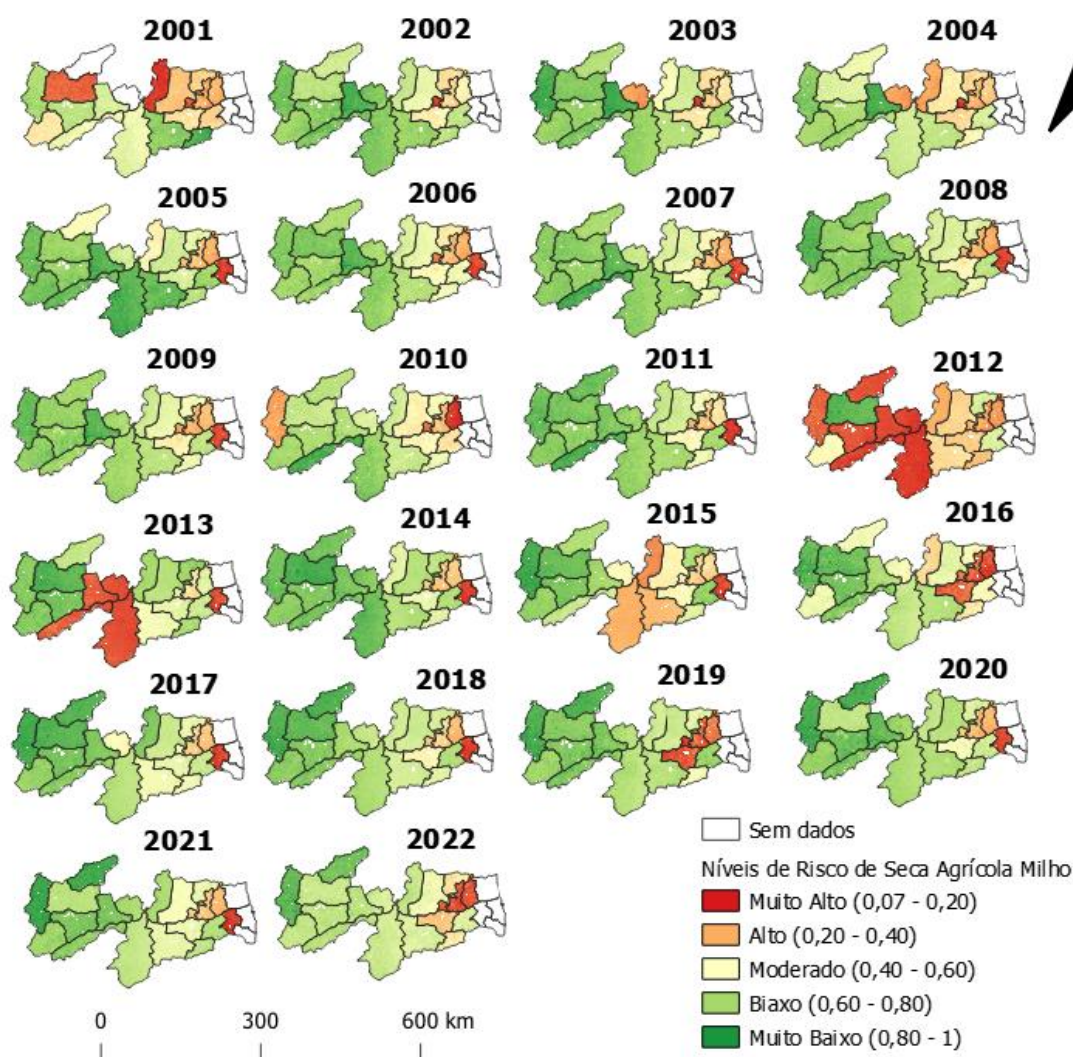
Microrregiões como Patos (04), Piancó (05), Cajazeiras (02), Catolé do Rocha (01), Sousa (03), Itaporanga (06) e Serra de Teixeira (07), situadas a oeste do estado, além das centrais Cariri Oriental (10), Cariri Ocidental (11), Curimataú Ocidental (12) e Curimataú Oriental (13), demonstraram maior vulnerabilidade, com recorrência de classificações de risco elevadas ao longo dos anos.

Em contrapartida, microrregiões como o Brejo Paraibano (15) apresentaram valores mais elevados de IRSA, indicando risco agrícola “Baixo” ou “Muito Baixo”, provavelmente em função de maior regularidade pluviométrica e características climáticas de transição entre o semiárido e o subúmido.

Nos anos de 2014 a 2016, verifica-se uma tendência de recuperação parcial, com áreas que oscilam entre risco “Moderado” e “Alto”. A partir de 2017, os níveis de risco voltam a se concentrar nas categorias mais favoráveis, evidenciando a variabilidade interanual dos indicadores climáticos e a influência das condições meteorológicas sobre o desempenho agrícola.

Esses achados reforçam a necessidade de implementação de políticas públicas adaptativas para a agricultura no semiárido paraibano, especialmente voltadas ao fortalecimento da resiliência produtiva frente às mudanças climáticas e aos eventos de estresse hídricos extremos.

Figura 17 – Valores do IRSA da cultura do milho nas microrregiões da Paraíba entre os anos de 2001 e 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

A Figura 17 apresenta a variação anual do IRSA para cada microrregião da Paraíba, no período de 2001 a 2022. A análise evidencia padrões críticos distintos entre as mesorregiões do estado, com destaque para o ano de 2012, que concentrou os menores valores de IRSA em praticamente todas as microrregiões, configurando-se como o ano mais severo de seca agrícola durante o período analisado.

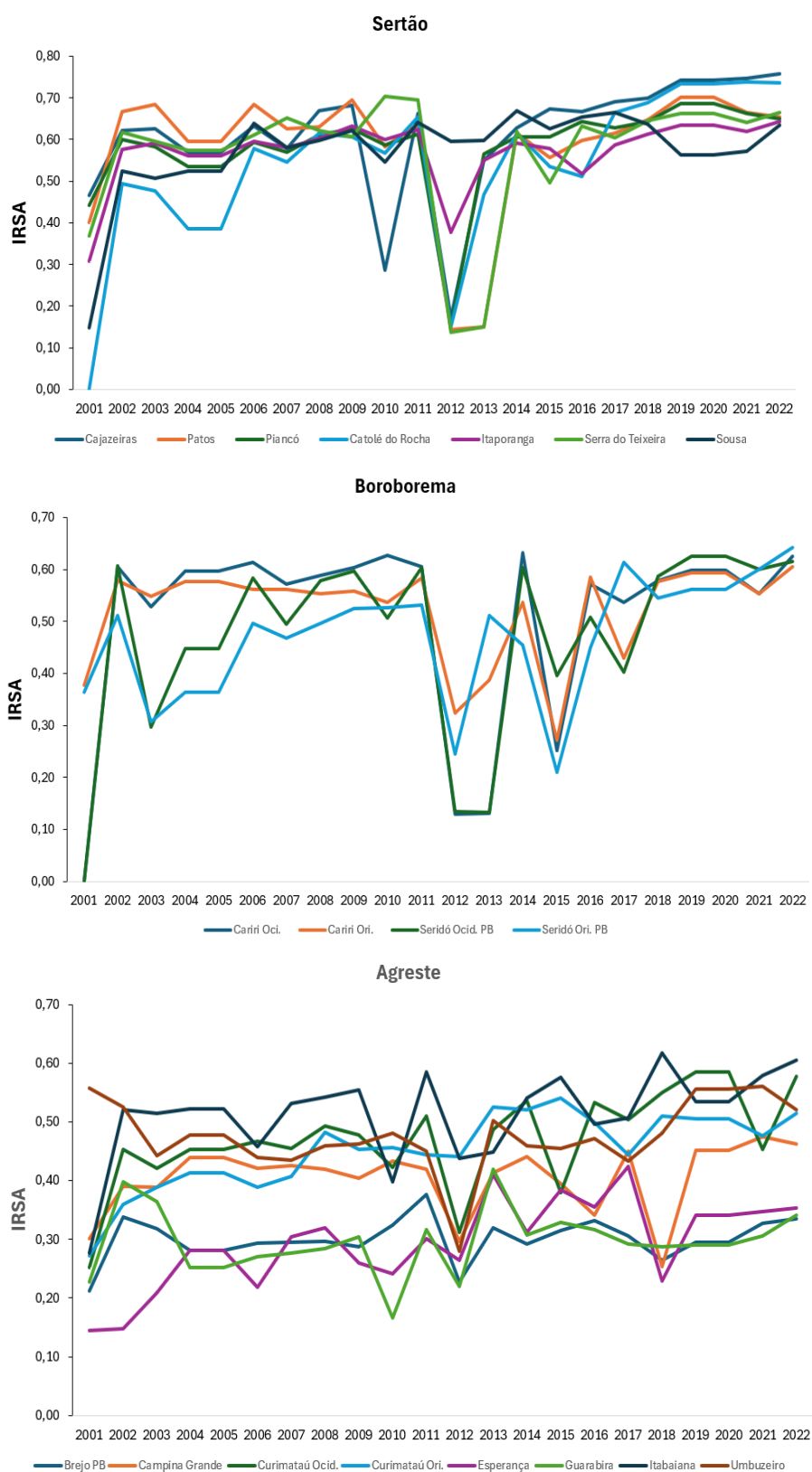
Na mesorregião do Sertão Paraibano, a microrregião de Catolé do Rocha destacou-se por apresentar os menores valores do IRSA em 2012, indicando risco moderado à seca agrícola. Essa queda acentuada é acompanhada por baixas variações entre microrregiões sertanejas, como Patos e Piancó, refletindo os impactos generalizados da estiagem naquele ano.

Na Borborema, os efeitos mais expressivos da seca também foram observados em 2012, com quedas acentuadas do IRSA nas microrregiões do Cariri Ocidental e Seridó Ocidental. Após esse período crítico, observou-se uma recuperação parcial em 2013, seguida de nova oscilação negativa em 2015. A microrregião do Seridó Oriental apresentou um comportamento irregular, com episódios de redução significativa do índice ao longo dos anos, evidenciando sua vulnerabilidade intermitente à seca.

Na mesorregião do Agreste, a microrregião de Esperança foi a que apresentou os menores valores de IRSA, com registros abaixo de 0,20 em diversos anos, como 2001 (0,14), 2003 (0,15), 2005 (0,18), 2010 (0,24) e 2018 (0,23), evidenciando maior vulnerabilidade à seca agrícola. Já a microrregião de Umbuzeiro, embora tenha apresentado oscilações, manteve valores de IRSA acima de 0,28 em todo o período, demonstrando desempenho mais estável em comparação às demais. Esses resultados reforçam que 2012 foi um dos anos mais críticos, com queda generalizada dos índices de resiliência à seca em todas as mesorregiões.

Segundo Lima et al. (2023), o ano de 2012 foi marcado por uma intensa crise hídrica na Paraíba, com baixos valores dos índices VHI e VCI em todas as mesorregiões, indicando forte estresse vegetativo e impactos severos nas áreas agrícolas. Além disso, microrregiões como Umbuzeiro, Catolé do Rocha e o Seridó Oriental revelaram uma fragilidade estrutural diante da variabilidade climática, com recorrentes quedas no IRSA, o que demandou atenção especial para estratégias de adaptação e mitigação voltadas à agricultura de sequeiro.

Figura 18 – Variabilidade temporal do IRSA para a cultura de milho para as microrregiões agrupadas por mesorregiões da Paraíba entre os anos de 2001 e 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

4.6.3 Variabilidade espaço-temporal das secas agrícolas para a cultura de mandioca

A Figura 19 mostra que o IRSA para a cultura da mandioca apresentou maior sensibilidade em comparação aos cultivos do milho e do feijão-caupi. As microrregiões do Curimataú Ocidental e do Brejo Paraibano destacaram-se como áreas mais propensas à ocorrência de seca agrícola, apresentando quedas acentuadas nos anos de estiagem intensa, especialmente em 2012 e 2013 — padrão também observado nas demais culturas analisadas.

Os riscos obtidos pelo IRSA estão de acordo com as recomendações do ZARC reforçando que, mesmo em microrregiões tradicionalmente produtoras, como o Curimataú e o Brejo, há vulnerabilidade significativa em anos de irregularidades climáticas severas, o que exige planejamento agrícola mais criterioso e políticas de apoio ao agricultor familiar.

Segundo os estudos de Francisco et al. (2017), nesses dois anos, a drástica redução das chuvas afetou significativamente a produção de mandioca, resultando em perdas na colheita e na diminuição da área plantada nas microrregiões paraibanas.

Embora a mandioca seja considerada uma cultura adaptada ao semiárido, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Brasil, 2021) ressalta que sua produtividade é altamente dependente da escolha adequada do período de plantio. O ZARC indica que, para a maior parte da Paraíba, o cultivo deve ocorrer entre os meses de abril e julho, dependendo do tipo de solo e do ciclo da cultivar (precoces, médias ou tardias). A não observância dessas janelas de plantio, associada à irregularidade das chuvas e à ausência de práticas aprimoradas, potencializa o risco de insucesso da safra, mesmo em culturas relativamente resilientes como a mandioca.

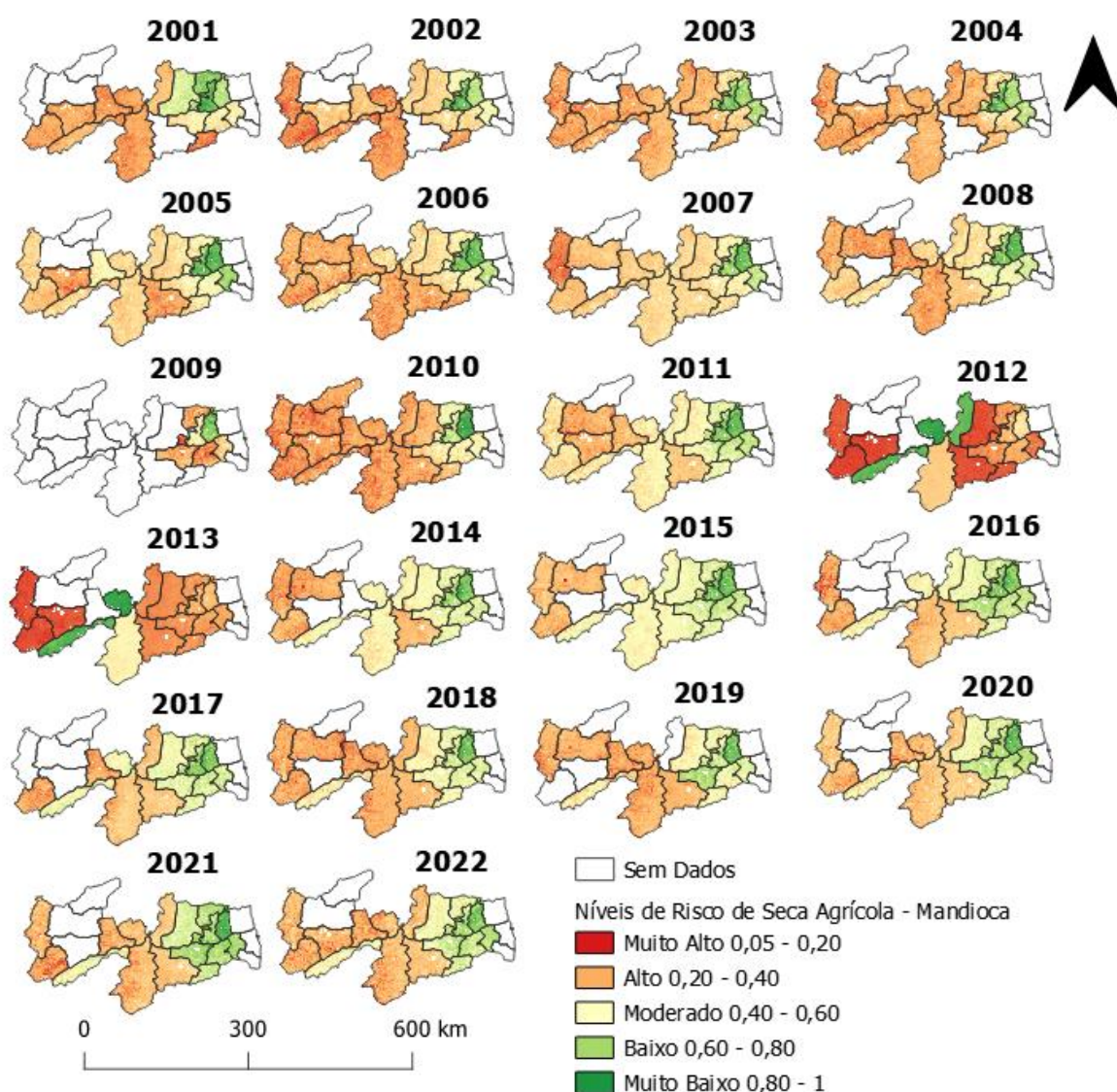
A Figura 20 apresenta a variabilidade temporal do IRSA para a cultura da mandioca nas mesorregiões da Paraíba, entre os anos de 2001 e 2022. Os resultados mostram que as microrregiões de Catolé do Rocha, Sousa, Patos, Piancó e Itaporanga, localizadas no Sertão Paraibano, registraram baixos valores em diversos anos. Observa-se que Sousa e Itaporanga apresentam valores igual a zero em anos como 2001, 2006, 2017, 2018 e 2020, o que não representa risco extremo, mas sim ausência de dados de cultivo da cultura agrícola nesse período. Apesar de um pico positivo em 2012 e 2013, especialmente em Patos e Piancó, com IRSA acima de 0,60,

a média geral dessas microrregiões manteve-se abaixo de 0,30, indicando condições desfavoráveis à produção em grande parte da série.

Na mesorregião da Borborema, destaca-se a microrregião do Cariri Ocidental, que apresentou ausência de dados em 2001 e 2010 e quedas acentuadas em 2009 e 2018, com valores de IRSA próximos de 0,20. As microrregiões do Seridó Ocidental e Seridó Oriental também apresentaram oscilações significativas, com destaque para valores baixos em 2012 e 2020. Embora tenha ocorrido uma recuperação em 2013, os índices voltaram a cair nos anos posteriores, indicando persistente vulnerabilidade agrícola.

No Agreste Paraibano, as microrregiões apresentaram maior estabilidade em comparação às demais mesorregiões. Entretanto, Esperança registrou os menores valores do Agreste, com IRSA abaixo de 0,20 nos anos de 2002, 2006, 2009, 2011, 2012, 2015 e 2017. Já Umbuzeiro e Guarabira também apresentaram oscilações negativas, com IRSA raramente ultrapassando 0,40, refletindo resiliência limitada da cultura nesses Territórios. Esperança e Itabaiana também mostram baixa resiliência, com valores que raramente ultrapassam 0,20, mantendo-se, assim, abaixo de 0,15.

Figura 19 – Valores do IRSA da cultura da mandioca nas microrregiões da Paraíba nos anos de 2001 a 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

A instabilidade anual nessas regiões indica fragilidade persistente à seca agrícola. Diante desses resultados, constatou-se que as microrregiões mais críticas ao longo do período analisado são Itaporanga, Sousa, Cariri Ocidental e Umbuzeiro, com IRSA frequentemente próximo de zero. Esses dados evidenciam a necessidade de políticas públicas voltadas para mitigação da seca e fortalecimento da segurança agrícola nessas áreas.

Figura 20 – Variabilidade temporal do IRSA para a cultura de mandioca para as microrregiões agrupadas por mesorregiões da Paraíba entre os anos de 2001 e 2022



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Na Tabela 7, a análise dos valores médios do IRSA, referente ao período de 2001 a 2022, evidencia uma heterogeneidade significativa na vulnerabilidade agrícola das microrregiões da Paraíba. Os dados, agrupados por mesorregiões e considerando as culturas do feijão-caupi, milho e mandioca, foram classificados em cinco categorias de risco: muito alto ($IRSA < 0,20$), alto ($0,20 \leq IRSA < 0,40$), moderado ($0,40 \leq IRSA < 0,60$), baixo ($0,60 \leq IRSA < 0,80$) e muito baixo ($IRSA \geq 0,80$). A coluna de somatório geral reflete a frequência com que cada microrregião foi classificada nos diferentes níveis de risco ao longo da série temporal, servindo como um indicativo de sua resiliência ou vulnerabilidade frente à seca agrícola.

Tabela 7 – Tabela síntese dos valores de IRSA para as culturas analisadas

Mesorregiões	Microrregiões	Feijão-Caupi		Milho		Mandioca		Classificação do IRSA			
		IRSA	Classificação	IRSA	Classificação	IRSA	Classificação	Feijão	Milho	Mandioca	Geral
Sertão Paraibano	Catolé do Rocha	0,53	Moderado	0,54	Moderado	0,00	Sem Dados	2	1	0	3
	Cajazeiras	0,51	Moderado	0,61	Baixo	0,25	Alto	1	1	1	3
	Sousa	0,48	Moderado	0,57	Moderado	0,19	Muito Alto	2	1	1	4
	Patos	0,52	Moderado	0,58	Moderado	0,24	Alto	4	1	1	6
	Piancó	0,50	Moderado	0,58	Moderado	0,17	Muito Alto	1	3	1	5
	Itaporanga	0,53	Moderado	0,57	Moderado	0,26	Alto	2	2	2	6
	Serra do Teixeira	0,51	Moderado	0,57	Moderado	0,33	Alto	1	2	1	4
Borborema	Seridó Ocidental	0,55	Moderado	0,47	Moderado	0,32	Alto	3	1	2	6
	Seridó Oriental	0,60	Baixo	0,47	Moderado	0,30	Alto	1	1	4	6
	Cariri Ocidental	0,56	Moderado	0,51	Moderado	0,29	Alto	1	2	1	4
	Cariri Oriental	0,53	Moderado	0,52	Moderado	0,24	Alto	3	3	1	7
Agreste	Curimataú Ocid.	0,59	Moderado	0,47	Moderado	0,31	Alto	2	3	4	9
	Curimataú Oriental	0,60	Baixo	0,45	Moderado	0,34	Alto	1	3	4	8
	Esperança	0,67	Baixo	0,29	Alto	0,36	Alto	4	2	1	7
	Brejo Paraibano	0,51	Moderado	0,30	Alto	0,41	Moderado	3	1	1	5
	Guarabira	0,43	Moderado	0,30	Alto	0,44	Moderado	3	3	2	7
	Campina Grande	0,55	Moderado	0,40	Moderado	0,34	Alto	5	3	5	13
	Itabaiana	0,49	Moderado	0,51	Moderado	0,35	Alto	5	2	3	10
	Umbuzeiro	0,57	Moderado	0,48	Moderado	0,32	Alto	1	4	3	8

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

As microrregiões de Guarabira (Agreste) e Sousa (Sertão) destacam-se como as áreas de maior vulnerabilidade, com os menores somatórios gerais (3 e 4, respectivamente), evidenciando predominância de classificações de risco alto e muito alto, especialmente para a cultura da mandioca. No caso de Sousa, observam-se baixos valores de IRSA para mandioca (0,19), indicando forte suscetibilidade à seca, enquanto Guarabira apresenta valores médios igualmente preocupantes para feijão e milho, ambos classificados como risco alto.

No grupo intermediário, com somatórios entre 5 e 7, estão microrregiões como Itaporanga, Campina Grande, Cariri Oriental e Umbuzeiro, que alternam entre classificações de risco moderado e alto, apresentando menor estabilidade interanual. Essas regiões exigem atenção, pois embora não sejam as mais críticas, apresentam persistência de fragilidade climática em pelo menos uma das culturas analisadas.

Em contrapartida, microrregiões como Curimataú Ocidental, Curimataú Oriental, Esperança e Itabaiana evidenciam maior resiliência, com somatórios gerais mais elevados (entre 7 e 10), indicando predominância de classificações moderadas ou baixas para as três culturas. Esperança, por exemplo, apresenta valores consistentes de IRSA e desempenho relativamente equilibrado entre as culturas, sugerindo a presença de condições agroclimáticas ou estratégias de manejo mais eficazes.

Destaca-se ainda que, para a cultura da mandioca, algumas microrregiões inseridas nas mesorregiões do Sertão e da Borborema apresentaram ausência de dados de área colhida em determinados anos da série analisada, o que pode ter influenciado as médias e as classificações associadas. Em contraste, as microrregiões do Agreste forneceram dados completos ao longo de todo o período, o que garante maior consistência analítica para essa mesorregião.

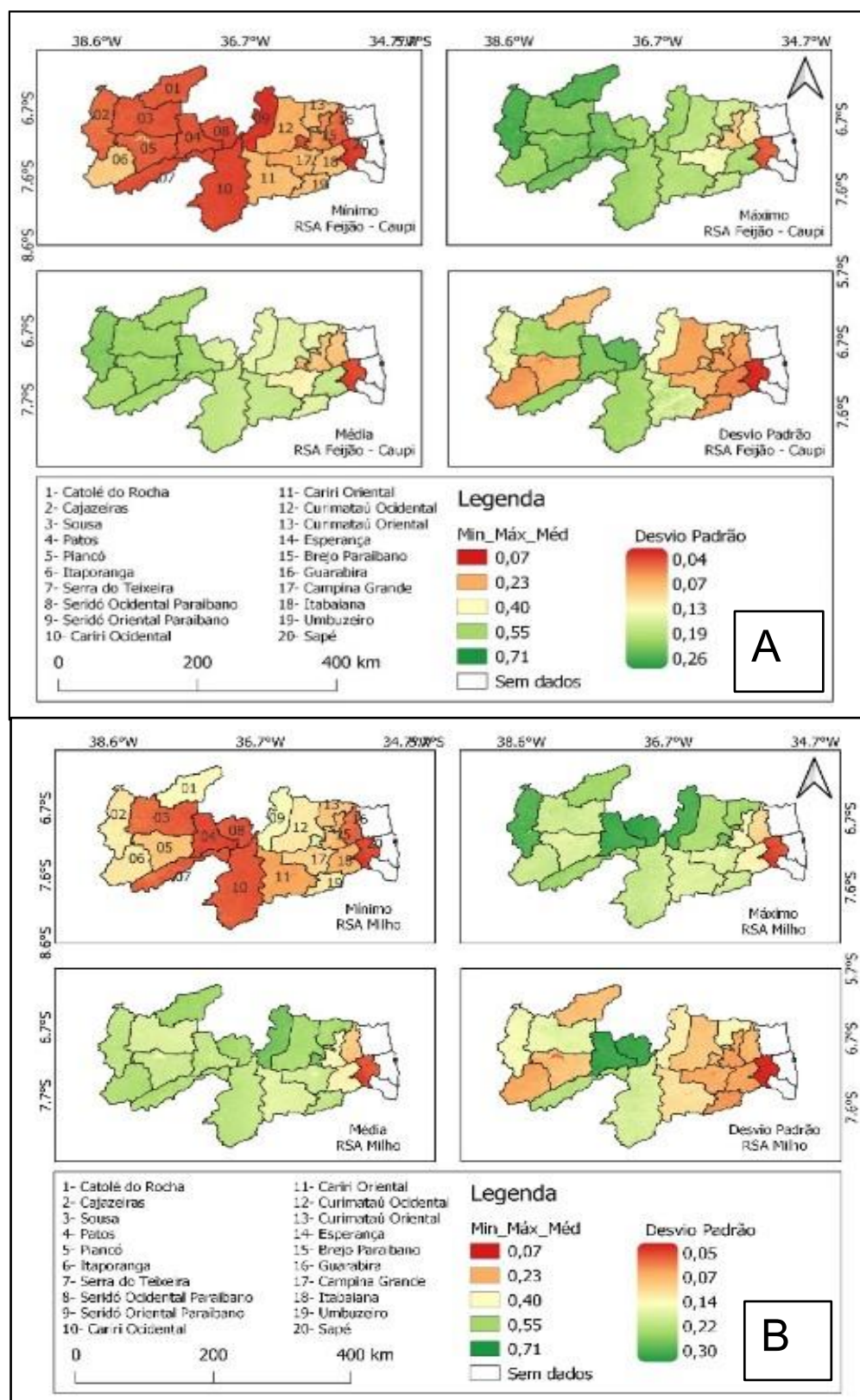
4.7 ESTATÍSTICAS DA ANÁLISE TEMPORAL DO IRSA

Os cálculos de estatística básica extraídos dos índices IRSA do feijão-caupi, milho e mandioca no período de 2001 a 2022 incluíram os valores de mínimo, máximo, médio e desvio padrão dos pixels (Figura 18). Observando o mapa dos valores de mínimo, as áreas em vermelho indicam os locais onde os valores do índice de IRSA indicam uma alta vulnerabilidade, ou seja, valores entre 0,07 a 0,23 indicando microrregiões com maior suscetibilidade à seca agrícola quando se refere à produtividade do feijão-caupi na Figura 21A e do milho na Figura 21B nas

microrregiões Catolé do Rocha(01), Cajazeiras (09), Patos (04), Piancó (05), Serra de Teixeira (07), Seridó Ocidental (08), Seridó Oriental (10) e do Cariri Ocidental (10). Essas variações são indicadas pelas cores vermelhas especialmente nas microrregiões que se encontram na região do Sertão Paraibano.

A análise dos dados estatísticos referentes aos últimos 22 anos evidenciou que os valores máximos do índice IRSA foram, de modo geral, baixos nas microrregiões de Cajazeiras (02), Catolé do Rocha (01), Patos (04) e Serra de Teixeira (07). Em ambas as culturas analisadas, os valores máximos de pixels variaram entre 0,55 e 0,71, sendo classificados de acordo com o valor do índice, como de risco baixo a muito baixo para o índice de IRSA do feijão-caupi (Figura 21A) e do milho (Figura 21B). Os resultados indicam que o índice de IRSA aplicado à cultura do milho apresentou desempenho superior, especialmente nos anos mais secos, em comparação ao índice desenvolvido para o feijão-caupi. Essa diferença pode ser observada claramente ao se comparar os valores máximos dos pixels nas microrregiões citadas, onde o milho demonstrou maior resiliência às condições adversas de seca agrícola, o que se observa na Figura 21(B).

Figura 21 – Estatísticas do índice de IRSA para o feijão-caupi (A) e milho (B) entre os anos de 2001 e 2022 para as microrregiões Paraibanas



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

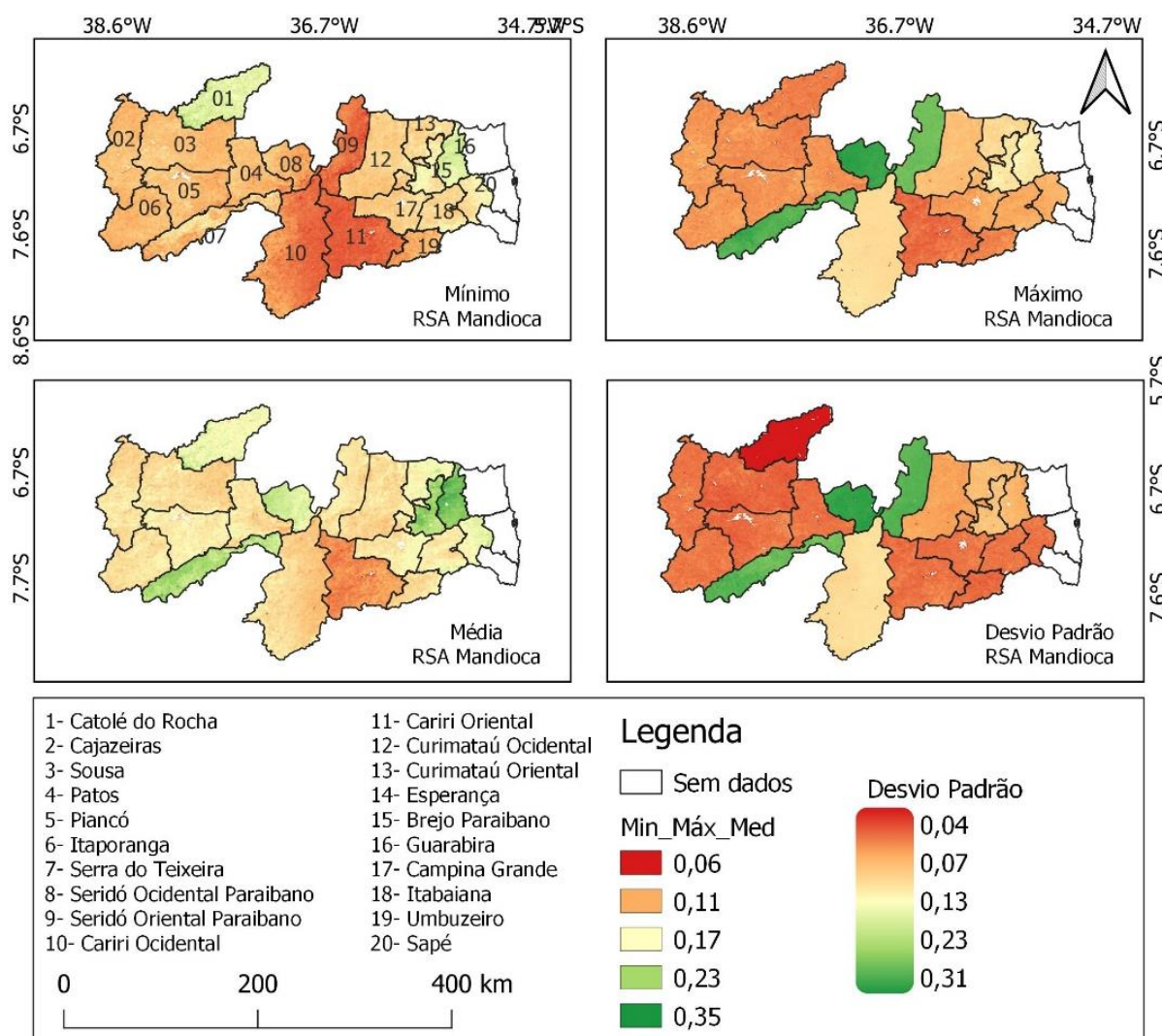
Para os valores médios Figura 21, o IRSA do milho tende a apresentar um desempenho melhor que o índice da cultura de feijão-caupi, o qual identificou uma maior extensão de microrregiões de risco mais baixos entre valores de pixels 0,55 a 0,71 e menos microrregiões críticas em alto risco a moderado. Isso sugere que o milho é, em média, mais resistente ou encontra melhores condições para o cultivo em um maior número das microrregiões paraibanas.

O desvio padrão dos índices apontou as microrregiões com as menores e as maiores variações nos valores desse índice. Entre elas, destacam-se Catolé do Rocha (01), Patos (05) e Cariri Ocidental (10) — áreas mais centrais da região do Sertão, onde ocorreram as altas variações para o índice do IRSA do milho (Figura 21).

A alta variabilidade dessas microrregiões, que incluem Cariri Oriental, Ocidental, Serra de Teixeira, Patos, Piancó, Catolé do Rocha, Sousa e Itaporanga, todas com clima predominantemente semiárido, tornou os resultados dos modelos do feijão-caupi e do milho bastante sensíveis. Essa sensibilidade se deve às variações climáticas, especialmente à disponibilidade irregular das chuvas. O índice do milho, por exemplo, demonstrou maior instabilidade, com variações de menores valores, indicando que essas microrregiões estão mais sujeitas a mudanças bruscas de condições climáticas.

Segundo Souza (2019), os eventos de seca estão principalmente associados à redução ou escassez de ocorrências ao longo de um determinado período, o que gera impactos em diversos setores. Esses impactos se tornam evidentes quando ocorrem mudanças no clima sendo agravado pelas atividades antrópicas em áreas com grande variabilidade climática e escassez de recursos hídricos. A Figura 22 apresenta as estatísticas básicas do IRSA da mandioca dos anos de 2001 a 2022 em microrregiões do estado da Paraíba-PB.

Figura 22 – Estatística básicas do índice IRSA para a cultura de mandioca entre os anos de 2001 e 2022 para as microrregiões da Paraíba



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Segundo Pereira e Barbosa (2009), nas microrregiões de Serra do Teixeira, Patos, Cajazeiras, projetos que têm como eixo a construção de cisternas para a captação de água para o consumo humano e a formação em convivência com o semiárido são direcionados para garantir a população rural ou o acesso à terra e à água tanto para o consumo das famílias e dos animais quanto para mitigar os riscos associados à atividade agrícola. Essas iniciativas foram propostas para o aumento da produção de alimentos por meio de processos participativos. Nesse contexto, as políticas públicas de captação e armazenamento de água rompidas no Semiárido paraibano destacam-se por promover integração e autossuficiência dessas microrregiões.

A análise dos valores mínimos, máximos, médios e do desvio padrão do modelo, obtidos a partir dos índices IRSA (Figura 22), revelou que as microrregiões do Brejo Paraibano (15) e Campina Grande (17) apresentaram um risco moderado de seca agrícola.

Em contraste, as microrregiões da Serra de Teixeira (07), Seridó Ocidental (10) e Seridó Oriental (11) exibiram valores de IRSA entre 0,23 e 0,35. Esses resultados indicam níveis elevados de risco de seca, pois se aproximam do extremo inferior da escala (0 = risco muito alto). Tais valores refletem condições menos favoráveis para a cultura da mandioca em contextos climáticos adversos, diferindo daquelas microrregiões que mantiveram valores mais altos de IRSA (acima de 0,70), associados a um baixo risco de seca.

De acordo com Silva (2015) essas microrregiões são conhecidas por receberem mais chuvas devido à sua proximidade com a zona de transição para o Agreste, o que as torna mais aptas a sustentar a agricultura, mesmo durante anos mais secos. A vegetação nativa e as práticas agrícolas também podem contribuir para uma melhor conservação do solo e retenção de umidade, o que favorece o cultivo de mandioca.

Os valores médios dos pixels na Figura 22 indicam que as microrregiões do Serra de Teixeira (7), Seridó Ocidental Paraibano (8), Brejo Paraibano (15) e Guarabira (16) mostram um melhor desempenho no modelo, registrando baixo valor do IRSA refletindo que o desempenho da cultura da mandioca foram mais resiliente às condições climáticas do período analisado. Por outro lado, na região Oeste do estado da Paraíba, as microrregiões de Cajazeiras (02), Sousa (03), Patos (04), Piancó (05) e Itaporanga (06) apresentam médias indicando riscos moderado de 0,40 a 0,60. Esses valores podem estar associados às características resistentes das culturas ao clima predominantemente do semiárido nessas microrregiões.

De acordo com Lima (2022) essas microrregiões no Oeste paraibano historicamente enfrentam frequentemente períodos de seca severa, devido à irregularidade das precipitações, e os solos, em sua maioria, são menos férteis e apresentam uma baixa capacidade de retenção de água, agravando o estresse hídrico nas culturas.

O desvio padrão indica que a variabilidade do IRSA é mais elevada na microrregião de Catolé do Rocha (1), alcançando valores de até 0,26. Essa elevada oscilação pode ser atribuída, em parte, à ausência de dados de área colhida em

alguns anos ao longo da série histórica de 22 anos, o que compromete a regularidade dos registros e influencia a instabilidade do índice. Tal comportamento sugere incertezas quanto à efetiva produção agrícola da mandioca na região e reflete tanto a irregularidade climática quanto a fragilidade das informações agrícolas disponíveis, dificultando a previsibilidade da resiliência produtiva da microrregião. De acordo com Bongiovani (2019), a regularidade da seca em algumas microrregiões, associada ao semiárido paraibano, impacta as práticas agrícolas e a resiliência dos cultivos locais.

4.8 ÁREAS DE PREDOMINÂNCIA DE PIXELS POR MICRORREGIÕES

Os valores apresentados na Tabela 8, Figura 23, referem-se às áreas (em km²) e às respectivas porcentagens de abrangência do índice de risco de seca agrícola para as culturas de feijão-caupi, milho e mandioca nas microrregiões do estado da Paraíba.

Esses dados evidenciam a predominância dos pixels classificados pelo índice, indicando os níveis de risco de seca agrícola em cada microrregião. As extensões territoriais mapeadas na pesquisa somam um total de 52.039 km². Ressalta-se que as microrregiões de João Pessoa, Litoral Norte e Litoral Sul e Sapé não foram incluídas na análise, uma vez que o Censo Agropecuário não apresentou dados disponíveis sobre o cultivo dessas culturas nessas localidades.

As análises realizadas a partir das médias das áreas, considerando as três culturas avaliadas, evidenciaram a predominância de pixels com valores do IRSA entre 0,58 e 0,81 — faixas que indicam baixo a muito baixo risco de seca agrícola.

Essa predominância foi observada em percentuais de área que variaram entre 28,69% e 30,35% por microrregião (Tabela 8, Figura 23). As microrregiões de Patos (04), Piancó (05), Cajazeiras (02), Sousa (03), Catolé do Rocha (01) e Itaporanga (06) destacaram-se nesse cenário, apresentando a maior proporção de áreas com baixos níveis de risco, o que sugere maior estabilidade hídrica para o desenvolvimento das culturas de feijão e milho para a cultura de mandioca. O comportamento do índice mostrou as microrregiões do Brejo (15), Guarabira (16) analisadas.

Segundo o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Brasil, 2024), essas microrregiões estão inseridas em municípios com alta aptidão para o cultivo de feijão-caupi, mandioca e milho. Essas culturas são classificadas como de sequeiro, e seu plantio é recomendado.

A recomendação se justifica pelo fato de as culturas serem agrupadas em três categorias, conforme a capacidade de retenção de água do solo, e por se adaptarem bem às condições climáticas da região onde as microrregiões paraibanas estão localizadas.

De acordo com Candido, Sousa Nascimento e Borges (2024), o fortalecimento da agricultura familiar nessas áreas é estratégia essencial para promover o desenvolvimento local, especialmente em comunidades que dependem diretamente dessa atividade.

Tabela 8 – Áreas da série temporal do índice de Risco de Seca Agrícola

Níveis de IRSA	Feijão		Milho		Mandioca	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Baixo	18.437	33	19.768	38	6.588	15
Muito baixo	20.303	36	2.201	4	24.874	56
Moderado	14.200	25	27.713	53	9.299	21
Alto	2.026	4	1.451	3	3.255	7
Muito alto	1.073	2	905	2	22,48	0

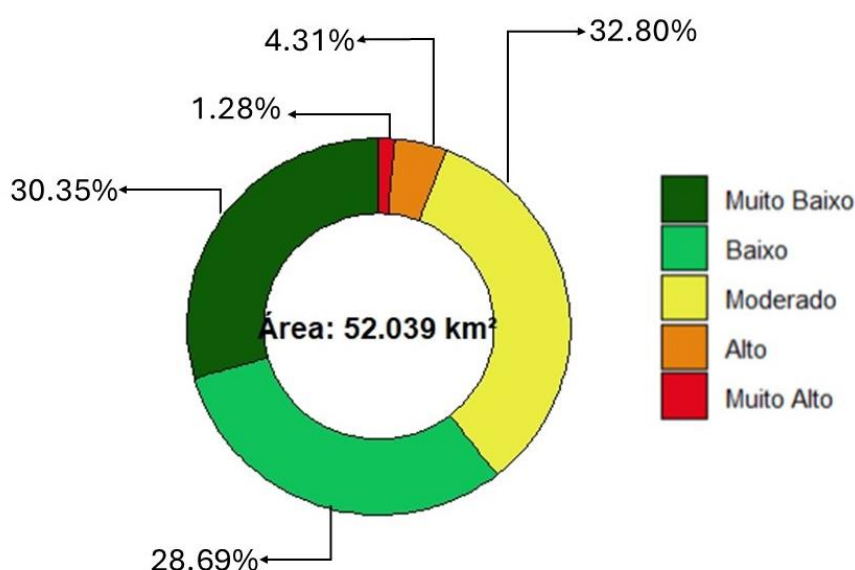
Fonte: Dados da pesquisa (2025)

O IRSA, quando analisado com base nas médias dos três modelos (Tabela 8 e Figura 23), indicou níveis moderados de risco de seca agrícola em uma extensão territorial de 17.071 km² entre as microrregiões analisadas, o que corresponde a 32,80% do total da área estudada. Esses valores refletem as áreas predominantes por microrregião onde os pixels apresentaram essa classificação de risco. As microrregiões com maior concentração desses níveis moderados foram Seridó Ocidental (8) e Seridó Oriental (9), Cariri Oriental (11) e Cariri Ocidental (10), Campina Grande (17), Guarabira (16), Umbuzeiro (19) e Curimataú Ocidental (12), pertencentes às mesorregiões do Sertão, Agreste e Borborema. A região semiárida do Sertão Paraibano é marcada por longos períodos de seca, o que pode ser um reflexo das condições que também afetam o Agreste e a Borborema (Bongiovani, 2019).

De acordo com Silva e Nascimento (2020) na microrregião de Guarabira, a redução da produtividade agrícola ocorre devido à diminuição da fertilidade do solo que leva à desertificação e degradação do solo, reduzindo sua fertilidade e capacidade de retenção de água, o que compromete o crescimento das plantas e a produtividade das culturas. As alterações do microclima, provocadas por mudanças

no uso da terra e degradação ambiental, contribuem para o aumento da temperatura e a redução da umidade do solo e do ar. Esses fatores criam condições desfavoráveis ao desenvolvimento das culturas agrícolas, elevando o risco de estresse hídrico e de ocorrência de seca agrícola, especialmente em regiões dependentes da chuva para produção.

Figura 23 – Gráfico da predominância de pixels das áreas na série temporal do índice de Risco de Seca Agrícola



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

As microrregiões de Catolé do Rocha (01), Guarabira (16), Brejo Paraibano (15) e Itabaiana (18) registraram áreas de 2,24 km² e 0,667 km², na Tabela 8 e na Figura 20, consideradas pelo índice de níveis alto a moderado risco de seca agrícola, porém, de acordo com os dados apresentados pelo Censo Agrícola do IBGE (2023), essas microrregiões apresentaram dados de áreas colhidas abaixo de 2 hectares e em alguns anos não apresentaram dados das culturas comprometendo o comportamento do índice.

Segundo Baydaroğlu et al. (2024), a identificação de indicadores eficazes de seca foi realizada no estado de Iowa, uma área do meio-oeste dos Estados Unidos conhecida por sua significativa produção de milho e soja. Os autores avaliaram os indicadores da seca e esses podem servir como medidas que avaliam a severidade e a duração das condições de seca, o que são cruciais para monitorar a sustentabilidade

agrícola e o abastecimento de água. Acrescentam também que esses métodos foram usados para determinar qual o modelo de seca é mais eficiente para prever a produtividade agrícola e estimar o rendimento da safra.

Estudos realizados por Sajjad et al. (2021) demonstraram o papel do feijão-caupi na coleta de água da chuva para aumentar a produção de trigo na região de Pothwar, no Paquistão, mostrando o impacto da biomassa do feijão-caupi na conservação da umidade do solo e subsequente lucratividade da cultura.

Mugiyo et al. (2021) realizaram estudo na África do Sul, em pequenas regiões agrícolas, que enfrentam desafios climáticos, como escassez de água e eventos de seca, o comportamento das culturas como o feijão-caupi em condições adversas utilizando o método AHP combinando com dados de sensoriamento remoto para análise multicritério, e os resultados observados foram uma avaliação detalhada das áreas mais resilientes ao cultivo e permitiu avaliar as condições de seca para promover uma melhor alocação desses recursos e um planejamento agrícola na região estudada.

4.9 VALIDAÇÃO DO ÍNDICE DE IRSA

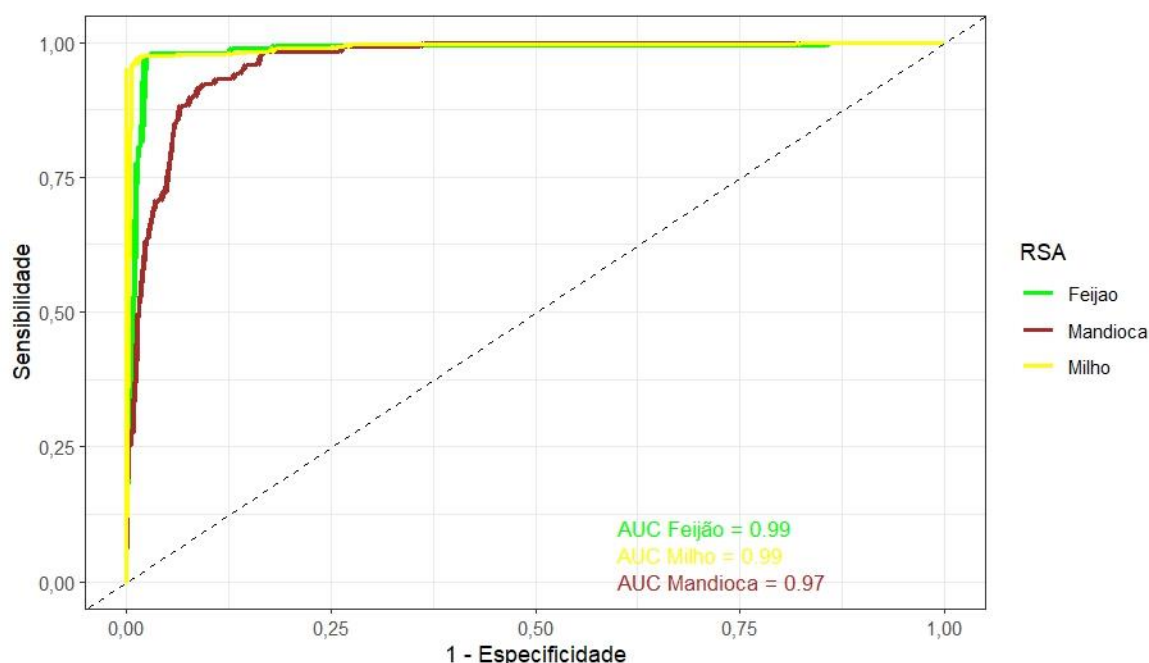
O teste de eficiência aplicado ao modelo dos Níveis de Risco à Seca Agrícola (NRSA) avaliou sua capacidade de classificação por meio das curvas ROC, que expressam a taxa de acerto na distinção entre áreas com e sem ocorrência de seca agrícola. Os valores de Área Sob a Curva (AUC) obtidos foram de 0,99, 0,99 e 0,97, conforme mostrados na Figura 24, indicando desempenho excelente na predição dos níveis de risco.

Esses valores indicam que o modelo tem uma excelente capacidade de distinguir entre os níveis do IRSA, classificando corretamente os casos de presença e ausência de seca agrícola. De acordo com as faixas de desempenho, quanto mais próximo de 1 for o valor da AUC, melhor é a eficiência do modelo. Isso significa que a especificidade (capacidade de identificar corretamente os casos de seca agrícola, representados por valores de IRSA próximos de 0) e a sensibilidade (capacidade de identificar corretamente os casos sem seca agrícola, com valores de IRSA próximos de 1) foram elevadas. O modelo classificou adequadamente os diferentes níveis de risco, o que comprova seu excelente desempenho com base nos fatores climáticos utilizados. Além disso, os resultados evidenciam a sensibilidade do modelo em

mapear os casos de seca agrícola, contribuindo para maior credibilidade científica e transparência no processo de tomada de decisão.

No estudo das microrregiões paraibanas, a escolha da metodologia adequada permitiu incorporar tanto a variabilidade espacial quanto a relevância dos dados para cada cultura agrícola. Desta forma, o mapeamento de risco garantiu uma representação equilibrada das condições ambientais das regiões.

Figura 24 – Gráfico da curva ROC para validação do IRSA



Além disso, nossos resultados corroboraram com os estudos existentes aplicados em um ambiente semelhante, como na validação do modelo pela ROC em estudos realizados no sudeste de Queensland na Austrália que é uma região propensa à seca com aproximadamente 123.897 km² e sua principal atividade econômica é a agricultura, nessa região Rahmati et al. (2019), Dayal et al. (2018), Rahmati et al. (2020), e Kiem et al. (2016) desenvolveram o modelo de análise de risco à seca meteorológica, agrícola e hidrológica. Os valores obtidos da AUC da análise do modelo de vulnerabilidade foram de 0,79, 0,82 e 0,88, respectivamente. Esses valores indicaram que os modelos de vulnerabilidade desenvolvidos nesses estudos atingiram um desempenho favorável para as análises de fenômeno da seca em regiões com áreas voltadas para agriculturas, pastagens e hortaliças.

Recentemente, Guria et al. (2024) realizaram estudos na região do Nordeste da Índia, especificamente nos Sete Estados Irmãos, que inclui Arunachal Pradesh, Assam, Manipur, Meghalaya, Mizoram, Nagaland e Tripura. Eles avaliaram a suscetibilidade da desflorestação e as mudanças na cobertura florestal, utilizando modelos de tomada de decisão multicritério. Avaliaram a eficiência a partir da AUC e da curva ROC. Os modelos obtiveram uma boa capacidade preditiva apresentando os seguintes resultados da AUCs para os modelos SAW com 0.901, EDAS com 0.895 e WASPAS com 0.864.

5 DISCUSSÃO: VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO IRSA

Os modelos de identificação de secas agrícolas têm o objetivo de melhorar a precisão e a exatidão por meio da integração de diversas fontes de dados e algoritmos avançados. Da mesma forma, os índices desenvolvidos pelo cruzamento de dados geoespaciais utilizando as técnicas do sensoriamento remoto e dados de modelo, superando os índices tradicionais de seca na detecção de eventos de seca e quantificando a severidade (Jadhav, 2024). Nas microrregiões paraibanas cuja economia depende fortemente da agricultura, como Brejo Paraibano, Agreste e Sousa, torna-se fundamental incorporar os avanços tecnológicos no desenvolvimento de modelos e no aprimoramento da exatidão e da precisão do monitoramento das secas agrícolas.

Segundo Silva et al. (2024) o Agreste, por se localizar em uma área de transição entre os climas semiárido e subúmido, tem sofrido com a alta variabilidade climática e é vulnerável à seca. As análises baseadas em NDVI e SPEI revelam que essa sub-região apresenta episódios de seca mais intensos e prolongados nos últimos anos, especialmente após 2012, destacando sua vulnerabilidade hídrica.

De acordo com Rahmati et al. (2019) as abordagens de aprendizado de máquina são capazes de construir mapas de risco geral, auxiliando na adoção de medidas de planejamento de contingência de seca não apenas para a região estudada, mas também para outras regiões onde a seca representa um desafio urgente.

Na aplicabilidade do modelo nas microrregiões paraibanas, a integração de múltiplas fontes como dados de satélite e dados de áreas colhidas das culturas possibilitou uma visão mais completa das condições de seca e foi capaz de reproduzir com sucesso a heterogeneidade espacial do padrão de seca e manter a consistência temporal e espacial com as condições reais das diferentes características climáticas que predominam em todas as microrregiões, o que confirma a eficácia do modelo no acompanhamento da seca agrícola a partir da escalabilidade e simplicidade do método abordado para monitorar com confiança a seca agrícola em grandes áreas, o que pode ser adaptado para outras regiões vegetadas com observações de campo limitadas.

O desenvolvimento de abordagens para o mapeamento do risco de seca agrícola evidenciou que o método do Processo de Análise Hierárquica (AHP) se

mostrou eficaz para identificar e classificar as áreas de maior risco de seca nas microrregiões paraibanas. A análise temporal de 22 anos apontou a ocorrência de secas nos anos de 2012, 2015, 2016, 2017, 2018 e 2021 em todos os modelos gerados, demonstrando a viabilidade da metodologia aplicada. Essa abordagem utilizou dados de evapotranspiração e temperatura do satélite MODIS, dados de precipitação do CHIRPS e informações de áreas colhidas obtidas na plataforma SIDRA do IBGE.

Os resultados obtidos a partir das análises do índice, com base em critérios específicos, como clima, características da temperatura, da vegetação e os padrões históricos dos cultivos, mostraram que, devido ao aquecimento global e, conseqüentemente, à baixa ocorrência de chuvas na maioria das microrregiões mapeadas, tornou-se necessário o uso de uma análise de frequência dos eventos, a fim de avaliar sua evolução e seus impactos sobre o meio ambiente e a sociedade. Os estudos da variabilidade temporal e espacial da ocorrência da seca nessas regiões é importante para diagnosticar a realidade desses espaços geográficos.

Os dados do Censo Agropecuário, disponibilizados pela plataforma SIDRA, foram fundamentais para o mapeamento do risco de seca agrícola. No entanto, observou-se a ausência de informações em algumas microrregiões, o que comprometeu a confiabilidade na construção do índice e, conseqüentemente, afetou a qualidade das análises dos resultados da pesquisa. Essa lacuna de dados impactou diretamente o pré-processamento e a implementação das informações utilizadas na formulação do índice de risco de seca agrícola, dificultando o mapeamento preciso e a identificação dos impactos da seca ao longo dos 22 anos avaliados.

Por outro lado, é fundamental destacar a relevância dos dados do Censo Agropecuário, que desempenham um papel essencial na avaliação de políticas públicas, como aquelas voltadas à redistribuição de terras. Esses dados também subsidiam estudos sobre a expansão das fronteiras agrícolas e contribuem significativamente para a produção de indicadores ambientais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa identificou as áreas suscetíveis à ocorrência de secas agrícolas por meio da aplicação de um índice de risco de seca agrícola usando dados censitários, sensoriamento remoto e análise multicritério, para avaliar a influência das secas na área colhida das culturas de feijão-caupi, milho e mandioca nas microrregiões paraibanas.

O índice avaliou e obteve resultados satisfatórios para as microrregiões com baixa precipitação ou com elevada evapotranspiração resultante do estresse hídrico das culturas agrícolas, o que constatou que essas oscilações afetam negativamente o crescimento e o desenvolvimento das culturas agrícolas.

Embora o índice forneça informações valiosas para o monitoramento e a previsão de secas, ainda persistem desafios relacionados à representação precisa das complexas interações entre fatores climáticos e ambientais, especialmente em regiões semiáridas. Para superar essas limitações, são necessários avanços contínuos nas tecnologias geoespaciais, bem como a integração de múltiplas fontes de dados, o que permitirá aprimorar a precisão, a robustez e a aplicabilidade do índice em diferentes contextos territoriais.

A aplicação de técnicas de geoprocessamento na avaliação do risco de seca aumenta a capacidade de analisar, modelar e visualizar as condições de seca, apoiando, em última análise, melhores estratégias de tomada de decisão e gestão adaptativa em regiões com a problemática com a falta de gestão dos recursos hídricos. Esses estudos destacam os avanços no monitoramento da seca, mas ainda permanecem desafios para garantir a precisão e a aplicabilidade desses modelos em diversos contextos agrícolas.

Para alcançar maior precisão do índice, conclui-se que é necessário dispor de um registro histórico de longo prazo de imagens de satélite com alta resolução, aliado a dados meteorológicos abrangentes, distribuídos em escala regional. Esses dados são fundamentais para avaliar e identificar os níveis de severidade de áreas propensas à seca. Além disso, é essencial que os órgãos responsáveis disponibilizem informações mais precisas, livres de lacunas, e desenvolvam um banco de dados mais completo e acessível da produção agrícola, contendo informações que retratam com fidelidade a situação real dos cultivos.

Esse conjunto de dados permitirá a construção de modelos e índices capazes de refletir sobre as situações reais enfrentadas pelas regiões em relação às mudanças climáticas, possibilitando prever cenários e auxiliar nas tomadas de decisões estratégicas. A existência de informações consistentes e planejadas não apenas detecta riscos associados à seca agrícola, mas também fornece uma base teórica sólida para subsidiar políticas públicas efetivas, perspectivas para intervenções que reduzem ou remediam os impactos ambientais provocados pela atividade humana e promovem o uso sustentável dos recursos naturais.

7 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se a aplicação prática do Índice de Risco de Seca Agrícola (IRSA) como ferramenta de apoio à gestão territorial e ao planejamento agrícola com vulnerabilidade ambiental com relação à seca. Os mapas de risco espacialmente distribuídos oferecem subsídios valiosos para a tomada de decisão por parte de órgãos públicos, gestores ambientais e agricultores, especialmente no que se refere à identificação de áreas mais vulneráveis à seca agrícola.

Sugere-se que o IRSA seja integrado a políticas públicas e desenvolvimento de Planos Municipais de Mitigação da Seca, Planos Diretores de Recursos Hídricos e programas estaduais de incentivo à agricultura familiar. A priorização de ações governamentais voltadas para as microrregiões mais críticas — como Patos, Piancó, Sousa, Catolé do Rocha e Seridó Oriental e Ocidental — pode contribuir para a redução de perdas produtivas e para a promoção de uma agricultura mais resiliente.

Além disso, recomenda-se o aprimoramento metodológico do índice por meio da inclusão de variáveis socioeconômicas complementares, como acesso à irrigação, à renda rural, às políticas de crédito e ao grau de tecnificação agrícola. O uso de imagens de satélite com maior resolução temporal e espacial também pode aumentar a precisão do índice, permitindo análises mais refinadas em escalas locais.

Recomenda-se que os resultados gerados pelo IRSA sejam incorporados a instrumentos de planejamento e gestão pública, como os Planos Municipais de Mitigação e Convivência com a Seca e os Planos Diretores de Recursos Hídricos. A integração dessas informações possibilita uma gestão territorial mais eficaz, orientada por evidências espaciais e temporais sobre a vulnerabilidade agrícola. Além disso, o IRSA pode auxiliar na priorização de investimentos em infraestrutura hídrica, práticas agrícolas adaptativas e políticas de incentivo à produção resiliente, fortalecendo a capacidade adaptativa dos municípios frente à variabilidade climática.

No campo acadêmico, este trabalho abre possibilidades para pesquisas futuras que apliquem o IRSA em outras regiões, possibilitando análises comparativas entre diferentes contextos geográficos e produtivos. Também se recomenda a investigação dos impactos do risco de seca agrícola diante da compreensão dos efeitos das mudanças climáticas na dinâmica do território.

Por fim, destaca-se a importância de ampliar o diálogo entre a produção científica, o setor público e os agricultores, a fim de transformar os conhecimentos gerados em estratégias concretas de mitigação e adaptação às secas. O fortalecimento dessas conexões é essencial para tornar a gestão das áreas mais susceptíveis à seca mais eficiente, justas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- AKCAPINAR, M. C.; ÇAKMAK, B. Y. Prediction models for some wheat varieties with satellite-based drought indices and machine learning algorithms. **Irrigation and Drainage**, v. 74, n. 1, p. 237-250, 2024. doi: <https://doi.org/10.1002/ird.2989>
- ALHARBI, R. S. et al. Assessment of Drought vulnerability through an integrated approach using AHP and Geoinformatics in the Kangsabati River Basin. **Journal of King Saud University-Science**, v. 34, n. 8, p. 102332, 2022. doi: [10.1016/j.jksus.2022.102332](https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102332)
- ALVES, A. A. C. Fisiologia da mandioca. In: SOUZA, L. S.; FARIAS, A. R. N.; MATTOS, P. L. P.; FUKUDA, W. M. G. (eds.). **Aspectos socioeconômicos e agrônômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. p.138-169.
- ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; FARIAS, A. A. Comportamento da precipitação pluvial e sua relação com o relevo nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 6, p. 1601-1614, 2015.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BARROS, A. H. C.; SILVA, C. O.; FREIRE FILHO, F. R. Zoneamento de risco climático para a cultura do feijão-caupi no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 1, p. 109-117, 2007.
- ARABAMERI, A.; SAHA, S.; CHEN, W.; ROY, J.; PRADHAN, B.; BUI, D. T. Flash flood susceptibility modelling using functional tree and hybrid ensemble techniques. **Journal of Hydrology**, v. 587, p. 125-137, ago. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125007>
- ARAÚJO, P. H. C.; CUNHA, D. A.; LIMA, J. E.; FÉRES, J. G. Efeitos da seca sobre a produtividade agrícola dos municípios do Nordeste. **Encontro de Economia Baiana**, Salvador, v. 9, p. 151-117, 2013.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 16. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.
- BAYDAROĞLU, Ö.; YEŞILKÖY, S.; DEMIR, I. A phenology-dependent analysis for identifying key drought indicators for crop yield based on causal inference and information theory. **EarthArxiv**. 29 ago. 2024. doi: <https://doi.org/10.31223/X5GD8X>
- BENDINI, H. N.; FONSECA, L. M. G.; BERTOLINI, C. A.; MARIANO, R. F.; FERNANDES FILHO, A. S.; FONTENELLE, T. H.; FERREIRA, D. A. C. Mapeamento da agricultura irrigada em uma região semiárida no Brasil com base no uso de dados do sentinel-2 e algoritmo de floresta aleatória. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 20., Florianópolis, 2023. Anais [...]. Florianópolis: SBSR,

2023. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1152956>. Acesso em: 11 set. 2025.

BEZERRA, B. D.; SILVA, B. D.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BLACUTT L. A.; HERDIES, D.L.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A.; ANDRADE, M. Precipitation comparison for the CFSR, MERRA, TRMM3B42 and Combined Scheme datasets in Bolivia. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 117-131, 2015.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise da escala temporal de monitoramento das secas agrícolas e meteorológicas no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 255-261, 2007.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 64, n. 4, p. 695-705, 2005.

BOKEN, V. K. Agricultural drought and its monitoring and prediction: some concepts. In: BOKEN, V. K.; VIJENDRA, K.; CRACKNELL, A. P.; HEATHCOTE, R. L. (org.). **Monitoring and predicting agricultural drought: a global study**. New York: OXFORD University Press, 2005.

BONGIOVANI, P. F. **Mudanças climáticas, seus impactos na cultura da mandioca no Semiárido Brasileiro e estratégias de manejo para mitigação das perdas**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-11032020-084003/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

BRASIL NETO, R. M.; GUIMARÃES SANTOS, C. A.; MARQUES, R.; COSTA, C. A. S. Evaluation of TRMM satellite dataset for monitoring meteorological drought in northeastern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, p. 2100-2120, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Mapa de Indicadores Agrícolas**. 28 jan. 2021. Disponível em: <https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Zarc/Zarc.html>. Acesso em: 11 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático: feijão-caupi – Estado da Paraíba**. Brasília: MAPA/DEZAE, 2021. 45 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro, 1972. 683 p. (Boletim Técnico, 15; SUDENE. Série Pedologia, 8).

BRASIL. Ministério da Integração Nacional (MIN). **Resolução N º 107/2017**. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Brasília, 2017. Disponível em: sudene.gov.br/imagens/2017/arquivos/Resolucao-107-2017.pdf. Acesso em: 11 set. 2025.

BRITO, C. S.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; COELHO, V. H. R. Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. **Atmospheric Research**, v. 250, p. 105-180, 2021.

BRITO, C. S.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; COELHO, V. H. R. Long-term basin-scale comparison of two high-resolution satellite-based remote sensing datasets for assessing rainfall and erosivity in a basin in the Brazilian semiarid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147, p. 1049-1064, 2022.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517-529, 2018.

CAMPOS, J. H. B.C.; SILVA, V. DE P. R.; AZEVEDO, P. V.; BORGES, C. J. R.; SOARES, J. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, B. B. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p.150-156, 2008.

CAVALCANTI, E. P.; SILVA, V.P. R.; SOUSA, F. A. S. Programa computacional para a estimativa da temperatura do ar para a região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 140-147, 2006.

CHEN, J.; HU, Y.; HU, Y. et al. Spatial characteristics analysis and vulnerability evaluation of agricultural land use environment. **Arab J Geosci**, v. 13, p. 587, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05597-z>

CHOWDHURI, I., PAL, S. C., CHAKRABORTTY, R. Flood susceptibility mapping by ensemble evidential belief function and binomial logistic regression model on river basin of eastern India. **Advances in Space Research**, v. 65, n. 5, p. 1466-1489, 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. (org). **Perspectivas da geografia**. São Paulo: Difel, 1982.

CIRINO, P. H.; FÉRES, J. G.; BRAGA, M. J.; REIS, E. Assessing the impacts of ENSO-related weather effects on the Brazilian agriculture. **Procedia Economics and Finance**, v. 24, p. 146-155, 2015

CLEMENTE, C. M. S. **Serviços ambientais e valoração dos estoques de carbono no semiárido baiano**. 195 f. Tese (Doutorado em Geografia - Tratamento da

Informação Espacial) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). **Caderno de caracterização: estado da Paraíba** / organizadores, Renan Loureiro Xavier Nascimento ... [et al.]. – Brasília, DF: CODEVASF, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento de safra brasileira. Grãos. Safra 2022/2023. **Monitoramento agrícola**. Brasília, v. 12, p. 1-17. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Monitoramento Agrícola**. 2021 Disponível em: <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/graos/monitoramento-agricola>. Acesso em: 05 maio 2022.

COSTA, A. F. et al. **Melhoramento do feijão-caupi para o semiárido brasileiro: situação atual e perspectivas**. In: XIMENES, L. F.; SILVA, M. S. L.; BRITTO, L. T. L. (eds.). Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro. Fortaleza, CE: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. p. 733-790.

COSTA, M. S.; LIMA, K. C.; ANDRADE, M. M.; GONÇALVES, W. A. Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, p. 1321-1334, 2015.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; PIMENTEL, M. A. G.; COELHO, A. M.; KARAM, D.; CRUZ, I.; GARCIA, J. C.; ALMEIDA, J. A. A.; OLIVEIRA, M. F.; GONTIJO NETO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; VIANA, P. A.; MENDES, S. M.; Costa, R. V.; ALVARENGA, R. C.; MATRANGOLO, W. J. R. **Produção de milho na agricultura familiar**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2011.

CUENCA, M. A. G.; MANDARINO, D. C. Mudanças na geografia agrícola no âmbito de microrregiões: Paraíba, 1990 e 2004. **Documentos**, v. 103, 2007.

DANTAS, J. C.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Drought impacts, social organization and public policies in northeastern Brazil: a case study of the Upper Paraíba River basin. **Environmental Monitoring And Assessment**, v. 192, p. 317, 2020.

DAYAL, K. S.; DEO, R. C.; APAN, A. A. Spatio-temporal drought risk mapping approach and its application in the drought-prone region of south-east Queensland, Australia. **Natural hazards**, v. 93, p. 823-847, 2018.

DECHANT, C. M.; MORADKHANI, H. Analyzing the sensitivity of drought recovery forecasts to land surface initial conditions. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 89-100, 2015.

DING, Y.; XU, J.; WANG, X.; PENG, X.; CAI, H. Spatial and temporal effects of drought on Chinese vegetation under different coverage levels. **Science of The Total Environment**, v. 716, p. 1-12, 2020.

DUFT, D. G.; PICOLI, M. C. A. Uso de imagens do sensor MODIS para identificação da seca na cana-de-açúcar através de índices espectrais. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 52, 2018.

ELUSMA, M.; TUNG, C.; LEE, C. Agricultural drought risk assessment in the Caribbean region: The case of Haiti. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 83, p. 103414, 2022.

FALCÃO, E. C. **Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no município de Boa Vista - PB**. 2013. 126f. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2013. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/28007>. Acesso em: 11 set. 2025.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Tecnologia da produção do feijão irrigado**. 2. ed. Piracicaba: Publique, 1997.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B., PAZ, R. L.; AMORIM, A. D. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a quantificação da seca**. Embrapa Arroz e Feijão-Documents (INFOTEC-E). 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/663874/indices-para-a-quantificacao-da-seca>. Acesso: 11 set. 2025.

FERNÁNDEZ. J. M.; GONZÁLEZ-ZAMORA, A.; SÁNCHEZ, N.; GUMUZZIO, A.; JIMÉNEZ, C. M. H. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. **Remote Sensing of Environment**, n. 177, p. 277-286, 2016.

FONTAINE, M. M.; STEINEMANN, A. C.; HAYES, M. J. State drought programs and plans: survey of the western United States. **Natural Hazards Review**, v. 15, n. 1, p. 95-99, 2014.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

FRADE, T. G.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Simulating future hydrological droughts and sediment yield by integrating different climate scenarios for a semiarid basin in Brazil. Stochastic. **Environmental Research And Risk Assessment**, v. 38, p. 3677-3693, 2024.

FRANCISCO, P. R. M. et al. Aptidão climática da mandioca (*Maniõth esculenta* Crantz) para o estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1651-1661, 2017.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. **Science Data**, v. 2, dez. 2015. doi: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GAO, F.; ZHANG, S.; YU, R.; ZHAO, Y.; CHEN, Y.; ZHANG, Y. Agricultural Drought Risk Assessment Based on a Comprehensive Model Using Geospatial Techniques in Songnen Plain, China. **Land**, v. 12, p. 1184, 2023.

GOLIAN, S.; MAZDIYASNI, O.; AGHAKOUCHAK, A. Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran. **Theoretical and applied climatology**, v. 119, p. 679-688, 2015.

GOMES, A. R. **Avaliação do potencial de dados polarimétricos Radarsat-2 para mapeamento de uso e cobertura da terra em trecho de faixa de dutos sobre diferentes condições geomorfológicas**. 2011. 198 f. Tese - (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011.

GONÇALVES, W. G. et al. Classificação de estratos florestais utilizando redes neurais artificiais e dados de sensoriamento remoto. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 3, p. 612-624, 2016.

GONG, K.; FRITSCH, D. Relative orientation and modified piecewise epipolar resampling for high resolution satellite images. The International Archives of the Photogrammetry. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 579-586, 2017.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAUR, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202 p. 18-27, 2017.

GOULART, M. A. **Análise da evapotranspiração por meio de wavelets em uma floresta de *vochysia divergens* no pantanal**. 2011. 52f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

GURIA, R.; MISHRA, M.; BARAJ, B.; GOSWAMI, S.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; BHUTIA, K. D. O. Examining the drivers of forest cover change and deforestation susceptibility in Northeast India using multicriteria decision-making models. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 11, p. 1-33, 2024.

GUTIÉRREZ, A. P.; ENGLE, N. L.; NYS, E.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Preparação para a seca no Brasil. **Clima e Extremos Climáticos**, v. 3, p. 95-106, 2014.

HERNÁNDEZ, L. **Manejo integrado del cultivo de yuca en el Caribe colombiano** (en línea). 2014. Disponível em: <http://es.slideshare.net/libardoefflorenz/manejo-integrado-del-cultivo-de-la-yuca-en-el-caribe-colombiano>. Acesso: 11 set. 2025.

HOQUE, M. A.; PRADHAN, B.; AHMED, N. Assessing drought vulnerability using geospatial techniques in northwestern part of Bangladesh. **Science of The Total Environment**, v. 705, p. 135957, 2020.

HOQUE, M. et al. Agricultural drought risk assessment of Northern New South Wales, Australia using geospatial techniques. **Science of the Total Environment**, v. 756, p. 143600, 2021.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. esp., p.195-213, 2002.

IHINEGBU, C.; OGUNWUMI, T. Multi-criteria modelling of drought: A study of Brandenburg Federal State, Germany. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 2, p. 2035-2049, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. 2021. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2021_dez.pdf. Acesso: 29 maio 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Inventário Florestal Nacional – Paraíba**. 2019. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/periodo_eleitoral/publicacoes_ifn/r elatorios/IFN_PB_2019_periodo_eleitoral.pdf. Acesso em: 11 set. 2025.

IPCC. **Climate Change 2023**: Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva: IPCC, 2023. p. 1-34.

IPCC. **Climate Change and Water**. Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes interrestrial ecosystems (SR2). Fev. 2017. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acesso em: 11 set. 2025.

JADHAV, B. D.; GHATE, P. M.; KOTA, P. N.; CHAVAN, S. D.; CHOPADE, P. B. An Optimized Network for Drought Prediction Using Satellite Images. Remote Sensing Applications: **Society and Environment**, v. 36, p. 101278, 2024.

JAIN, S. K.; KESHRI, R.; GOSWAMI, A.; SARKAR, A.; CHAUDHRY, A. Identificação de áreas vulneráveis à seca usando dados NOAA AVHRR, **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 10, 2009.

JARVIS, A.; LANE, A.; HIJMANS, R. J. The effect of climate change on crop wild relatives. **Agricultural, Ecosystems & Environment**, v.1, n.126, p.13-23, 2008.

JASKOWIAK, P. A.; COSTA, I. G.; CAMPELLO, R. J. G. B. The area under the ROC curve as a measure of clustering quality. **Data Mining and Knowledge Discovery**, v. 36, n. 3, p. 1219-1245, 2022.

JONES, P. G.; THORNTON, P. K. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. **Global Environmental Change**. v. 1, n. 13, p.51-59, 2003.

JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. **Theor Appl Climatol**, v. 141, p. 465-481, 2020.

KAMILARIS, A.; OSTERMANN, F. Geospatial analysis and internet of things in environmental informatics. **arXiv preprint arXiv:1808.01895**, 2018. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.01895>

KHALEGHI, S.; MAHMOODI, M. Assessment of flood hazard zonation in a mountainous area based on GIS and analytical hierarchy process. **Carpathian J Earth Environ Sci**, v. 12, n. 1, p. 311-322, 2017.

KHANDELWAL, R.; GOYAL, H.; SHEKHAWAT, R. S. Agricultural Drought Index Selection using Probability Distribution: Statistical and Linear Regression Approach. In: **2023 3rd International Conference on Innovative Sustainable Computational Technologies (CISCT)**. IEEE, p. 1-6, 2023.

KIEM, A. S. et al. Natural hazards in Australia: droughts. **Climatic Change**, v. 139, p. 37-54, 2016.

KLUTHCOUSKI, João et al. Manejo do solo eo rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 97-104, 2000.

KUNDU, A.; DUTTA, D.; PATEL, N. R.; DENIS, D. M.; CHATTORAJ, K. K. Evaluation of Socio-Economic Drought Risk over Bundelkhand Region of India using Analytic Hierarchy Process (AHP) and Geo-Spatial Techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 49, n. 6, p. 1365-1377, 2021.

LAGO, I.; STRECK, N. A.; BISOGNIN, D. A.; SOUZA, A. T.; SILVA, M. R. Transpiração e crescimento foliar de plantas de mandioca em resposta ao deficit hídrico no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 11, p. 1415-1423, 2012.

LEMO, J. D. J. S.; BEZERRA, F. N. R.; DA COSTA FILHO, J.; OLIVEIRA GURJÃO, N. Agricultura familiar no Ceará: evidências a partir do Censo Agropecuário de 2017. **Revista Economica do Nordeste**, v. 51, p. 93-112, 2020.

LIMA, A. G.; CARVALHO, L. R.; MOTA, M. C.; LIMA JUNIOR, A. F.; MOREIRA, J. M.; SILVA, A. P.; ROSA, J. Q. S. Produtividade de mandioca avaliada sobre adubação fosfatada e a adubação de cobertura. **Pubvet**, v. 12, n. 8, p. 1-4, 2018.

LIMA, C. E. S.; COSTA, V. S. O.; GALVINCIO, J. D.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Assessment of automated evapotranspiration estimates obtained using the GP-SEBAL algorithm for dry forest vegetation (Caatinga) and agricultural areas in the Brazilian semiarid region. *Agricultural Water Management*, v. 250, p. 106863, 2021.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; KOIDE, S.; SANTOS, R. M. Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de Latossolos do Cerrado em Condições de Campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 1, p. 23-32, 2012.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011.

LIMA, J. R.; MAGALHÃES, A. R. Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. **Revista Parcerias Estratégicas**, Brasília-DF, v. 23, n. 46, p. 191-212, jan./jun. 2018.

LIMA, S. C. et al. Response of semi-arid vegetation to agricultural drought determined by indices derived from MODIS satellite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 8, p. 632-642, ago. 2023.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Oficina de Textos, 2015.

MARÉCHAL, R.; MASCHERPA, J. M.; STAINIER, F. Étude taxonomique d'un groupe complexe d'espèces de genres *Phaseolus* et *Vigna* (Papilionaceae) sur la base de données morphologiques et polliniques, traitées par l'analyse informatique. **Boissiera**, Geneve, v. 28, p. 1-273, 1978.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Revista da Academia Brasileira de Ciência*, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.

MARQUES, F. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; BARROS, A. H. C.; LOPES, E. H. B.; BARBOSA, G. M. N. Aptidão pedoclimática das culturas dos feijões caupi e comum para o estado de Alagoas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO*, 33., Uberlândia, 2010. **Anais [...]**. Uberlândia: RBCS, 2010.

MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R.; FONTENELE, D. A seca plurianual de 2010-2017 no Nordeste e seus impactos. **Parc. Estrat.** Brasília, v. 22, n. 44, p. 17-40, jan./jun. 2017.

MAS, J. et al. A suite of tools for ROC analysis of spatial models. **ISPRS: International Journal of Geo-Information**, v. 2, n. 3, p. 869-887, 2013.

MEDEIROS, I. C.; COSTA, J. F. C. B. S; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Run-off-erosion modelling and water balance in the Epitácio Pessoa Dam river basin, Paraíba State in Brazil. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, p. 3035-3048, 2019.

MEDEIROS, R. M.; FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; SILVA, L. L.; BANDEIRA, M. M. Variabilidade da Temperatura Média do Ar no Estado da Paraíba-Brasil **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 128-135, 2015.

MENEZES, J, A. et al. Analyzing spatial patterns of health vulnerability to drought in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 12, p. 6262, 2021.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1-2, p. 202-216, 2010.

MODIS. MODIS Surface Reflectance User's Guide. **Orbit An International Journal On Orbital Disorders And Facial Reconstructive Surgery**, p. 1-40, 2011.

MOKARRAM, M. et al. Determining and forecasting drought susceptibility in southwestern Iran using multi-criteria decision-making (MCDM) coupled with CA-Markov model. **Science of the Total Environment**, v. 781, p. 146703, 2021.

MU, Q.; ZHAO, M.S.; RUNNING, S.W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sens. Env.**, v. 111, n. 4, p. 1781-1800, 2011.

MUGIYO, H. et al. Multi-criteria suitability analysis for neglected and underutilised crop species in South Africa. **PLoS One**, v. 16, n. 1, p.1-24, 2021.

NJOKU, C.G.; EFIONG, J.; UZOEZIE, A. C.; OKENIYI, F. O.; ALAGBE, A. O. A GIS multi-criteria evaluation for flood risk-vulnerability mapping of Ikom local government area, cross river state. **J Geogr Environ Earth Sci Int**, v. 15, n. 2, p. 1-17, 2018.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2010.

NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE; Banco Mundial, 2016.

OLASEENI, O. G.; OLADAPO, M. I.; OLAYANJU, G. M. Vulnerability assessment of an aquifer in the basement complex terrain of Nigeria using 'LAHBUD' model. **Model Earth Syst Environ**, v. 7, p. 833-852, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00912-9>.

OLIVEIRA, M. G. C. et al. **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/173690/1/CNPAF-2018-lvfeijoeiro.pdf>. Acesso: 11 set. 2025.

OLIVEIRA, N. M.; SILVA, R. M.; BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C. A. G.; VIANA, P. C. G. Spatiotemporal patterns of agricultural and meteorological droughts using SPI and MODIS-based estimates over a Brazilian semiarid region: Study case of Upper Paraíba River basin. **Geocarto International**, v. 37, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **O estado da segurança alimentar e nutricional no mundo 2022**. Roma: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/relatorio2022>. Acesso em: 11 set. 2025.

ORTEGA-GAUCIN, D. et al. Agricultural drought risk assessment: A spatial analysis of hazard, exposure, and vulnerability in Zacatecas, Mexico. **Water**, v. 13, n. 10, p. 1431, 2021.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G. Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. **Geophysical Research Letters**, v. 38, 2011.

PALCHAUDHURI, M.; BISWAS, S. Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya district, India. **Natural Hazards**, v. 84, p. 1905-1920, 2016.

PANDEY, V.; SRIVASTAVA, P. K. Integration of microwave and optical/infrared derived datasets for a drought hazard inventory in a sub-tropical region of India. **Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 439, 2019.

PANU, U. S.; SHARMA, T. C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, p. 19-30, 2014.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.

PEREIRA, L. C.; LOMBARDI NETO, F. **Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004.

PEREIRA, R. A.; BARBOSA, M. F. N. Diagnóstico socioeconômico e ambiental de uma microbacia hidrográfica no semi-árido paraibano. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 137-153, 2009.

RAHMATI, O. et al. Capability and robustness of novel hybridized models used for drought hazard modeling in southeast Queensland, Australia. **Science of The Total Environment**, v. 718, p. 134656, 2020.

RAHMATI, O.; FALAH, F.; DAYAL, K.; DEO, R.C.; MOHAMMADI, F.; BIGGS, T.; MOGHADDAM, D. D.; NAGHIBI, S. A.; BUI, D. T. Machine learning approaches for spatial modeling of agricultural droughts in south-east region of Queensland Australia. **Sci. Total Environ.**, v. 699, p.134230, 2019.

RASYID, A. R.; BHANDARY, N. P.; YATABE, R.. Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia. **Geoenvironmental Disasters**, v. 3, n. 1, p. 19, 2016.

RIND, D.; GOLDBERG, R.; HANSEN, J.; ROSENZWEIG, C.; RUEDY, R. Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**. v. 95, p.9983-10004, 1990.

ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; ZERI, M.; CUNHA, A. P.; PIRES, L.; BARBOSA, H. A. Impact of soil moisture on crop yields over Brazilian semiarid. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, n. 73, p. 1-16, 2017.

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiração 8 dias L4 Global 500m SIN Grid V006 [Conjunto de dados]. Press. **Available atNASA EOSDIS Land Processes DAAC**. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>. Acesso em: 11 set. 2025.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process Thomas. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-3597-6_1. Acesso em: 11 set. 2025.

SAINI, D. et al. Geoinformatics and analytic hierarchy process based drought vulnerability assessment over a dryland ecosystem of north-western India. **Natural Hazards**, v. 114, n. 2, p. 1427-1454, 2022.

SAJJAD, M. R. et al. Characterization of cowpea to harvest rainwater for wheat in semiarid conditions. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 19, n. 3, 2021.

SÁNCHEZ, N.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; GONZÁLEZ-ZAMORA, A. A combined approach with SMOS and MODIS to monitor agricultural drought. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.** XLI-B8, p. 393-398, 2016. doi: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-393-2016>

SANTANA, A. S.; SANTOS, G. R. Avaliação das políticas de mitigação de riscos da agricultura nordestina. **Revista de Política Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 102-114, jan./mar. 2019.

SANTOS, C. A. G.; MOURA, R.; SILVA, R. M.; COSTA, S. G. F. Cluster Analysis Applied to Spatiotemporal Variability of Monthly Precipitation over Paraíba State Using Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 637, 2019.

SANTOS, E. S; MATIAS, E. C.; BARBOSA, M. M. **Mandioca**: Cultivo agroecológico e uso na alimentação humana e animal. João Pessoa: Emepa-PB, 2011.

SANTOS, F. A.; AQUINO, C. M. S. Panorama da Desertificação no Nordeste do Brasil: Características e Suscetibilidades. **Revista InterEspaço**, Grajaú, v. 2, n. 7, p. 144-161, 2016.

SANTOS, L. L. **geeSEBAL**: uma ferramenta Google Earth Engine para estimativa de séries temporais de evapotranspiração. 67 f. 2020. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/219375>. Acesso em: 11 set. 2025.

SANTOS, T. G.; VENTORINI, S. E. Análise multicritério: modelos de interesse ambiental e de áreas propícias à expansão urbana na bacia do Córrego do Lenheiro. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 64, p. 60-77, 2017.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

SCHLESINGER, W.H.; JASECHKO, S. Transpiration in the global water cycle. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.189, p.115-117, 2014.

SCHROTER, D. et al. Vulnerability assessment-analysing the human-environment system in the face of global environmental change. **ESS Bulletin**, v. 2, n. 2, p. 11-17, 2004.

SEBO, V. É. L. S. C. Vulnerabilite de la production du manioc aux changements climatiques et priorite d'adaptation dans les agglomerations frontalières benin-togo (vallee du mono, afrique de l'ouest). EPRA international journal of research & development, vl,7, 227-240, 2023 doi: 10.36713/epra12133.

SENA, J. P. O.; MORAES NETO, J. M.; LUCENA, D. B. Variabilidade da Precipitação em Sumé e São João do Cariri e suas Consequências na Agropecuária. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 278-293, 2019.

SENAPATI, U.; KUMAR, T. Geospatial assessment of agricultural drought vulnerability using integrated three-dimensional model in the upper Dwarakeshwar river basin in West Bengal, India. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-28, 2022.

SHAMS EDDIN, M. H.; GALL, J. Focal-TSMP: deep learning for vegetation health prediction and agricultural drought assessment from a regional climate simulation. **Geoscientific Model Development**, v. 17, n. 7, p. 2987-3023, 2024.

SILVA, A. M.; da SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 79, p. 1-11, 2019.

SILVA, E. L. et al. Emprego de modelo de susceptibilidade a escorregamentos rasos para gestão de riscos de desastres no município de Vitória-ES. **Sociedade & Natureza**, v. 25, p. 119-132, 2013.

SILVA, F. J. B. C. **Uso de índices físicos e de sensoriamento remoto para quantificação da seca e aridez e determinação da susceptibilidade à desertificação no semiárido Pernambucano**. 226 f. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/37727>. Acesso em: 11 set. 2025.

SILVA, G. J. F.; SILVA, R. M.; BRASIL NETO, R. M.; SILVA, J. F. C. B. C.; DANTAS, A. P. C.; SANTOS, C. A. G. Multi-datasets to monitor and assess meteorological and hydrological droughts in a typical basin of the Brazilian semiarid region. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, p. 368, 2024.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; JUNIOR SILVA, V. P. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 2, p. 293-303, 2015.

SILVA, L. L.; COSTA, R. F.; CAMPOS, J. H. B. C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola da Paraíba. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 454-461, 2009.

SILVA, O. F.; WANDER, A. E. O feijão-comum no Brasil: passado, presente e futuro. **Documentos / Embrapa Arroz e Feijão**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2013. Disponível em: https://www.bibliotecaagpatea.org.br/agricultura/culturas_anuais/livros/O%20FEIJAO%20COMUM%20NO%20BRASIL%20PASSADO%20PRESENTE%20E%20FUTURO.pdf. Acesso em: 11 set. 2025.

SILVA, P. L. F.; NASCIMENTO, R. S. Balanço hídrico climatológico e índice de aridez para municípios da microrregião de Guarabira, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 14, n. 2, p. 125-139, 2020.

SILVA, R. F. C. **Paraíba 2000-2013**. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2014.

SILVA, R. M.; SANTOS, CELSO A. G.; MARANHÃO, K. U. A.; SILVA, A. M.; LIMA, V. R. P. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. **Earth Sciences Research Journal**, v. 22, p. 175-186, 2018.

SILVA, V. P. R. et al. Modelo de previsão de rendimento de culturas de sequeiro, no semiárido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 83-87, 2002.

SINGH, R. P.; ROY, S.; KOGAN, F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. **International journal of remote sensing**, v. 24, n. 22, p. 4393-4402, 2003.

SOUZA, A. G. S. S. **Índice de seca no Estado de Pernambuco utilizando dados de umidade do solo do Satélite SMOS**. 180 f. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34490>. Acesso em: 11 set. 2025.

SOUZA, A. G. S. S.; RIBEIRO NETO, A.; ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; SOUZA, L.L. Use of SMOS L3 Soil Moisture Data: Validation and drought assessment for Pernambuco state, Northeast Brazil. **Remote Sensing**, v.10, n. 8, p. 1314, 2018.

SOUZA, L. S.; MEDEIROS, E. S.; GALBETTI, M. V.; BICALHO, C. C.; SANTOS, C. A. C.; SHINMA, T. A.; SILVA, A. Q.; OLIVEIRA, L. A. Modelagem Espacial de Chuvas Intensas no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 373-383, 2022.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). **Resolução CONDEL/Sudene Nº 176**. 3 de jan. de 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/acesso-a-informacao/legislacao/hierarquia/resolucoes-conselho-deliberativo/resolucao-condel-sudene-no-176-de-3-de-janeiro-de-2024>. Acesso em: 11 set. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGUER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

TALHOFER, V.; H. Spatial data quality in multi-criterial analysis for decision making process. **Advances in Cartography and GIScience of the ICA**, v. 1, p. 1-8, 2019.

TEIXEIRA, A. H. C. Balanço de energia na cultura da bananeira no primeiro ciclo de produção. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e da água no Semiárido brasileiro. **Embrapa**, p. 32, 2013.

TERNES, M. Fisiologia da planta. *In*: CEREDA, M. P. (coord.). **Agricultura: tuberosas amiláceas latino-americanas**. São Paulo: Fundação Cargill, 2002.

TURNER, B. L. et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 100, n. 14, p. 8074-8079, 2003.

UJJAL, S. Geospatial assessment of agricultural drought vulnerability using integrated three-dimensional model in the upper Dwarakeshwar river basin in West Bengal, **India. Environmental Science and Pollution Research**, v. 1-33, 2022. doi: 10.1007/s11356-022-23663-9

VALE, M. C. T. et al. Subsistence agriculture productivity and climate extreme events. **Atmosphere**, v. 11, n. 12, p. 1287, 2020.

WALKER, D. W. et al. Não se trata apenas de seca: o que o monitoramento dos “impactos da seca” revela sobre o semiárido Nordeste do Brasil. *In*: RESUMOS DA CONFERÊNCIA DA ASSEMBLEIA GERAL DA EGU, 2023, Viena. **Anais [...]**. Viena: EGU, 2023.

WANG, C.; QI, S.; NIU, Z., WANG, J. Evaluating soil moisture status in China using the temperature-vegetation dryness index (TVDI). **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 671-679, 2004.

WILHITE, D. A; SVOBODA, M. D. **Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation**. Nebraska: National Drought Mitigation Center, 2000.

WU, X. et al. Agricultural Drought Monitoring Using an Enhanced Soil Water Deficit Index Derived from Remote Sensing and Model Data Merging. **Remote Sensing**, v. 16, n. 12, p. 2156, 2024.

YANG, J.; CHEN, X.; WANG, H.; YANG, F.; CHEN, M.; YANG, L. Sensitivity analysis of the Priestley–Taylor parameter and validation of the modified model for estimating evapotranspiration from MODIS data in China. **Journal of Hydrology**, v. 551, p. 411-425, 2017.

ZAGADE, N. D.; UMRİKAR, B. N. Drought severity modeling of upper Bhima river basin, western India, using GIS–AHP tools for effective mitigation and resource management. **Natural Hazards**, v. 105, p. 1165-1188, 2021.

ZAREI, A. R.; MOGHIMI, M. M.; KOOHI, E. Sensitivity assessment to the occurrence of different types of droughts using GIS and AHP techniques. **Water Resources Management**, v. 35, p. 3593-3615, 2021.

ZHANG, H et al. Analyzing Saaty’s consistency test in pairwise comparison method: a perspective based on linguistic and numerical scale. **Soft Computing**, v. 22, p. 1933-1943, 2018.

ZHYAN, A.; AHMED, J. M.; SHEIKH, S. Drought vulnerability modeling over Mandawa watershed, northern Iraq, using GIS-AHP techniques. **PolyTechnic**, p. 136-147, 2023.

ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. **Meteorological Applications**, v. 13, n. 1, p. 69-80, 2006.