



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E GESTÃO DE
RECURSOS NATURAIS - PPGEGRN

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

VARIABILIDADE DO CLIMA, DO USO E COBERTURA
DAS TERRAS NO ESTADO DA PARAÍBA

JOSÉ DIOGENES ALVES PEREIRA

CAMPINA GRANDE, PB
DEZEMBRO - 2023

JOSÉ DIOGENES ALVES PEREIRA

**VARIABILIDADE DO CLIMA, DO USO E COBERTURA
DAS TERRAS NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande como cumprimento das exigências requisitadas para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Madson Tavares Silva

Área de concentração: Engenharia de Recursos Naturais

CAMPINA GRANDE, PB

DEZEMBRO – 2023

P436v

Pereira, José Diogenes Alves.

Variabilidade do clima, do uso e cobertura das terras no estado da Paraíba / José Diogenes Alves Pereira – Campina Grande, 2023.
49 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais)
- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva."

Referências.

1. Bioma Caatinga. 2. Condições Ambientais. 3. Agrupamento de Ward. 4. Testes Estatísticos de MannKendall. I. Silva, Madson Tavares.
II. Título.

CDU 551.583(043)

JOSÉ DIOGENES ALVES PEREIRA

VARIABILIDADE DO CLIMA, DO USO E COBERTURA DAS TERRAS NO ESTADO DA PARAÍBA



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO/TESE

Ata da **Décima Terceira** sessão pública de Defesa de **Dissertação** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais – PPGEGRN do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Ao **dia 26 do mês de Junho de 2023 às 14:00 horas, por vídeo conferência** reuniu-se na forma e Termos do Art. 62 do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação “Stricto Sensu” da UFCG e do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Resolução 02/2019 do Colegiado Pleno do Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão – CONSEPE/UFCG, a Banca Examinadora composta pelos professores/pesquisadores Prof.(a.) Dr.(a) **Madson Tavares Silva**, como orientador(a) principal; Prof.(a.) Dr.(a.) **Viviane Farias Silva/UAEF** como membro interno; Prof.(a.) Dr.(a) **Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão/ITV/DS**, como membro externo; Prof.(a.) Dr.(a) **Thomás Rocha Ferreira/CIDACS/FIOCRUZ BAHIA**, como membro externo, a qual foi constituída pela Portaria **PPGEGRN 40/2023** da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, juntamente com **Sr. José Diogenes Alves Pereira** candidato(a) ao Grau de **Mestre** em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais. Abertos os trabalhos, o(a) Senhor (a) Presidente da Banca Examinadora, Prof.(a.) Dr.(a). **nome do orientador**, anunciou que a sessão tinha a finalidade de julgamento da apresentação e de defesa da Dissertação sob o título: **“VARIABILIDADE DO CLIMA, DO USO E COBERTURA DAS TERRAS NO ESTADO DA PARAÍBA.”** Área de Concentração: **Engenharia de Recursos Naturais**, orientada pelo(a) Prof.(a.) Dr. (a) **Madson Tavares Silva**. O(A) presidente concedeu à palavra o(a) candidato(a) para, no prazo de tempo estipulado, efetuar a apresentação de seu trabalho. Concluída a exposição do(a) candidato(a), o(a) Presidente iniciou a segunda etapa do processo de defesa passando a palavra a cada membro da Banca Examinadora para as devidas considerações, correções e arguição do(a) candidato(a). Em seguida, a Banca Examinadora solicitou a saída dos presentes para, em sessão secreta, avaliar a apresentação e defesa. Após chegar a uma decisão final, a Banca Examinadora solicitou o retorno da Assembléia e anunciou, de conformidade com o que estabelece o Art. 57 do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, o Conceito **APROVADO**, o qual será atribuído após O(a) candidato(a), no prazo máximo de 90 (NOVENTA) dias, efetuar as correções e modificações sugeridas e aprovadas pela Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar pelo Coordenador, pelo candidato e pelos membros da Banca Examinadora.

Assinaturas:

Campina Grande, 26 de Junho de 2023.

Coordenadora do PPGEGRN _____

Candidato(a) _____

Presidente _____

Examinador _____

Examinador _____

Examinador _____



Documento assinado eletronicamente por **VIVIANE FARIAS SILVA, VICE-COORDENADOR**, em 29/06/2023, às 11:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MADSON TAVARES SILVA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/06/2023, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thomas Rocha Ferreira, Usuário Externo**, em 29/06/2023, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão, Usuário Externo**, em 29/06/2023, às 14:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIA DE FATIMA MARTINS, COORDENADORA DE PÓS GRADUAÇÃO**, em 13/07/2023, às 15:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Diogenes Alves Pereira, Usuário Externo**, em 06/09/2023, às 05:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3518104** e o código CRC **B2663C5F**.

“Se me for permitido vencer, não me importo em passar o resto da minha vida lutando”

(Autor anônimo)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que sempre acreditaram que teriam um filho formado, dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por ele me amar e ter me dado forças para superar todas as dificuldades que apareceram no caminho.

A Djalma Alves e Maria Marlice, meus pais, por sempre incentivarem minha caminhada na academia e por todo amor que tenho a eles.

A minha noiva, Jaqueline Jardel, que sempre acreditou em minhas lutas e compreendeu todos os meus esforços.

A UFCG por ser uma instituição que preza pelo ensino e desenvolvimento, que em sua estrutura, permitiu minha formação.

A CAPES pelo apoio financeiro que permitiu, sobre muitas adversidades continuar na pós-graduação.

Por fim, ao professor Dr. Madson Tavares Silva, pelo consentimento em me orientar, pelo apoio e esforço em todas as lutas e adversidades que a pesquisa impõe e por toda paciência e compreensão que o mesmo deteve em minha jornada na pós-graduação.

RESUMO

As atividades exercidas pelo homem são capazes de transformar a paisagem, e são impulsionadas por modelos de desenvolvimento que são muitas vezes, insustentáveis e que propiciam a intensificação de áreas desmatadas. Mas, não somente práticas humanas como a agricultura tem este efeito de alteração, também o clima e suas variações com eventos climáticos, a exemplo das secas, são capazes de condicionar a variabilidade das vegetações. Sendo assim, o presente estudo objetiva compreender e investigar o comportamento que o Bioma Caatinga deteve por microrregião do Estado da Paraíba, investigando as condições ambientais e a variabilidade ao longo dos anos. Para tanto, foram utilizados o método de agrupamento de Ward e os testes estatísticos de Mann-Kendall, que aponta a tendência, e de Pettitt que caracteriza possíveis homogeneidades, aplicados a série temporal que compreende dados de formação savânica de 1985 a 2020. Em continuidade foram usados dados de produções agrícolas de culturas do estado no período de 1990 a 2020, caracterizando as áreas com sugestivas produções, bem como de dados climatológicos que indicam a variabilidade climática da Paraíba. Os resultados, por sua vez, mostraram que teve redução de áreas de Caatinga em diversas microrregiões paraibanas, além de que muitas das áreas possuem tendência de redução, e de modo geral, o clima e as produções agrícolas do estado, possivelmente, foram agentes que contribuíram para as diminuições vistas no Estado.

Palavras-Chave: Bioma Caatinga; Mudanças no uso e cobertura; Impactos.

ABSTRACT

The activities carried out by man are capable of transforming the landscape, and are driven by development models that are often unsustainable and that favor the intensification of deforested areas. However, not only human practices such as agriculture have this effect of alteration, the climate and its variations with climatic events, such as droughts, are also capable of conditioning the variability of vegetation. Therefore, the present study aims to understand and investigate the behavior that the Caatinga Biome had by microregion of the State of Paraíba, investigating the environmental conditions and the variability over the years. To this end, Ward's grouping method and Mann-Kendall's statistical tests, which point out the trend, and Pettitt's, which characterizes possible homogeneities, were used, applied to the time series comprising data on savannah formation from 1985 to 2020. In continuity data from agricultural production of crops in the state in the period from 1990 to 2020 were used, characterizing the areas with suggestive productions, as well as climatological data that indicate the climatic variability of Paraíba. The results, in turn, showed that there was a reduction in Caatinga areas in several micro regions of Paraíba, in addition to the fact that many of the areas have a tendency to reduce, and in general, the climate and agricultural production in the state, possibly, were agents that contributed to the decreases seen in the State.

Keywords: Caatinga Biome; Changes in use and coverage; Impacts.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. GERAL.....	3
2.2. ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. Caatinga e suas características gerais.....	4
3.2. Mudanças no uso e cobertura da terra e impactos que suprimem o bioma caatinga.....	5
3.3. Utilização de sensoriamento remoto em estudos no bioma caatinga.....	6
3.4. Análise de séries temporais em estudos ambientais de uso e ocupação da terra	7
3.5. Interpretação espaço temporal de dados do MapBiomas evidenciando a dinâmica de uso de ocupação do solo da caatinga.....	7
3.6. Dependência espacial e métodos de determinação correlação entre variáveis	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	10
4.1. Área de estudo	10
4.2. Dados	11
4.3. Metodologia.....	12
4.3.1. Análise de séries temporais.....	12
4.3.2. Teste de Mann-Kendall.....	12
4.3.3. Estimador de inclinação de Sen's slope (Sen)	13
4.3.4. Teste de Pettitt.....	14
4.3.5. Métodos de agrupamento hierárquico de <i>Ward</i>	15
4.3.6. Índice de Moran (I)	15
4.3.7. Modelo de regressão clássica (CR).....	16
4.3.8. Modelo autorregressivo espacial (SAM)	17
4.3.9. Modelo erro espacial (SEM).....	17
4.3.10. Método estimativa da evapotranspiração potencial (ETP).....	19
4.3.11. Índices climatológicos (Ia, Ih, Iu, Iv, Irs e Isv)	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1 Variabilidade da cobertura savânica	21
5.2. Variabilidade espacial das tendências de redução e aumento de áreas de cobertura vegetal	24
5.3 Variabilidade espacial dos grupos homogêneos	25
5.4. Produtividade agrícola das microrregiões.....	28
5.5. Dependência espacial sob a perspectiva agrícola	33
5.6. Variabilidade climática sob a perspectiva agrícola.....	35
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39

7. REFERÊNCIAS	40
-----------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação da correlação por intensidade.....	18
Tabela 2. Fator de correção (F), conforme a metodologia de Thornthwaite (1948).	19
Tabela 3. Modelos de regressão ajustados aos dados de algodão herbáceo segundo covariáveis climáticas do Estado da Paraíba.	36
Tabela 4. Modelos de regressão ajustados aos dados de cana de açúcar segundo covariáveis climáticas do Estado da Paraíba.	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo.	10
Figura 2. Distribuição espacial da variabilidade da cobertura savânica (Ha) nas microrregiões do estado da Paraíba no período de 1985 a 2020.....	23
Figura 3. Tendência de perda da cobertura savânica nas microrregiões do estado da Paraíba no período de 1985 a 2020.	25
Figura 4. Distribuição espacial dos grupos homogêneos de perda da cobertura savânica nas microrregiões do estado da Paraíba no período de 1985 a 2020.....	26
Figura 5. Variabilidade da cobertura savânica no Grupo A, Grupo B, Grupo C, Grupo D, Grupo E e Grupo F no período de 1985 a 2020.	28
Figura 6. Acumulado da produção de algodão (Toneladas) no período de 1990 a 2020.	29
Figura 7. Acumulado da produção de cana de açúcar (Toneladas) no período de 1990 a 2020.	30
Figura 8. Acumulado da produção de feijão (Toneladas) no período de 1990 a 2020 ..	31
Figura 9. Acumulado da produção de milho (Toneladas) no período de 1990 a 2020. ..	32
Figura 10. Acumulado da produção de sisal (Toneladas) no período de 1990 a 2020 ..	33
Figura 11. Dispersão de Moran para as produções de algodão herbáceo (A), cana de açúcar (B), feijão (C), milho (D) e sisal (E).	35

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga ocupa aproximadamente 10% do território brasileiro, é bioma exclusivamente nacional, não encontrado em nenhum outro local do planeta. É detentora da maior riqueza de espécies dentre os núcleos de Arbustos e Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FATSS) (Moro et al., 2014), sendo composta por vegetações adaptadas ao semiárido, com características que as permitem uma resiliência natural limitada as condições climáticas e antrópicas, vista em períodos de senescência que reage a condições hídricas adversas, como épocas de secas ou quando as atividades humanas são capazes de suprimir vegetações (Almeida, 2016 e Monteiro, 2015), porém é possuidora de uma incontestável importância ambiental e socioeconômica, visto por recursos naturais.

Inúmeras atividades antrópicas são executadas nas áreas de Caatinga, urbanização, mineração, agricultura, pastagens para animais, assim como o pastoreio, extrativismo vegetal desde questões a aplicabilidade de oleaginosas a utilização de madeira em carvoarias e outros segmentos se necessitam deste recurso para sua execução (ISNP, 2023), onde muitas destes feitos para serem executados partem inicialmente de outras atividades como o desmatamento e as queimadas, que abrem áreas permitindo que outras ações humanas ocorram.

No entanto, se tem um histórico de degradações que impactaram o bioma, por causa de explorações inadequadas de ocorrência secular e que com a modernização alcançada por tecnologias houve intensificação dessas adversidades, a exemplo de atividades como queimadas ilegais, bem como produções agropecuárias que proporcionam uma pressão nas vegetações, assim como na fauna, na flora, nos solos e nos recursos hídricos (Pareyn, 2010; Brand, 2017). Por causa da negligência sobre a Caatinga, ela se tornou um dos biomas brasileiros menos observados e assistidos quanto a necessidade de conservação (ICMBio e MMA, 2022).

Para se ter uma dimensão, o Bioma já perdeu cerca de 45,6% de suas áreas vegetadas, sendo as mais afetadas derivadas do desmatamento por práticas agrícolas inadequadas, que impactam muitos dos recursos naturais das áreas alteradas, vista pela mudança de um meio natural muitas vezes intocado para um meio antropizado e geralmente, causam supressão de vegetações da Caatinga, além de favorecer condições impactantes negativas, como observadas em muitas áreas que sofrem intensificação de processos erosivos e assoreamento de corpos hídricos (Gama et al., 2022; Medeiros et al., 2012 e Brasil, 2016).

Muitas das perdas são proporcionadas pelo uso inadequada de áreas através de ações aplicadas por agriculturas familiares a nível de subsistências, sistemas agropecuários que compreende grandes empreendimentos neste setor, muito comuns a realidade nordestina, causando a supressão das vegetações, culminando em degradações ambientais (Vanzela et al., 2010). No entanto, o clima também é um agente limitador da Caatinga, as secas geram muitos problemas, em níveis humanos, econômicos e ambientais (Silva e Moura, 2018).

Considerando os usos e impactos que ocorrem no bioma, o estado da paraíba também está envolto desta realidade, na qual a caatinga presente vem diminuindo com o passar dos anos em meio ao cenário estadual, onde inúmeros municípios, estes que compõem as microrregiões integrantes da Paraíba, observam diminuições de vegetação da Caatinga, realidade que condiz com aumentos expressivos de desmatamento no estado (Governo da Paraíba, 2021).

Com relação a esta dinâmica de transformações ambientais adversas, várias ciências podem contribuir na salva guarda do bioma Caatinga, a exemplo do sensoriamento remoto e geoprocessamento de imagens de satélites, que condicionam a uma significativa quantidade de dados espaciais utilizados na compreensão e monitoramento de áreas, que permitem analisar condições ambientais sejam adversas ou positivas.

O MapBiomias é um projeto que se mune dessa ciência ao utilizar dados espaciais dos satélites LandSat, e consegue obter informações que sediam inúmeros estudos (Blanco et al., 2022; Borges, Fortunato e Fernandes, 2022; Luciano, Campagnuci e Maire, 2022; Santos et al., 2022;) que acompanham as transformações ambientais de áreas, tal compreensão permite o planejamento e tomada de decisões adequadas e consistentes para a realidade analisada (MapBiomias, 2022).

Outra ciência pertinente é o processamento de dados aplicados em modelos estatísticos, como os testes de Mann, (1945) e Kendall, (1975) e Pettitt (1979) que resultam em tendências e anos de quebra de séries de dados respectivamente, tal conhecimento é amplamente empregado por pesquisadores (Ferreira, Rodrigues e Teixeira, 2020; Silva, Sousa e Santos, 2022) que analisam transformações espaciais, possibilitando a compreensão devida de ambientes e condiciona a tomada de ações devidas.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Compreender o comportamento dinâmico do uso e cobertura das microrregiões do Estado da Paraíba, no período de 1985 a 2020 em detrimento das atividades antrópicas.

2.2. Específicos

- Delimitar as microrregiões com padrões homogêneas quanto ao uso e cobertura do solo;
- Determinar a tendência das séries anuais de áreas de cobertura vegetal da Caatinga, visando compreensão os níveis atuais de ganhos e de perdas de áreas de vegetação natural por conjunto de grupos;
- Investigar o comportamento espacial ao longo dos anos do Bioma Caatinga em relação ao aumento de áreas agrícolas (áreas desmatadas e produções agrícolas) na Caatinga;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Caatinga e suas características gerais

A Caatinga é exclusiva e endêmica do Brasil, sua nomenclatura advinda do idioma Tupi-Guarani significando floresta branca, se estende do Nordeste a uma faixa do Estado de Minas Gerais, seu clima é o semiárido quente e muito quente, com registros de precipitações médias de 400 a 800mm por ano, com períodos relativamente chuvosos de três a seis meses, possuidor de vegetações predominantemente xerófilas, resilientes a realidades semiáridas e relativamente limitadas quanto a perspectiva hídrica (Albuquerque e Melo, 2018 e Lima e Bessa; 2022).

As formações vegetais que são dominantes e representadas por um estrato arbustivo são de perfis arbóreos espaços, como bioma é reconhecido mundialmente como um berço de biodiversidade, por ser detentor de uma grande riqueza natural, sendo também um dos que apresentam elevado contingente populacional, com cerca de 56 milhões de habitantes, com indivíduos que desenvolveram estratégias para conseguirem lidar com as inúmeras realidades impostas (Oliveira et al., 1999 e Silva et al., 2022).

Rica em diversidade com cerca de 3.150 espécies vegetais, que constituem 950 grupos e aproximadamente 152 famílias de angiospermas (plantas que fisiologicamente geram flores e frutos), considerando que 29 são endêmicas da Caatinga. Em outra nomenclatura suas vegetações são denominadas como savânicas estépicas, tamanha riqueza é diretamente ligada as potencialidades que possui, a diversidade se uni a aplicabilidade, em que inúmeros substratos podem ser utilizados consistentemente em indústrias, a exemplo de compostos bioativos fármacos (Cunha et al., 2015; Fernandez e Queiroz, 2018), bem como a execução de inúmeras outras atividades sediadas pela diversidade que o bioma apresente, como práticas de agricultura, pecuária e até mesmo turismo pedagógico (Rocha e Oliveira, 2022).

Considerando a perspectiva social, inúmeras populações usufruem da riqueza, situação notória na relação socioambiental de dependência, que é refletida em incontáveis esferas da sociedade que se mantém devido ao equilíbrio que o Bioma detém, questões econômicas, políticas e culturais estão envoltas de muitas possibilidades e potencialidades, que a relação sociedade e natureza podem alcançar (Mendonça et al., 2016).

No entanto, áreas anteriormente ocupadas com vegetação da caatinga, dão espaço a áreas agricultáveis, pastagens e produções de animais, que direta ou indiretamente geram ou intensificam impactos ambientais adversos, tornando assim, muitas áreas

degradadas (Sousa et al., 2022), esse desequilíbrio ocorre por causa da má utilização dos recursos naturais, tais como plantas, solo, água, dentre outros, ocasionando alterações no ambiente (Aquino, Almeida e Oliveira, 2021; e Demartelaere, 2021). As mudanças podem ser vistas no intenso processo de devastação vivenciado nas últimas décadas, e ainda assim, a caatinga é considerada um bioma rico, com expressão de várias espécies vegetais e animais (Rocha e Oliveira, 2022).

3.2. Mudanças no uso e cobertura da terra e impactos que suprimem o bioma caatinga

Na dinâmica de mudança dos constituintes ambientais ao longo dos anos é perceptível que o meio natural e o meio antrópico possuem capacidades de condicionar essas alterações, seja o clima semiárido um agente limitador da Caatinga com secas severas, que por sua vez, nas últimas três décadas deteve alterações, que tem potencial de suprimir vegetações e limitar todos os agentes que dela dependem, as atividades humanas que em sua estruturação social se munem de recursos naturais da caatinga, proporcionando a sua estabilidade social, a um preço da exploração que ocorre no meio ambiente, assim as áreas se transformam com o passar do tempo de acordo com características culturais e econômicas (Castanho et al., 2020).

Como exposto no estudo de Abreu e Borges (2021) estão ocorrendo mudanças espaciais nos padrões de uso e cobertura da terra da Caatinga, pois as áreas de cobertura vegetal estão sendo alteradas por ações antrópicas em passos acelerados, que implicam em transformações da paisagem pelo uso excessivo, e muitas vezes irregular dos recursos naturais, condicionado pela modernização advinda de novas tecnologias, que intensificaram as mudanças espaciais. Desde o passado, os recursos naturais estão em um contínuo processo de exaustão, não é diferente com o bioma Caatinga quanto a perder cobertura vegetal nativa, e gerar inúmeras adversidades (Souza, 2018; Tavares et al., 2019).

Sendo assim, inúmeros impactos ambientais são causados devido a antropização de áreas de Caatinga, como é o caso dos efeitos adversos das queimadas e desmatamentos proporcionados por práticas agrícolas ou exploração mineral (Vicente et al., 2021), e que ocasionam uma perda da fauna, flora, assoreamento do solo, bem como perder sua fertilidade, enquanto processos erosivos se acentuam, em função de alterações significativas naquele meio (Silva, Moura e Santos, 2018; Pereira, Junior e Lobão, 2020).

Considerando a atividade desmatamento muito usada por práticas agrícolas de pequenas e grandes escalas, se tem o surgimento ou intensificação de impactos ambientais negativos tais como, a desertificação, que sendo um processo natural acaba por ser intensificado e/ou proporcionado pelas más práticas na agricultura (Flor, 2021), condição que suprime ainda mais áreas vegetadas e pressiona outros agentes ambientais deste meio, como a fauna que com o passar dos anos se limita em ambientes do bioma cada vez mais restritos.

3.3. Utilização de sensoriamento remoto em estudos no bioma caatinga

Como ferramenta é amplamente usado no segmento de investigação e monitoramento, sendo uma ciência que sedia diretamente a tomada de decisões, pelo fato de evidenciar realidades, que ao serem interpretadas, fomentam uma base de planejamento que pode culminar na defesa do meio ambiente (INPE, 2017). Sendo importante considerar a acurácia dos dados geográficos, bem como sua validação científica que vão diretamente de acordo com cada temática que é investigada, assim são considerados dados confrontantes, que fundamentam e evitam interpretações errôneas (Machado et al., 2022).

Tal conhecimento possibilita indicar estados ambientais que detém realidades e condições particulares, singulares, com fatores, efeitos e comportamentos que denotam a condição espacial, assim vários alvos podem e são interpretados, como vegetações, corpos hídricos, áreas urbanizadas, dentre outros (Borges, Fortunato e Fernandes, 2022). Esses estados ambientais são conhecidos e interpretados em diversos estudos (Bezerra et al., 2020; Coelho et al., 2021; Freitas, 2021; Melo et al., 2022) que compreendem a realidade ambiental ocorrente, condicionando os melhores caminhos para se lidar adequadamente com o meio ambiente, portanto, a utilização de sensoriamento remoto auxilia de forma devida na gestão ambiental podendo e sendo aplicado tanto na iniciativa pública quanto na privada.

Inúmeros estudos usam sensoriamento remoto na Caatinga, para que possam acompanhar as transformações do meio ambiente, sendo possível monitorar condições ambientais que apresentem ou não mutabilidade, expondo características terrestres (Meneses e Almeida, 2012). Como estudos de monitoramento ambiental das mudanças da Caatinga que compreendem desmatamentos (Bezerra et al., 2020 e Garcia et al., 2019), a pesquisadas voltadas a compreensão de componentes do ciclo hidrológico obtidos por sensoriamento remoto, que são aplicados a modelos hidrológicos (Britto, et al., 2019).

3.4. Análise de séries temporais em estudos ambientais de uso e ocupação da terra

Conceitualmente séries temporais são conjuntos de observações feitas em sequência ao longo do tempo, em outras palavras, são sequências de dados em uma ordem cronológica, que geralmente, são utilizadas na compreensão de comportamentos, provenientes da interpretação da estruturação que a série apresenta, estrutura aplicada em estudos que determinam tendências, relativas ao banco de dados fonte (Gonzada, 2017).

Sendo possuidora de componentes comportamentais, como a tendência que corresponde ao aumento e diminuição ao longo do tempo de determinada variável, a sazonalidade, que é vista em um padrão fixo que se repete no mesmo período de tempo, também tem os clicos que ocorrem quando os dados mostram diminuições e elevações que não se enquadram em um período fixo e erros aleatórios, que indicam anomalias comportamentais ou irregularidades nos dados, proporcionado por causas desconhecidas (Gonzada, 2017).

Dados obtidos que se enquadram na estrutura supracitada, são empregados em estudos ambientais, que utilizam o sensoriamento remoto para alcançar o banco da série histórica, que expõe a condição ambiental de objetos alvos na premissa dos objetivos de cada estudo (Ganem et al., 2020). Segundo Borges, Fortunato e Fernandes (2022), séries temporais possibilitam inferir ciclos, analisar, extrair comportamentos e detectar mudanças na paisagem, em seu estudo, foi possível identificar mudanças de ambientes naturais de caatinga, que foram convertidos em áreas antropizadas, como pastagens, agricultura e exposição do solo.

As séries temporais ajudam na detecção de mudanças do uso e cobertura da terra, fato que auxilia na compreensão da transformação da paisagem, bem como aponta os indícios de agentes causadores da mutabilidade de constituintes naturais da Caatinga (Santos et al., 2019). As séries temporais podem ter sua compreensão otimizada quando aplicadas em testes estatísticos, que aperfeiçoam e refinam, dando relevância estatística aos resultados, condição vista no estudo de Salles et al. (2020) que detectaram eventos pontuais relevantes, presentes em uma série temporal de dados.

3.5. Interpretação espaço temporal de dados do MapBiomias evidenciando a dinâmica de uso de ocupação do solo da caatinga

O Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomias), tem sua origem no ano de 2015, através de uma união de especialistas em sensoriamento remoto e mapeamento de vegetações. Os pesquisadores alcançaram a

interpretação de inúmeros outros objetos presentes nas visadas espaciais pelos satélites LandSat, com o objetivo de contribuir para o entendimento do meio ambiente por meio do mapeamento do uso e ocupação do solo no Brasil e em outros países, podendo compreender a dinâmica e as mudanças de inúmeros elementos presentes em áreas, baseando-se no emprego de uma metodologia confiável, de implementação metodológica rápida e de baixo custo, que gera dados de forma consistente e anual, subsidiando a geração de mapas (anuais) que retratam o uso e cobertura do solo a partir de 1985 até os dias atuais (MapBiomias, 2022).

Construção metodológica está, alcançada por meio do uso das imagens cedidas pelos LandSats, a qual os pesquisadores que compõem o projeto montam um mosaico anual que cobre o Brasil, que representa o comportamento de pixels ou camadas de informações, estas que detêm como interpretação, o uso destes dados de séries históricas e acervos de mapas que cediam os objetivos que cada estudo ou pesquisador edifica, baseados em elementos alvos presentes e de interesse das pesquisas, como em diversos estudos que compreendem as alterações ambientais evidenciando dinâmicas de uso de ocupação em áreas da Caatinga, onde os pesquisadores diversos estudiosos (Cerqueira e Gomes, 2023, Farias, et al., 2022, Galina et al., 2020 e Ganem et al., 2020).

Segundo Sartorio e Maier (2022), o projeto MapBiomias oferece um banco de dados rico, referente ao uso e cobertura do território brasileiro, que fomentam uma demanda que estuda questionamentos que envolvem o território nacional, considerando a possibilidade de emprego de estatísticas que condicionam a otimização e aplicabilidade dos dados. A qual, para muitos pesquisadores, o projeto detêm uma classificação mais inclusiva que permite a compreensão de vários objetos presentes em áreas, por meio também de ferramentas de geoprocessamento e SIGs, que interpretam melhor a superfície terrestre e seus constituintes (Costa et al., 2018, Souza et al., 2020 e Claudino et al., 2022).

3.6. Dependência espacial e métodos de determinação correlação entre variáveis

A dependência espacial é algo de extrema importância na compreensão de fenômenos espaciais podendo ser avaliada por meio de autocorrelações que se referem a correlações espaciais entre realizações de uma mesma variável aleatória mensurada em locais distintos a um espaço, sendo aplicado com variáveis que entre si, conhecidamente ou não, possuem relação.

Tal comportamento de dependência é obtido através do índice global de Moran que proporciona uma das medidas de autocorrelação espacial mais utilizadas, se

observado o empenho de dados de áreas, esse índice permite estimar o valor de uma variável aleatória com uma determinada localização, sendo dependente dos valores da mesma variável nas localizações de variáveis próximas (Moran, 1950). Existem estudos que utilizam este índice (Silveira et al., 2022, Andrade et al., 2021 e Silva et al., 2021) para evidenciar dependências espaciais de culturas agrícolas em relações a espaços, envolvidas na dinâmica de uso de uso e ocupação em áreas de Caatinga.

Existem outros métodos capazes de compreender o comportamento referente a relação entre variáveis, tal lógica é vista em métodos estatísticos como os de regressões, que em sua análise, lida com a dependência entre as variáveis, sendo instrumentos estatísticos capazes de simplificar e sintetizar dados, possibilitando um emprego amplo em inúmeras áreas do conhecimento (Chein, 2019).

Dois dos modelos mais usados para modelagem de correlação espacial são o modelo auto regressivo espacial (SAM) que é comum na modelagem de relações espaciais e o modelo de erro espacial (SEM) relacionado com a diminuição de erros de medida ocasionados por divisões artificiais em unidades geográficas, proporcionando uma otimização de resultados, por uma melhor acurácia dos mesmos (Albuquerque e Carvalho, 2010; Andrade et al., 2021; Dantas, 2003).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

As vinte e três microrregiões geopolíticas do Estado da Paraíba (Figura 1) estão localizadas na (Latitude $6^{\circ} 02' 12''$ e $8^{\circ} 19' 18''$ S e Longitude $34^{\circ} 45' 45''$ O) que denota a localização paraibana, presente setor oriental do Nordeste do Brasil, onde o território estadual tem como confrontantes os Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco (Governo do Estado da Paraíba, 2022). É constituído por 223 municípios que contemplam uma unidade territorial de 56.467,242 km², com população estimada no ano de 2021 em cerca de 4.059.905 habitantes e de 3.766.528 com base no censo de 2010.

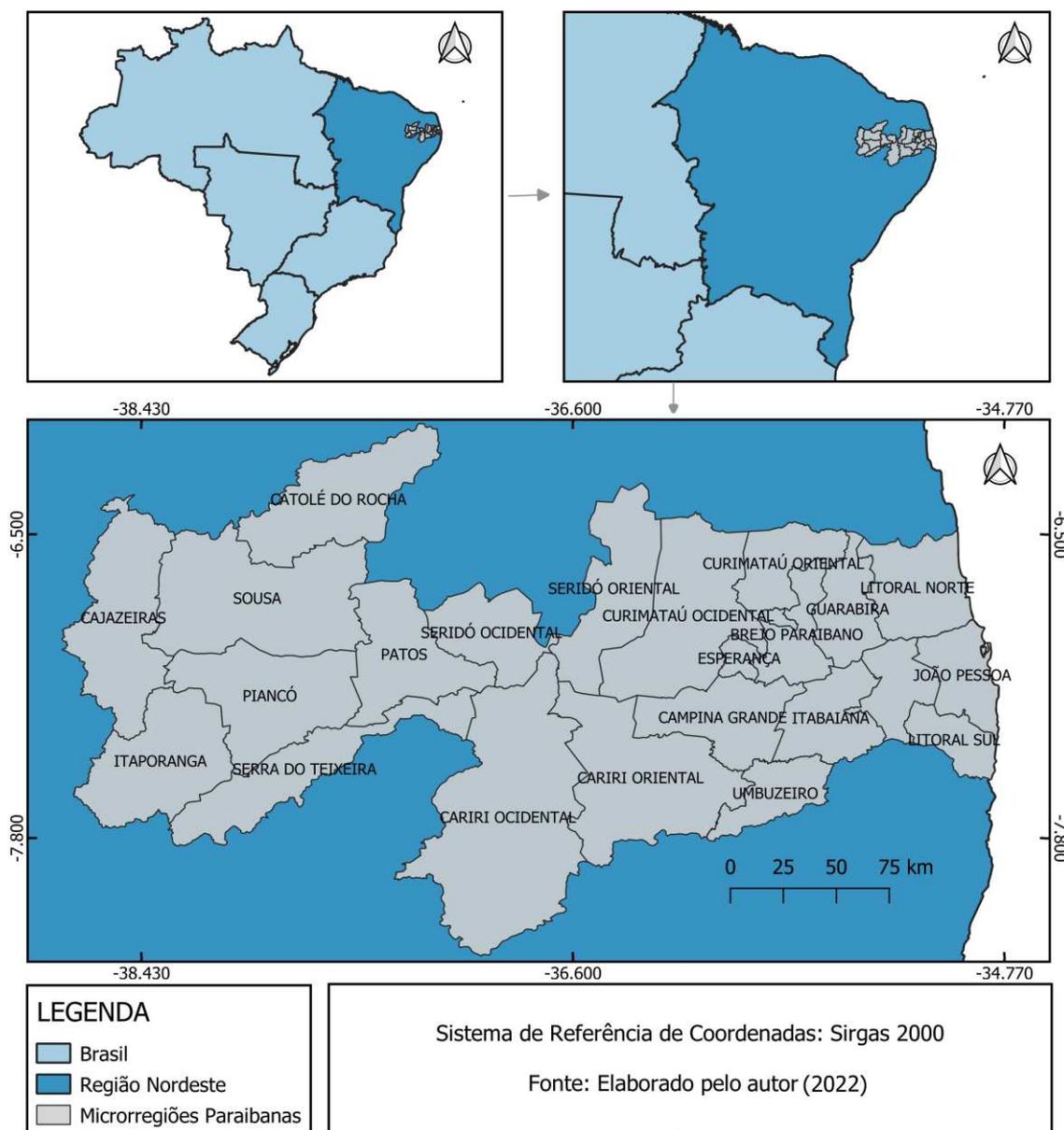


Figura 1. Localização das microrregiões paraibanas.

4.2. Dados

São utilizados os dados de uso e cobertura da terra do estado da Paraíba entre 1985 a aos dias atuais, do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil-MapBiomass, que possui o objetivo de produzir dados anuais de cobertura e uso do solo de forma automatizada, passivo de ser acessado e usado (MAPBIOMAS, 2022).

Para a análise foi escolhida a coleção 6.0 que é uma versão otimizada das anteriores, detentora do banco de dados de 1985 a 2020, com dados de formação savânica do estado da Paraíba, essa base de dados é produzida a partir da classificação supervisionada de imagens Landsat que possui resolução espacial de aproximadamente ~30x30m. Assim, utilizou-se dados de cobertura da terra da série temporal, referente a formação savânica em hectares no período de 36 anos (1985-2020), para analisar a dinâmica do uso e cobertura da terra das 23 microrregiões geopolíticas do Estado que abrangem 223 municípios, para verificar a variabilidade temporal da cobertura, tendências de perdas, amplitudes incidentes e padrões homogêneos na Caatinga.

Dados de produção agrícola foram oriundos do IBGE (2023) através do sistema SIDRA - Sistema IBGE de recuperação automática no período de 1990 a 2020 (total acumulado em toneladas) das culturas de milho, feijão, algodão herbáceo, Sisal e Cana de Açúcar no Estado da Paraíba com os seus totais acumulados (1990 a 2020) em toneladas das culturas.

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948), alcançada com as seguintes variáveis, temperatura média do ar, para tal ser obtida utilizou-se o software Estima_T (CAVALCANTI & SILVA, 1994; CAVALCANTI et al., 2006) e o fator de correção em função da latitude e do mês.

O Balanço Hídrico foi calculado a partir do modelo matemático proposto por Thornthwaite e Mather (1955). Os valores de capacidade de água disponível no solo (CAD) utilizado foi de 100 mm. Os dados de precipitações pluviais médias mensais e anuais foram adquiridos do banco de dados coletado pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), para o período de 1994-2021.

4.3. Metodologia

4.3.1 Análise de séries temporais

Os testes estatísticos de Mann-Kendall e Pettitt são amplamente usados para verificação e constatação de resultados, estes que resultam em informações que condicionam a uma melhor compreensão de realidades ambientais, entendendo respectivamente, que estes testes são capazes ou não de expressar tendências, e existência ou não de homogeneidade de dados, que evidenciam comportamentos de aumento a diminuição de determinada variável em detrimento de períodos de tempo de uma dada série de dados.

Assim, para o presente estudo foram escolhidos os testes de tendência de Mann-Kendall, Sen e teste de homogeneidade de Pettitt, para verificar o comportamento por microrregião, para o estado da Paraíba, no período de 1985 a 2020.

Também foi utilizado o Software livre Qgis versão 3.1.8 para geração de cinco mapas das produções acumuladas no período de 1990 a 2020 das culturas de algodão herbáceo, cana de açúcar, milho, feijão e sisal, por microrregião para vislumbrar como se dá a disposição destas produções por micro do estado paraibano.

4.3.2. Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) verifica a existência de uma tendência em uma determinada série temporal, ou seja, para identificar eventuais flutuações nas tendências ao longo do tempo e para detectar os possíveis pontos de mudança na série de cobertura savânica. O teste é baseado na Equação (1):

$$S = \sum_{i=j}^{n-1} \sum_{j=1+i}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Sendo n o número de pontos de dados usados, x_i e x_j são dados da série temporal i e j ($j > i$), respectivamente, e $\text{sgn}(x_j - x_i)$ é a função do sinal, dada como:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

A alteração de tendência será calculada por:

$$\text{var}(S)n = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

em que: P é o número de grupos empatados, o sinal de soma (P) indica a soma de todos os grupos vinculados, e t_i é o número de valores no grupo. Na ausência de grupos vinculados, este processo pode ser ignorado, com base nos pesquisadores Kisi e Ay (2014). Um grupo vinculado é um conjunto de dados de amostra com o mesmo valor e nos casos em que o tamanho de n ser maior que 30 amostras, o teste normal padrão estatístico Z_s é aplicado e calculado pela Equação (4).

$$Z_s = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Z como um valor caracteriza se há ou não tendência no teste de MK para a série de dados de formação savânica utilizada, compreendendo a possibilidade da tendência alcançada seja de reduções de áreas de Caatinga ou de redução da mesma. Os valores de Z quando positivos indicam uma tendência crescente e os valores Z negativos indicam uma tendência negativa. Se o Z for igual a 0, tem-se a ausência de tendência.

4.3.3. Estimador de inclinação de Sen's slope (Sen)

O teste não paramétrico indica a inclinação de Sen, um teste desenvolvido por Sen (1968), amplamente usado em estudos ambientais, que objetiva estimar a verdadeira inclinação de uma tendência, usando um modelo estatístico de estimativa linear, e a variância nos resíduos deve ser constante no tempo. (Kisi et al., 2018; Silva, 2018; Lira et al., 2020;).

A inclinação é estimada pela Equação (6):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ for } i = 1 \dots, n \quad (6)$$

em que: x_j e x_k são os valores relativos aos tempos j e k ($j > k$), respectivamente. Se houver n valores de x na série temporal de dados, obtemos até $N = n(n-1)/2$ estimativas de inclinação Q_i . Os valores N de Q_i são classificados do menor para maior, e o estimador de inclinação de Sen é a mediana dos valores N de Q_i ; determinado pela Equação (7):

$$Q_{med} = \begin{cases} Q\left(\frac{n+1}{2}\right) & \text{se } N \text{ for impar} \\ \frac{Q\left(\frac{n}{2}\right) + Q\left(\frac{n+2}{2}\right)}{2} & \text{se } N \text{ for par} \end{cases} \quad (7)$$

Na forma que o sinal de Q_{med} representa a tendência dos dados da série temporal, enquanto que o valor indica a tendência e sua inclinação. Para determinar se a inclinação média é significativa diferente de zero, o intervalo de confiança de Q_{med} ser obtido em uma probabilidade estatística específica. Sendo o intervalo de confiança considerado com base na inclinação de tempo, (C_α) calculado pela Equação (8), de Gilbert (1987).

$$C_\alpha = Z_{1 - \alpha/2} \sqrt{var(s)} \quad (8)$$

a qual: $Z_{1 - \alpha/2}$ é alcançado a partir de uma tabela de distribuição normal padrão. Nesse estudo, o intervalo de confiança é calculado em vários níveis de significância. Então, $M1 = (n - C_\alpha) / 2$ e $M2 = (n + C_\alpha) / 2$ são calculados. Os limites inferiores e superiores do intervalo de confiança, Q_{min} e Q_{max} , é o $M1^\circ$ maior e $(M2 + 1)$ o maior das estimativas de inclinação ordenada n , respectivamente (Gilbert 1987). A inclinação Q_{med} é significativa diferente de zero se os dois limites (Q_{min} e Q_{max}) têm sinais iguais.

4.3.4. Teste de Pettitt

O teste de Pettitt é um método não-paramétrico que determina a homogeneidade de uma sequência de dados (amostras), através de uma versão do teste de Mann-Whitney, a qual se verifica se duas amostras Y_1, \dots, Y_T e Y_{t+1}, \dots, Y_T pertencem a uma mesma população, sendo capaz de determinar o ponto de ocorrência de mudanças bruscas nas médias da série de dados. Segundo Pettitt (1979), é estatisticamente determinado o valor de U_{Tt} com a Equação (9).

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_t - x_j) \quad (9)$$

$$\text{Para } t=2, \dots, n, \text{ onde } , \text{ Sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

Quando se tem ausência de laços nos dados $V_{t,T} = T + 1 - 2R_t$, a qual R_t é a ordem de x_t da amostra. O valor de k_t (Equação 10) fornece o ponto onde ocorre a mudança brusca na média da série:

$$k_t = \text{MAX}_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (10)$$

Sendo sua significância calculada pela Equação (11):

$$p \approx 2\exp\{-6(kt)^2 / (T^3 + T^2)\} \quad (11)$$

A hipótese (H_0) é nula e indica nenhuma mudança brusca ao longo do tempo, assim a série histórica é homogênea e a hipótese alternativa (H_1) é que existe mudança brusca na série, indicando a condição heterogênea dos dados.

4.3.5. Métodos de agrupamento hierárquico de Ward

Foi aplicado o método de agrupamento hierárquico de Ward na série histórica de 36 anos, amplitude (1985-2020) da cobertura savânica, para compreender se existe homogeneidade quanto a possíveis reduções de vegetação da Caatinga, com a finalidade de agrupar os indivíduos (pontos) com base em suas características e uma medida de dissimilaridade denominada de quadrado da distância euclidiana. O método relaciona as amostras por suas associações e considera para a formação inicial dos grupos, aqueles indivíduos que proporcionam a menor soma de quadrados dos desvios. O agrupamento foi feito por meio de somas dos quadrados dos desvios entre acessos ou a partir do Quadrado da Distância Euclidiana, obtidos pela relação nas Equações (12 e 13).

$$SQD_{ii'} = \frac{1}{2}d_{ii'}^2 \quad (12)$$

$$SQD_{ii'} = \sum_{j=1}^n SQD_{j(ii')} \quad (13)$$

em que: $SQD_{j(ii')}$ é a soma dos quadrados dos desvios para a j -ésima variável, considerando os postos i e i' ; $d_{ii'}^2$ o quadrado da distância euclidiana entre os postos i e i' , sendo n o número de variáveis avaliadas. A soma dos quadrados dos desvios total é determinada por meio da Equação (14):

$$SQDT = \frac{1}{g} \sum_{i < i'}^g \sum_{i'}^g d_{ii'}^2 \quad (14)$$

4.3.6. Índice de Moran (I)

O índice de Moran é um produto estatístico que permite perceber se existe dependência espacial em relação a uma variável, índice este amplamente usado para medir a autocorrelação espacial dos produtos dos desvios da média, de modo global indica o grau de associação espacial presente em um determinado conjunto de dados, a qual os valores do índice variam de -1 a 1.

O valor quando zero indica ausência de dependência espacial, quando o valor se encontra entre zero e mais um (0 e +1), aponta para uma correlação direta, ou seja, existe uma dependência espacial, quando são encontrados valores entre zero e menos um (-1 e 0), é uma dispersão indicando uma correlação inversa ou em outras palavras, se tem a ausência de correlação, por fim o mesmo é estimado pela seguinte Equação (15), segundo Almeida et, al. (2008):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \mu)(X_j - \mu)}{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2} \quad (15)$$

em que: n é o número de observações; W_{ij} é o elemento na matriz de vizinhança para o par i e j; W é a soma dos pesos da matriz; X_i e X_j são os desvios da média e μ é a média.

Para o estudo foi aplicada a análise univariada local, nas variáveis: microrregiões em relação as culturas de algodão herbáceo, cana de açúcar, milho, feijão e sisal, gerando assim pontualmente para cada cultura cinco gráficos que representam a dependência espacial por microrregião de cada uma das culturas.

4.3.7. Modelo de regressão clássica (CR)

É um modelo de regressão que se baseia no interesse em avaliar a relação de uma variável (Y) em relação a outras variáveis que podem ser covariáveis ou independentes (X), é a relação entre duas ou mais variáveis para que uma delas possa ser prevista ou explicada por outras.

Teste este aplicado em dados das culturas de algodão herbáceo e cana de açúcar (valores acumulados no período de 1990 a 2020) em relação as covariáveis climáticas, precipitação pluvial, temperatura média do ar, evapotranspiração potencial, índice de repouso por seca, índice de saúde da vegetação, índice de vegetação, índice hídrico, índice de umidade, índice de aridez, deficiência hídrica e excedente hídrico do estado da Paraíba, para determinar se as variáveis climáticas possuem correlações com as culturas analisadas, onde para estes dados espaciais, quando existir correlação espacial, o modelo gerado incorpora a estrutura espacial, devido as observações interdependentes afetarem o poder produtivo do modelo, resultante determinada pela seguinte Equação (16):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon_j \quad (16)$$

sendo: Y_i é o valor de uma dada observação da variável dependente; X_1 e X_2 são as variáveis independentes; $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ são os coeficientes de regressão correspondentes e ϵ_j é o erro associado as observações da variável dependente.

4.3.8. Modelo autorregressivo espacial (SAM)

O modelo auto regressivo espacial permite as observações da variável dependente y_i na área i ($i = 1, \dots, n$) a depender das observações em áreas vizinhas com $j \neq i$ visto no estudo de Câmara et al. (2004), neste sentido foi aplicado o teste SAM nas culturas de algodão herbáceo e cana de açúcar (valores acumulados no período de 1990 a 2020) em relação a variáveis climáticas paraibanas de Precipitação pluvial, temperatura média do ar, evapotranspiração potencial, índice de repouso por seca, índice de saúde da vegetação, índice de vegetação, índice hídrico, índice de umidade, índice de aridez, deficiência hídrica e excedente hídrico, de acordo com a Equação (17):

$$Y_i = \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} y_j + \sum_{q=1}^Q X_{iq} \beta_q + \varepsilon_i \quad (17)$$

em que: ε_i é o erro; o elemento da matriz espacial de ordem n ($n \times n$); o ρ é um parâmetro que determina a intensidade da relação autoregressiva espacial entre Y_i e $\sum_j W_{ij} y_j$; o W é o vetor de atraso espacial; X matriz tem as observações das variáveis independentes e o β é o vetor que tem os coeficientes para as variáveis independentes.

4.3.9. Modelo erro espacial (SEM)

O modelo de erro espacial obtém a dependência por meio do processo de erro, na qual os diferentes erros das áreas podem apresentar uma covariância espacial, foi aplicado as culturas de algodão herbáceo e cana de açúcar (valores acumulados no período de 1990 a 2020) em relação a variáveis climáticas paraibanas: Precipitação pluvial, temperatura média do ar, evapotranspiração potencial, índice de repouso por seca, índice de saúde da vegetação, índice de vegetação, índice hídrico, índice de umidade, índice de aridez, deficiência hídrica e excedente hídrico. Sendo determinado pela seguinte Equação (18):

$$\varepsilon_i = \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} \varepsilon_j + \mu_i \quad (18)$$

em que: ρ é o parâmetro autorregressivo que indica a intensidade da correlação espacial entre os resíduos da equação observada e mede o efeito médio dos erros dos vizinhos em relação ao resíduo da região analisada; μ_i é o erro aleatório. A autocorrelação espacial em SEMs é evidenciado nos termos de erro. Por notação matricial é expresso pela seguinte Equação (19):

$$\varepsilon = \lambda W \varepsilon + \mu \quad (19)$$

Assumindo que o módulo de $\lambda < 1$, se tem a seguinte Equação (20)

$$\mathcal{E} = (I - \lambda W)^{-1} \mu \quad (20)$$

Inserindo a expressão acima no modelo de regressão clássico, se alcança o seguinte SEM, Equação (21):

$$Y = X\beta + (I - \lambda W)^{-1} \mu \quad (21)$$

Com $E[uu'] = \sigma^2 I$ e a variância e matriz de covariância expressa pela Equação (22):

$$E[\mathcal{E}\mathcal{E}'] = \sigma^2 (I - \lambda W)^{-1} (I - \lambda W)^{-1} \quad (22)$$

O SEM é combinação entre o modelo de regressão clássico e um SAM em termos do \mathcal{E} erro. Assim, o valor resultando esperado é igual ao de um modelo de regressão clássico. Se o processo for aplicado a um único modelo existe a possibilidade de não se optar por um que proporcione um melhor ajuste dos dados, nesta compreensão os testes de RC, SAM e SEM foram comparados, na premissa de visualizar qual deteve a maior influência das variáveis climáticas nas culturas de algodão herbáceo e cana de açúcar.

Para a interpretação da correlação dos coeficientes obtidos pelos modelos estatísticos RC, SAM e SEM, foi utilizada a classificação de Rowntree & O'hehir (1981) conforme a Tabela (1).

Tabela 1. Classificação da correlação por intensidade

Classes	Intervalo
Muito fraca	0,0 – 0,2
Fraca	0,2 – 0,4
Moderada	0,4 – 0,7
Forte	0,7 – 0,9
Muito forte	0,9 – 1,0

Fonte: Rowntree e O'hehir (1981); adaptado: Autor (2023)

4.3.10. Método estimativa da evapotranspiração potencial (ETP)

Foi determinado através do método proposto por Thornthwaite (1948) estimado pela Equação (23):

$$ETp = 16 \times F \times \left(\frac{10 \times Tmed}{I} \right)^a \quad (23)$$

em que: ETp é a evapotranspiração potencial representada em (mm/mês); F é um fator de correção que varia de acordo com a latitude (Tabela 2); I é o índice de calor, obtido em função da temperatura, que corresponde ao somatório dos doze índices mensais, calculado para cada mês individualmente, por meio da expressão: $(T/5)^{1,514}$; Tmed é a temperatura média mensal em °C e a é determinado pela expressão $6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0,01791 \times I + 0,492$.

Tabela 2. Fator de correção (F), conforme a metodologia de Thornthwaite (1948).

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1,80	0,97	1,05	0,99	1,01	0,90	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10

Fonte: Adaptada pelo autor com dados cedidos por Thornthwaite 1948.

4.3.10. Índices climatológicos (Ia, Ih, Iu, Iv, Irs e Isv)

Com base no balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) foram estimados teores de água do estado da Paraíba, que correspondem aos índices que determinam variáveis diretamente ligadas ao balanço hídrico de áreas, produtos determinados pelo índice de aridez (Ia), índice de umidade (Iu) e índice hídrico (Ih), obtidos pelas respectivas Equações (24, 25 e 26):

$$Ia = \frac{D}{ETP} \times 100 \quad (24)$$

$$Iu = \frac{S}{ETP} \times 100 \quad (25)$$

$$Ih = Iu - 0,6 \times Ia \quad (26)$$

Em que: S é o excedente hídrico e D é a deficiência hídrica.

Com base no evapluviograma gerado, com pontos do mesmo, foi possível determinar os índices de vegetação (Iv), de repouso por seca (Irs) e de saúde da vegetação (Isv).

Ainda pelo balanço hídrico foram calculadas a deficiência hídrica (D) que determina quanto o sistema solo-planta e atmosfera deixou de evapotranspirar e excedente hídrico (S) que corresponde a água que não pode ser retida e por eventualidade

drena em profundidade convencionalmente nomeada como água gravitacional, obtidos respectivamente pelas Equações (27 e 28).

$$D = ETP - ETR \quad (27)$$

$$S = \begin{cases} \text{Se } ARM < CAD; S = 0 \\ \text{Se } ARM = CAD; S = (P - ETP) - ALT \end{cases} \quad (28)$$

Em que: ETP é a evapotranspiração potencial; ETR a evapotranspiração real; ARM a ascensão capilar; ALT a alteração de armazenamento e P a precipitação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variabilidade da cobertura savânica

Na Figura 2 se tem tanto a constância da presença de vegetações, quanto alterações no período de 1985 a 2020, em que a microrregião do Cariri Ocidental é a que possui a maior constância da presença de formação savânica (>350 mil ha), valor observado nos 36 anos datados. No estudo de Diniz, Medeiros e Guerra (2020), a microrregião do Cariri Ocidental deteve mais anos úmidos que anos secos, baseados em precipitações ocorridas em uma faixa de 21 anos (1999-2019), sendo possível inferir que fatores climáticos possivelmente, propiciaram o valor encontrado, no ano de 2010 foi verificado o maior registo de ocupação savânica (>400 mil ha).

Já o Cariri Oriental oscilou em sua cobertura vegetal, de 1985 a 1987 possuía cerca de 150 mil ha de área ocupada por formação savânica, no ano de 1990 teve um aumento aproximado de 100 mil ha, mas de 1993 a 2007 houve também uma redução de 100 mil ha, sendo que os anos de 2010 e 2012 registram novo aumento de aproximadamente 50 mil Ha em relação ao ano de 2007, no entanto, volta a diminuir nos anos de 2015 a 2020, onde segundo o IBAMA (2017) a Caatinga vem sendo suprimida de forma gradual, e com uma aceleração nos últimos anos, por causa de atividades antrópicas desenfreadas que contribuem para tais condições de reduções e flutuações de dados de áreas de vegetação natural devido a prática de desmatamento e a exploração de recursos naturais.

Entre os anos de 1985 a 2007 as microrregiões de Cajazeiras, Piancó e Itaporanga detinham presença de formação savânica em torno de 250 mil ha, enquanto que a micro de Sousa possuía valores aproximados de 350 mil ha, mas a microrregião de Cajazeiras a partir do ano de 2010 teve uma redução acentuada de vegetação savânica, de 2010 a 2020 diminuiu em cerca de 100 mil ha e que se manteve até o ano de 2020.

Enquanto que Piancó, Itaporanga e Sousa também detiveram redução da Caatinga entre 1985 a 2020 nos valores de 50 mil ha aproximadamente. As reduções podem ser reflexos da realidade do cenário dos municípios de Condado e Sousa, situados nas microrregião de Sousa, que Rodrigues et al. (2022) constataram presença de solos expostos que englobavam cerca de 53,6% da área territorial municipal, que evidência uma considerável perda de vegetação nativa da Caatinga em Condado, enquanto que no município de Sousa, práticas agricultáveis má executadas como as do perímetro irrigado de São Gonçalo salinizaram o solo a ponto de o tornarem potencialmente/parcialmente improdutivo, induzindo muitas áreas a exposição de seus solos e serem abandonadas (Campos et al., 2015).

De acordo com Beuchle et al. (2015), a taxa anual em valores líquidos de perda de cobertura vegetal natural na Caatinga aumentou -0,19% para -0,44% ao ano, visto a década de 1990 a 2000. O percentual de cobertura remanescente da Caatinga era de cerca de 63%, mas esse bioma brasileiro vem experimentando ganhos e perdas de cobertura de árvores e outras terras estão sendo arborizadas, contudo, a diminuição líquida de vegetação natural, continua sendo observada entre 1990 e 2010, com uma taxa anual média de mudança do período de -0,3 ao ano mantendo o comportamento de redução de áreas. Na pesquisa de Marin et al. (2013), vários tipos de atividades humanas podem proporcionar reduções, a exemplo da agricultura de larga escala muitas vezes somando efeitos com estruturas fundiárias de pequeno porte.

No contexto de reduções de áreas do Bioma, segundo IBGE (2017) o clima merece sua devida atenção pela possibilidade de limitações ambientais que impactam diretamente na Caatinga, como o fenômeno climatológico El Niño, que pode interferir nas precipitações que ocorrem no Nordeste Brasileiro, assim como interação com as vegetações nativas, sendo o El Niño capaz de estender períodos de seca, devido a anormalidade e diminuições consideráveis das precipitações nestas áreas.

Os autores Terassi et al. (2018) mostraram que, os eventos do El Niño estão associados a secas, podendo provoca-las em sua forma extrema ou moderada, segundo Marengo et al. (2017) foram relatadas secas intensas durante os anos de El Niño forte em 1877-1879, 1897, 1899, 1902-1903, 1919, 1951, 1958, 1966, 1982-83, 1986-1987, 1997-1998, 2005, 2010 e 2015. Tais ocorrências podem ter efeitos limitantes na Caatinga, como no estudo de Júnior (2012), que ressalta que a seca tem potenciais de efeitos capazes de se acumular lentamente e perdurar por um considerável e longo período de tempo, além da sua finalização, afetando umidade do solo, escoamentos superficiais, assim como toda a estrutura biótica acima do solo, que dele dependem como as vegetações.

Ainda de acordo com Marengo et al. (2017) desde os anos de 1990 a 2016, dentre esses 25 anos, 16 tiveram regime pluviométrico abaixo do normal. Isso sugere que a seca recente pode ter se iniciado em meados de 1990, com secas intensas nos anos de 1993 e 1998 e, em sequência, uma sucessão de anos secos (porém não contínua devido a ocorrência de anos úmidos como visto em 2007, 2008, 2009 e 2011) o que, possivelmente, impactaram na resiliência natural das vegetações e em condições mesmo que mínimas de revegetação natural, de áreas tais quais as que datadamente flutuam entre reduções e aumentos.

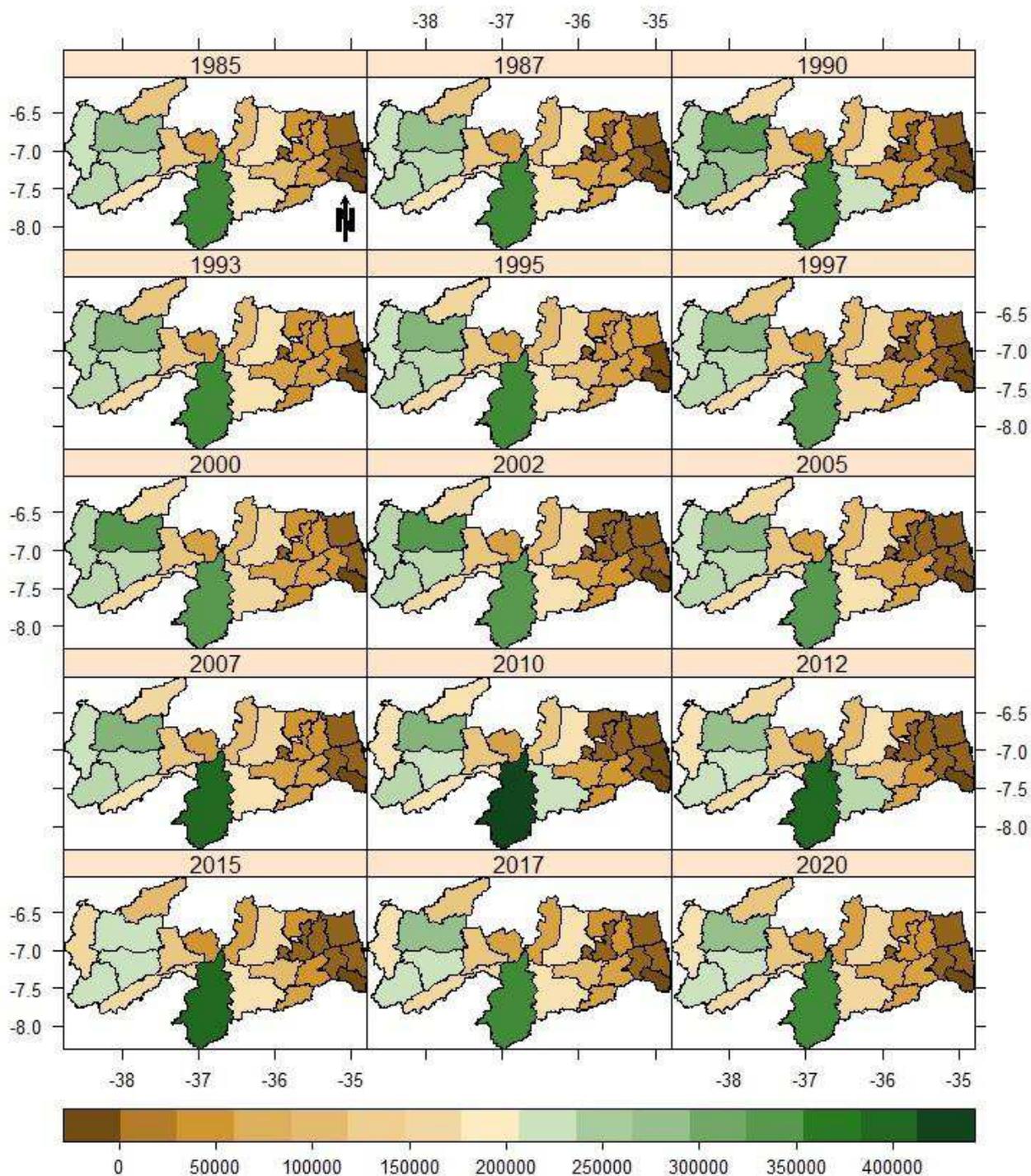


Figura 2. Distribuição espacial da variabilidade da cobertura savânica (Ha) nas microrregiões do estado da Paraíba no período de 1985 a 2020. Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Segundo Marengo e Cunha (2016), que analisaram secas no NEB, foram observadas perspectivas de ocorrências de secas, compreendendo o aumento de sua frequência, bem como sua duração, tal qual de 2012 a 2015, categorizando uma

preocupação entre gestores de recursos naturais, agricultores e especialistas em desenvolvimento, pela condição ambiental proporcionar inúmeros fatores limitantes ao meio natural e antrópico. Sendo possível dizer que, o El Niño como fenômeno natural tem uma relação direta sobre as secas no Nordeste brasileiro, percebido diretamente pela intensificação das mesmas (Santos, Amaral e Neto, 2019).

Ainda em relação a variabilidade da cobertura savânica, a faixa litorânea do estado da Paraíba detém a menor presença com valores que se aproximam muito de 0 ha na escala observada no mapa considerando o tipo de vegetação, que ao longo de 36 anos teve um comportamento constante visto pelas microrregiões de Litoral Norte, Litoral Sul, João Pessoa e Sapé. Tal condição pode ser explicada devido a faixa de encontro do Bioma Caatinga com a Mata Atlântica, que é mais presente no litoral paraibano. Assim, os pesquisadores Diniz e Oliveira (2016) reafirmam a realidade de muitas localidades litorâneas, como as do Estado da Paraíba e seus perfis transicionais de áreas vegetadas entre a presença de matas densas relativas ao Bioma Mata Atlântica e a existência de vegetações da Caatinga.

5.2. Variabilidade espacial das tendências de redução e aumento de áreas de cobertura vegetal

De acordo com os resultados alcançados pelo teste de Mann-Kendall (Figura 3), foi possível identificar as tendências de redução ou aumento da cobertura savânica para o período analisado, e também as suas significâncias estatísticas, sendo as microrregiões de Cajazeiras, Sousa, Piancó e Itaporanga as que apresentaram tendência decrescente estatisticamente significativa, ou seja, houve tendência significativa na redução da cobertura savânica de Caatinga ao longo dos anos estudados e o oposto para as microrregiões de João Pessoa e Litoral, que tiveram tendência crescente estatisticamente significativa (p -valor $< 0,05$) e, de modo geral, um decaimento e aumento de áreas de formação savânica no estado da Paraíba em um comportamento distribuído alternado.

As microrregiões de Catolé do Rocha, Patos, Seridó Ocidental Paraibano, Cariri Ocidental, Curimataú Oriental, Esperança, Campina Grande, Umbuzeiro tiveram tendência crescente não estatisticamente significativa, enquanto que as microrregiões de Seridó Oriental Paraibano, Curimataú Ocidental, Cariri Oriental, Brejo Paraibano, Serra do Teixeira, Guarabira, Litoral Norte, Sapé e Itabaiana possuem tendência decrescente não estatisticamente significativa.

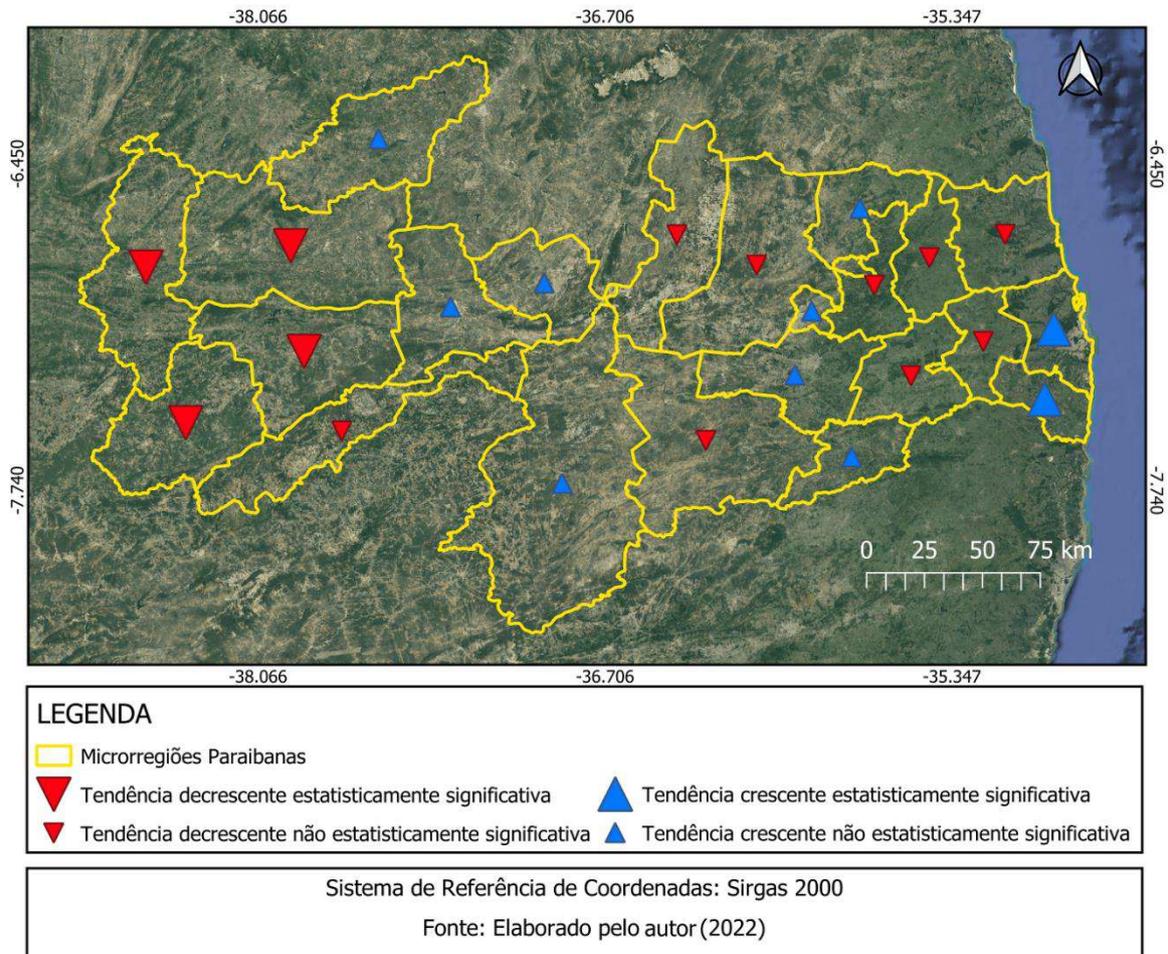


Figura 3. Tendência de perda da cobertura savânica nas microrregiões do estado da Paraíba no período de 1985 a 2020.

5.3 Variabilidade espacial dos grupos homogêneos

Na Figura 4 alcançada através do método de agrupamento de Ward, é visto que o grupo A é constituído pelas microrregiões, Brejo Paraibano, Catolé do Rocha e Guarabira, sendo que respectivamente as duas primeiras se encontram próximas ao litoral paraibano, enquanto que a micro de Guarabira está localizada no alto sertão do estado.

Cajazeiras dentre os 6 grupos está situada no grupo B, localizada ao extremo oeste do estado (Sertão), possivelmente sendo a única neste grupo, por ter uma acentuada redução de áreas de Caatinga, onde segundo dados da plataforma Terra Brasilis-INPE (2023), a vegetação deste bioma vem detendo diminuições de áreas, a qual os municípios de Cachoeira dos Índios, Cajazeiras, Santa Helena e São José de Piranhas, tiveram a perda de muitas áreas por desmatamentos, visto que até o ano de 2022 foram perdidos aproximadamente cerca de 107225 ha (somatório de perdas dos municípios) deste Bioma.

O grupo C engloba Campina Grande e Sousa, situadas respectivamente próxima a porção central da Paraíba e Sertão, já o grupo D abrange Cariri Ocidental, Itabaiana, Serra de Teixeira e Umbuzeiro, que estão distribuídas na porção inferior do Estado da Paraíba, confrontante em divisa em algumas porções com o vizinho Estado do Pernambuco. Não discuti, sei nem como faz.

Já o grupo E é formado por Cariri Oriental, Curimataú Ocidental, Seridó Oriental, Itaporanga e Piancó, elas estão espacialmente, considerando as três primeiras distribuídas, próximas ao centro do estado, enquanto as duas seguintes na porção noroeste do estado.

O grupo F, é o grupo com o contingenciamento de maior quantidade de microrregiões, comportado pelas microrregiões de João Pessoa, Litoral Norte, Litoral Sul e Sapé, a qual as três primeiras estão zoneados na faixa litorânea do Estado e são detentoras de vegetações da Mata Atlântica, Curimataú Oriental e Esperança estão situadas no Brejo Paraibano, e Patos e Seridó Ocidental no Sertão e na porção do Estado.

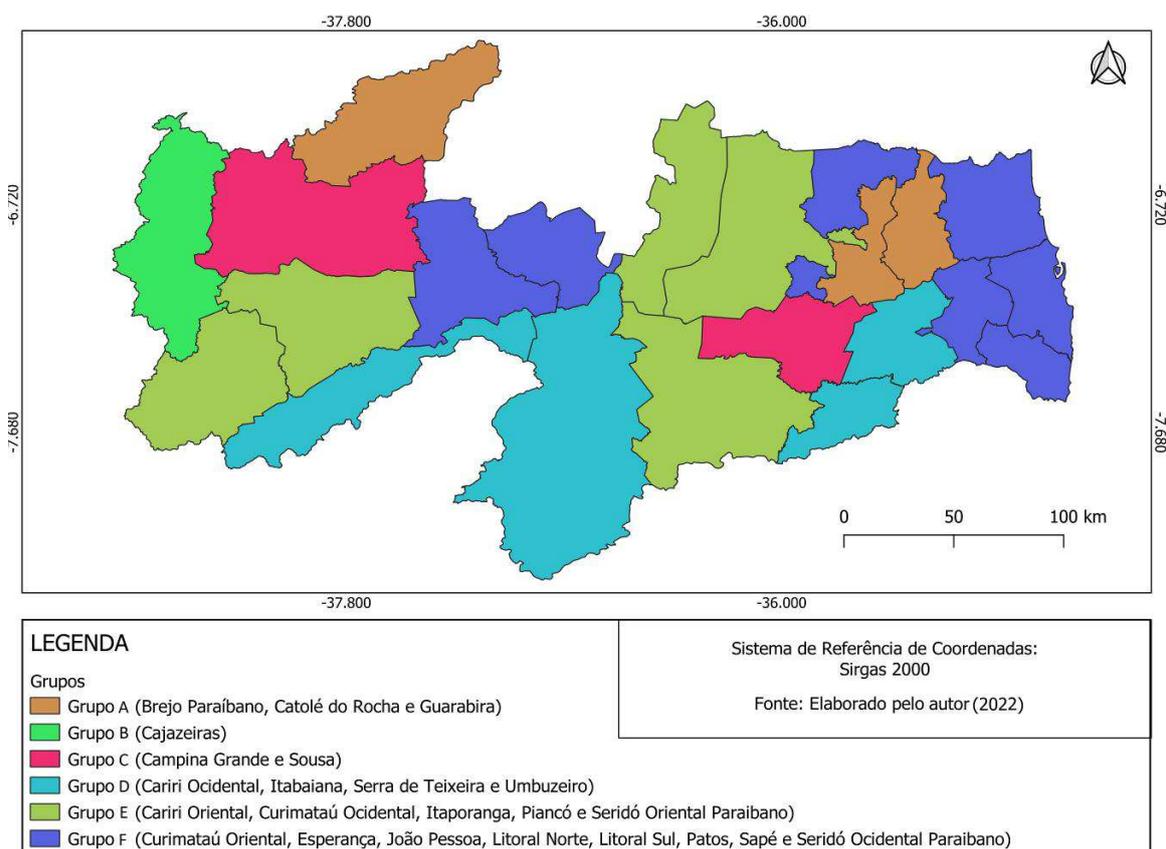


Figura 4. Distribuição espacial dos grupos homogêneos de perda da cobertura savânica nas microrregiões do estado da Paraíba no período de 1985 a 2020.

De acordo com a aplicação dos testes de Mann-Kendall e Pettit, na Figura 5 o grupo B existe uma tendência na perda de cobertura savânica durante o período de 2002

a 2020, nos anos de 2009 a 2020, os grupos A e C apresentaram comportamento homogêneo na série de dados, com valores próximos a média, compreendendo os anos de 1985 a 2020.

Já os grupos D, E e F oscilaram, em que os três grupos de 1985 a 2009 tiveram valores de ocupação da Caatinga próximas a média, sendo que nos anos posteriores de 2010 a 2015, com uma redução em hectares, seguida de um aumento compreendido nos anos de 2016 a 2020, portanto nos 12 anos (2009 a 2020) foram observadas tendências de diminuição e aumento, respectivamente. No ano de 2010 ocorreu uma quebra nas séries dos grupos A e C, no B essa quebra foi no início de 2003, em 2008 o grupo D teve a quebra, já os grupos E e F em 2009.

Os seis grupos (A, B, C, D, E e F), detiveram reduções consideráveis de áreas de vegetações de Caatinga por volta dos anos de 2008 a 2015, podendo assim inferir que, possivelmente a seca ocorrente nos anos de 2012 a 2017 propiciou esta sugestiva redução de vegetações, a qual, segundo os pesquisadores, Cunha et al., 2018, Brito et al., 2017 e Marengo et al., 2017, esta seca impactou intensamente a região nordeste e por consequência, as microrregiões paraibanas, devido ao processo prolongado da mesma, sendo este evento definido como o mais intenso dos últimos 30 anos.

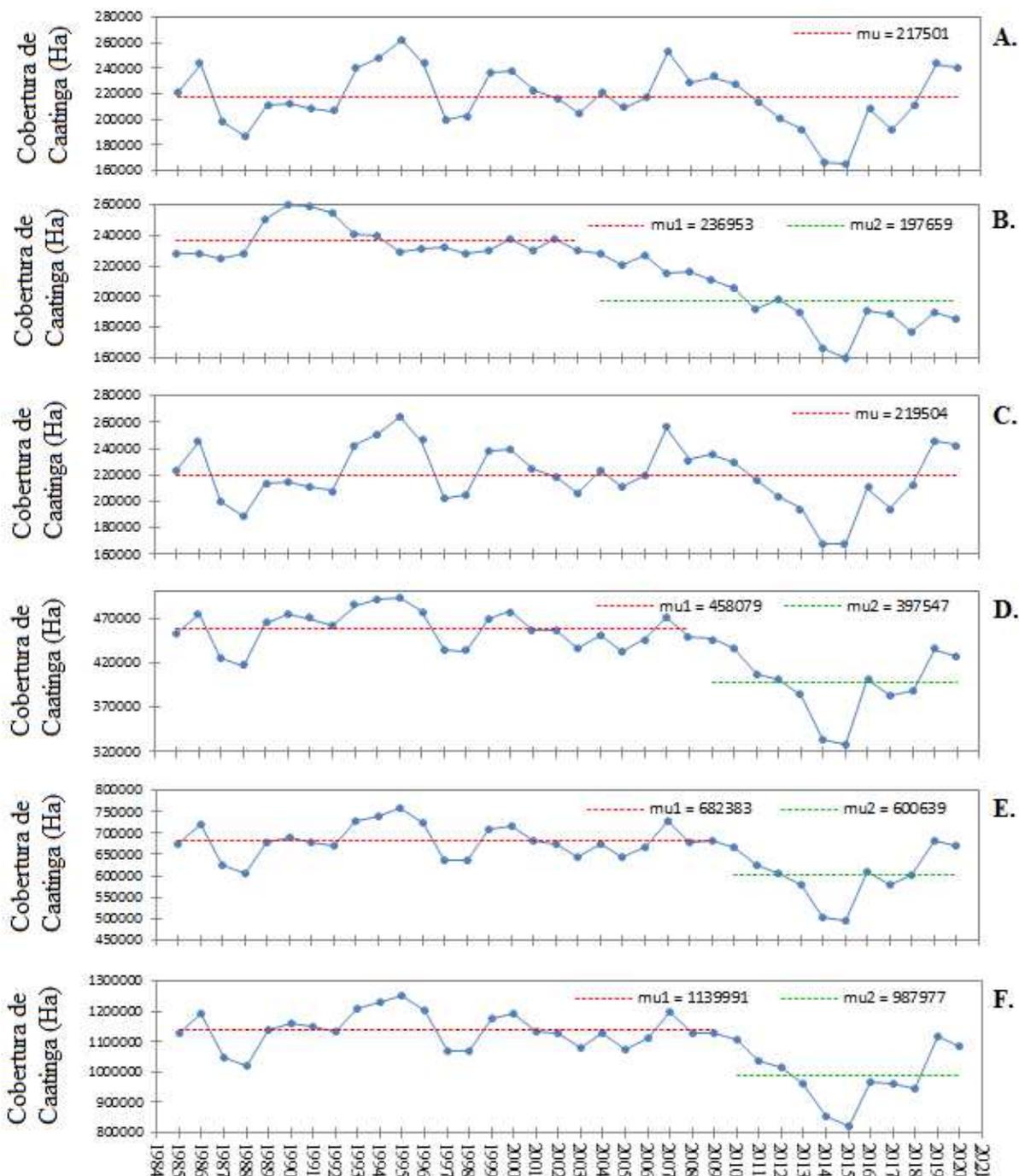


Figura 5. Variabilidade da cobertura savânica no Grupo A, Grupo B, Grupo C, Grupo D, Grupo E e Grupo F no período de 1985 a 2020. Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

5.4. Produtividade agrícola das microrregiões

De acordo com a Figura 6 se tem os totais de produção agrícola de Algodão Herbáceo acumulados de 1990 a 2020, tendo Sousa uma produtividade de 38704 toneladas, sendo a micro com maior produção da cultura no Estado da Paraíba, valor que advém da importância econômica que a cultura implica para a microrregião, e por ser uma produção com uma elevada capacidade de resistência à seca, relevância que corrobora

com os dados da Figura 3, que apontam a tendência de diminuição de áreas de vegetação nativa, a qual Sousa possui tendência significativa de redução de áreas de Caatinga.

As microrregiões de Cajazeiras, Curimataú Oriental e Itabaiana possuem valores entre 14676 a 2134 de toneladas produzidas, tendo Cajazeiras um cenário similar ao de Sousa, com expectativa de redução de área, em que a cultura pode vir a impactar essa tendência, já as microrregiões de Itaporanga, Piancó, Catolé do Rocha e Guarabira produziram valores de 6702 a 14676 toneladas de algodão.

As microrregiões de Patos, Serra do Teixeira, Cariri ocidental, Seridó Oriental, Curimataú Ocidental, Esperança e Brejo Paraibano apresentaram valores entre 1866 a 6702 toneladas, se assemelhando com a realidade vista no estudo de Melo (2017), que apontou algumas adversidades que a produção de algodão impactou no município de Patos, que implicou na retirada de vegetação natural da Caatinga, deixando os solos desprotegidos e mais susceptíveis a erosão.

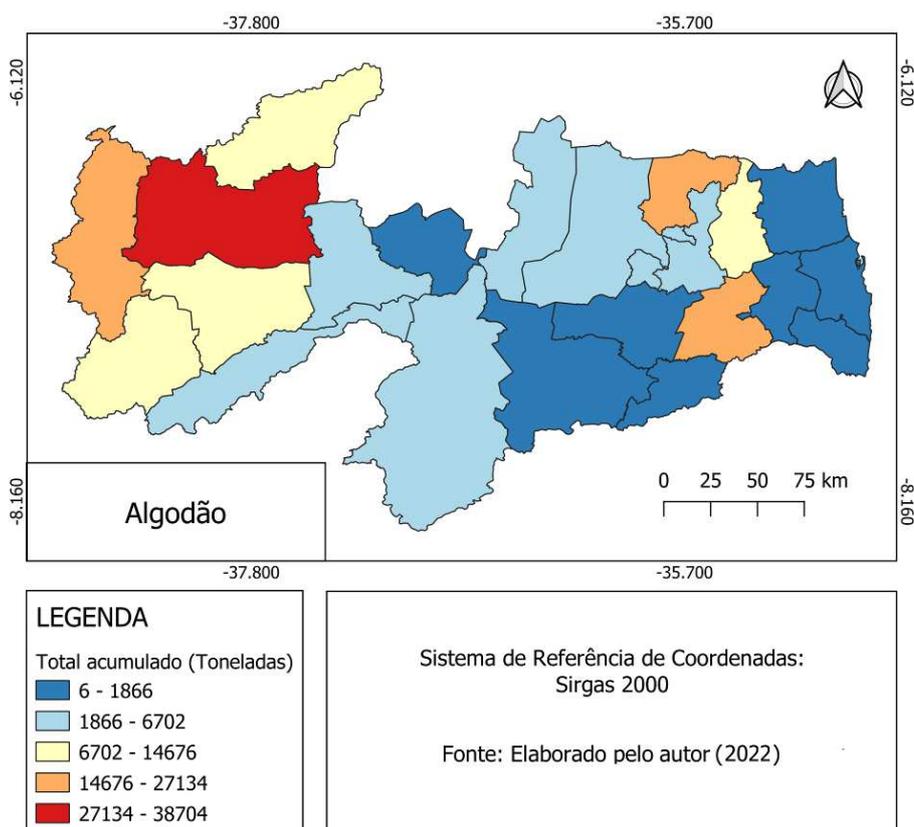


Figura 6. Acumulado da produção de algodão (Toneladas) no período de 1990 a 2020.

De acordo com a Figura 7, que compreende a produção acumulada de cana-de-açúcar em toneladas, a microrregião de Litoral Sul possui uma elevada produtividade chegando ao valor de 57167612 toneladas produzidas de 1990 a 2020, enquanto o Litoral Norte e Sapé produziram entre 25193160 a 44738760 toneladas no mesmo período de tempo e as microrregiões de João Pessoa e Guarabira entre 2151648 a 25193160 toneladas.

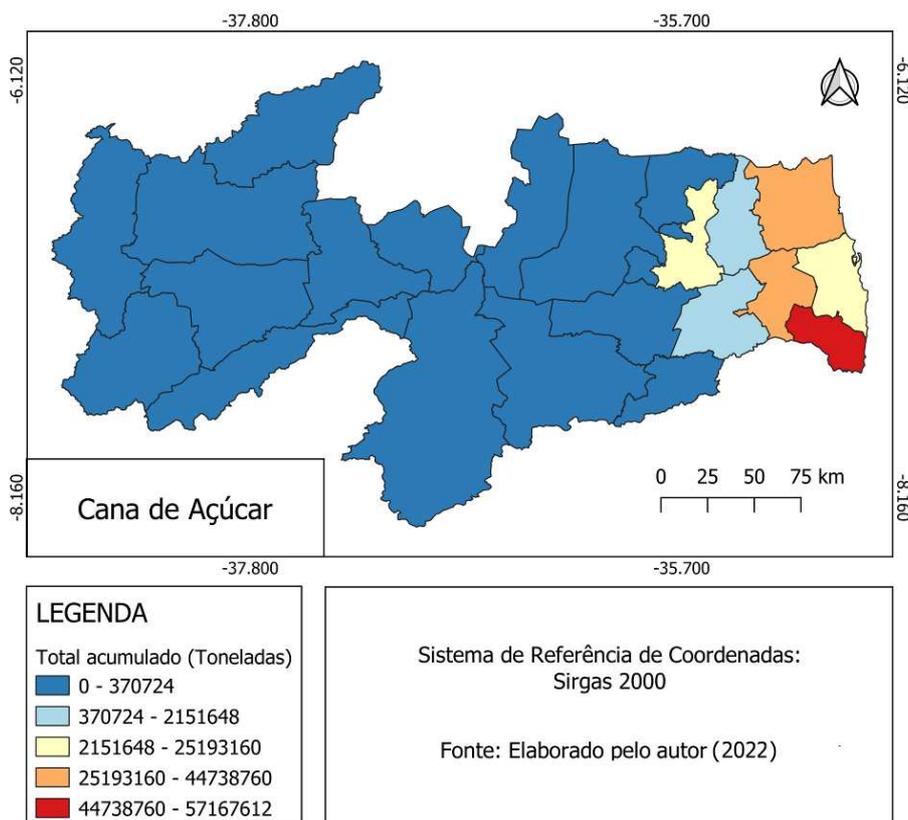


Figura 7. Acumulado da produção de cana de açúcar (Toneladas) no período de 1990 a 2020.

As microrregiões de Cajazeiras, Sousa, Itaporanga, Catolé do Rocha, Piancó, Serra do Teixeira, Patos, Seridó Ocidental, Seridó Oriental, Cariri Ocidental, Cariri Oriental, Curimataú Ocidental, Curimataú oriental Esperança, Campina Grande e Umbuzeiro, possuem produção acumulada de 0 a 370724 toneladas, com os valores relevantes, pois, para ter uma produtividade tão elevada são necessárias muitas áreas vegetadas que anteriormente eram de Caatinga, segundo Ismael e Rocha (2019), uma grande cultura como a de Cana-de-açúcar é considerada uma das culturas de maior consumo de agrotóxicos, e que no estado da Paraíba, a sua expansão vem acompanhada

de alterações significativas, passíveis de serem irremediáveis pela contaminação dos solos, que inviabiliza até a possibilidade de recuperação.

Com base na Figura 8 sabe-se que a microrregião de Serra do Teixeira é a maior produtora de grãos de feijão no estado, alcançando uma produção acumulada de 750602 toneladas, no entanto, a sua produção pode estar direta e indiretamente associada aos impactos ambientais que podem potencializar possíveis degradações em áreas, como informa o estudo de Oliveira e Aquino (2020), que apontaram que a qualidade ambiental é comprometida a partir de práticas agrícolas aplicadas na cultura no feijão, desde o desmatamento de áreas nativas, como também aumento de susceptibilidade de processos de degradação em áreas de Caatinga.

As microrregiões de Itaporanga, Cariri Ocidental, Curimataú Ocidental, Curimataú Oriental e Campina Grande possuem uma produção entre 317481 a 415283 toneladas, já Cajazeiras, Sousa, Piancó, Seridó Oriental, Cariri Oriental, Itabaiana, Guarabira, Esperança e Brejo Paraibano possuem produções entre 103573 a 317481 toneladas, enquanto que as microrregiões de Catolé do Rocha, Patos, Seridó Ocidental e Umbuzeiro entre 47712 a 103573 toneladas.

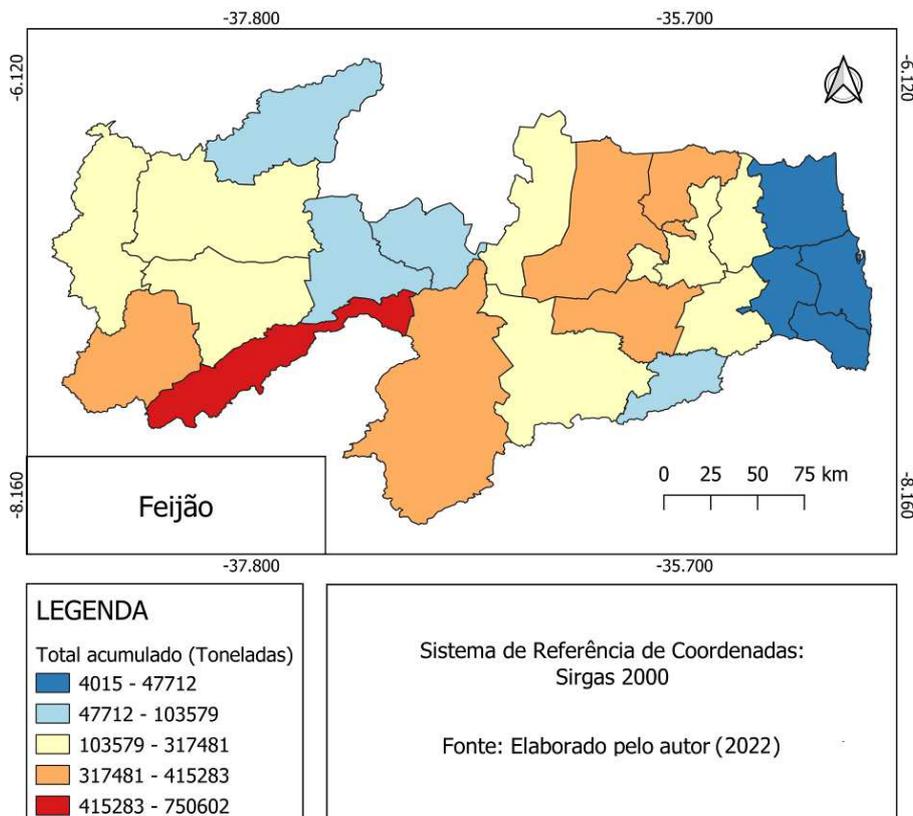


Figura 8. Acumulado da produção de feijão (Toneladas) no período de 1990 a 2020.

Na Figura 9, a microrregião de Serra do Teixeira é aquela com a maior produção de milho, alcançando o valor de 465682 toneladas, dado que corrobora com a tendência (estatisticamente não significativa) de redução de áreas vegetadas do Bioma Caatinga, que no estudo de Galina et al, (2020) foi observado o comportamento na produtividade agrícola de milho, cultura que se tornou um agente dentre outros, que ao avançar sobre áreas nativas de Caatinga.

Considerando Cajazeiras, Itaporanga, Cariri Ocidental, Campina Grande, Itabaiana e Curimataú Oriental, possuem produções entre 108301 a 219727 toneladas, as microrregiões de Sousa, Piancó, Seridó Oriental Paraibano, Curimataú Ocidental, Brejo Paraibano e Guarabira com valores entre 46248 a 108301 toneladas. Já as micros de Catolé do Rocha, Cariri Oriental, Umbuzeiro, Patos e Itabaiana produziram entre 18796 a 46248 toneladas.

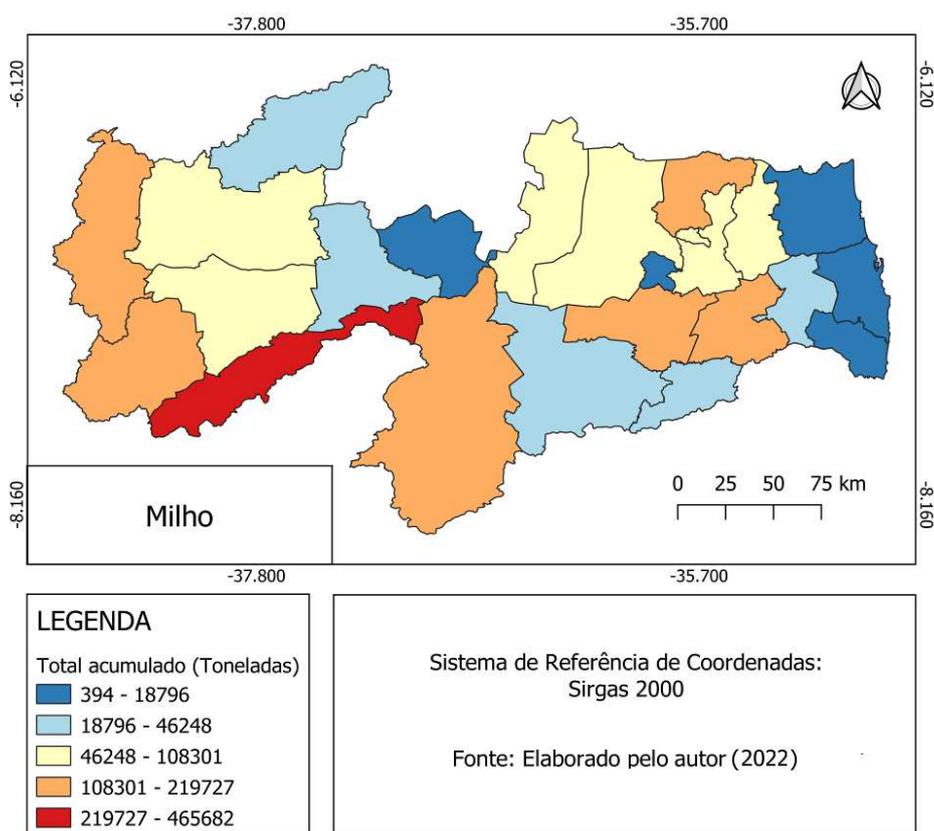


Figura 9. Acumulado da produção de milho (Toneladas) no período de 1990 a 2020.

De acordo com a Figura 10, a microrregião de Curimataú Ocidental é a detentora da maior produção de Sisal chegando a valores de 101127 a 225465 toneladas, região que segundo o IBGE (2020) é composta por dois dos maiores municípios produtores de Sisal,

que são Pocinhos e Barra de Santa Rosa. Enquanto que a Serra do Teixeira (Microrregião esta que novamente destaca-se com uma elevada produtora agrícola no estado) e Seridó Oriental Paraibano possuem valores entre 21070 a 1010127 toneladas produzidas, as microrregiões de Esperança de Curimataú Oriental produziram entre 4651 a 21070 toneladas de sisal de 1990 a 2020.

Em contrapartida, as demais microrregiões da Paraíba se encontram com produções agrícolas da cultura de Sisal com valores inferiores a 4651 toneladas, evidenciando produtividades em vários pontos do Estado Paraibano detendo pouca produtividade ou até mesmo nenhuma em algumas microrregiões.

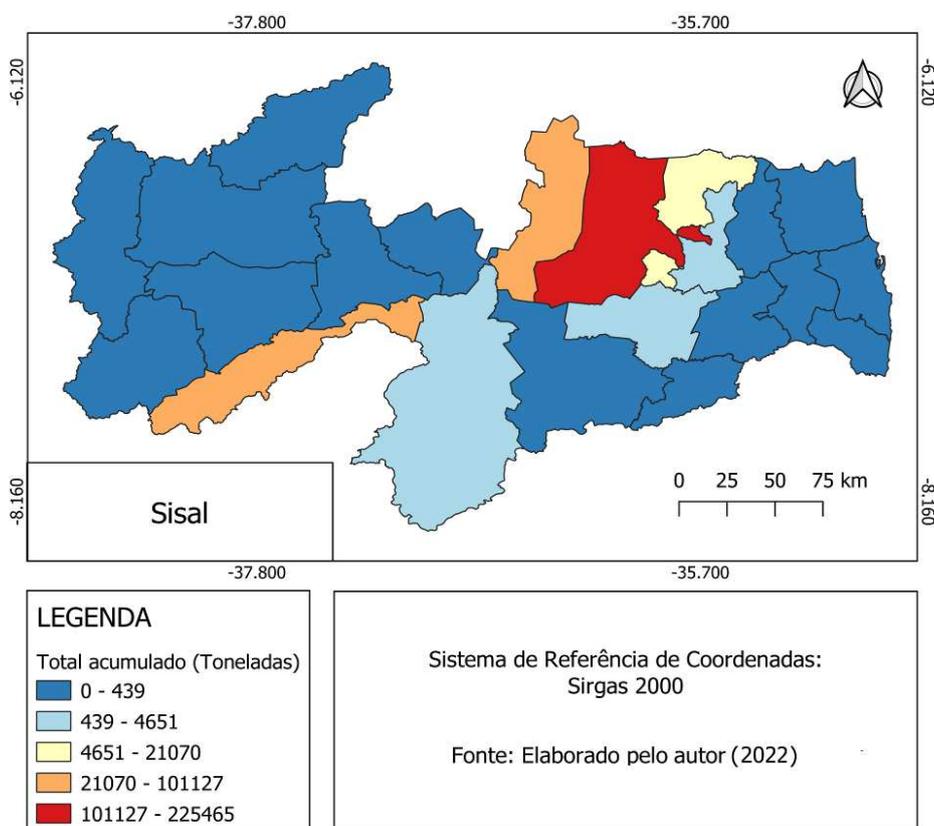


Figura 10. Acumulado da produção de Sisal (Toneladas) no período de 1990 a 2020.

5.5. Dependência espacial sob a perspectiva agrícola

De acordo com as respostas de dependência espacial determinadas pelo índice de Moran (Figura 11) para as produções agrícolas do estado da Paraíba, para a produção da cultura de algodão herbáceo (A) sabe-se que, as microrregiões de Cajazeiras, Catolé do Rocha e Piancó possuem tipologia Alto-Alto, que mostra que elas possuem um grau elevado de autocorrelação com esse tipo de produção agrícola, enquanto que as

microrregiões de João Pessoa e Litoral Sul a correlação do tipo Baixo-Baixo. As demais foram classificadas como não significantes para o tipo de produção, ou seja, mesmo que não produzam esse tipo de cultura, ou detenham produções em valores menores, elas não impactaram o índice em relação as grandes produções do estado.

Considerando a produção estadual de cana-de-açúcar (B), as microrregiões com dependência espacial mais expressiva do tipo Alto-Alto foram João Pessoa, Litoral Norte, Litoral Sul e Sapé, o que pode ser justificado pela localização geográfica em que a faixa de território se encontra, por estar situada no litoral e pela cultura ser muito dependente de uma elevada quantidade recursos hídricos.

Ainda sobre a cultura de cana-de-açúcar, o Cariri Ocidental, Cariri Oriental, Seridó Ocidental Paraibano e Seridó Oriental Paraibano com classificação de Moran do tipo Baixo-Baixo e a micro de Guarabira Baixo-Alto, ou seja, uma menor dependência espacial e as demais micros do estado sem dependência espacial (não significante).

Quanto a produção de feijão (C), as microrregiões de João Pessoa, Litoral Norte, Litoral Sul e Sapé possuem autocorrelação espacial do tipo Baixo-Baixo, enquanto que as demais microrregiões foram classificadas como não possuidoras de dependência espacial.

As microrregiões que possuíram maior dependência espacial do tipo Alto-Alto na produção de milho (D) foram as de Itaporanga, Piancó e Serra do Teixeira, seguidas de João Pessoa e Litoral Sul (Baixo-Baixo) com menor autocorrelação espacial. Enquanto que as demais micros não tiveram autocorrelação espacial.

Já quanto a cultura de Sisal (E), a micro que mais se destacou com autocorrelação do tipo Alto-Alto foi a de Curimataú Oidental, enquanto que Sousa, João Pessoa e Sapé foram classificadas como Baixo-Baixo, as microrregiões de Cariri Oriental e Esperança Baixo-Alto e nas microrregiões paraibanas restantes não foram observadas dependências espaciais.

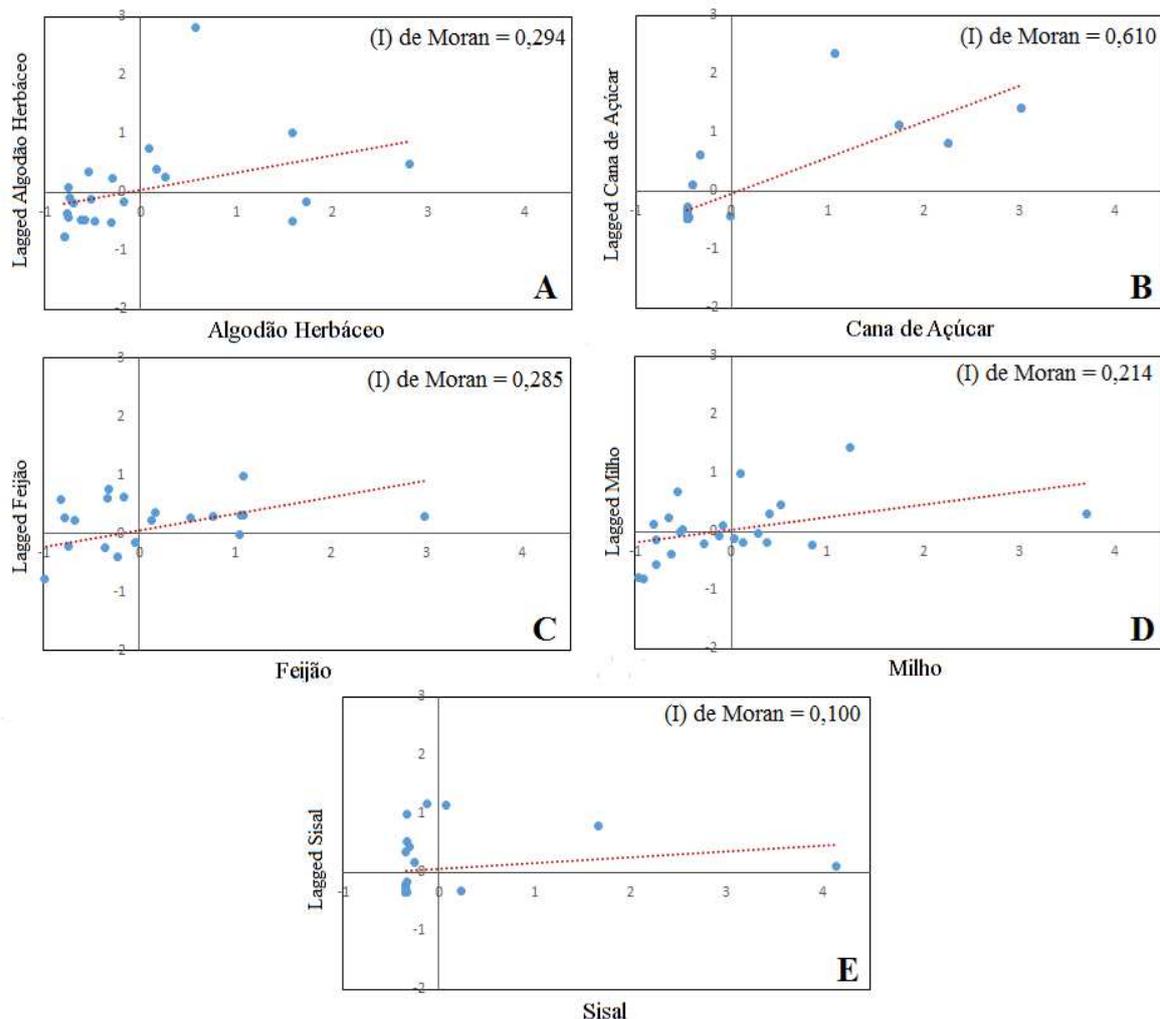


Figura 11. Dispersão de Moran para as produções de algodão herbáceo (A), cana de açúcar (B), feijão (C), milho (D) e sisal (E). Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5.6. Variabilidade climática sob a perspectiva agrícola

As respostas obtidas pelos modelos de regressão espacial aplicados no algodão herbáceo (Tabela 3) referente covariáveis climatológicas, evidenciaram que, o método SEM foi o que proporcionou melhora significativa nos resultados, pois, foi capaz de explicar 67,3% da variabilidade da influência das variáveis climáticas na cultura de algodão, indicando uma acentuada correlação entre os dados. Em que a precipitação, temperatura média, evapotranspiração potencial, índice de resistência a seca, índice hídrico, índice de umidade e deficiência hídrica foram estatisticamente significativas e as demais estatisticamente não significativas, e todas covariáveis com uma moderada correlação com esta cultura.

A precipitação (P) possui constante com valor de -323,675, o que aponta que regimes elevados de precipitação irão implicar diretamente em uma redução da

produtividade de algodão herbáceo no estado da Paraíba, por características inerentes ao tipo de cultura, que é sensível aos excessos hídricos. Comportamento visto também no estudo de Silva et al. (2021) que constatou um excesso umidade pode causar a redução deste tipo de produção.

Já considerando a evapotranspiração potencial (ETP) com valor de 534,101, é possível elencar que quanto mais evapotranspiração em áreas com esse tipo de produção, menor será a sua produtividade. Sabendo que é uma cultura produzida em áreas semiáridas de regimes pluviométricos médios baixos, para que se desenvolva, quão maior for a perda de água do solo e das plantas, menor é a possibilidade de desenvolvimento da cultura.

Tabela 3 Modelos de regressão ajustados aos dados de algodão herbáceo segundo covariáveis climáticas do Estado da Paraíba.

Covariáveis	RC	p-valor	SAM	p-valor	SEM	p-valor
P	-213,712	0,1886	-222,577	0,03153	-323,675	0,00003
Tmed	-743,429	0,94528	1397,42	0,84591	10706,8	0,02526
ETP	270,365	0,1412	269,942	0,01968	534,101	0,00003
Irs	-1577,97	0,57903	-1614,45	0,38871	-4154,26	0,00344
Isv	-531,732	0,86033	-100,056	0,96031	1264	0,41001
Iv	2161,09	0,40584	2168,78	0,20126	486,532	0,72961
Ih	-9805,09	0,21755	-9784,4	0,05443	-12921,8	0,00045
Iu	11399,9	0,1966	11792,5	0,03621	19286,7	0,00008
Ia	-4409,34	0,37236	-4270,73	0,18439	-1918,75	0,38949
D	-290,163	0,21853	-309,027	0,04069	-796,652	0,00001
S	46,8672	0,87751	29,284	0,88454	-208,864	0,19789

(RC-R² = 0,408218), (SAM-R² = 0,430256) e (SEM-R² = 0,673449)

P: Precipitação pluvial; Tmed: Temperatura média do ar; ETP: Evapotranspiração potencial; Irs: índice de repouso por seca; Isv: índice de saúde da vegetação; Iv: índice de vegetação; Ih: índice hídrico; Iu: índice de umidade; Ia: índice de aridez.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O comportamento do índice de umidade (Iu), apontou o valor de 19286,7 que demonstra que é reativa a presença de água, pois quanto menor for a umidade, maior será a produção de algodão, comportamento observado em outros estudos, como os de Duarte

et al. (2020) e Daniel et al. (2021) em que a umidade excessiva ocasionou inaptidão para o desenvolvimento da cultura.

De acordo com a Tabela 4, considerando a cana-de-açúcar, dentre os métodos de regressivos, o que melhor determinou a variabilidade foi o SEM, explicando 84,8% da influência das covariáveis, indicando uma forte correlação da cultura de cana-de-açúcar com as mesmas, a temperatura média (Tmed) e a deficiência hídrica (D) foram estatisticamente significativas, enquanto as demais não.

Analisando o comportamento da precipitação (P), em constante deteve valor de -19889,1, que aponta que a cultura se beneficia de precipitações elevadas, típicas de áreas muito chuvosas, a exemplo de localidades litorâneas, já em contrapartida quanto a deficiência hídrica (D) com o valor de -244823, quanto maior for a deficiência de água, menor será a produtividade da cultura de cana-de-açúcar.

Tabela 4 Modelos de regressão ajustados aos dados de cana de açúcar segundo covariáveis climáticas do Estado da Paraíba.

Covariáveis	RC	p-valor	SAM	p-valor	SEM	p-valor
P	4188,07	0,9763	7292,01	0,93967	-19889,1	0,81975
Tmed	7407580	0,45504	7056180	0,2936	13857000	0,03312
ETP	89755,8	0,572	84291,3	0,4603	67684,2	0,48113
Irs	-1697680	0,51014	-1650110	0,343	-2089920	0,20988
Isv	2760440	0,32294	2760390	0,13442	2491870	0,13268
Iv	672742	0,77141	668501	0,66879	933037	0,53205
Ih	677727	0,9221	860069	0,85737	-1265430	0,77712
Iu	1073830	0,88864	829807	0,87725	3131810	0,50238
Ia	2975620	0,50175	-0,183563	0,31164	1970510	0,48119
D	-219941	0,29702	-209146	0,17852	-244823	0,03454
S	-109194	0,69199	-107417	0,56542	-92558	0,60131
(RC-R ² = 0,793402), (SAM-R ² = 0,793597) e (SEM-R ² = 0,848303)						

P: Precipitação pluvial; Tmed: Temperatura média do ar; ETP: Evapotranspiração potencial; Irs: índice de repouso por seca; Isv: índice de saúde da vegetação; Iv: índice de vegetação; Ih: índice hídrico; Iu: índice de umidade; Ia: índice de aridez.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A temperatura média (T_{med}) (13857000) teve contribuição negativa, ou seja, a produtividade de cana diminuiu à medida que a temperatura aumenta. Com base no índice de aridez (I_a) que possui valor de 1970510, é possível inferir que, quando se encontra em menor valor implica potencialmente em uma aptidão para a produção cultura de cana-de-açúcar, já o excedente hídrico (S) com constante de valor -92558, denota que, quanto mais elevado, maior é a produção de cana-de-açúcar.

Neste contexto o clima e suas variáveis são agentes que tem direto ou indireto efeito em uma determinada produtividade agrícola e tal entendimento é reforçado por estudos como o de Andrade et al. (2021), que demonstrou o quanto uma cultura pode ser sensível a variáveis climatológicas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme visto ao longo do estudo, as ações antrópicas e suas interações no meio ambiente, podem ter sido as principais causadoras de mutabilidade da presença de vegetações do Bioma Caatinga em áreas do Estado da Paraíba. Podendo considerar que, ações humanas detém inúmeras motivações, sejam elas culturais e/ou econômicas que visam desde a subsistência a grandes empreendimentos, que propiciam a manutenção e, assim, a perpetuação de práticas que muitas vezes, são ambientalmente insustentáveis.

Diante dos resultados, é possível considerar que se teve uma variabilidade da cobertura de formação savânica no Estado, situação comprovada por reduções e tendências de reduções de áreas do Bioma Caatinga ao longo dos anos, sobretudo, em microrregiões que compõem o sertão da Paraíba, mas, também ocorreram diminuições de vegetações nativas que se estendem em áreas do sertão a mata paraibana.

Desse modo, se tem considerações sobre o comportamento que a agricultura paraibana deteve nas culturas de Algodão herbáceo, cana-de-açúcar, feijão, milho e sisal com suas dependências espaciais, justificadas por questões inerentes aos condicionantes, como o clima e localização geográfica, que zoneiam favorecendo a produção ou a impossibilidade de determinada cultura, aspectos que podem implicar no potencial degradador que cada manejo de cultura pode deter.

A tipologia de utilização de índices climatológicos está diretamente correlacionada com as culturas analisadas, evidenciando diretamente características inerentes as necessidades específicas que propiciam a produção de cada cultura e assim demarcando possíveis efeitos passivos de serem agentes causadores/intensificadores de redução de áreas de vegetação da Caatinga.

Assim, o presente estudo contribui para a compreensão da realidade paraibana referente ao comportamento do Bioma Caatinga ao longo dos anos, uma vez que, considerou variáveis que estão diretamente ligadas a interpretação da realidade ambiental do cenário estadual, e pode vir a embasar pesquisas que consideram a variabilidade de vegetações da Caatinga e seus efeitos no meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS

- ABREU, F. B., & BORGESorges, E. F. Análise espacial do uso e cobertura das terras no município de São Gabriel-Bahia, 2007 e 2018. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12 n. 7, p. 535-548. 2021.
- ALBUQUERQUE, P. H. M. CARVALHO, A. X. Y. Tópicos em econometria espacial para dados cross-section. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Ipea. 2010.
- ALBUQUERQUE, U. P.; MELO, F. P. L. Socioecologia da Caatinga. *Ciência e Cultura*, v. 70, n. 4, p. 40-44, 2018.
- ALMEIDA, C, J. S., TAVARES, F. M., SCHULZO, K., PEREIRA, R. C. A., & CIERIACKS, A. Floristic survey of the caatinga in areas with different grazing intensities, Pernambuco, Northeast Brazil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 1 n. 1, 43-51. 2016. DOI: <https://doi.org/10.24221/jeap.1.1.2016.986.43-51>
- ANDRADE, A. S. D., SILVA, M. T., SERRÃO, E. A. D. O., SILVA, V. D. P. R. D., CAVALCANTI, E. P., SOUZA, E. P. D., & BRAGA, C. C. Exploring spatial dependence of cowpea-beans yield using global and local autocorrelation statistics in the Eastern Cariri region of Paraíba. *Ciência Rural*, 51. 2021.
- AQUINO, C. M. S.; ALMEIDA, J. A. P.; OLIVEIRA, J. G. B. Cobertura das Terras e Aspectos Econômicos em Núcleo de Degradação/Desertificação. *Revista Mercator*, v.11, n. 26, p.171-182, 2021.
- BELTRÃO, N. E. M. Clima regula produção e qualidade da fibra do algodoeiro. *Visão Agrícola*, v.6, p.76- 77. 2006.
- BEUCHLE, R.; GRECCHI, R.C.; SHIMABUKURO, Y.E.; SELIGER, R.; EVA, H.D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography* 58, p.116–127. 2015.
- BEZERRA, A.C., SILVA, J.L.B., SILVA, D. A.O., BATISTA, P.H.D., PINHEIRO, L.C., LOPES, P.M.O., MOURA, G.B.A. Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13 n. 1, p. 286-301. 2020.
- BEZERRA, A. C; SILVA, J. L. B; SILVA, D. A. O; BATISTA, P. H. D; PINEHEIRO, L.C; LOPES, P. M. O MOURA, G. B. A. Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no

- Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 01, p. 286-301, 2020.
- BLANCO, J., BELLÓN, B., BARTHELEMY, L., CAMMUS, B., PALMAS, A., FILLON, I., ... & RENAUD, P. C. Early stages of crop expansion have little effect on farm-scale vegetation patterns in a Cerrado biome working landscape. *Landscape and Urban Planning*, v. 223, p. 104422. 2022.
- BORGES, E. F., FORTUNATO, U. M. C., & FERNANDES, L. A. (2022). Séries temporais de dados de Sensoriamento Remoto no estudo do comportamento fenológico no Polo de Desertificação de Jeremoabo-BA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.15 n.1, 443-464. 2022.
- BRAND, M. A. Potencial de uso da biomassa florestal da caatinga, sob manejo sustentável, para geração de energia. *Ciência Florestal*, v. 27, n. 1, 2017. DOI <https://doi.org/10.5902/1980509826452>
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente – MMA. Estratégia do Programa Nacional de Monitoramento Ambiental dos Biomas Brasileiros. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental - Departamento de Políticas de Combate ao Desmatamento. Brasília: MMA, p. 44. 2016.
- BRITO, S.S.B., CUNHA, A.P.M.A, CUNNINGHAM, C.C., ALVALÁ, R.C., MARENGO, J.A., ARAUJO, M. Frequency, duration and severity of drought in the Brazilian Semiarid. *International Journal of Climatology*. v.38, n.2, p.517-529, 2018.
- BRITTO, M., BAPTISTA, G. M., & de LIMA, E. A. O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão. *Paranoá*, (23), 127-146. 2019.
- CAMPOS, S. A. C., FERREIRA, M. D. P., COELHO, A. B., & de LIMA, J. E. Degradação ambiental agropecuária no bioma Caatinga. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 46 n. 3, p. 155-170. 2015.
- CARMONA, M.; BELTRÃO, N. E de M.; ARAÚJO, J. M. de; CORDÃO SOBRINHO, D. P.; ARIAS, A. A reintrodução da cultura do algodão no semi-árido do Brasil através do fortalecimento da agricultura familiar: um resultado prático da atuação do COEP. *Cadernos da Oficina Social*, Rio de Janeiro, n. 13, p. 1-99, 2005.
- CASTANHO, A. D. A., COELHO, M., BRANDO, P., MACEDO, M., BACCINI, A., WALKER, W., ANDRADE, E. M. Potential shifts in the aboveground biomass and

- physiognomy of a seasonally dry tropical forest in a changing climate. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 34-53. 2020.
- CERQUEIRA, E, Barros; GOMES, J. Maria A. EXPANSÃO AGROPECUÁRIA E DINÂMICAS DE USO E COBERTURA DO SOLO NO PIAUÍ. *Geo UERJ*, n. 42, p. 69241, 2023.
- CHEIN, F. Introdução aos modelos de regressão linear. Coleção: Metodologias de pesquisa. Enap, 2019.
- CLAUDINO, A. C. M., ABRANTES, S. L. M., ALMEIDA, A. A. R. D., THIAGO S. E. N. A., da SILVA, C. S., & FILGUEIRA, H. J. A. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA GERAÇÃO DE MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO A PARTIR DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND). *Geosciences= Geociências*, v. 41, n. 1, p.227-241. 2022.
- COELHO, M. S., PEREIRA, J. D. A., de LUCENA, M. M. A., SILVA, R. A., de OLIVEIRA, I. S., & de ARAÚJO, J. E. F. S.. Sensoriamento remoto aplicado em área de caatinga como subsídios para conservação da biodiversidade. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12 n. 5, p. 159-166. 2021.
- COSTA, D. P., SANTOS, J. J., CHAVES, J. M., ROCHA, W. J. S. F., VASCONCELOS, R. N., 2018. Novas Tecnologias e Sensoriamento Remoto: Aplicação de uma Oficina Didática para a Disseminação das Potencialidades dos Produtos e Ferramentas do Mapbiomas. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research* [online] 6. DOI: <https://doi.org/10.7770/safer-V0N0-art1402>.
- CUNHA, A.P.M.; ALVALÁ, R.C.; NOBRE, C.A.; CARVALHO, M.A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 214-215, n. 3, p. 494-505, 2015.
- CUNHA, A.P.M.A., TOMASELLA J, RIBEIRO-NETO GG, et al. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. *Atmospheric Science Letters*. v.19, n.10, 2018.
- DANIEL, D. F., QUEIROZ, T. M. D., DALLACORT, R., & BARBIERI, J. D. Aptidão Agroclimática para a Cultura do Algodão em Três Municípios do Estado de Mato Grosso, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.36. p. 257-270. 2021.
- DANTAS, R. A. Modelos espaciais aplicados ao mercado habitacional: Um estudo de caso para a cidade de Recife. 2003.

- DUARTE, J. F. M. MEDEIROS, R. M. MENEZES, E. A. Aptidão agroclimática de culturas anuais em perenes no município de Recife-PE, Brasil. *Revista de Ciências Agroambientais*. V. 18, n. 1. 2020.
- DEMARTELAERE, A. C. F., dos SANTOS, A. F., COUTINHO, P. W. R., de SÁ, R. J. D. S., do NASCIMENTO, F. D. A., da CONCENIÇÃO, A. G. C., ... & de SOUZA, T. L. Causas, consequências e métodos atribuídos para prevenir a desertificação na caatinga. *Brazilian Journal of Development*, v. 7 n. 8, p. 83270-83285. 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n8-502
- DINIZ, R. R. S., ALENCAR, M. L. S., MEDEIROS, S. A., GUERRA, H. O. C., & SALES, J. C. R. (2020). Índice de anomalia de chuvas da Microrregião do Cariri Ocidental Paraibano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.13, n.6, p. 2628-2640. 2020.
- DINIZ, M. T. M., & de OLIVEIRA, G. P. Proposta de compartimentação em mesoescala para o litoral do Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17 n. 3. 2016.
- FARIAS, E. S. B., SILVA, M. T., SILVA B, L., & PEREIRA, J. D. A. Análise multitemporal das alterações ambientais do bioma caatinga no município de Camalaú (PB). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 4, p. 314-324, 2022.
- FERNANDES, M.F; QUEIROZ, L.P. Vegetação e flora da Caatinga. *Ciência e Cultura*, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.
- FERREIRA, F. L. V., RODRIGUES, L. N., ALMEIDA, L. T., & TEIXEIRA, B. D. S. Tendência em séries hidrológicas e de mudanças no uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Guanhões, Minas Gerais. *Embrapa Cerrados-Artigo em periódico indexado (ALICE)*. 2020.
- FLOR, M. J. P. CONSEQUENCIAS DAS DERRUBADAS E QUEIMADAS DE VEGETAÇÃO: PRÁTICAS UTILIZADAS PELOS AGRICULTORES DA TRANSASSURUNI ALTAMIRA PARÁ. 2021.
- FLORENZO, T. G. Iniciação em sensoriamento remoto. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos. P. 120. 2011.
- FRANCISCO, P. R. M; SANTOS, D; CHAVES, I, B. ALGODÃO HERBÁCEO (*Gossypium hirsutum*) E SEU POTENCIAL PEDOLÓGICO NO ESTADO DA PARAÍBA. Solos: estudo e aplicações. 1.a Edição. p. 14-23. 2018.

- GALINA, A. B.; ILHA, D. B.; PAGOTTO, M. A. Dinâmica multitemporal da cobertura e uso do solo do estado de Sergipe. **Scientia Plena**, v. 18, n. 6, 2022.
- GAMA, D. C., de OLIVEIRA, F. F., de JESUS, J. B., & do NASCIMENTO, J. M. Susceptibilidade à desertificação em uma microrregião semiárida do Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 8 n. 1, 160-174. 2022.
- GANEM, K. A., DUTRA, A. C., de OLIVEIRA, M. T., de FREITAS, R. M., & CRISTINA, R.. Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra-Oportunidades e Desafios. *Rev Bras Cartogr*, v. 72, p. 829-854. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56543>
- GONZAGA, S. T. Curso de series temporais-ibpad. Instituto Brasileiro de Pesquisa e Análise de Dados. 2017.
- GARCIA, A. D. M., de ARAUJO F. J. C., da SILVA, H. P., & CARVALHO, R. D. O. Estudo espaço temporal de áreas susceptíveis à desertificação do Semiárido brasileiro. 2019.
- GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO ESTADO DA PARAÍBA. Disponível em: <https://paraiba.pb.gov.br/diretas/secretariadeinfraestruturadosrecursoshidricosedo meioambiente/meioambiente/zee#:~:text=O%20Estado%20da%20Para%C3%ADba%20possui,Oeste>. Acesso: Mar de 2022.
- GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA. Perda de vegetação nativa da Caatinga. Disponível em: <https://paraiba.pb.gov.br/diretas/secretaria-da-ciencia-tecnologia-inovacao-e-ensino-superior/noticias/paraiba-perdeu-mais-de-2-7-mil-hectares-de-vegetacao-em-2020>. Acesso em: jun/2023.
- IBGE CIDADES Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –INPE. A origem do INPE na corrida espacial. 2017. Disponível em:<http://www.inpe.br/institucional/sobre_inpe/historia.php> . Acesso em: Abr/2022.
- ISP.N. Instituto sociedade, população e natureza. Caatinga-Ameaças à Caatinga. Disponível em: <https://ispn.org.br/biomas/caatinga/ameacas-a-caatinga/#:~:text=Foram%20anos%20de%20explora%C3%A7%C3%A3o%20de,da%20Caatinga%2C%20e%20que%20tem>. Acesso em: jun/2023.
- ISMAEL, L. L.; ROCHA, E. M. R. Estimativa de contaminação de águas subterrâneas e superficiais por agrotóxicos em área sucroalcooleira, Santa Rita/PB, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 24, p. 4665-4676, 2019.

- JÚNIOR, W. B. Identificação e avaliação dos fatores de ocorrência de secas na bacia do Rio Guandu – Espírito Santo. Tese de Doutorado. Meteorologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. 2012.
- KENDALL, M.G. Rank correlation methods, 4th edn. Charles Griffin, London, UK, 1975.
- KIŞI, Ö.; SANTOS, C.A.G.; DA SILVA, R.M.; ZOUNEMAT-KERMANI, M. Trend analysis of monthly streamflows using Şen's innovative trend method. *Geofizika* 35:53. 2018. DOI: <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.3>
- LIMA, D. R., & BESSA, S. A. REGIÃO SERTÃO DO NORDESTE DO BRASIL: ANÁLISE DE SOLOS E TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO COM TERRA Congresso de Arquitetura e Construção. p. 89-98. 2022.
- LIRA, B. R. P., LOPES, L. D. N. A., CHAVES, J. R., SANTANA, L. R., & FERNANDES, L. L. Identificação de Homogeneidade, Tendência e Magnitude da Precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43 n. 4, p. 426-439. 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_426_439
- LUCIANO, A. C., CAMPAGNUCI, B. C. G., & le MAIRE, G. Mapping 33 years of sugarcane evolution in São Paulo state, Brazil, using landsat imagery and generalized space-time classifiers. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, p. 100749. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100749>
- MACEDO, R; S, WALLASSY, S. Diversidade florística entre fragmentos de Caatinga, Piauí, Brasil. **Diversitas Journal**, v. 7, n. 2, 2022.
- MACHADO, P. P., da COSTA, L., ROCHA, L. S., JUNIOR, J. L. L. F., MILANEZE, L. A., SILVA, M. A. P., & RODRIGUES, B. D. Geoprocessamento aplicado a área de meio ambiente: um estudo de caso baseado em processamento digital de imagens e sensoriamento remoto. *Brazilian Journal of Development*, v. 8. n. 4, p. 23819-23836. 2022. DOI:10.34117/bjdv8n4-072
- MARANGON, G. P., FELKER, R. M., ZIMMERMANN, A. P. L., FERREIRA, R. L. C., & da SILVA, J. A. A. (2016). Análise de agrupamento de espécies lenhosas da Caatinga no estado do Pernambuco. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 36 n.88, 347-353. 2016.
- MARENGO, J.A., Alves, L.M., Alvala, R.C., Cunha, A.P., Brito, S.S., Moraes, O.L.L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. v.90, n.2, pp.1973-1985, 2018.

- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, 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. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, p. 1-13, mai. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- MARIN, P. A. M., CAVALCANTE, A. D. M. B., MEDEIROS, S. S. D., TINÔCO, L. B. D. M., & SALCEDO, I. H. Núcleos de desertificação do semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica?. *Parcerias Estratégicas*, v. 17. n.34, p. 87-106. 2013.
- 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.
- MEDEIROS, S. D. S; CAVALCANTE, A. D. M. B; MARIN, A. M. P; TINÔCO, L. B. D. M; SALCEDO, I. H; PINTO, T. F. Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro. Campina Grande: INSA, p. 107. 2012.
- MELO, A. C. LIMITAÇÕES E CONFRONTAÇÕES DO SISTEMA AGROPASTORIL E O SEU POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NO ASSENTAMENTO RURAL PATATIVA DO ASSARÉ – PATOS/PB. I CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO. 1.a Edição. p. 1-13. 2017.
- MELOM. V. N., de OLIVEIRA, M. E. G., de ALMEIDA Almeida, G. L. P., GOMES, N. F., MORALES, K. R. M., SANTANA, T. C., & da SILVA, M. V. Spatiotemporal characterization of land cover and degradation in the agreste region of Pernambuco, Brazil, using cloud geoprocessing on Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, p. 100756. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100756>
- MENESES, P. R., & ALMEIDA, T. D. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. *Universidade de Brasília, Brasília*. 2012.
- MONTEIRO, E.R., MANGOLIN, C.A., NEVES, A.F., ORASMO, G.R., SILVA, J.G.M., & MACHADO, F.P. S. Genetic diversity and structure of populations in *Pilosocereus gounellei* (F.A.C.Weber ex K.Schum.) (Cactaceae) in the Caatinga biome as revealed by heterologous microsatellite primers. *Biochem System Ecol.* 58(2), 7-12. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bse.2014.10.006>
- MORAN, P. A. P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology*, Durham, v. 37, p. 17-23, 1950.

- OLIVEIRA, L. N.; AQUINO, C. M. S. Dinâmica temporal do uso e cobertura da Terra Na Fronteira agrícola do MATOPIBA: análise na sub-bacia hidrográfica do rio Gurgueia-Piauí. **Revista Equador**, v. 9, n. 1, p. 317-333, 2020.
- PAREYN, F. G. C. Os recursos florestais nativos e a sua gestão no estado de Pernambuco – o papel do manejo florestal sustentável. In: GARIGLIO, M. A. et al. (Org.). *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga*. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, . p. 99-112. 2010.
- PEREIRA, A. J. JUNIOR, O. I., & Lobão, J. S. B. Análise da susceptibilidade à desertificação em ambiente de caatinga. *Geo UERJ*, v. 37, 39260. 2020. DOI: 10.12957/geouerj.2020.39260
- RORCHA, M.H.M.; OLIVEIRA, N.S.M. Desafios do Turismo pedagógico no Parque Nacional do Vale do Catimbau (PE). *Revista Brasileira de Ecoturismo*, São Paulo, v 15, n.1, pp. 64-76. 2022. DOI: <https://doi.org/10.23925/1809-3876.2022v20i1p279-301>
- RODRIGUES, R. B, AARAÚJO, S. M. S., BEZERRA, M. F., & de SOUSA, L. A. Análise da dinâmica espacial e temporal do uso e ocupação do solo no município de Condado-PB (1989-2018). *Research, Society and Development*, v. 11 n.3. 2022.
- ROUSSEEUW, P. J. ‘Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis’, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20, 53-65. 1987.
- ROWNTREE, D., & O'HEHIR, R. *Statistics without tears: A primer for non-mathematicians*. Harmondsworth: Penguin. 1981.
- SALLES, R., ESCOBAR, L. E., BARONI, L., ZORRILLA, R., ZIVIANI, A., KREISCHER, V. & OGASARA, E. S. HARBINGER: Um framework para integração e análise de métodos de detecção de eventos em séries temporais. In *SBBD* p. 73-84. 2020.
- SARTORIO, L. F.; MAIER, É. L. B. Identificação das Mudanças Espaço-temporais nos Biomas Brasileiros por Intermédio da Análise de Componentes Principais (ACP). **Rev. Bras. Cartogr**, v. 74, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>
- SANTOS, S. R. Q., CUNHA, A. P. M., & NETO, G. G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. *Revista brasileira de climatologia*, 25 p. 80-10. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.62018>

- SANTOS, N. M., MEDEIRO, F. S. L., SANTOS, N. A., & NOGUEIRA, R. ANÁLISE MULTITEMPORAL DA DINÂMICA DE USO E COBERTURA DO SOLO NA REGIÃO DO MÉDIO SÃO FRANCISCO. p. 3027-3030. 2019.
- SANTOS C, E., MASCARENHAS F, S., TOLENTINO N, A., CHAVES, J. MAPEAMENTO DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NO MUNICÍPIO DE IBITIARA-BA. In *Congresso Internacional e Congresso Nacional Movimentos Sociais & Educação* v. 1, n. 1. 2022.
- SILVA, M. T., ANDRADE, A. S. D., SERRÃO, E. A. D. O., da SILVA, V. D. P., & SOUZA, E. P. D. APPLICATION OF SPATIAL MODELING FOR UPLAND COTTON YIELD IN THE SEMI-ARID OF PARAÍBA STATE, BRAZIL. *Engenharia Agrícola*, 41, 609-618. 2021.
- SILVA, L. S., FERRAZ, L. L., de SOUSA, L. F., SANTOS, C. A. S., & ROCHA, F. A. Trend in hydrological series and land use changes in a tropical basin at Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, v. 57 n. 1, p. 137-147. 2022.
- SILVA J, W. B., FLORENCIO, B. O. G., de NEGREIROS, L. V., & da SILVA, C. E. M. Levantamento dos gastos em biodiversidade no estado de Pernambuco-Brasil. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, v. 3 n. 1, p. 45-66. 2022. DOI: <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i1.206>
- SILVA, F. P., de MOURA, G. J. B., & SANTOS, C. A. B. Representações dos moradores do entorno das áreas de exploração sobre a importância e impactos da mineração. *Geosul*, v. 33 n. 66, p. 128-146. 2018.
- SILVA, D A M; MOURA, M, O. Registros de desastres associados à estiagem e seca na região do Alto Sertão da Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 126-136, 2018.
- SILVA, M. N. A. PESOA, F. C. L., SILVEIRA, R. N. P. D. O., ROCHA, G. S., & MESQUITA, D. A. Determinação da homogeneidade e tendência das precipitações na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 665-675, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778633400>
- SILVEIRA, H. L. F.; FARIAS, A. R.; MINGOTI, R. Autocorrelação espacial da dinâmica de uso e cobertura da terra no bioma Caatinga entre 2001 e 2018. 2022.
- SOUZA, P. H. N., BASTOS, G. Q., DUTRA, J. A., 2020. Interação cana-de-açúcar x épocas de colheita na Microrregião Centro de Pernambuco via modelos mistos. *Research, Society and Development* [online] 9. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsdv9i9.7700>.

- SOUZA, R. S. Avaliação espaço-temporal do processo de desertificação em sub-bacias hidrográficas do Rio Paraíba no Semiárido do Brasil. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, Tese de Mestrado em Geografia. 88 p. 2018.
- TAVARES, V. C.; ARRUDA, Í. R. P.; SILVA, D. G. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. *Geosul*, v. 34, n. 70, p. 385-405. 2019.
- TERASSI, P. M. D., JÚNIOR, J. F. D., GÓIS, G. D., & GALVANI, E.. Variabilidade do índice de precipitação padronizada na região norte do estado do paraná associada aos eventos de el nio-oscilação sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, p.11-25. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786331002>
- TERRA BRASILIS. INPE. Prodes (desmatamento). Incremento de desmatamento acumulado por ano. Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/caatinga/increments>>. Acesso em: Jul de 2023.
- VANELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B.; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Corrgo Três Barras, Marinópolis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.55-64, 2010.
- VICENTE, P. G., do NASCIMENTO, D. C., de ABREU, M. K. F., & EDSON, B. Desenvolvimento sustentável na caatinga é possível? visão dos alunos de ensino médio de uma escola pública de Quixel (CE). *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 16 n. 4, p.102-120. 2021.