

Autocorrelação espacial da dinâmica de uso e cobertura da terra no bioma Caatinga entre 2001 a 2018



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Territorial
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

DOCUMENTOS 145

Autocorrelação espacial da dinâmica de uso e cobertura da terra no bioma Caatinga entre 2001 e 2018

*Hilton Luís Ferraz da Silveira
André Rodrigo Farias
Rafael Mingoti*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Territorial
Av. Soldado Passarinho, nº 303
Fazenda Chapadão
13070-115, Campinas, SP
Fone: (19) 3211.6200
www.embrapa.br/territorial
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Territorial

Presidente
Lucíola Alves Magalhães

Secretária-executiva
Bibiana Teixeira de Almeida

Membros
Ângelo Mansur Mendes, José Dilcio Rocha, Lauro Rodrigues Nogueira, Suzi Carneiro, Vera Viana dos Santos Brandão, André Luiz dos Santos Furtado e Paulo Augusto Vianna Barroso

Supervisão editorial
Suzi Carneiro e Bibiana Teixeira de Almeida

Revisão de texto
Bibiana Teixeira de Almeida

Normalização bibliográfica
Vera Viana dos Santos Brandão

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica e tratamento das ilustrações
Suzi Carneiro

Ilustração da capa
Banco Múltimídia Embrapa (Saulo Coelho) e Freepik.com

1ª edição
Publicação digital - PDF (2022)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Territorial

Autocorrelação espacial da dinâmica de uso e cobertura da terra no bioma Caatinga entre 2001 e 2018. / Hilton Luís Ferraz da Silveira, André Rodrigo Farias, Rafael Mingoti. - Campinas: Embrapa Territorial, 2022.

PDF (23 p.): il. ; (Documentos / Embrapa Territorial, ISSN 0103-7811; 145).

1. Fragmentação da Caatinga. 2. Índice local de Moran. 3. Sistema de Informação Geográfica. I. Silveira, Hilton Luís Ferraz. II. Farias, André Rodrigo. III. Mingoti, Rafael. IV. Título. V. Série.

CDD 631.47816

Vera Viana dos Santos Brandão (CRB 8/7283)

© Embrapa, 2022

Autor

Hilton Luís Ferraz da Silveira

Geógrafo, mestre em Sensoriamento Remoto, analista da Embrapa Territorial, Campinas, SP

André Rodrigo Farias

Geógrafo, mestre em Geografia, analista da Embrapa Territorial, Campinas, SP

Rafael Mingoti

Engenheiro-agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, analista da Embrapa Territorial, Campinas, SP

Apresentação

A Embrapa Territorial é uma Unidade temática da Embrapa que atua na viabilização de soluções de inteligência, gestão e monitoramento territorial para a agricultura brasileira. Em seus projetos e ações, a Unidade desenvolve e aplica métodos que propiciam aos gestores públicos e privados maior conhecimento da complexidade do mundo rural, seus desafios e oportunidades.

Nossas equipes multidisciplinares fazem amplo uso das geotecnologias para gerar, integrar e analisar informações de diversas fontes e naturezas, em bases territoriais e em diversas escalas temporais.

O desenvolvimento e a aplicação de métodos, técnicas e procedimentos permitem detectar, identificar, qualificar, cartografar, prever e monitorar os diversos aspectos e fatores que influenciam a dinâmica de atividades agrícolas, pecuárias, florestais e ambientais em nível local, regional e nacional.

Bons prognósticos e diagnósticos territoriais são fundamentais na busca pelo desenvolvimento agropecuário sustentável, de modo a equilibrar as questões produtivas, socioeconômicas e ambientais. Além da caracterização de aspectos técnicos e agronômicos, a análise detalhada da agropecuária de uma determinada região implica compreender como essas características interagem com cada situação natural, agrária, agrícola, de infraestrutura e socioeconômica possibilitando o monitoramento de sua evolução.

Esta obra utiliza dados secundários advindos de mapeamentos para, por meio da análise de autocorrelação espacial do índice de Moran, diagnosticar a evolução histórica e o atual estágio de uso e cobertura da terra no bioma Caatinga, identificando tendências espaciais.

Boa leitura!

Gustavo Spadotti Amaral Castro

Chefe-Geral da Embrapa Territorial

Sumário

Apresentação	7
Introdução.....	11
Material e Métodos	12
Área de estudo	12
Banco de dados	12
Cálculo das métricas de uso	14
Índice de Moran.....	15
Resultados e Discussão	16
Conclusões	21
Agradecimentos	22
Referências	22

Introdução

O bioma Caatinga apresenta um regime pluvial de alta variabilidade espacial e temporal, além de elevada evapotranspiração. Essa característica promove a ocorrência de déficit hídrico em alguns meses do ano, com intensidade variável espacial e temporalmente, e o bioma apresenta uma vegetação especialmente adaptada a esta condição (Silveira et al., 2018). A Caatinga ocupa área de 850 mil km² em sete estados brasileiros onde residem cerca de 28 milhões de pessoas (IBGE, 2021e).

Apesar de ocupar uma parcela importante do território brasileiro, durante muito tempo o bioma foi visto como um pária entre as regiões brasileiras, pois o flagelo da seca assolava a vida do sertanejo (Silva, 2007). Neste contexto, diversas ações fragmentadas foram implementadas desde o fim do Brasil Império, cujos objetivos eram combater a seca e seus impactos (Silva, 2007). Já a partir do fim da década de 1950, com a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene), teve início a reorientação das ações governamentais, com o objetivo de criar polos de desenvolvimento agropecuário focados na fruticultura irrigada como salvação para a região (Silva, 2003).

Não obstante o incremento tecnológico, a maior parte do sertão não apresenta potencial para irrigação ou dispõe de quantidade de água para sustentar uma agricultura irrigada de elevada produção (Cavalcanti et al., 1994; Ferrarini et al., 2020). A partir da década de 1980, emerge a percepção do regime de secas como um processo natural que não deve ser combatido, mas "convivido" (Embrapa, 2021). Por conta desse novo paradigma, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas, a fim de amenizar os impactos das estiagens na vida dos sertanejos e garantir sua segurança alimentar.

Entretanto, a adoção das tecnologias de convivência com o Semiárido não ocorre de modo pleno em todo o território, o que resulta em modos de produção ainda bastante inadequados e focados principalmente na subsistência (Silva, 2007). Em grande parte das localidades onde os investimentos de capital são reduzidos e a utilização de tecnologias agropecuárias é restrita, a vegetação gramínea e arbustiva serve de pasto para a criação extensiva de gado enquanto o componente arbóreo sofre o corte seletivo para a produção de lenha e posterior substituição por culturas anuais de ciclo curto (Moro et al., 2014).

Consequentemente, é fundamental fazer o monitoramento frequente do bioma, a fim de detectar alterações na organização do espaço e entender a dinâmica da ocupação do território. Essa é uma importante ferramenta de planejamento e de formulação de políticas públicas (IBGE, 2021a, 2020b). Sob essa perspectiva, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cumprindo sua missão institucional, elaborou o produto Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil, que mapeia bianualmente, em uma grade de 1 km², as principais classes de uso e cobertura presentes no Brasil (IBGE, 2020b).

Embora o mapeamento, por si só, já forneça aos tomadores de decisão informações sobre o território, nem sempre ele é suficiente, principalmente em termos de identificação de tendências e fenômenos espacialmente alocados. A visualização dos dados sob a forma de mapas (analógicos ou digitais) propicia suporte para conclusões intuitivas, mas ferramentas de análise espacial de áreas, presentes nos sistemas de informações geográficas (SIGs), podem propiciar avaliações mais objetivas (Câmara et al., 2004).

Uma das ferramentas oferecidas pelos SIGs é a análise de autocorrelação espacial por meio de *Local Indicators of Spatial Association* (Lisa), também conhecida como índice local de Moran, que identifica a existência de dependência espacial de uma variável exploratória (Câmara et al., 2004). Os espaços contínuos nos quais os valores do Lisa são significativos estatisticamente podem ser caracterizados como agrupamentos de alta intensidade (*hot spots*) da variável estudada (Anselin, 1995).

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi diagnosticar a evolução histórica e o atual estágio de uso e cobertura da terra no bioma Caatinga por meio da análise de autocorrelação espacial do índice de Moran para os períodos de 2000 a 2010 e de 2010 a 2018, identificando tendências espaciais a partir de dados secundários advindos de mapeamentos.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo corresponde aos municípios cujas microrregiões a que pertencem estão inseridas majoritariamente no bioma Caatinga, conforme o trabalho de Garagorry e Farias (2021). Abarca 1.130 municípios em boa parte dos estados Bahia, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e todo o estado do Ceará, totalizando uma área de mais de 845 mil km² (Figura 1)

Apesar da condição climática muitas vezes desfavorável, a produção agrícola regional, em 2019, reuniu cerca de 1,5 milhão de toneladas de milho, 2 milhões de toneladas de mandioca, 5,4 milhões toneladas de cana-de-açúcar, além de 6,8 milhões de toneladas de frutas diversas (Embrapa Territorial, 2022). A pecuária também desempenha papel importante, com um efetivo de cabeças de gado de 4 milhões de suínos, 10 milhões de caprinos, 12 milhões de bovinos e 12,5 milhões de ovinos (Embrapa Territorial, 2022).

Banco de dados

Para este trabalho, foram utilizados os mapeamentos do Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil do IBGE, gerados conforme a grade estatística, conceito desenvolvido pela Coordenação de Cartografia que minimiza distorções decorrentes da grande extensão territorial do País e que possibilita a integração e a comparação com outros dados geoespaciais produzidos pelo IBGE, base para futuros estudos (IBGE, 2020b). Foram selecionados os anos de 2000, 2010 e 2018 com as seguintes classes (Embrapa Territorial, 2022):

- a) Área artificial (Aar): áreas antrópicas não agrícolas, como edificações, sistemas viários, lavras e garimpos;
- b) Área agrícola (Aag): áreas ocupadas por lavouras (permanentes, temporárias ou semiperenes), inclusive as áreas em pousio ou alagadas;
- c) Pastagem com manejo (Apm): áreas destinadas ao pastoreio, com vegetação herbácea cultivada ou natural e que apresentam ações como plantio, limpeza da terra, gradagem e outros manejos que descaracterizem a cobertura natural;
- d) Mosaico de ocupações em área florestal (Mfl): ocupação mista de áreas agropecuárias e remanescentes florestais de modo a não permitir a individualização dos seus elementos;
- e) Silvicultura (Asi): áreas ocupadas por plantios florestais comerciais;
- f) Vegetação florestal (Nvf): áreas ocupadas por formações arbóreas com mais de 5 m de altura;
- g) Área úmida (Nau): área permanentemente ou periodicamente inundada por água doce ou salobra e ocupada por vegetação natural;



Figura 1. Localização da área de estudo com os limites municipais e a indicação da unidade federativa.

- h) Vegetação campestre (Nvc): diferentes categorias de vegetação composta por estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre outro estrato gramíneo-lenhoso;
- i) Mosaico de ocupações em área campestre (Mvc): associação indiscriminada de área agropecuária e remanescentes campestres;

- j) Corpo d'água continental (Nal): agrega águas interiores, como rios, lagos e reservatórios artificiais (exceto tanques de aquicultura);
- k) Corpo d'água costeiro (Nat): agrega áreas com cobertura de água inseridas nas 12 milhas náuticas da Lei nº 8.617, de 4 de janeiro de 1993, e;
- l) Área descoberta (Nad): agrupa afloramentos rochosos, praias, dunas e outras áreas naturalmente sem vegetação.

Também foi utilizada a Malha Municipal do Brasil, gerada por IBGE (2020a), em que foram selecionados os municípios da área de estudo, além dos dados da Produção Agrícola Municipal (PAM), da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) e da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), extraídos do Sistema IBGE de Recuperação Automática Sidra/IBGE (IBGE, 2021a, 2021b, 2021c), e que mostram mudanças dos perfis socioeconômicos dos municípios, em especial quanto a agricultura, pecuária e extrativismo, agentes da mudança do uso e da cobertura dos solos (Jukneliene et al., 2021).

Cálculo das métricas de uso

Para determinar os índices de Moran, foram computadas, para cada um dos 1.130 municípios, a área ocupada por cada uso e cobertura indicado nos mapeamentos do IBGE, considerando o sistema de projeção equivalente de Albers e o sistema de referência SIRGAS 2000 (IBGE, 2020a). Então, foi calculada a diferença das áreas entre os anos de 2000 e 2010 (primeiro período) e entre 2010 e 2018 (segundo período), e sua proporção foi determinada em relação à dimensão total do município, conforme a Equação 1. Dessa forma, mudanças ocorridas entre 2000 e 2010 foram comparadas às mudanças ocorridas entre 2010 e 2018 em cada município, de acordo com a ponderação de sua respectiva área. A ponderação das mudanças de uso em função da área municipal atua como um ponderador de heterogeneidade dos polígonos, e polígonos de tamanhos diferentes apresentam densidades diferentes para os fenômenos estudados, ocorrendo os chamados efeito escala e efeito zoneamento (Ramos, 2004).

$$d = \frac{100(U_f - U_i)}{A_m} \quad (1)$$

d é a diferença relativa, em porcentagem, entre as áreas ocupadas pelo uso U no tempo final (f) e inicial (i) em relação a uma área A em um dado município m .

A fim de simplificar a análise, as classes de uso foram agrupadas em três categorias utilizando o software ArcGIS da ESRI. A categoria “natural” foi o resultado do agrupamento das classes Nvf, Nau, Nvc, Nal, Nat e Nad; a categoria “mosaico” reuniu as classes Mvc e Mfl; e, finalmente, a categoria “antrópico” foi constituída pelas classes Aar, Aag, Apm e Asi.

Índice de Moran

Para testar a significância estatística da variabilidade espacial na área de estudo, foi calculada a matriz de proximidade espacial, ou matriz de vizinhança, na qual os valores normalizados de proximidades (entre 0 e 1 e determinados a partir da variância dos dados) são calculados para cada uma das áreas em relação às outras. Para calcular os valores de proximidade, podem ser adotados

diversos critérios, como proporção da borda compartilhada em relação ao perímetro dos polígonos, distância entre os centroides das áreas, além de limiares de distâncias (Anselin, 1995; Câmara et al., 2004; Picoli et al., 2020). Os cálculos e operações aqui descritos foram feitos utilizando o software ArcGIS da ESRI.

Neste trabalho foi utilizado, assim como no trabalho de Pereira (2016), o inverso do quadrado da distância euclidiana entre os centroides dos limites municipais, por sua facilidade de cálculo, além do limiar de 68,5 km, calculado com base nas distâncias entre centroides, de modo a garantir que todos os municípios tenham pelo menos um vizinho na matriz.

A partir dos valores de áreas relativas (d) das categorias "natural", "mosaico" e "antrópico", foi calculado, por meio da Equação 2, o índice global de Moran (I), que varia entre -1 e +1, e, diferentemente de outras análises de correlação, não é centrado em zero (porém tende a zero quanto maior o n), mas em $E(I) = -[1/(n-1)]$ (Prudente et al., 2014). Dessa forma, valores próximos a $E(I)$ indicam um caráter aleatório, sem dependência espacial, enquanto valores positivos (isto é, maiores que $E(I)$) são compreendidos como uma tendência de agrupamento espacial dos valores da variável estudada (isto é, áreas com vizinhança com valores semelhantes) e, por fim, valores negativos (menores que $E(I)$) indicam tendência de dispersão (áreas com vizinhança cujos valores são diferentes) (Anselin, 1995).

Para estabelecer a validade estatística do índice global de Moran, é feito um teste de "pseudossignificância", no qual os valores (d) são comutados entre os diversos municípios da área de estudo, gerando diferentes combinações espaciais para os dados e determinando a significância estatística (valor z e p -valor) do arranjo real (Anselin, 1995; Câmara et al., 2004).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z}) (z_j - \bar{z})}{\sum_{i=0}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (2)$$

n é o número de áreas, z é o valor da variável considerada na área i , \bar{z} é o valor médio da variável e w_{ij} são os elementos da matriz normalizada de proximidade espacial. Existindo dependência espacial, calcula-se o Lisa (Equação 3) para cada uma das categorias de uso em cada um dos municípios (k), com o objetivo de mostrar a forma como a dependência espacial se apresenta no território.

$$I^{(k)} = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}^{(k)} (z_i - \bar{z}) (z_j - \bar{z})}{\sum_{i=0}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (3)$$

Uma vez que o valor do Lisa é de difícil compreensão, foi empregada a técnica do espalhamento de Moran, que consiste em classificar cada município com base no valor normalizado do índice local de Moran (Z) e da média dos valores dos polígonos vizinhos (W_z) conforme a Tabela 1 (Prudente et al., 2014; Xue et al., 2022).

Portanto, é possível entender a classificação como: HH (alto–alto), quando um município de alto Lisa está circundado de polígonos com valores do Lisa igualmente altos; HL (alto–baixo), quando um município de alto valor do Lisa está localizado em um entorno de valor baixo; LL (baixo–baixo), quando o Lisa tanto do município quanto da média do seu entorno são baixos; e LH (baixo–alto), quando um município de baixo Lisa é circundado por municípios cuja média do Lisa é alta (Anselin, 1995; Câmara et al., 2004; Prudente et al., 2014).

Tabela 1. Classificação dos polígonos de acordo com sua posição no diagrama de espalhamento de Moran.

Classificação	Wz	Z
HH	>0	>0
HL	<0	>0
LH	>0	<0
LL	<0	<0

É importante salientar que a classificação de acordo com o diagrama de espalhamento de Moran leva em conta a sua vizinhança e a tendência da variável estudada, segundo a qual as classes HH e LL seguem o mesmo processo de dependência espacial das demais áreas (Câmara et al., 2004). Outro ponto a ser ressaltado é a ocorrência das chamadas extremas correlações espaciais positivas e negativas, que tornam o método ineficiente para alguns tipos de dados (Dray, 2011).

Resultados e Discussão

Quando são analisados os números absolutos de ganhos e reduções de área dos usos e coberturas para os dois períodos considerados, pouca diferença é encontrada. Entretanto, quando é analisada a forma como a mudança ocorreu espacialmente, verifica-se que o fenômeno de mudança do uso da terra não ocorre desassociado da organização territorial.

A Figura 2 mostra as diferenças relativas, em porcentagem, entre as áreas ocupadas pelo uso no período inicial (2000 a 2010) e no período final (2010 a 2018). É possível observar forte associação entre as reduções de áreas da categoria "natural" (Figuras 2a e 2d para os períodos de 2000–2010 e 2010–2018, respectivamente) e o aumento das áreas da categoria "mosaicos" (Figuras 2b e 2e para os períodos de 2000–2010 e 2010–2018, respectivamente), indicando um processo de fragmentação das classes de uso associadas principalmente à Caatinga. Na fragmentação da região semiárida, áreas contínuas de cobertura natural são entrecortadas por usos diversificados de culturas agrícolas, em diferentes estágios de desenvolvimento, e por pecuária extensiva, e é difícil separar espectralmente áreas inferiores a 100 ha (Accioly et al., 2008).

Por sua vez, em alguns municípios concentrados, começa a ocorrer um processo de recuperação da vegetação nativa na porção noroeste da área de estudo, no limite entre Piauí e Maranhão e entre Piauí e Ceará, no entorno da Chapada do Araripe, justamente pela redução da fragmentação intraperíodo 2010–2018 (Figuras 2d e 2e).

Nas transformações intracategoria, ocorre a migração do processo de fragmentação da Caatinga (redução da categoria natural e aumento do mosaico) do norte da área de estudo para as porções centrais, nos estados Paraíba e Pernambuco (Figuras 2a, 2b, 2d e 2e). Além disso, observa-se crescimento dos municípios ao longo da região do Agreste no limite com a Zona da Mata no sentido SO–NE do Saliente Nordeste. Na distribuição dos ganhos e perdas das áreas antrópicas (Figuras 2c e 2f), poucas mudanças são observadas, exceto por um aumento da antropização nas imediações do município de Pilão Arcado (BA).

Todos esses padrões de aumento e diminuição das categorias de uso e cobertura revelaram a existência de dependência espacial e de agrupamento com mais de 99% de confiança estatística (p -valores menores que 0,01) a partir do índice global de Moran, cujo índice esperado (ponto central) foi de $-8,86 \times 10^{-4}$. Rejeita-se, portanto, H_0 , quando os padrões de aumento e redução das áreas seguem uma distribuição espacial aleatória.

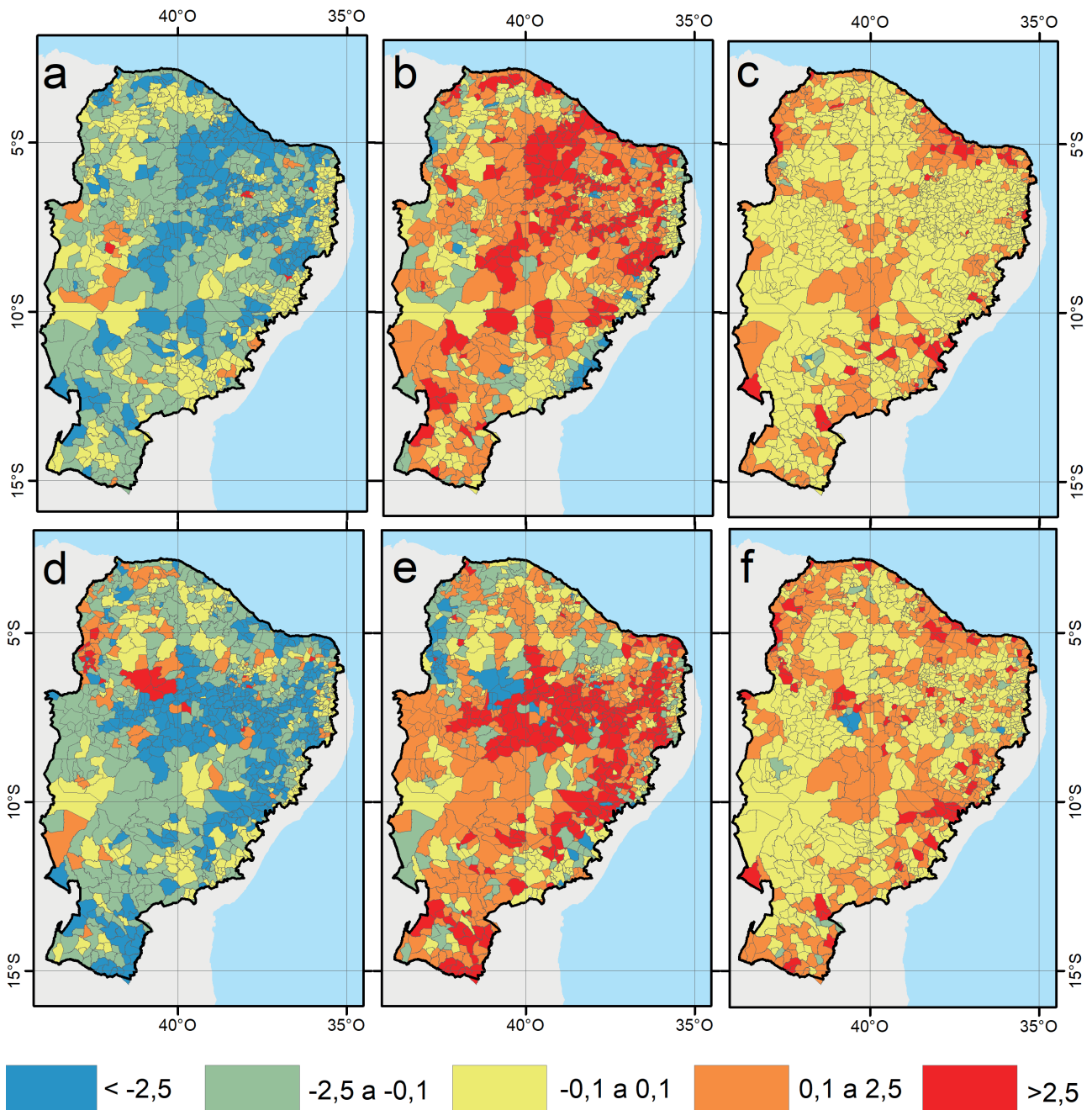


Figura 2. Diferenças entre as porcentagens das áreas ocupadas do uso e cobertura em função da área dos municípios no período de 2000-2010 para as categorias: natural (a), mosaico (b), e antrópico (c), e no período 2010-2018 para as categorias: natural (d), mosaico (e) e antrópico (f).

Com base no cálculo do Lisa, cada município que apresentou significância estatística em sua dependência espacial foi classificado segundo o diagrama de espalhamento de Moran (Figura 3 e Tabela 2).

É importante notar que os municípios do Semiárido brasileiro apresentam tamanhos relativamente próximos, com exceção das porções mais a oeste da Bahia. Essa configuração mais homogênea reduz os riscos da ocorrência de uma distorção na ponderação pela maior população. O uso de uma métrica de análise ponderada pela área do município atenuou eventuais discrepâncias em função do tamanho, tais como as encontradas por Câmara et al. (2004). Além disso, é importante notar que nenhuma das análises apresentou dissimilaridade completa (extrema autocorrelação negativa),

quando I é próximo a -1 , ou divisão completa (extrema autocorrelação negativa), quando I é próximo a 1 , conforme a Figura 4 (Moretti, 2021; Dray, 2011).

Dessa forma, para a categoria "natural" (Figuras 4a e 4d), os municípios que apresentavam uma taxa de conversão em torno de zero e estavam próximos a outros municípios com características semelhantes foram classificados como HH. Por sua vez, municípios com forte redução de suas

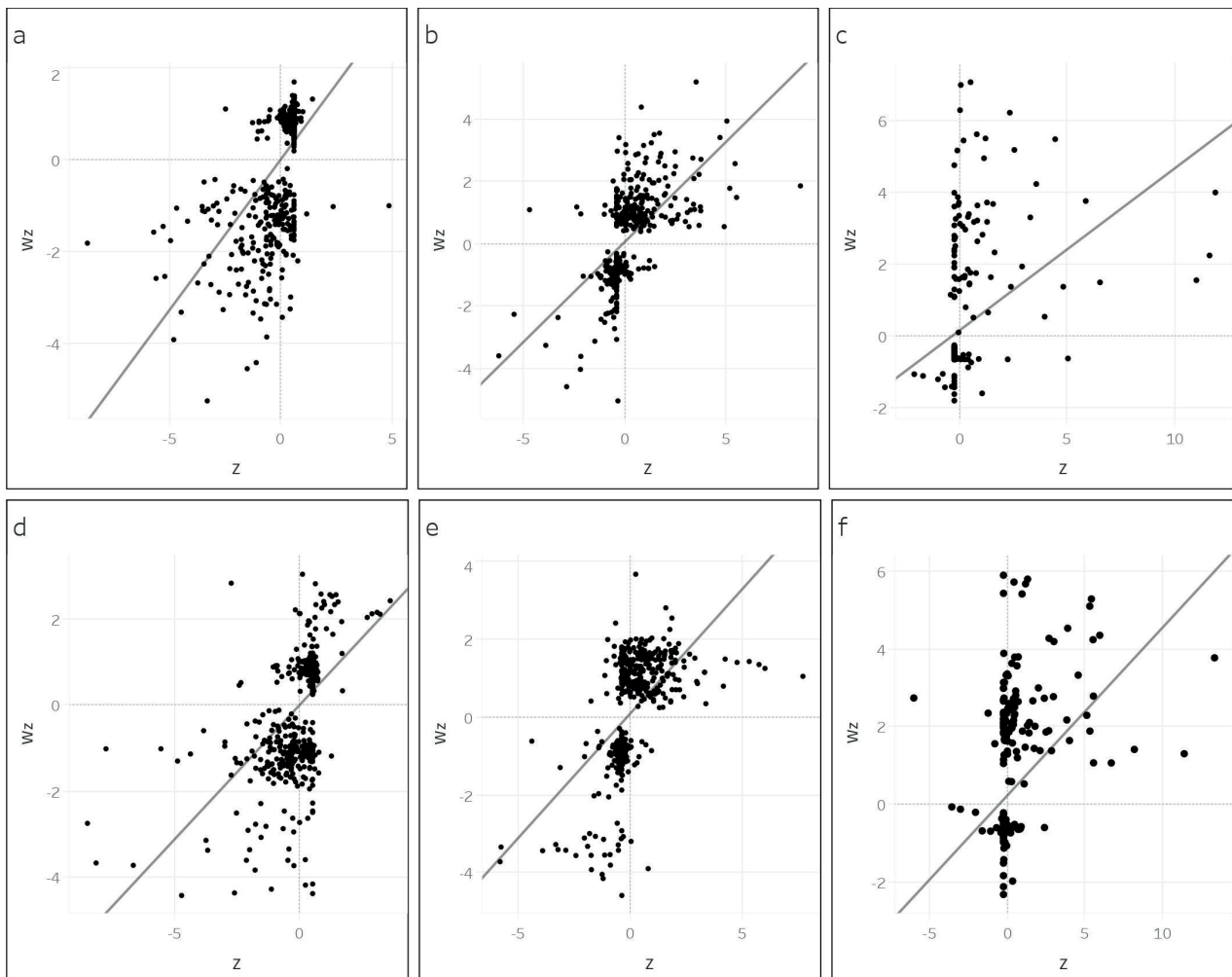


Figura 3. Diagrama de espalhamento de Moran para o valor normalizado da mudança (Z) e a média normalizada dos valores da vizinhança (Wz) no período de 2000–2010 para as categorias natural (a), mosaico (b) e antrópico (c), e no período 2010–2018 para as categorias natural (d), mosaico (e) e antrópico (f).

Tabela 2. Classificação dos polígonos de acordo com sua posição no diagrama de espalhamento de Moran.

	Natural		Mosaico		Antrópico	
	2000–2010	2010–2018	2000–2010	2010–2018	2000–2010	2010–2018
HH	22,8	21,0	11,6	10,7	3,5	4,8
HL	3,6	3,9	0,8	0,4	2,8	0,6
LH	1,2	1,1	2,7	4,9	2,7	2,9
LL	10,8	9,6	11,6	13,0	13,4	13,6

áreas naturais e na vizinhança de outros municípios semelhantes foram rotulados como LL. Outros municípios, classificados como HL ou LH, podem ser entendidos como áreas de transição entre agrupamentos de municípios com características semelhantes e municípios com características distintas.

Comportando-se de maneira oposta, na categoria "mosaico", foram classificados como HH os municípios agrupados em área de elevada taxa de mudança positiva (aumento de área), enquanto a classificação LL agregou municípios com poucos valores próximos a zero (Figuras 4b e 4e). Esta categoria conta geralmente com valores de conversão expressivos e, na maioria das vezes, positivos (Figura 4b). O mesmo ocorre para a categoria "antrópico", embora com valores médios mais baixos (Figura 4c). Em contrapartida, os valores para o período de 2010 a 2018 revelam que as médias caminham para as extremidades, ampliando também os desvios-padrão (Figuras 4c, 4d e 4e).

Finalmente, nas Figuras 4c e 4f, é possível notar que, para a categoria "antrópico", foram classificados como LL os municípios sem mudanças na área ocupada, enquanto os municípios rotulados como HH apresentaram aumento de área para esta categoria nos municípios agrupados (taxa positiva).

Os municípios, classificados por meio do diagrama de espalhamento de Moran, foram exibidos em mapas para cada uma das categorias de uso e cobertura e para cada um dos períodos considerados (Figura 5). Para facilitar a discussão, alguns agrupamentos de municípios com características semelhantes foram numerados. Na Figura 5a, por exemplo, o agrupamento 1 (HH), localizado na

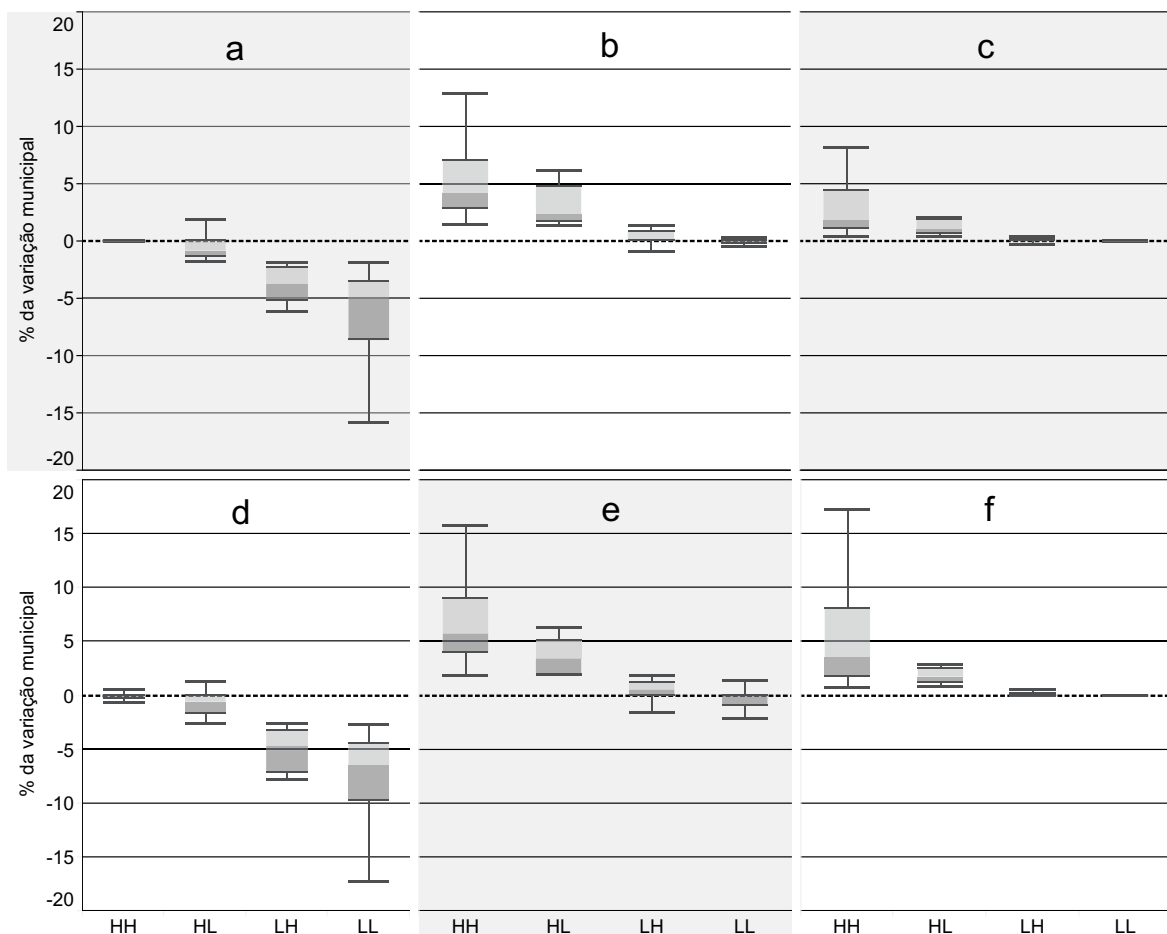


Figura 4. Diagramas de extremos e quartis da porcentagem da variação das categorias de classe de acordo com a classificação do agrupamento de Moran no período de 2000–2010 para as categorias natural (a), mosaico (b) e antrópico (c), e no período 2010–2018 para as categorias natural (d), mosaico (e) e antrópico (f).

faixa entre Teresina (PI) e Sobral (CE) cruzando o estado do Piauí no sentido SO–NE se reflete na Figura 5b como um conjunto LL, indicando uma estabilização da taxa de conversão próxima a zero.

Esse grupo (*cluster*) apresenta expansão no número de municípios, de 66 para 195, entre os períodos de 2000 a 2010 e de 2010 a 2018, respectivamente (Figura 5d), acompanhada de redução significativa de 16,5% na área plantada e de 6,6% na extração de lenha entre os dois intervalos (IBGE, 2021b, 2021d).

O agrupamento 2 é o que apresenta maior complexidade, movendo-se espacialmente entre os dois períodos estudados, indo da porção norte da área de estudo, entre os estados Ceará e Rio Grande do Norte, para o sul, ao longo dos estados Paraíba (incluindo os polos de desertificação do Seridó e

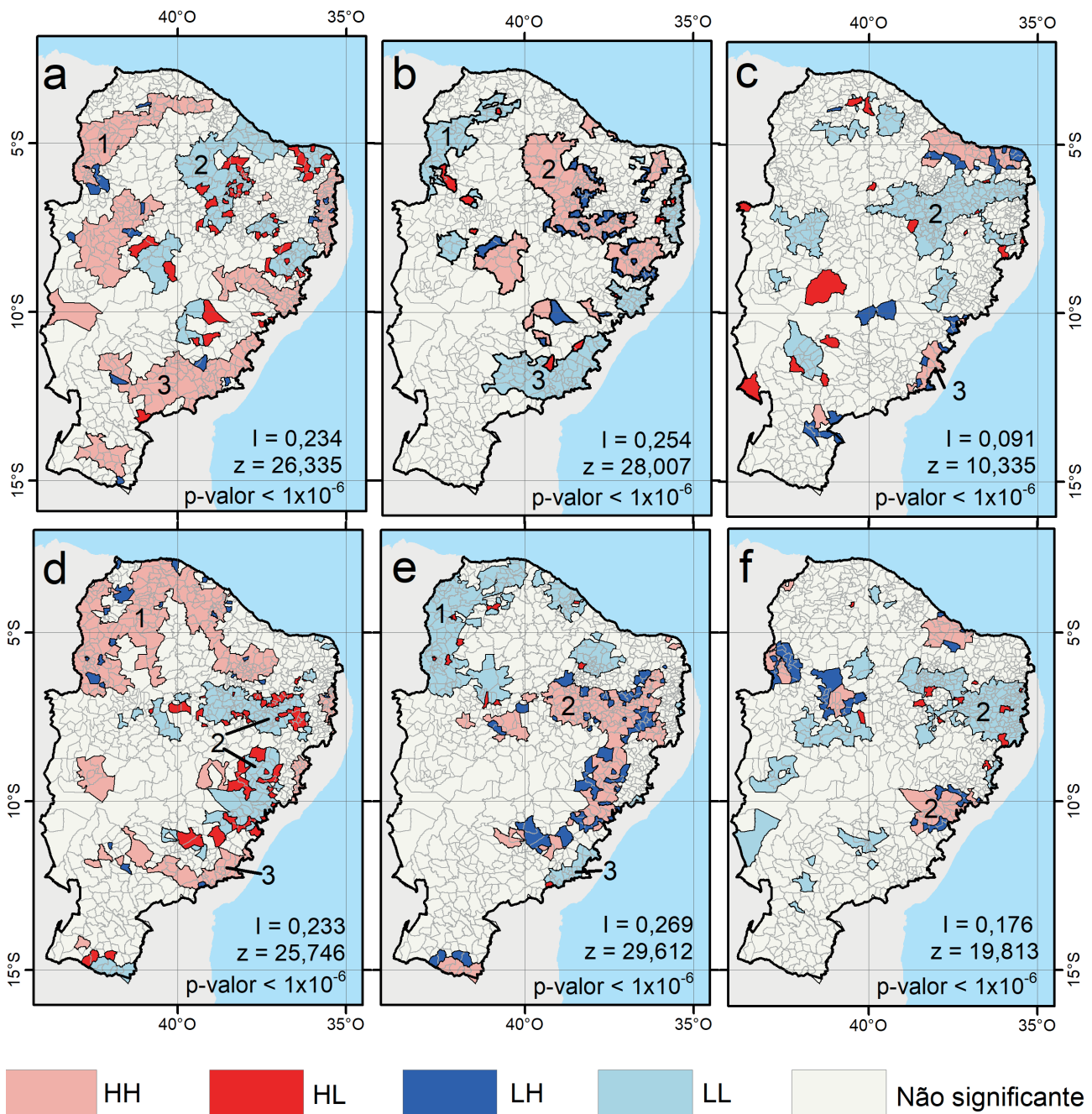


Figura 5. Mapa de espalhamento de Moran no período de 2000–2010 para as categorias natural (a), mosaico (b) e antrópico (c), e no período 2010–2018 para as categorias natural (d), mosaico (e) e antrópico (f).

do Cariri), Pernambuco e dos sertões de Alagoas e Sergipe (Figuras 5a, 5b, 5d e 5e), e mantendo-se estável para as áreas antrópicas (Figuras 5c e 5f).

Neste agrupamento municipal, apesar do alto crescimento dos gados bovino, caprino e ovino no primeiro período (31%, 28% e 34%, respectivamente), no segundo período houve desaceleração da atividade agropecuária, com manutenção no número de cabeças e forte redução da área plantada total, de 755 mil hectares em 2011 para menos de 400 mil hectares em 2018 (IBGE, 2021c, 2021d). Apesar da desaceleração econômica, o número de municípios (113 no primeiro período e 117 no segundo) e a área (6.384 km² entre 2000 e 2010 e 5.741 km² no período de 2010 a 2018) praticamente não se alteraram.

No agregado municipal de Feira de Santana (agrupamento 3), no estado da Bahia, ocorre exatamente o contrário: há redução do número de municípios quando comparados os dois períodos (Figuras 5a e 5d). A dinâmica da paisagem, inicialmente orientada à desagregação das paisagens naturais (Figura 5b), passou a mostrar um comportamento agregado apenas em sua porção mais a leste (Figura 5e). Neste agregado, a redução da área plantada também foi significativa, de uma média de 635 mil hectares no período de 2000 a 2010 para 397 mil no período de 2010 a 2018, com reduções significativas para as culturas de milho, mandioca e feijão (IBGE, 2021d).

A pecuária extensiva e a extração de lenha e madeira parecem acompanhar o processo de fragmentação da Caatinga, principalmente por seu baixo investimento inicial. A extração vegetal do componente arbóreo tem levado à redução do banco de sementes, e a pecuária extensiva nas áreas naturais, à redução das plântulas no solo pelo excesso de pastoreio (Silva et al., 2014). Diante disso, a estabilização das áreas ocupadas pela Caatinga passa pela adoção de tecnologias que aumentem a eficiência da agropecuária e substituam a lenha e a madeira como fonte energética e de matéria-prima (Lopes; Canto, 2018; Arruda et al., 2019; Santana et al., 2022).

Vale ressaltar que não foi identificada relação direta entre as estiagens e o aumento ou a redução das taxas de conversão das categorias "natural", "mosaico" ou "antrópico" quando confrontados os resultados obtidos por este trabalho com os dados de severidade, duração e frequência para as secas de 2001 a 2006, 2006 a 2011 e 2011 a 2016 elaborados por Brito et al. (2018). Dessa forma, as perturbações na regularidade (espacial, temporal e volumétrica) da precipitação, embora tenham impactos diretos nas economias e nas produções agropecuárias locais, não geraram efeitos observáveis no longo prazo para as mudanças de uso e cobertura e ainda precisam ser melhor compreendidas.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a mudança do uso e da cobertura da terra no bioma Caatinga ocorre a partir do processo de fragmentação das classes florestais e campestres, por meio da transferência de área entre as categoria "natural" e "mosaico". A pecuária tem se mostrado como um relevante fator de conversão, principalmente associada à extração vegetal do componente arbóreo (madeira e lenha). Essa degradação, espacialmente lenta e espalhada, ocorre através da incorporação de pequenas parcelas com área inferior à separabilidade das classes dos mapeamentos.

O processo de mudança de uso e cobertura na Caatinga é dinâmico espacial e temporalmente, embora alguns núcleos de alteração possam estabilizar-se em torno de pequenos agrupamentos de municípios.

Por fim, o espalhamento de Moran, apesar dos problemas discutidos, mostrou-se um método eficaz para a identificação de agrupamentos territoriais de mudança de uso e cobertura da terra na Caatinga.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Banco do Nordeste, por meio do Fundo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro no projeto Sistema de Inteligência Territorial Estratégica do bioma Caatinga (Convênio BNB/Fundeci nº 2019.0016).

Referências

- ACCIOLY, L. J. de O.; SILVA, A. B. da; LOPES, H. L.; SILVEIRA, H. L. F. da; SILVA, E. A. da; SILVA, J. A. da; ALVES, E. da S.; MENEZES, A. **Uso e cobertura das terras do Estado de Alagoas**. Recife: [s. n.], 2008.
- ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association—LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>.
- ARRUDA, H. L. S.; SANTOS, J. F. O.; ALBUQUERQUE, U. P.; RAMOS, M. A.; Influence of Socioeconomic Factors on the Knowledge and Consumption of Firewood in the Atlantic Forest of Northeast Brazil. **Economic Botany**, v. 73, p. 1–12, 2019.
- BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517–529, fev. 2018. DOI: 10.1002/joc.5225.
- CÂMARA, G.; CORREA, V.; CÂMARA, G.; CORREA, V. Análise espacial de áreas. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. São José dos Campos: INPE, 2004. p. 155–209. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/10.07.15.04/doc/cap5-areas.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- CAVALCANTI, A. C.; RIBEIRO, M. R.; ARAUJO FILHO, J. C. de; SILVA, F. B. R. e. **Avaliação do potencial das terras para irrigação no Nordeste**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. 38 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/135271>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- DRAY, S. A New Perspective about Moran's Coefficient: spatial autocorrelation as a linear regression problem. **Geographical Analysis**, v. 43 n. 2, p. 127–141, 2011. DOI:10.1111/j.1538-4632.2011.00811.x.
- EMBRAPA. **Coping with droughts**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/tema-convivencia-com-a-seca/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 9 out. 2021.
- EMBRAPA TERRITORIAL. **Sistema de Inteligência Territorial Estratégica do Bioma Caatinga**. Campinas, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/bioma-Caatinga>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- FERRARINI, A. S. F.; FERREIRA FILHO, J. B. S.; CUADRA, S. V.; VICTORIA, D. C. Water demand prospects for irrigation in the São Francisco River: Brazilian public policy. **Water Policy**, v. 22, p. 449–467, 2020.
- GARAGORRY, F. L.; FARIAS, A. R. **Caatinga: concentração espacial e dinâmica de produtos agrícolas**. Campinas: Embrapa Territorial, 2021. 182 p. (Embrapa Territorial. Documentos, 139).
- IBGE. **Malha Municipal**. 2020a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=27733&t=downloads>. Acesso em: 12 dez. 2020.
- IBGE. **Monitoramento da cobertura e uso da terra: estatísticas desagregadas por unidades da Federação: 2000/2018**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2021a. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101790>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- IBGE. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil: 2016-2018**. 1. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020b. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101703>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- IBGE. **Tabela 289 - quantidade produzida e valor da produção na extração vegetal, por tipo de produto extrativo**. 2021b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289>. Acesso em: 8 out. 2021.
- IBGE. **Tabela 3939 - efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho**. 2021c. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>. Acesso em: 8 out. 2021.
- IBGE. **Tabela 5457 - área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes**. 2021d. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 8 out. 2021.

IBGE. **Tabela 6579 - população residente estimada**. 2021e. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Acesso em: 8 out. 2021.

JUKNELIENE, D.; KAZANAVICIUTE, V.; VALCIUKIENE, J.; ATKOCEVICIENE, V.; MOZGERIS, G. Spatiotemporal Patterns of Land-Use Changes in Lithuania. **Land**, v. 10, n. 619, p. 1-24, 2021. DOI: 10.3390/land10060619.

LOPES, E. A.; CANTO, J. L. Produtividade e custos de dois sistemas de exploração e transporte de lenha na Caatinga. **Nativa**, v. 6, n. 2, p. 207-212, mar./abr., 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i2.4697>.

MORETTI, M. P. P. **Autocorrelação espacial: um método espacial de análise de variáveis**. 2021. Disponível em: <https://marcospaulomoretti.medium.com/autocorrela%C3%A7%C3%A3o-espacial-382c5af6d2ed>. Acesso em: 13 dez. 2022.

MORO, M. F.; NIC LUGHADHA, E.; FILER, D. L.; ARAÚJO, F. S. de; MARTINS, F. R. A catalogue of the vascular plants of the Caatinga phytogeographical domain: a synthesis of floristic and phytosociological surveys. **Phytotaxa**, v. 160, n. 1, p. 1-9, fev. 2014. DOI: 10.11646/phytotaxa.160.1.1.

PEREIRA, L. M. Uma análise socioespacial sobre os aglomerados subnormais em Goiânia-GO: fronteiras, aplicações e dimensões. **Cadernos do Leste**, v. 16, n. 16, p. 45-65, 2016.

PICOLI, M. C. A.; RORATO, A.; LEITÃO, P.; CAMARA, G.; MACIEL, A.; HOSTERT, P.; SANCHES, I. D. Impacts of public and private sector policies on soybean and pasture expansion in Mato Grosso-Brazil from 2001 to 2017. **Land**, v. 9, n. 20, 2020. DOI 10.3390/land9010020.

PRUDENTE, V. H. R.; DE SOUZA, C. H. W.; MERCANTE, E.; JOHANN, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A. Spatial statistics applied to soybean production data from Paraná state for 2003-04 to 2009-10 crop-years. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 4, p. 755-769, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000400015>. Acesso em: 13 dez. 2022.

RAMOS, F. R. **Análise espacial de estruturas intra-urbanas: o caso de São Paulo**. INPE: São José dos Campos, 2004. 141 p. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marciana/2003/04.14.11.38/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2022.

SANTANA, O. A.; ENCINAS, J. I.; MUÑOZ G. R.; Stacking factor in transporting firewood produced from a mixture of Caatinga biome species in Brazil. **International Journal of Forest Engineering**, v. 34, n. 1, p. 54-63, 2022. DOI: 10.1080/14942119.2022.2084674.

SILVA, R. M. A. da. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semi-árido. **Sociedade e Estado**, v. 18, n. 1-2, p. 361-385, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-69922003000100017>.

SILVA, R. M. A. da. Entre o combate à seca e a convivência com o semiárido: políticas públicas e transição paradigmática. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 38, p. 466-485, 2007.

SILVA, R. M. P.; LIMA, J. R.; MENDONÇA, I. F. C. de. Alteração da cobertura vegetal na Sub-Bacia do Rio Espinharas de 2000 a 2010. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 202-209, 2014. DOI: 10.1590/S1415-43662014000200011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662014000200011&lng=pt&nrm=iso&tIng=en. Acesso em: 13 dez. 2023.

SILVEIRA, H. L. F.; GALVÃO, L. S.; SANCHES, I. D.; SÁ, I. B.; TAURA, T. A.; Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian Semi-arid region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 179-190, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.016>

XUE, D.; YUE, L.; AHMAD, F.; DRAZ, M. U.; CHANDIO, A. A.; AHMAD, M.; AMIN, W. Empirical investigation of urban land use efficiency and influencing factors of the Yellow River basin Chinese cities. **Land Use Policy**, v. 117, 2022. DOI 10.1016/j.landusepol.2022.106117.

Embrapa

Territorial