RGe ISSN: 2177-3246

MUDANÇAS NA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CAATINGA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

CHANGES IN THE SPATIOTEMPORAL DYNAMICS OF LAND USE AND LAND COVER IN THE CAATINGA BIOME OF THE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN

CAMBIOS EN LA DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO EN EL BIOMA CAATINGA DE LA CUENCA DEL RÍO SÃO FRANCISCO

10.56238/revgeov17n6-110

Sonaly da Silva Pedrosa
Graduanda em Agronomia
Instituição: Universidade Estadual Feira de Santana
E-mail: sonalypedrosa25@gmail.com

Rodrigo Nogueira Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: rnv@uefs.br

Jocimara Souza Britto Lobão
Doutora em Geografia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: juci.lobao@uefs.br

Mariana Martins Medeiros de Santana
Doutora em Ecologia
Instituição: Universidade do Estado do Amapá
E-mail: mariana.medeiros@ueap.edu.br

Deorgia Tayane Mendes de Souza
Doutora em Geociências Aplicadas e Geodinâmica
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: dtmsouza@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: wrocha@uefs.br

Carolina Oliveira de Santana
Doutora em Geoquímica
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: cosantana@uefs.br

RGe
ISSN: 2177-3246

Luanna Maia Carneiro
Doutora em Geoquímica do Petróleo e Meio Ambiente
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: lmcarneiro@uefs.br

RESUMO
A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF), parcialmente inserida no bioma Caatinga único bioma exclusivamente brasileiro, constitui um dos sistemas hidrográficos mais estratégicos e ecologicamente sensíveis do semiárido nordestino. Nas últimas quatro décadas, a combinação de desmatamento, expansão agropecuária intensiva, uso desordenado do solo e o histórico negligenciamento das políticas de conservação na Caatinga vêm comprometendo de forma acelerada a integridade da vegetação nativa e a conectividade ecológica da paisagem ao longo da bacia. O presente estudo analisou as mudanças espaço-temporais do uso e cobertura da terra em sete sub-bacias hidrográficas (SF3 a SF9) no período de 1985 a 2023, integrando dados anuais da plataforma MapBiomas (Coleção 9) com métricas de ecologia da paisagem calculadas no software R. As quatro métricas aplicadas número de manchas (NP), percentual de área da paisagem (PLAND), área total da classe (CA) e proporção da maior mancha (LPI) foram calculadas para cada classe de cobertura em cada ano da série, permitindo caracterizar a estrutura e a dinâmica espacial da paisagem ao longo de 39 anos. Os resultados revelaram perda sistemática de vegetação natural e de conectividade ecológica em todas as sub-bacias analisadas, expressa pelo declínio consistente do LPI da vegetação natural, pelo aumento do número de manchas e pela redução do PLAND. Dois padrões distintos de transformação foram identificados: (i) nas sub-bacias SF3, SF4, SF8 e SF9, a agropecuária emergiu como principal vetor de substituição da vegetação nativa, chegando a superar a vegetação natural em LPI nos anos mais recentes configurando uma inversão da hierarquia espacial da paisagem; (ii) nas sub-bacias SF5, SF6 e SF7, a expansão das áreas não vegetadas indicativa de processos ativos de degradação e desertificação foi o principal fator de transformação, com a SF6 registrando o caso mais grave, onde o LPI das áreas não vegetadas superou o da vegetação natural a partir de 2018. Os resultados reforçam a urgência de estratégias integradas de restauração ecológica, governança territorial diferenciada por sub-bacia e fortalecimento das políticas de conservação no bioma Caatinga.

Palavras-chave: Ecologia da Paisagem. Fragmentação Florestal. MapBiomas. Sensoriamento Remoto. Métricas de Paisagem. Caatinga. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

ABSTRACT
The São Francisco River Basin (SFRB), partially located within the Caatinga biome Brazil's only exclusively national biome represents one of the most strategically important and ecologically sensitive hydrographic systems in the Brazilian semiarid region. Over the past four decades, a combination of deforestation, intensive agricultural expansion, unplanned land use, and historically neglected conservation policies has rapidly compromised the integrity of native vegetation cover and the ecological connectivity of the landscape throughout the basin. This study analyzed spatiotemporal changes in land use and land cover (LULC) across seven sub-basins (SF3 to SF9) from 1985 to 2023, integrating annual data from the MapBiomas platform (Collection 9) with landscape ecology metrics calculated in R software. Four metrics were applied number of patches (NP), percentage of landscape area (PLAND), total class area (CA), and largest patch index (LPI) calculated for each cover class in each year of the series, enabling characterization of landscape structure and spatial dynamics over a 39-year period. Results revealed systematic loss of natural vegetation and ecological connectivity across all analyzed sub-basins, expressed by consistent decline in the LPI of natural vegetation, increasing patch numbers, and reducing PLAND values. Two distinct transformation patterns were identified: (i) in sub-basins SF3, SF4, SF8, and SF9, agriculture and livestock emerged as the primary driver of native vegetation replacement, with the agricultural LPI surpassing that of natural vegetation in recent years configuring an inversion of the landscape spatial hierarchy; (ii) in sub-basins SF5, SF6, and SF7, the expansion of unvegetated areas indicative of active degradation and desertification processes was the primary transformation factor, with SF6 presenting the most severe case, where the

LPI of unvegetated areas exceeded that of natural vegetation from 2018 onward. Findings underscore the urgency of integrated ecological restoration strategies, sub-basin-differentiated territorial governance, and strengthened conservation policies for the Caatinga biome.

Keywords: Landscape Ecology. Forest Fragmentation. MapBiomas. Remote Sensing. Landscape Metrics. Caatinga. São Francisco River Basin.

RESUMEN
La Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco (CHRSF), ubicada parcialmente en el bioma Caatinga el único bioma exclusivamente brasileño, constituye uno de los sistemas hidrográficos más estratégicos y ecológicamente sensibles del semiárido noreste de Brasil. A lo largo de las últimas cuatro décadas, la combinación de deforestación, expansión agropecuaria intensiva, uso desordenado del suelo y el histórico abandono de las políticas de conservación en la Caatinga han comprometido aceleradamente la integridad de la vegetación nativa y la conectividad ecológica del paisaje en toda la cuenca. El presente estudio analizó los cambios espacio-temporales en el uso y cobertura del suelo en siete subcuencas hidrográficas (SF3 a SF9) en el período de 1985 a 2023, integrando datos anuales de la plataforma MapBiomas (Colección 9) con métricas de ecología del paisaje calculadas en el software R. Las cuatro métricas aplicadas número de parches (NP), porcentaje de área del paisaje (PLAND), área total de la clase (CA) y proporción del parche más grande (LPI) se calcularon para cada clase de cobertura en cada año de la serie, permitiendo caracterizar la estructura y dinámica espacial del paisaje a lo largo de 39 años. Los resultados revelaron pérdida sistemática de vegetación natural y de conectividad ecológica en todas las subcuencas analizadas. Dos patrones distintos de transformación fueron identificados: (i) en las subcuencas SF3, SF4, SF8 y SF9, la agropecuaria emergió como el principal vector de sustitución de la vegetación nativa; (ii) en las subcuencas SF5, SF6 y SF7, la expansión de áreas no vegetadas indicativa de procesos activos de degradación y desertificación fue el principal factor de transformación. Los resultados refuerzan la urgencia de estrategias integradas de restauración ecológica y gobernanza territorial diferenciada en el bioma Caatinga.

Palabras clave: Ecología del Paisaje. Fragmentación Forestal. MapBiomas. Teledetección. Métricas de Paisaje. Caatinga. Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco.

ISSN: 2177-3246

1 INTRODUÇÃO

A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro, estendendo-se por aproximadamente 862.818 km² e abrangendo cerca de 53,49% da Região Nordeste e 10,1% do território nacional (IBGE, 2019). Do ponto de vista ecológico, o bioma abriga uma das biotas mais ricas e singulares do mundo: mais de 5.000 espécies de plantas vasculares, das quais cerca de 40% são endêmicas; 178 espécies de répteis (45% endêmicas); 241 espécies de peixes de água doce (57% endêmicas); e pelo menos 178 espécies de mamíferos (Leal et al., 2005; Antunes et al., 2022). Essa biodiversidade ímpar contrasta com a percepção social equivocada de que a Caatinga seria um ambiente pobre e homogêneo, percepção que historicamente justificou o baixo investimento público em sua conservação e a intensa exploração de seus recursos naturais (Avancini; Tega, 2013).

Apesar de sua singularidade ecológica e de sua importância socioeconômica para os mais de 27 milhões de habitantes do semiárido, a Caatinga permanece como o bioma brasileiro com menor cobertura proporcional de unidades de conservação menos de 8% de sua área total e um dos mais desprotegidos do ponto de vista das políticas ambientais nacionais (Ibama, 2008). Como resultado, estima-se que entre 30% e 65% do bioma já tenha sofrido algum grau de antropização, resultando em solo exposto, vegetação degradada e perda irreversível de biodiversidade (Leal et al., 2005; Silva et al., 2013). Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, o desmatamento na Caatinga atingiu 3.189,61 km² no ano de 2023, refletindo o avanço contínuo de atividades como a pecuária extensiva, o extrativismo desordenado de lenha e carvão vegetal, a expansão agrícola e a especulação imobiliária (INPE, 2024). Projeções indicam que, sem medidas efetivas de conservação, a Caatinga poderá perder até 40% de sua cobertura vegetal remanescente nas próximas três décadas em decorrência das mudanças climáticas combinadas ao uso insustentável do solo (Schulz et al., 2017).

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) constitui o principal sistema hídrico inserido no bioma Caatinga e o mais importante rio perene do semiárido nordestino. Com extensão aproximada de 640.000 km² e drenagem de oito estados brasileiros Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Goiás, Ceará, Alagoas e Sergipe, a BHRSF abrange cerca de 505 municípios e desempenha função estratégica no abastecimento de água para consumo humano, na irrigação de mais de 340 mil hectares de lavouras, na geração de energia elétrica e na manutenção de ecossistemas aquáticos de alto valor ecológico (Agência Nacional de Águas, 2007; Castro; Pereira, 2019). A porção da BHRSF inserida no bioma Caatinga engloba aproximadamente 55% de sua extensão total, sendo especialmente expressiva nas regiões do Médio e Submédio São Francisco (Agência de Bacia Hidrográfica Peixe Vivo, 2022). Ao longo dessas regiões, a vegetação ripária, as matas ciliares e os remanescentes de Caatinga arbórea desempenham papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico, na contenção de processos erosivos e no abastecimento dos aquíferos que sustentam a vazão base do Rio São Francisco durante os períodos de estiagem.

Nas últimas quatro décadas, a BHRSF vem enfrentando intensas transformações no uso e cobertura da terra, associadas a múltiplos vetores de pressão antrópica. A expansão das monoculturas agrícolas voltadas à exportação sobretudo no Médio São Francisco, onde projetos de irrigação pública e privada transformaram a paisagem semiárida em grandes perímetros agrícolas representa um dos principais motores de supressão da vegetação nativa na bacia (Zellhuber; Siqueira, 2016). A pecuária extensiva, praticada em propriedades sem adequação ao Código Florestal, ocupa vastas extensões das sub-bacias do Submédio e Baixo São Francisco, com impactos diretos sobre a mata ciliar e as áreas de preservação permanente (Pereira Filho; Bakke, 2010). A retirada de lenha nativa para uso energético atividade que responde por 12,6% do desmatamento da Caatinga (Leal et al., 2005) é ainda predominante nas comunidades rurais mais pobres da região, onde o acesso a fontes alternativas de energia é limitado. Somam-se a esses fatores os incêndios recorrentes em áreas de proteção ambiental, frequentemente originados em propriedades rurais vizinhas como prática de manejo de pastagens (Medeiros; Fiedler, 2004), e a expansão urbana desordenada em torno das sedes municipais às margens do Rio São Francisco.

O resultado cumulativo dessas pressões é a perda de aproximadamente 7 milhões de hectares de vegetação nativa na BHRSF nas últimas décadas, com registro de quase 2 mil alertas de desmatamento somente entre 2019 e 2020 na região do Médio São Francisco, totalizando cerca de 99 mil hectares suprimidos nesse curto período (Dias; Nunes; Motta, 2022). A fragmentação progressiva dos remanescentes florestais entendida não apenas como perda de área, mas como subdivisão e isolamento espacial dos fragmentos compromete os serviços ecossistêmicos essenciais à sustentabilidade da bacia: regulação hídrica, ciclagem de nutrientes, controle de erosão, polinização, dispersão de sementes e manutenção da biodiversidade (Fernandes et al., 2022). A perda de vegetação nas áreas de recarga de aquíferos reduz a capacidade de infiltração do solo, aumentando o escoamento superficial e acelerando o assoreamento dos afluentes problema que tem comprometido a navegabilidade e a disponibilidade hídrica do Rio São Francisco em trechos críticos de seu curso (Castro; Pereira, 2019).

As mudanças no uso e cobertura da terra produzem efeitos que vão além da perda quantitativa de vegetação, alterando profundamente a estrutura e a funcionalidade das paisagens. A fragmentação da paisagem processo pelo qual manchas contínuas de habitat são subdivididas em fragmentos menores e progressivamente mais isolados é reconhecida como uma das principais ameaças à biodiversidade em escala global, por reduzir o tamanho efetivo das populações, restringir o fluxo gênico entre comunidades biológicas, ampliar os efeitos de borda e alterar as condições microclimáticas dos ecossistemas (Gardner et al., 1987; Rathcke; Jules, 1993; Nascimento, 2007). No contexto da Caatinga, esses efeitos são potencializados pelo clima semiárido, que torna os ecossistemas mais sensíveis às perturbações e com menor capacidade de resiliência e regeneração natural (Schulz et al., 2017).

Fragmentos de vegetação caatingeira menores que 100 ha apresentam redução drástica na riqueza de espécies arbóreas em relação a fragmentos maiores, e sua capacidade de atuarem como corredores ecológicos depende criticamente da permeabilidade da matriz circundante (Calegari et al., 2010; Silva et al., 2013).

O emprego de técnicas de sensoriamento remoto integrado a métricas de ecologia da paisagem representa uma das abordagens mais eficazes, economicamente viáveis e metodologicamente robustas para o monitoramento sistemático das mudanças na estrutura da paisagem em escala regional (McGarigal; Marks, 1995; Turner II; Lambin; Reenberg, 2007). No Brasil, a plataforma MapBiomas tem revolucionado o acesso a dados de uso e cobertura da terra ao disponibilizar séries temporais anuais de alta resolução (30 m) para todos os biomas, com classificação automatizada por algoritmos de aprendizado de máquina (Random Forest) e validação amostral extensiva (Souza Jr. et al., 2020). A Coleção 9 do MapBiomas, utilizada neste estudo, compreende a série histórica de 1985 a 2023, constituindo uma das bases de dados mais completas e confiáveis disponíveis para análises de longa duração nos biomas brasileiros. As métricas de paisagem, por sua vez, traduzem a estrutura espacial bidimensional das manchas em indicadores quantitativos interpretáveis número de manchas, percentual de área, área total e proporção da maior mancha, permitindo capturar não apenas a quantidade de cobertura vegetal remanescente, mas também sua configuração espacial e conectividade (Gustafson, 1998; Yu et al., 2019; Rempel; Kaukinen; Carr, 2012).

Apesar da reconhecida relevância ecológica e do estado de degradação avançado da Caatinga, estudos sistemáticos e multitemporais sobre a dinâmica da paisagem em escala de bacia hidrográfica ainda são escassos para esse bioma. A maioria dos trabalhos existentes aborda fragmentos isolados, áreas protegidas específicas ou escalas locais de análise (Calegari et al., 2010; Silva et al., 2013; Fernandes et al., 2024), sem contemplar a variabilidade espacial das transformações ao longo de um continuum hidrográfico de relevância regional. Estudos de abrangência maior, como os de Schulz et al. (2017) e Fernandes et al. (2022), utilizaram resoluções espaciais mais grosseiras (MODIS, 500 m) ou se limitaram a subconjuntos da série temporal disponível, não explorando a totalidade dos dados MapBiomas com resolução Landsat (30 m). A análise integrada e comparativa das sete sub-bacias da BHRSF inseridas no bioma Caatinga em uma série temporal de 39 anos representa, portanto, uma contribuição científica inédita e metodologicamente rigorosa para o entendimento da dinâmica da paisagem no bioma.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar as mudanças espaço-temporais do uso e cobertura da terra e da estrutura da paisagem no bioma Caatinga, nas sete sub-bacias hidrográficas da BHRSF (SF3–SF9), no período de 1985 a 2023. Como objetivos específicos, o estudo visa: (i) quantificar as mudanças na área total (CA), no grau de fragmentação (NP), na proporção de área da paisagem (PLAND) e na conectividade (LPI) das classes de cobertura do solo ao

longo da série temporal; (ii) identificar e comparar padrões diferenciados de transformação da paisagem entre as sub-bacias, relacionando-os ao contexto socioeconômico, agroecológico e hidrológico de cada região; (iii) avaliar a trajetória de perda de conectividade ecológica dos remanescentes de vegetação nativa da Caatinga ao longo do eixo longitudinal da BHRSF; e (iv) fornecer subsídios científicos baseados em evidências quantitativas para a formulação de estratégias de conservação, restauração ecológica e uso sustentável do solo na bacia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O BIOMA CAATINGA: BIODIVERSIDADE, AMEAÇAS E PERSPECTIVAS DE CONSERVAÇÃO

A Caatinga apresenta elevada heterogeneidade ambiental, com fitofisionomias que variam desde florestas secas caducifólias densas, com dossel entre 7 e 15 metros, até arbustais espinhosos abertos sobre solos rasos e pedregosos (Antunes et al., 2022). Essa heterogeneidade é condicionada pela combinação de fatores edáficos, topográficos e climáticos, gerando um mosaico de habitats que sustenta a diversidade biológica do bioma. A irregularidade espaço-temporal da precipitação característica central do clima semiárido impõe ciclos de estresse hídrico que selecionaram adaptações fisiológicas e morfológicas únicas, como a deciduidade foliar, a xerofitia, o xilopodismo e a suculência (Leal et al., 2005). Essas características tornam as espécies da Caatinga altamente especializadas e, portanto, especialmente vulneráveis a perturbações que rompam os ciclos naturais de seca e chuva.

A Caatinga é o bioma brasileiro com menor cobertura de unidades de conservação de proteção integral (menos de 2% da área total), o que expõe a maioria de sua biodiversidade à exploração direta e às pressões do uso da terra (Ibama, 2008). Leal et al. (2005) identificaram que a maioria das espécies endêmicas do bioma não está adequadamente protegida pelas unidades de conservação existentes, estando sujeita a um risco elevado de extinção local no médio prazo. A ausência de corredores ecológicos entre as unidades de conservação existentes agrava esse cenário, pois impede o deslocamento de espécies entre áreas protegidas e inviabiliza a troca genética entre populações isoladas. Estudos filogenéticos recentes demonstram que a Caatinga abriga linhagens evolutivas únicas, com alta divergência em relação a biomas vizinhos, reforçando sua importância como repositório de diversidade evolutiva irrecuperável (Antunes et al., 2022).

2.2 A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO: DINÂMICA HIDROLÓGICA E PRESSÕES ANTRÓPICAS

A BHRSF é dividida em quatro regiões hidrográficas Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco, cada uma com características físicas, socioeconômicas e de uso da terra distintas (Agência Nacional de Águas, 2007). O Alto São Francisco, com nascentes na Serra da Canastra (MG),

caracteriza-se por maior pluviosidade e vegetação de cerrado e campos rupestres. O Médio São Francisco, inteiramente inserido no semiárido, abrange vastas áreas de Caatinga e concentra os maiores projetos de irrigação da bacia. O Submédio São Francisco, marcado pelos cânions e pelas Dunas do São Francisco, apresenta as menores precipitações médias e maior vulnerabilidade à desertificação. O Baixo São Francisco, trecho final antes da foz, enfrenta problemas graves de redução de vazão, assoreamento e salinização das águas (Castro; Pereira, 2019).

A BHRSF apresenta um passivo ambiental expressivo, resultado de décadas de uso intensivo e sem planejamento de seus recursos naturais. Os problemas mais graves incluem a redução da mata ciliar estimada em mais de 70% em alguns trechos do Médio São Francisco, o assoreamento progressivo dos afluentes, a contaminação por agrotóxicos e efluentes urbanos, a invasão de espécies exóticas aquáticas e terrestres, e a diminuição da biodiversidade aquática em decorrência das barragens e da pesca excessiva (Castro; Pereira, 2019; Fernandes et al., 2022). A perda de vegetação nas encostas e nas áreas de recarga compromete a regulação hídrica da bacia, favorecendo a erosão laminar e o aporte de sedimentos aos cursos d'água, o que tem reduzido a capacidade dos reservatórios e comprometido a qualidade da água para abastecimento (Agência Nacional de Águas, 2007).

2.3 MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA: PADRÕES E CONSEQUÊNCIAS

A ciência das mudanças da terra (land change science) emergiu como campo interdisciplinar central para compreender as interações entre sistemas humanos e processos ecológicos em escala regional e global (Turner II; Lambin; Reenberg, 2007). No Brasil, dados do MapBiomas demonstram que entre 1985 e 2020 o país perdeu aproximadamente 71 milhões de hectares de vegetação natural, enquanto as pastagens cresceram 46% e a agricultura, 172% (Souza Jr. et al., 2020). No bioma Caatinga especificamente, a análise multitemporal de longa duração revela que a conversão da vegetação nativa para usos antrópicos tem acelerado nas últimas duas décadas, coincidindo com a expansão da fronteira agrícola para o semiárido e com o enfraquecimento dos mecanismos de fiscalização ambiental (Schulz et al., 2017; Fernandes et al., 2024).

As consequências das mudanças no uso da terra para os ecossistemas da Caatinga são multidimensionais. No plano da biodiversidade, a conversão de vegetação nativa em pastagens e lavouras elimina habitats de espécies endêmicas e restringe a ocorrência de espécies com baixa tolerância a perturbações. No plano hidrológico, a substituição da vegetação por superfícies impermeáveis ou com baixa cobertura vegetal reduz a infiltração, aumenta o escoamento superficial e agrava a erosão hídrica. No plano edáfico, o pisoteio do gado, o uso intensivo de maquinário agrícola e a ausência de cobertura vegetal promovem a compactação e a perda de matéria orgânica do solo, acelerando os processos de desertificação nas regiões mais áridas (Leal et al., 2005; Francisco et al., 2012). No plano climático local, a substituição da vegetação nativa por superfícies com maior albedo

pode modificar os padrões de temperatura e umidade em escala local e regional, criando feedbacks positivos que agravam a aridez já característica do semiárido (Schulz et al., 2017).

2.4 ECOLOGIA DA PAISAGEM: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES AO MONITORAMENTO AMBIENTAL

A ecologia da paisagem é o campo científico que estuda as relações entre os padrões espaciais da paisagem e os processos ecológicos que nela ocorrem, em diferentes escalas espaço-temporais (McGarigal; Marks, 1995). O modelo conceitual mancha-corredor-matriz, proposto por Forman e Godron (1986, apud Filho, 1998), fornece a estrutura básica para a interpretação da paisagem: manchas são unidades espaciais discretas e interiormente homogêneas; corredores são estruturas lineares que conectam manchas e facilitam o movimento de organismos; e a matriz corresponde ao elemento dominante da paisagem que condiciona o funcionamento do mosaico como um todo. A qualidade ecológica da paisagem depende, portanto, não apenas da quantidade de habitat remanescente, mas também de sua configuração espacial tamanho, forma, conectividade e posição relativa dos fragmentos.

As métricas de paisagem são índices matemáticos derivados da análise cartográfica que permitem quantificar diferentes aspectos da estrutura espacial da paisagem (Gustafson, 1998). O número de manchas (NP) é uma medida direta do grau de subdivisão e fragmentação: quanto maior o NP, mais subdividida está a classe em fragmentos isolados. O percentual de área da paisagem (PLAND) expressa a dominância relativa de cada classe no mosaico, sendo um indicador sensível a ganhos e perdas de cobertura. A área total da classe (CA) mensura a extensão física de cada classe em termos absolutos. A proporção da maior mancha (LPI) é o indicador mais informativo do ponto de vista ecológico, pois reflete o grau de dominância do maior fragmento de cada classe: quando o LPI cai, os fragmentos maiores foram subdivididos e a classe passa a existir como um conjunto de pequenas manchas isoladas (Rempel; Kaukinen; Carr, 2012). Pesquisas demonstraram que o LPI abaixo de 10-15% para a classe de vegetação nativa é um limiar crítico associado a perdas significativas de biodiversidade e ruptura dos fluxos ecológicos em paisagens tropicais (Gardner et al., 1987).

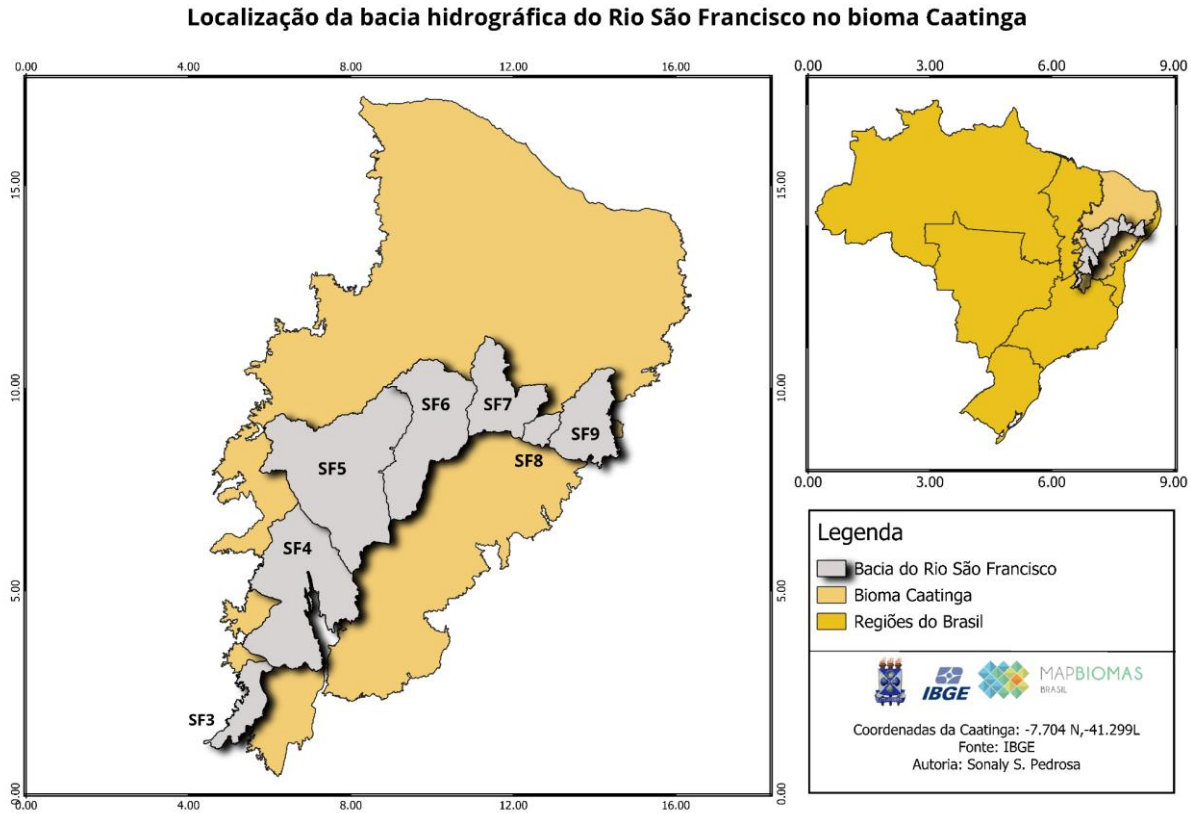
A aplicação integrada de dados de sensoriamento remoto de alta resolução temporal com métricas de paisagem calculadas em ambiente SIG ou R tem sido amplamente utilizada para o monitoramento de biomas brasileiros, incluindo Amazônia (Pereira et al., 2001), Cerrado (Landau et al., 2020), Mata Atlântica (Calegari et al., 2010) e, em menor escala, Caatinga (Silva et al., 2013; Fernandes et al., 2022). A plataforma MapBiomas representa um avanço metodológico fundamental para esses estudos, ao disponibilizar séries temporais anuais padronizadas e validadas para todo o território brasileiro, permitindo análises de longa duração que antes exigiam investimentos computacionais e de tempo proibitivos (Souza Jr. et al., 2020).

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o trecho da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF) inserido no bioma Caatinga, abrangendo sete sub-bacias hidrográficas denominadas SF3, SF4, SF5, SF6, SF7, SF8 e SF9, conforme a delimitação hidrográfica da Agência Nacional de Águas (ANA). As sub-bacias se estendem desde o Médio São Francisco trecho que contempla os municípios de Pirapora (MG) a Remanso (BA) até o Baixo São Francisco, na região de foz do rio nos estados de Alagoas e Sergipe. O clima predominante na área é o semiárido, com temperaturas médias anuais entre 25 °C e 30 °C, precipitação baixa e irregular (400 a 1.200 mm anuais), elevadas taxas de evapotranspiração potencial (acima de 2.000 mm anuais na maioria da área) e alta incidência solar ao longo de todo o ano (Antunes et al., 2022). A Figura 1 apresenta o mapa de localização das sub-bacias analisadas.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (SF3–SF9) inseridas no bioma Caatinga, Brasil.



Fonte: IBGE (2010); ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico).

3.2 BASE DE DADOS

Foram utilizadas bases de dados vetoriais georreferenciadas do Ministério do Meio Ambiente (MMA) para os limites dos biomas brasileiros; da Agência Nacional de Águas (ANA) para a delimitação das bacias hidrográficas; e do IBGE (2010) para os limites político-administrativos. Os dados de uso e cobertura da terra foram obtidos da plataforma MapBiomas Coleção 9 (2024), que

disponibiliza mapas anuais produzidos a partir de imagens multitemporais do satélite Landsat, com resolução espacial de 30 metros e cobertura integral do território brasileiro. O modelo de classificação emprega o algoritmo Random Forest aplicado a composições de índices de vegetação, umidade e superfície, com validação por amostras de referência coletadas por intérpretes especialistas (Souza Jr. et al., 2020). Os polígonos de uso e cobertura foram recortados por sub-bacia no software QGIS 3.32.3 e as classes originais do MapBiomas foram reagrupadas em cinco categorias: (i) Vegetação Natural; (ii) Agropecuária; (iii) Áreas Não Vegetadas; (iv) Áreas Urbanizadas; e (v) Corpos d'Água.

3.3 MÉTRICAS DE ECOLOGIA DA PAISAGEM

As métricas de paisagem foram calculadas para cada sub-bacia e cada ano da série temporal (1985–2023) por meio de script desenvolvido em R (R Core Team), utilizando as imagens raster reclassificadas de uso e cobertura da terra. Para cada combinação sub-bacia/ano/classe foram obtidos os valores de NP, PLAND, CA e LPI. O Quadro 1 sintetiza as métricas utilizadas, sua definição e o indicador ecológico associado.

Quadro 1. Métricas de ecologia da paisagem utilizadas na análise do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco Bioma Caatinga.

Métrica	Sigla	Definição	Indicador ecológico
Número de Manchas	NP	Contagem total de fragmentos contíguos de cada classe em cada sub-bacia	Grau de subdivisão e fragmentação valores crescentes indicam maior fragmentação
Percentual de Área da Paisagem	PLAND (%)	Proporção (%) de cada classe em relação à área total da sub-bacia	Dominância relativa tendência revela expansão ou contração da classe no mosaico
Área Total da Classe	CA (ha)	Soma das áreas de todos os fragmentos de cada classe	Ganhos ou perdas absolutas de cobertura ao longo do tempo
Proporção da Maior Mancha	LPI (%)	Percentual que o maior fragmento da classe representa em relação à área total da sub-bacia	Conectividade e hierarquia espacial declínio indica fragmentação do fragmento principal

Fonte: McGarigal; Marks (1995); Rempel; Kaukinen; Carr (2012).

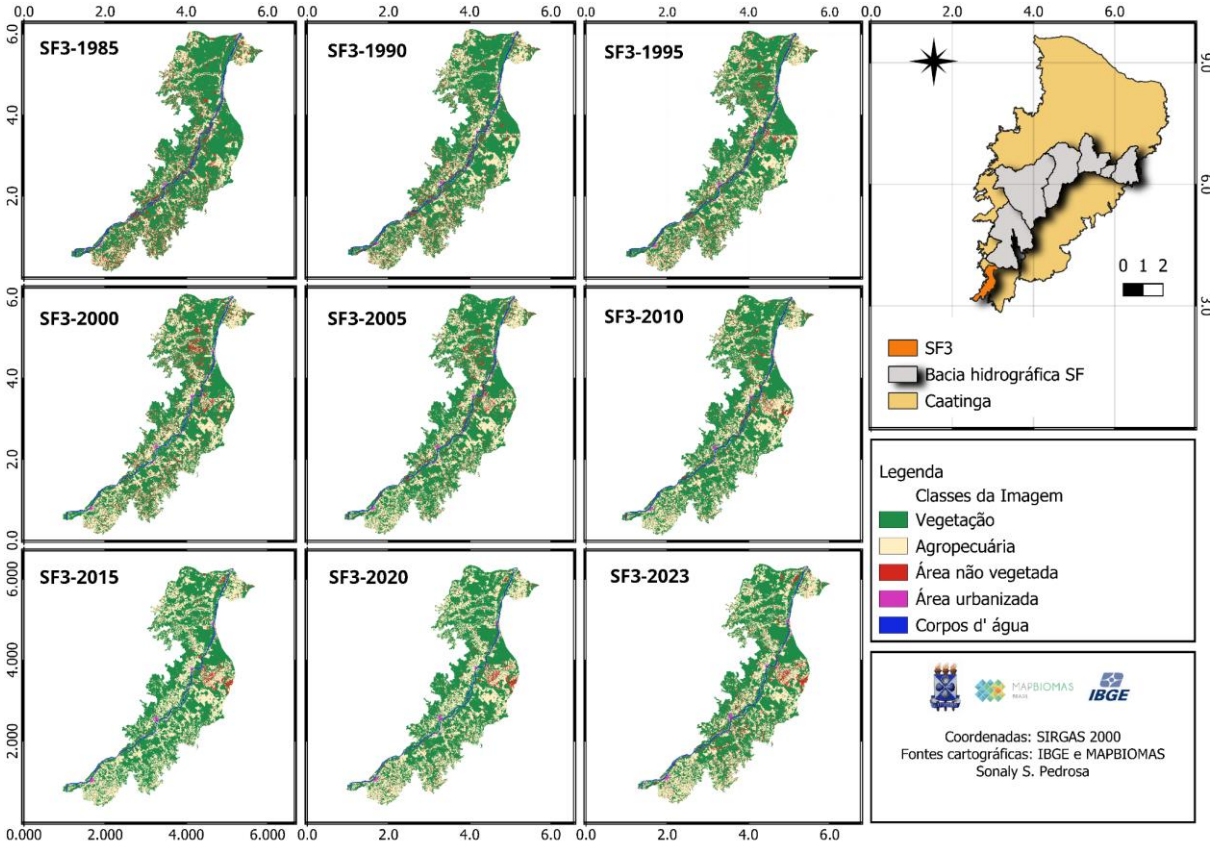
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SUB-BACIAS SF3 E SF4 MÉDIO SÃO FRANCISCO

A análise integrada das séries temporais de mapas de uso e cobertura da terra com as métricas de paisagem permitiu identificar padrões distintos e ecologicamente significativos de transformação da paisagem ao longo do eixo hidrográfico do São Francisco no bioma Caatinga. Os resultados são apresentados por grupo de sub-bacias, articulando os padrões visuais observados nas séries de mapas temporais (Figuras 2, 5, 7, 9, 11, 13 e 15) com os dados quantitativos das métricas de paisagem (Figuras 3, 4, 6, 8, 10, 12 e 14), em diálogo com a literatura científica pertinente.

As sub-bacias SF3 e SF4, localizadas no Médio São Francisco (Pirapora-MG a Remanso-BA), apresentam padrões convergentes de transformação da paisagem, com a agropecuária como principal vetor de substituição da vegetação nativa. Na série temporal da SF3 (Figura 2), observa-se a progressiva retração das manchas de vegetação natural entre 1985 e 2023, acompanhada pela expansão das áreas agropecuárias e pela consolidação de pontos de áreas não vegetadas, especialmente visível na porção nordeste da sub-bacia a partir de 2010.

Figura 2. Série temporal (a cada cinco anos) das mudanças de uso e cobertura do solo na sub-bacia SF3 Bioma Caatinga, Rio São Francisco.

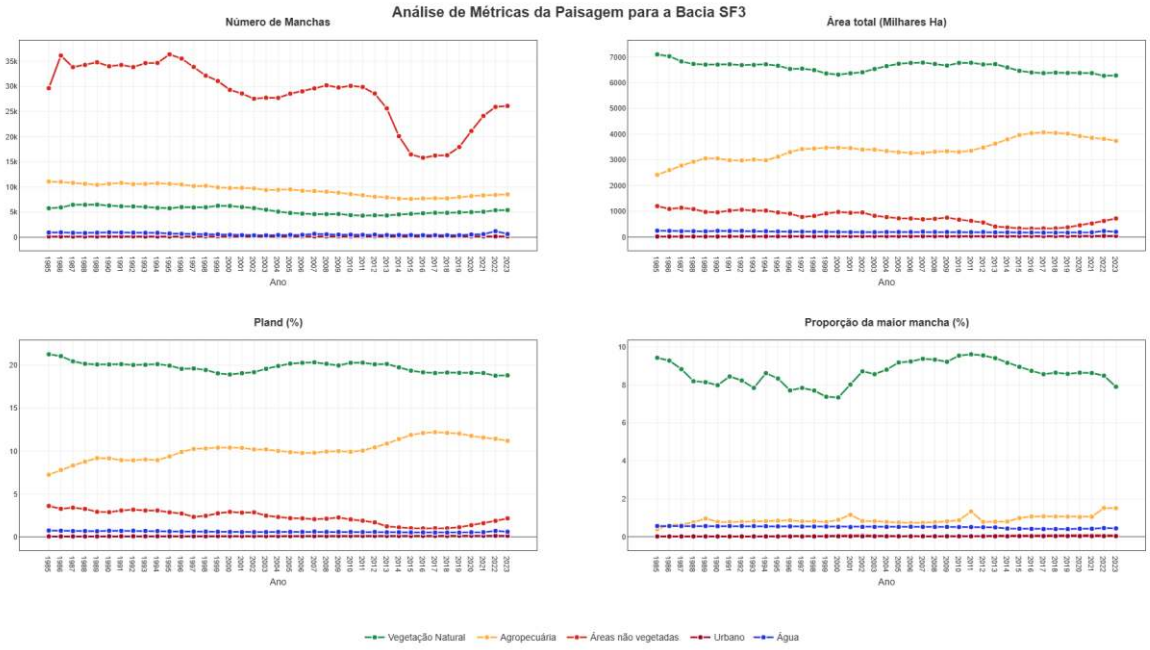


Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (Coleção 9, 2024).

As métricas da SF3 (Figura 3) revelam que a classe de áreas não vegetadas manteve o maior número de manchas ao longo de toda a série com pico entre 1986 e 1995, indicando intensa subdivisão do solo exposto em pequenos fragmentos dispersos pela paisagem. Após 1996, o NP dessa classe reduz-se progressivamente, com queda mais pronunciada após 2012 e nova elevação após 2019. Essa dinâmica é interpretada como um ciclo de abertura, possível incorporação ao uso agropecuário e nova abertura de áreas: o declínio do NP de áreas não vegetadas entre 1996 e 2012 é temporalmente coincidente com o crescimento do PLAND agropecuário, sugerindo conversão de áreas degradadas em uso produtivo padrão documentado por Landau et al. (2020) como característico da dinâmica de expansão agropecuária no semiárido brasileiro.

O PLAND da vegetação natural na SF3 variou entre 18% e 22% ao longo da série mantendo-se como a classe de maior extensão territorial, porém com tendência consistente de declínio após 2005. Mais revelador do que o PLAND é o comportamento do LPI: enquanto o PLAND cai moderadamente, o LPI da vegetação natural sofre redução mais expressiva, indicando que a perda de área está concentrada nos fragmentos maiores que estão sendo subdivididos e não nos pequenos fragmentos periféricos. Esse padrão de fragmentação "centrípeta", em que os maiores remanescentes são progressivamente erodidos pelas bordas, é ecologicamente mais grave do que a perda equivalente em pequenos fragmentos, pois destrói as áreas de interior (core areas) que sustentam as espécies mais sensíveis à perturbação (Gardner et al., 1987). O LPI agropecuário, por sua vez, cresce de forma consistente reflexo da fusão de fragmentos de pastagem e lavoura em manchas cada vez maiores, processo associado à mecanização e ao aumento de escala das propriedades rurais do Médio São Francisco (Zellhuber; Siqueira, 2016).

Figura 3. Gráficos das métricas de ecologia da paisagem para a sub-bacia SF3 Bioma Caatinga, Rio São Francisco. NP: número de manchas; PLAND: percentual de área; CA: área total (ha); LPI: proporção da maior mancha (%).



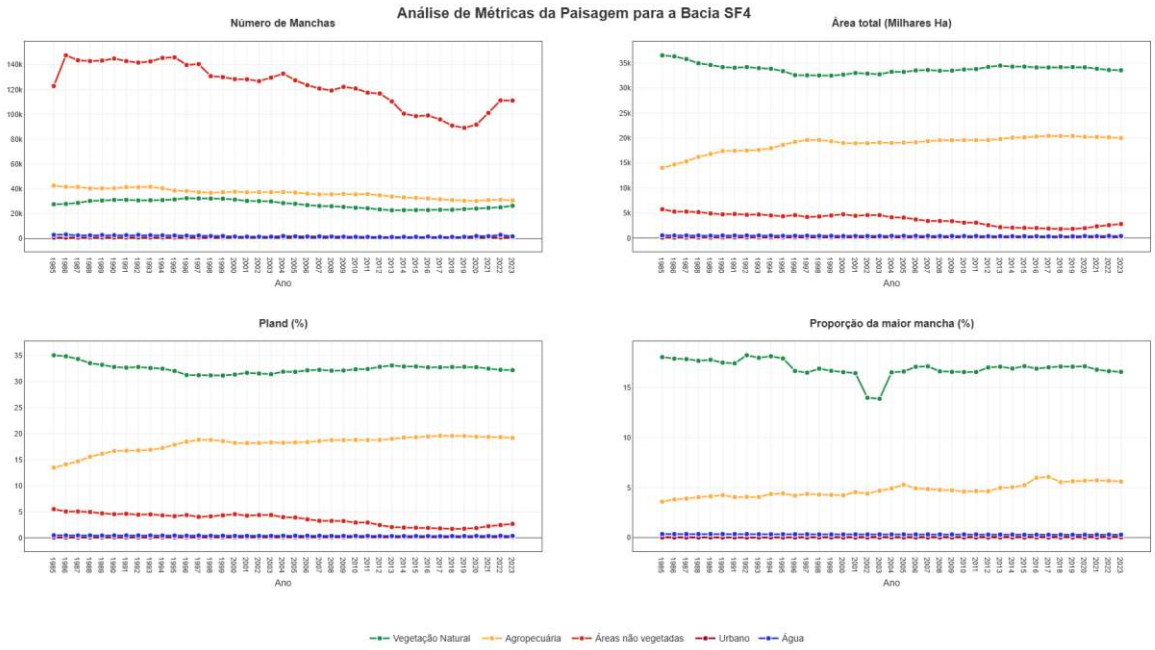
Fonte: Elaborado pelos autores.

A sub-bacia SF4 apresenta padrão semelhante ao da SF3, porém com maior intensidade de transformação e fragmentação. O NP das áreas não vegetadas oscila entre 90 mil e 120 mil, valores sistematicamente superiores aos da SF3, indicando maior grau de subdivisão e dispersão das áreas abertas nessa sub-bacia. A vegetação natural mantém o maior PLAND (30%–35%), mas com declínio acelerado a partir de 2010 e LPI em queda consistente o que, em conjunto com a manutenção do NP relativamente estável (~40 mil manchas), sugere que os grandes fragmentos estão sendo erodidos sem redução proporcional no número de manchas, o que implica perda de área dos fragmentos maiores e

ISSN: 2177-3246

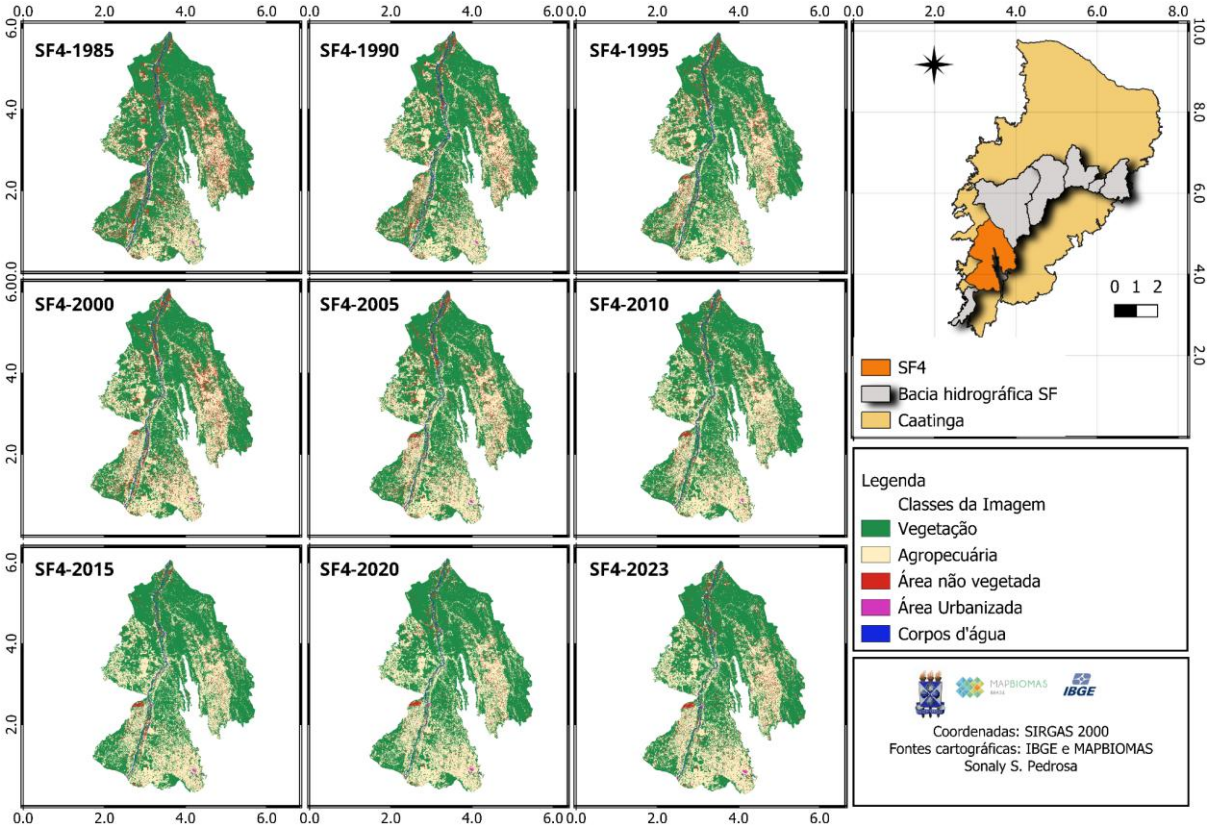
consolidação de fragmentos menores. A agropecuária na SF4 registrou crescimento do PLAND de 13% para ~18% entre 1985 e 2020 e crescimento expressivo do LPI (Figura 4) consistente com a expansão e consolidação de grandes projetos agrícolas irrigados no Médio São Francisco identificados por Fernandes et al. (2022).

Figura 4. Gráficos das métricas de ecologia da paisagem para a sub-bacia SF4 Bioma Caatinga, Rio São Francisco. NP: número de manchas; PLAND: percentual de área; CA: área total (ha); LPI: proporção da maior mancha (%).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5. Série temporal (a cada cinco anos) das mudanças de uso e cobertura do solo na sub-bacia SF4 Bioma Caatinga, Rio São Francisco.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (Coleção 9, 2024).

Os padrões observados nas sub-bacias SF3 e SF4 são coerentes com os dados de desmatamento registrados entre 2019 e 2020, quase 2 mil alertas de desmatamento foram registrados na região do Médio São Francisco, totalizando cerca de 99 mil hectares suprimidos (Dias; Nunes; Motta, 2022). Esses valores são consistentes com a aceleração observada nas métricas após 2019, especialmente no NP das áreas não vegetadas e na queda do LPI da vegetação natural. Em escala nacional, Souza Jr. et al. (2020) documentaram que entre 1985 e 2020 as áreas de pastagem cresceram 46% e as agrícolas, 172%, com perda de 71 milhões de hectares de vegetação natural um contexto macrorregional que se manifesta localmente nos padrões identificados nas SF3 e SF4.

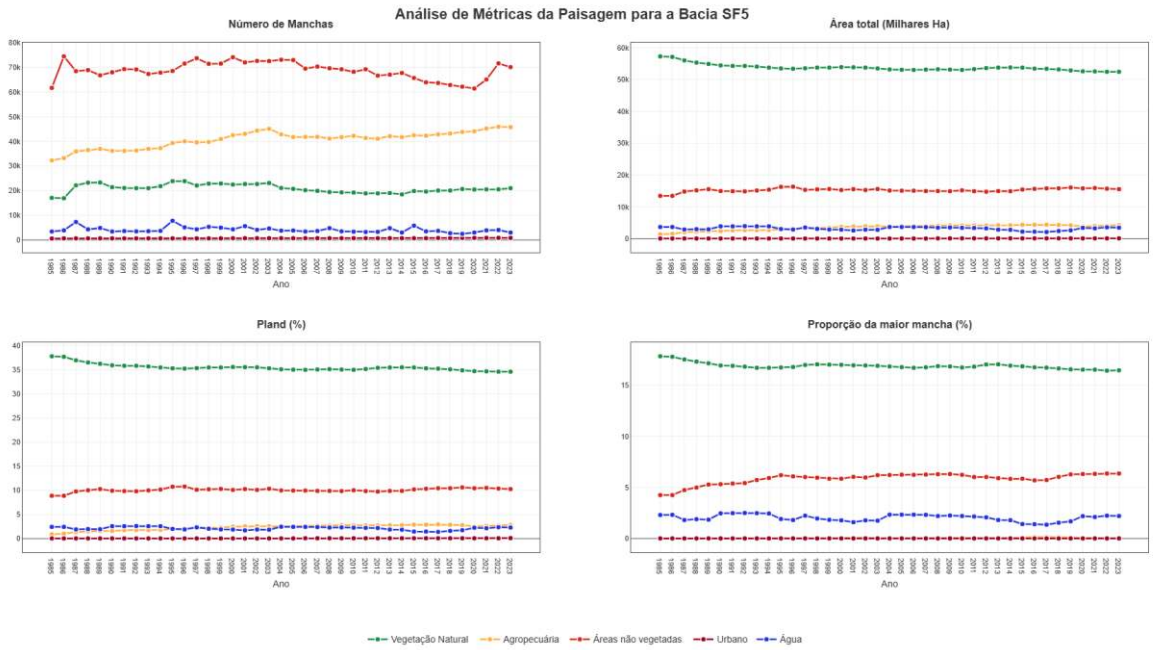
4.2 SUB-BACIAS SF5 E SF6 MÉDIO SÃO FRANCISCO

As sub-bacias SF5 e SF6 apresentam um padrão de transformação da paisagem distinto do observado nas SF3 e SF4, com as áreas não vegetadas e não a agropecuária como principal classe substituta da vegetação nativa. Esse padrão é indicativo de processos ativos de degradação e desertificação, possivelmente associados à menor pluviosidade, à maior vulnerabilidade pedológica dos solos e ao uso menos organizado do solo por pequenos produtores (Schulz et al., 2017).

Na SF5 (Figuras 6 e 7), a vegetação natural permanece como a classe de maior cobertura territorial ao longo de toda a série, com PLAND entre 40% e 45%. No entanto, o NP das áreas não

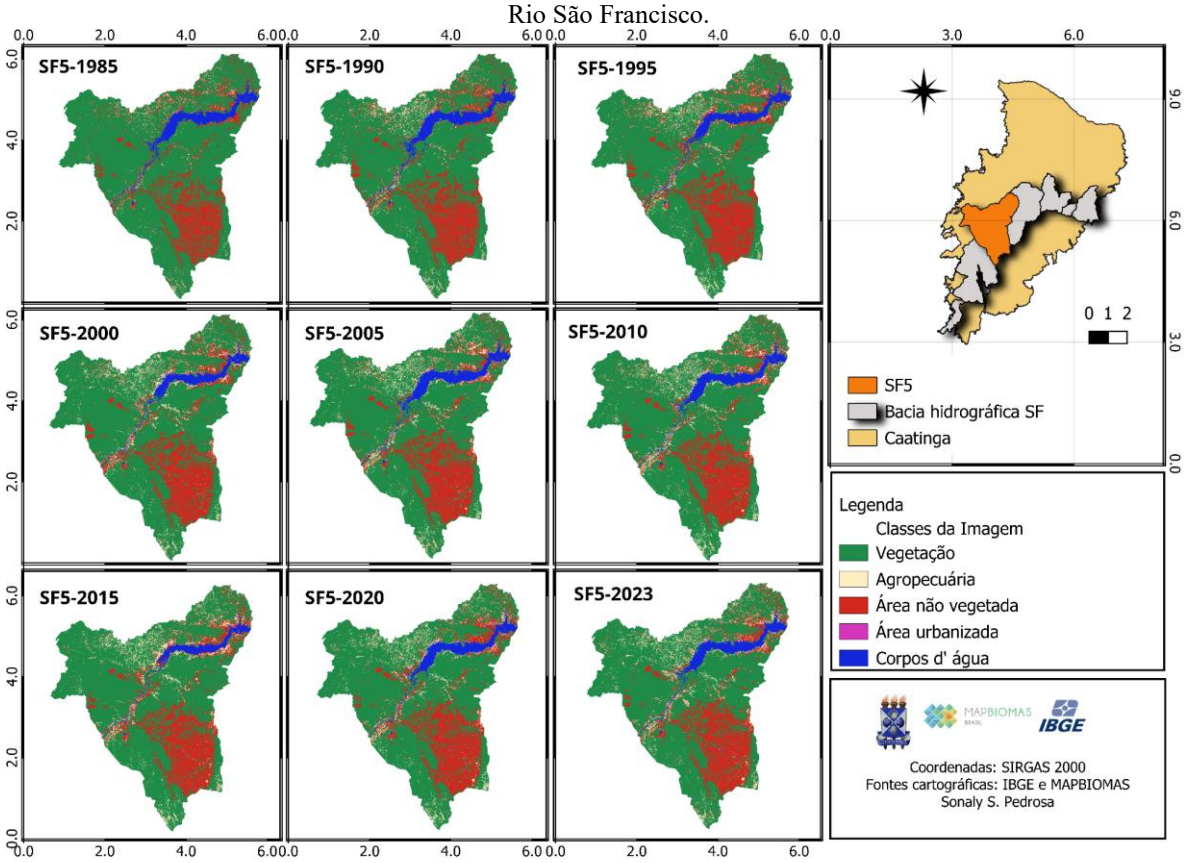
vegetadas manteve-se sistematicamente alto (65 mil–75 mil manchas) e sem tendência clara de redução, evidenciando a persistência e recorrência dos processos de supressão vegetal e abertura de solo ao longo de toda a série temporal. A ausência de tendência clara de redução no NP ao contrário da redução observada na SF3 após 1996 sugere que na SF5 não há incorporação sistemática das áreas abertas ao uso agropecuário, mas sim um processo crônico de supressão-regeneração-supressão típico de áreas submetidas a uso extensivo com períodos de pousio (Fernandes et al., 2024). O LPI da vegetação natural na SF5, embora ainda seja o mais alto entre todas as classes, apresenta declínio consistente a partir de 2000, indicando erosão dos fragmentos maiores possivelmente em virtude da expansão da agricultura irrigada às margens dos corpos d'água (Schulz et al., 2017).

Figura 6. Gráficos das métricas de ecologia da paisagem para a sub-bacia SF5 Bioma Caatinga, Rio São Francisco. NP: número de manchas; PLAND: percentual de área; CA: área total (ha); LPI: proporção da maior mancha (%).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7. Série temporal (a cada cinco anos) das mudanças de uso e cobertura do solo na sub-bacia SF5 Bioma Caatinga, Rio São Francisco.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (Coleção 9, 2024).

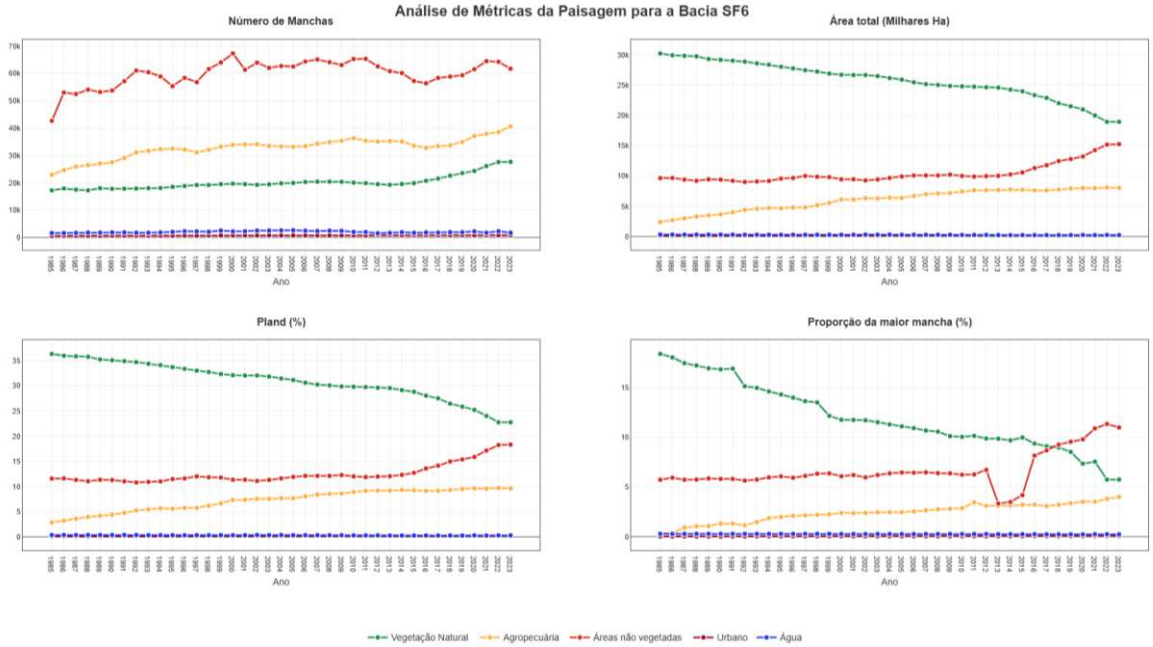
A sub-bacia SF6 registra as mudanças mais expressivas e ecologicamente preocupantes entre as sub-bacias do Médio São Francisco. A série temporal (Figura 9) evidencia uma transformação drástica da paisagem: em 1985, a vegetação natural dominava visualmente o mosaico; em 2023, os remanescentes florestais aparecem como ilhas isoladas em uma matriz de áreas não vegetadas e agropecuárias. As métricas (Figura 8) quantificam essa transformação com precisão: a vegetação natural reduziu de ~30 mil ha em 1985 para ~18 mil ha em 2023 perda absoluta de ~40% da área original em 38 anos, com PLAND caindo de 36% para 23% e LPI desabando de 18% para apenas 6%.

O comportamento do LPI na SF6 é particularmente informativo: a queda de 18% para 6% indica que o fragmento florestal dominante foi subdividido e erodido ao ponto de representar apenas 6% da área total da sub-bacia em 2023. Esse nível de LPI para a vegetação natural está abaixo do limiar crítico de ~10-15% frequentemente associado na literatura a perda acelerada de biodiversidade e colapso de processos ecológicos como polinização, predação de sementes e dispersão de frutos (Gardner et al., 1987; Rathcke; Jules, 1993). Mais grave ainda é a inversão da hierarquia espacial observada a partir de 2018: o LPI das áreas não vegetadas ultrapassou o LPI da vegetação natural, significando que o fragmento mais contínuo e conectado da sub-bacia passou a ser a área degradada uma configuração em que a vegetação remanescente existe como ilhas em uma matriz hostil, com severas implicações para a fauna que depende de conectividade entre habitats (Nascimento, 2007).

ISSN: 2177-3246

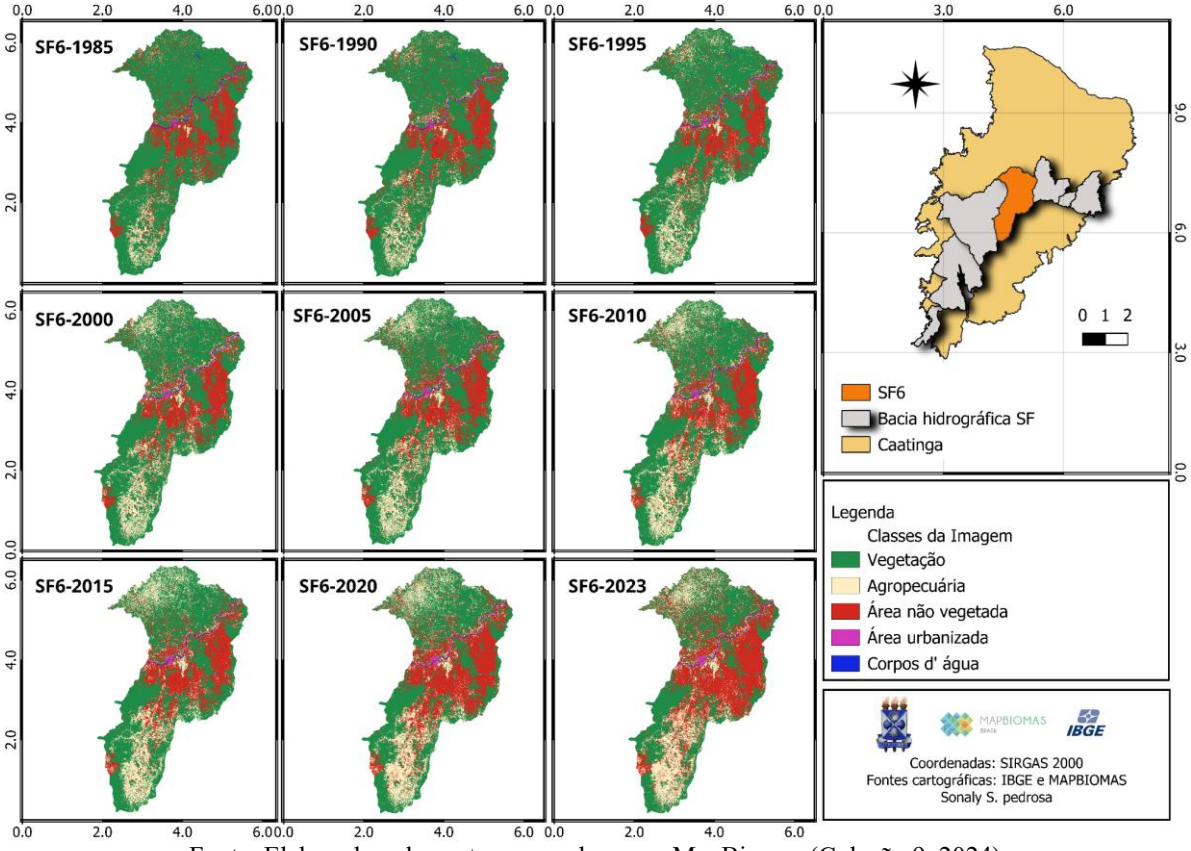
Essa inversão é análoga ao conceito de "transição da paisagem" (landscape transition) descrito por Gardner et al. (1987), em que mudanças acima de determinado limiar reorganizam os fluxos ecológicos de forma potencialmente irreversível.

Figura 8. Gráficos das métricas de ecologia da paisagem para a sub-bacia SF6 Bioma Caatinga, Rio São Francisco. NP: número de manchas; PLAND: percentual de área; CA: área total (ha); LPI: proporção da maior mancha (%).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9. Série temporal (a cada cinco anos) das mudanças de uso e cobertura do solo na sub-bacia SF6 Bioma Caatinga, Rio São Francisco.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (Coleção 9, 2024).

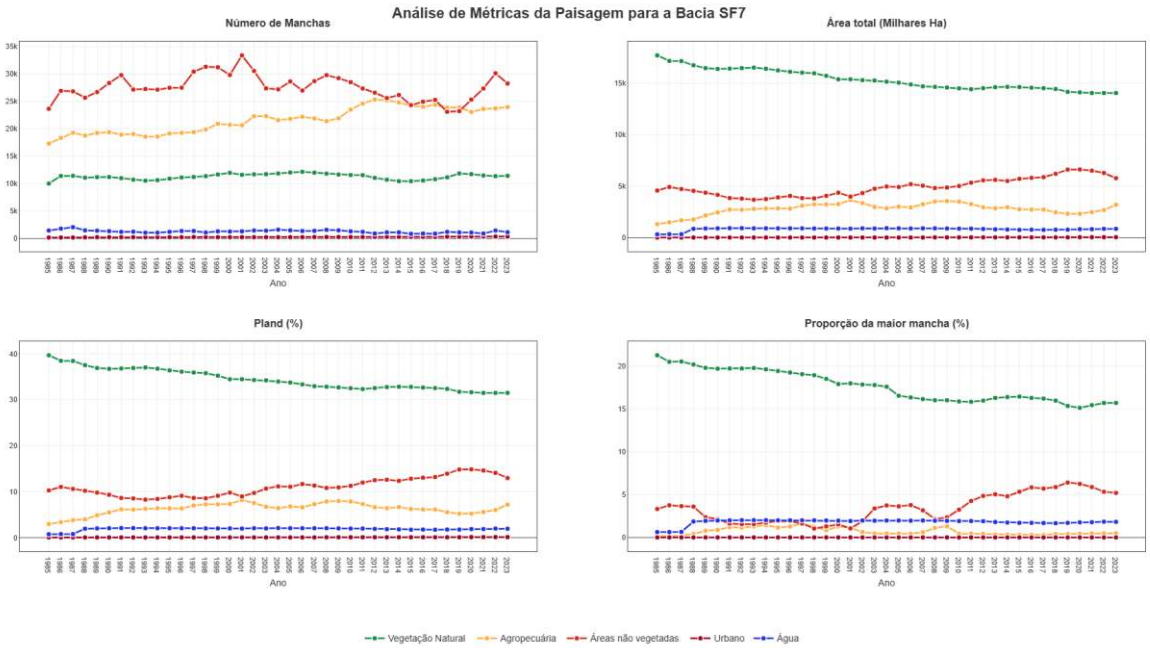
As áreas não vegetadas da SF6 cresceram de ~9 mil ha em 1985 para mais de 15 mil ha em 2023 (+67%), com crescimento simultâneo do NP e do LPI. O aumento do LPI das áreas não vegetadas que supera a vegetação natural a partir de 2018 indica que as áreas degradadas estão se conectando espacialmente, formando uma matriz contínua que isola os remanescentes florestais. Esse processo de "consolidação da degradação" é descrito por Schulz et al. (2017) como resultado da interação entre a expansão agrícola, o pastoreio excessivo e os processos de desertificação no domínio fitogeográfico da Caatinga. Calegari et al. (2010) e Silva et al. (2013) alertam que, nessas condições, mesmo fragmentos pequenos (<10 ha) podem ser ecologicamente valiosos como trampolins (stepping stones) para o movimento de fauna entre remanescentes maiores, razão pela qual a preservação de qualquer vegetação remanescente, mesmo em fragmentos pequenos, é prioritária na SF6.

4.3 SUB-BACIAS SF7, SF8 E SF9 SUBMÉDIO E BAIXO SÃO FRANCISCO

As sub-bacias SF7, SF8 e SF9 compreendem as porções do Submédio e Baixo São Francisco inseridas no bioma Caatinga. Historicamente, essas regiões concentram as mais intensas pressões antrópicas do semiárido nordestino, combinando pecuária extensiva, agricultura de sequeiro, extração de lenha e ocupação urbana desordenada, em condições climáticas de extrema aridez que limitam a capacidade de regeneração natural da vegetação (Leal et al., 2005; Pereira Filho; Bakke, 2010). As três sub-bacias apresentam um gradiente de antropização crescente de SF7 para SF9, com a SF9 exibindo o mais grave cenário de degradação entre todas as sub-bacias analisadas.

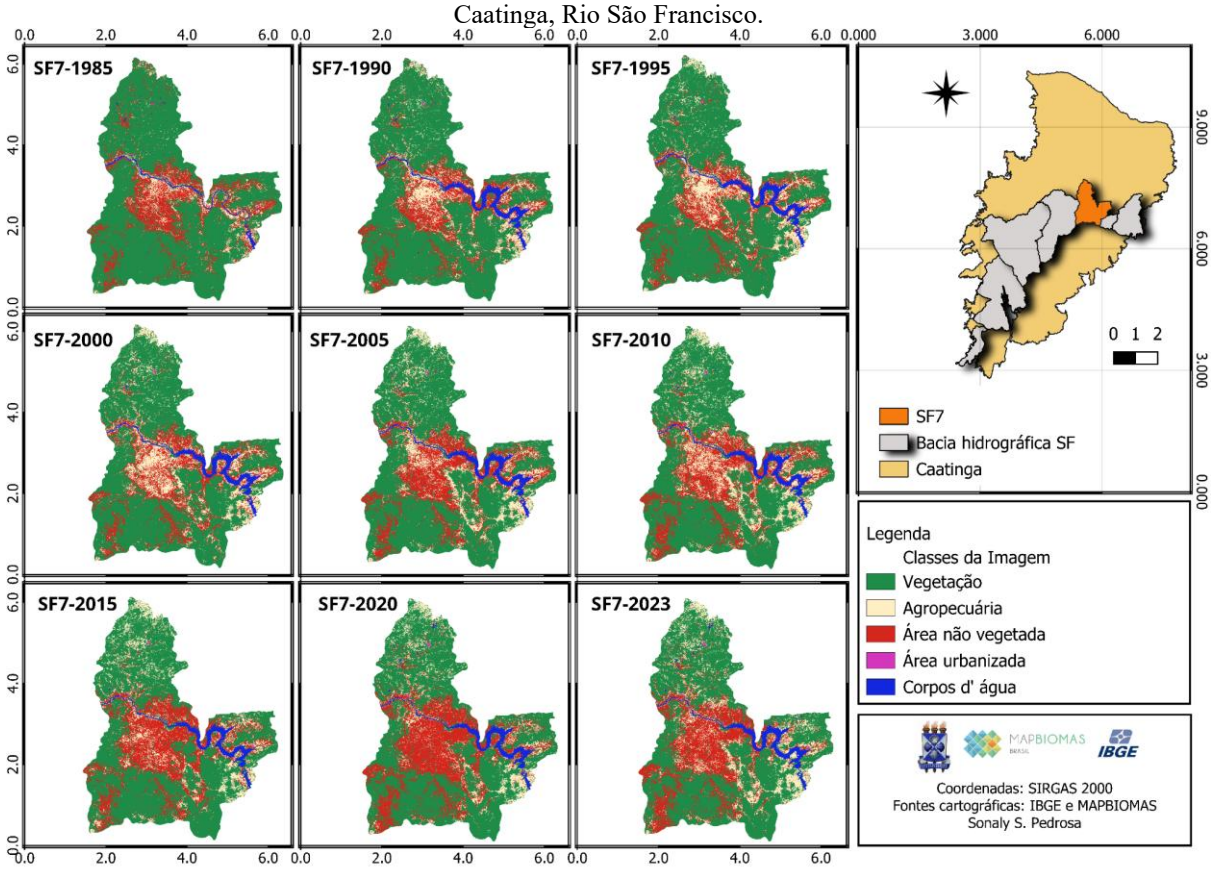
A sub-bacia SF7 ainda apresenta a vegetação natural como a classe de maior extensão territorial no início da série (1985), com PLAND próximo de 40% (Figuras 10 e 11). No entanto, ao longo de 38 anos, essa cobertura recua para cerca de 30% em 2023 perda relativa de 25% do PLAND original. Mais do que a perda de área, é a queda do LPI da vegetação natural que revela a gravidade ecológica do processo: o declínio consistente do LPI indica que os fragmentos maiores estão sendo progressivamente erodidos e subdivididos, comprometendo a existência de áreas de interior (core areas) capazes de sustentar espécies com maiores requerimentos de habitat. As áreas não vegetadas da SF7 apresentam número elevado e crescente de manchas ao longo de toda a série, com aumento do PLAND evidência de que o processo de degradação e abertura de solo é disseminado e persistente na sub-bacia, não se limitando a pontos isolados.

Figura 10. Gráficos das métricas de ecologia da paisagem para a sub-bacia SF7 Bioma Caatinga, Rio São Francisco. NP: número de manchas; PLAND: percentual de área; CA: área total (ha); LPI: proporção da maior mancha (%).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 11. Série temporal (a cada cinco anos) das mudanças de uso e cobertura do solo na sub-bacia SF7 Bioma Caatinga, Rio São Francisco.



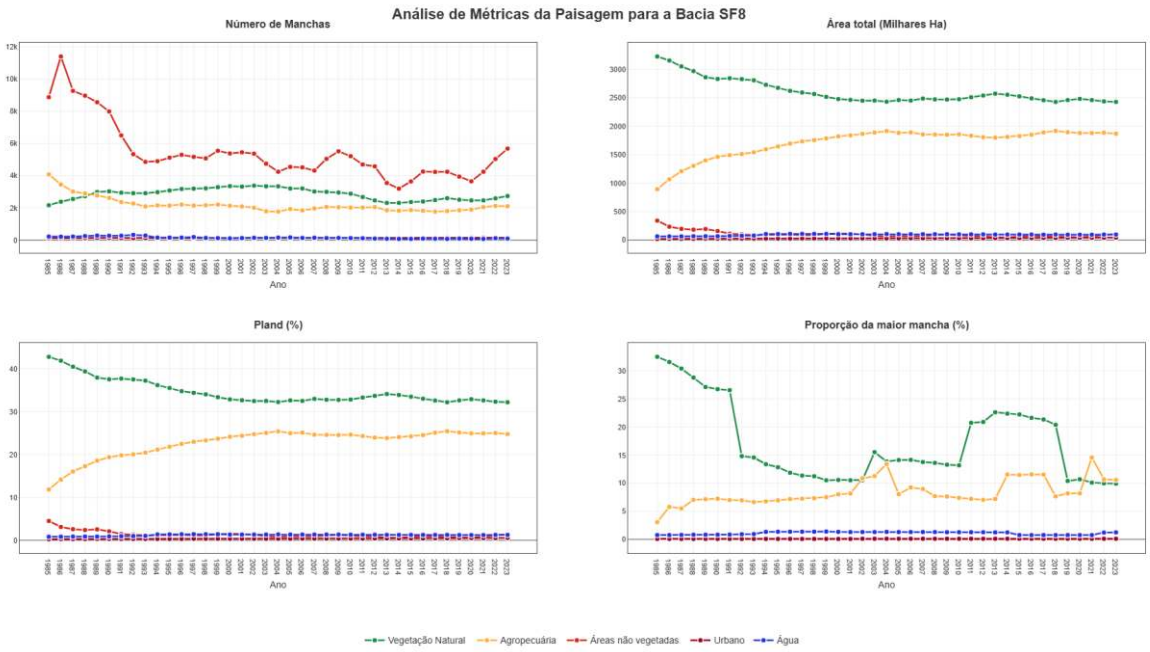
Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (Coleção 9, 2024).

A sub-bacia SF8 apresenta o padrão mais evidente de conversão intensa da vegetação nativa para uso agropecuário entre as três sub-bacias do Submédio-Baixo São Francisco. A série temporal

(Figura 13) evidencia o avanço progressivo e sistemático das áreas agropecuárias sobre os remanescentes de Caatinga, especialmente nas décadas de 1990 e 2000. As métricas (Figura 12) revelam que o PLAND agropecuário cresceu de 12% em 1985 para ~25% em 2023 o dobro da cobertura original em menos de quatro décadas, enquanto o LPI dessa classe passou a superar o LPI da vegetação natural nos anos de 2021, 2022 e 2023. Esse cruzamento de curvas de LPI é um indicador ecológico crítico: quando a classe antrópica passa a ser mais conectada espacialmente do que a vegetação nativa, o sistema atinge um ponto de reorganização estrutural da paisagem com consequências potencialmente irreversíveis para os processos ecológicos (Gardner et al., 1987).

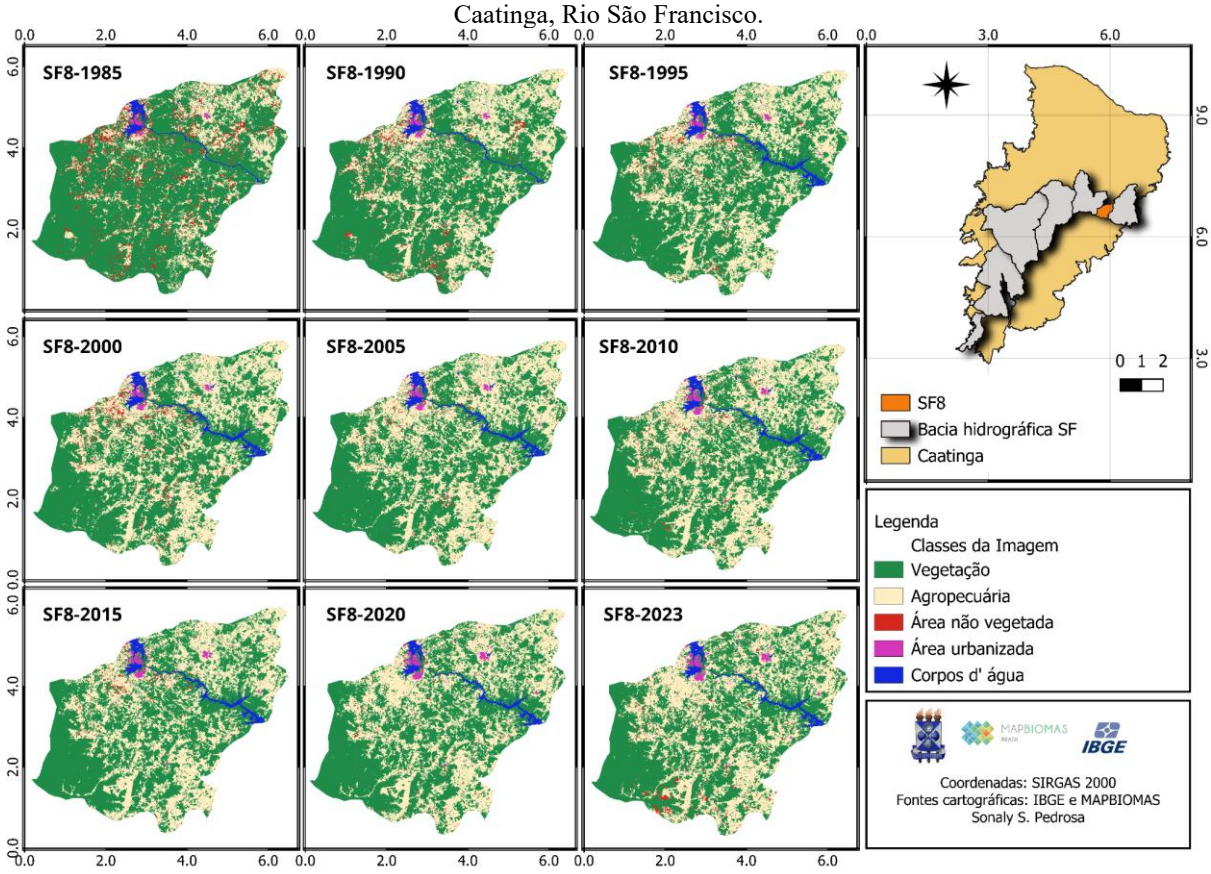
Na SF8, o pastejo intensivo de bovinos, caprinos e ovinos ao longo das margens do Rio São Francisco prática comum durante os períodos de estiagem representa um fator de degradação estrutural do ecossistema: o pisoteio compromete a estrutura do solo, destrói novas brotações e retarda o processo de sucessão ecológica, perpetuando a vulnerabilidade da vegetação às perturbações (Pereira Filho; Bakke, 2010; Silva et al., 2013). As queimadas para limpeza de pastagens constituem outro vetor crítico: no bioma Caatinga, incêndios iniciados em propriedades rurais frequentemente se propagam para áreas de proteção ambiental, resultando em perdas de vegetação de difícil recuperação em função das condições climáticas adversas do semiárido (Medeiros; Fiedler, 2004). A retirada contínua da cobertura vegetal para implantação de agricultura e pecuária extensiva compromete progressivamente as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, inviabilizando a manutenção ecológica e a exploração sustentável a longo prazo (Francisco et al., 2012).

Figura 12. Gráficos das métricas de ecologia da paisagem para a sub-bacia SF8 Bioma Caatinga, Rio São Francisco. NP: número de manchas; PLAND: percentual de área; CA: área total (ha); LPI: proporção da maior mancha (%).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 13. Série temporal (a cada cinco anos) das mudanças de uso e cobertura do solo na sub-bacia SF8 Bioma Caatinga, Rio São Francisco.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (Coleção 9, 2024).

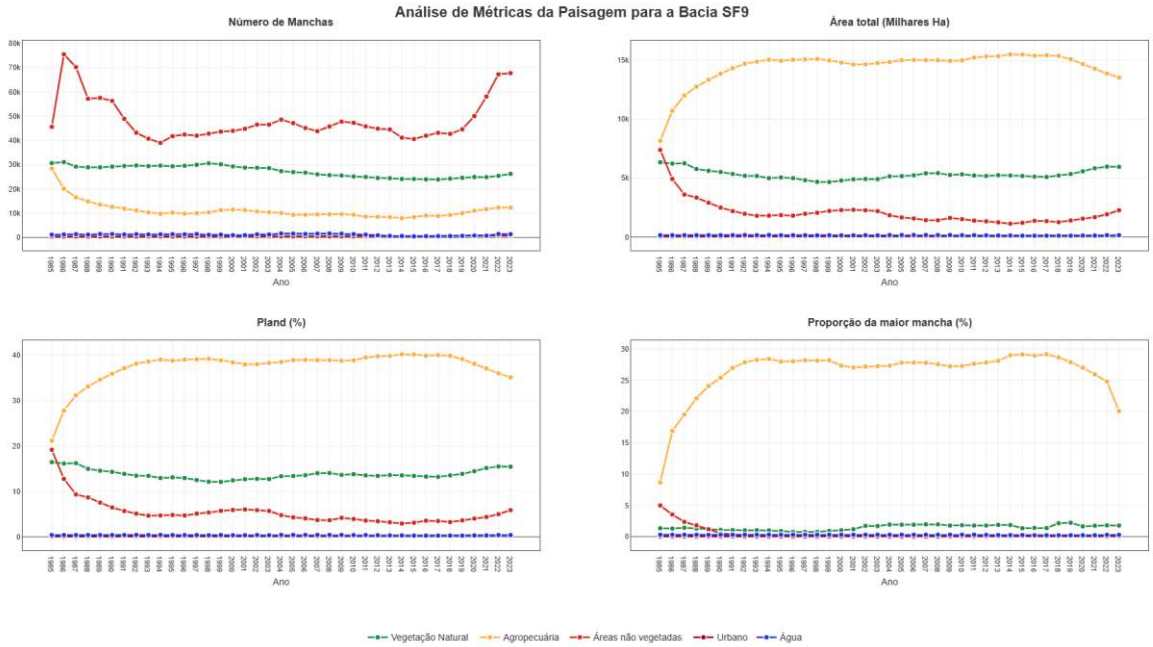
A sub-bacia SF9, no Baixo São Francisco, representa o cenário mais grave de antropização entre todas as sub-bacias analisadas. Desde o início da série histórica (1985), a paisagem da SF9 é dominada por áreas de uso humano, com a vegetação nativa restrita a fragmentos pequenos e dispersos (Figura 15). As métricas (Figura 14) confirmam e quantificam esse padrão: a agropecuária consolidou-se como a cobertura dominante ao longo de todo o período, com PLAND próximo de 40% e LPI atingindo quase 30% entre 1990 e 2020, indicando altíssima conectividade espacial dessa classe. A vegetação natural, em contrapartida, manteve LPI próximo de 2% durante toda a série valor que expressa um grau extremo de fragmentação, em que nenhum fragmento florestal alcança extensão representativa em relação à área total da sub-bacia.

O comportamento do NP das áreas não vegetadas na SF9 entre 40 mil e 75 mil manchas, com tendência de redução ao longo da série é interpretado como processo de consolidação do uso agropecuário sobre áreas previamente degradadas: à medida que as áreas não vegetadas são incorporadas ao sistema produtivo (como novas pastagens ou lavouras), o número de manchas de áreas abertas diminui, não por recuperação da vegetação, mas por mudança no tipo de uso antrópico dominante. A queda expressiva do LPI agropecuário observada em 2023 merece atenção particular: pode indicar o início de um processo de subdivisão e fragmentação dessa classe por avanço de áreas

não vegetadas possivelmente associado ao abandono de pastagens improdutivas por esgotamento do solo ou ao avanço da desertificação sobre terras outrora produtivas (Schulz et al., 2017).

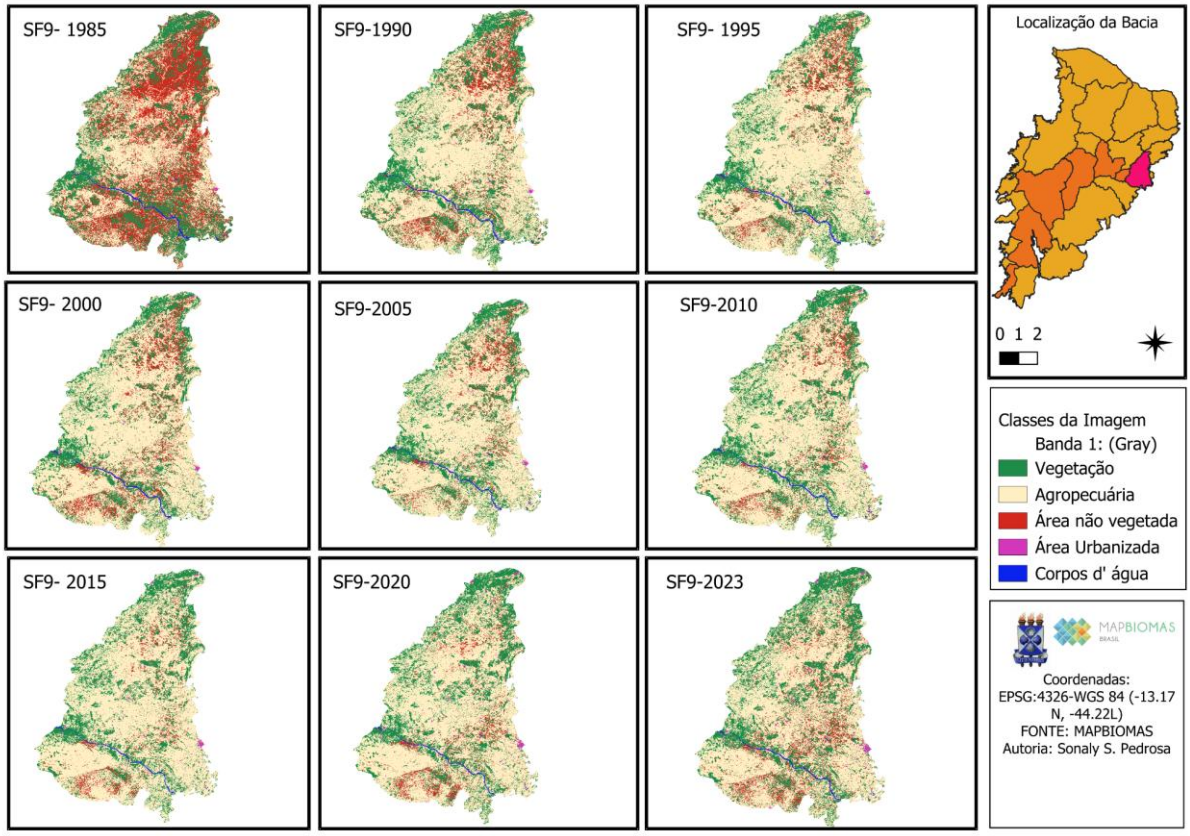
Os efeitos ecológicos acumulados da fragmentação intensa na SF9 são severos e multidimensionais. Com LPI da vegetação natural próximo de 2%, os remanescentes florestais estão efetivamente ilhados em uma matriz antrópica contínua, o que implica: (i) redução drástica do tamanho efetivo das populações de espécies arbóreas e faunísticas, aumentando o risco de extinção por estocasticidade ambiental e demográfica; (ii) comprometimento das interações mutualísticas planta-polinizador e planta-dispersor de sementes, com consequências negativas para o recrutamento de novas plantas (Rathcke; Jules, 1993); (iii) alteração das condições microclimáticas nos remanescentes aumento de temperatura, redução de umidade, maior variação de ventos que dificultam a germinação e o estabelecimento de plântulas (Nascimento, 2007); e (iv) amplificação dos efeitos de borda, que reduzem a área de interior (core area) ecologicamente funcional dos fragmentos, tornando-os funcionalmente menores do que sua área geométrica sugere (Gardner et al., 1987).

Figura 14. Gráficos das métricas de ecologia da paisagem para a sub-bacia SF9 Bioma Caatinga, Rio São Francisco. NP: número de manchas; PLAND: percentual de área; CA: área total (ha); LPI: proporção da maior mancha (%).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 15. Série temporal (a cada cinco anos) das mudanças de uso e cobertura do solo na sub-bacia SF9 Bioma Caatinga, Rio São Francisco.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em MapBiomas (Coleção 9, 2024).

4.4 SÍNTESE COMPARATIVA E IMPLICAÇÕES ECOLÓGICAS

A análise conjunta das sete sub-bacias revela um gradiente longitudinal de transformação da paisagem ao longo do eixo hidrográfico do São Francisco, com padrões diferenciados de tipo e intensidade de pressão antrópica. Em termos de perda de vegetação nativa, todas as sub-bacias apresentaram declínio consistente do CA e do LPI da vegetação natural, com perdas acumuladas de 25% a 40% da área original ao longo de 38 anos. Em termos de conectividade ecológica medida pelo LPI, as sub-bacias SF6 e SF8 atingiram o estado mais crítico, com o LPI da vegetação natural sendo ultrapassado pelo LPI de classes antrópicas (áreas não vegetadas na SF6 e agropecuária na SF8), configurando a inversão da hierarquia espacial da paisagem. Esse estado é ecologicamente análogo ao conceito de "threshold da paisagem" (landscape threshold) proposto por With e Crist (1995, apud Gardner et al., 1987), em que a conectividade da vegetação nativa colapsa e os processos ecológicos dependentes de deslocamento de organismos são irreversivelmente comprometidos.

Os padrões identificados neste estudo dialogam de forma direta com os principais referenciais teóricos e empíricos da literatura. Souza Jr. et al. (2020) documentaram em escala nacional que a agropecuária é o principal motor de perda de vegetação natural nos biomas brasileiros padrão confirmado para as sub-bacias SF3, SF4, SF8 e SF9. Schulz et al. (2017), utilizando produtos MODIS para a Caatinga entre 2001 e 2012, identificaram perda sistemática de diversidade da paisagem

associada à expansão de monoculturas e pastagens consistente com os padrões das SF5, SF6 e SF7. Fernandes et al. (2022) identificaram redução significativa da conectividade entre remanescentes florestais em toda a BHRSF resultado que este estudo confirma e detalha sub-bacia por sub-bacia, com resolução temporal anual e espacial de 30 m.

Do ponto de vista das implicações para a conservação, os resultados apontam para a necessidade de abordagens distintas conforme o perfil de transformação de cada sub-bacia. Nas sub-bacias com maior expansão agropecuária (SF3, SF4, SF8, SF9), as intervenções prioritárias devem focar em: regularização fundiária e cumprimento do Código Florestal (áreas de preservação permanente e reserva legal), pagamento por serviços ambientais para proprietários que mantenham ou restaurem vegetação nativa, e incentivo a sistemas agroflorestais que conciliem produção e conservação. Nas sub-bacias com maior prevalência de áreas não vegetadas (SF5, SF6, SF7), as intervenções devem priorizar: programas de restauração ecológica ativa, controle rigoroso do uso do fogo e alternativas econômicas que reduzam a pressão sobre a vegetação nativa. Em todas as sub-bacias, a reconexão de fragmentos remanescentes por meio de corredores ecológicos ao longo dos principais cursos d'água constitui uma estratégia fundamental para a manutenção dos fluxos ecológicos e da funcionalidade da paisagem (Sartori; Silva; Zimback, 2012).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou, com base em uma série temporal de 39 anos (1985–2023) de dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas (Coleção 9) e no cálculo sistemático de quatro métricas de ecologia da paisagem NP, PLAND, CA e LPI, que a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco inserida no bioma Caatinga vem enfrentando um processo contínuo, progressivo e espacialmente abrangente de degradação ambiental e perda de conectividade ecológica. Em todas as sete sub-bacias analisadas (SF3 a SF9), a vegetação natural reduziu sua área e sua conectividade de forma consistente ao longo de quatro décadas, com impactos que se estendem da escala local dos fragmentos florestais à escala regional dos serviços ecossistêmicos da bacia hidrográfica.

Dois padrões espacialmente distintos de transformação da paisagem foram identificados. Nas sub-bacias SF3, SF4, SF8 e SF9 localizadas nas porções Médio e Baixo São Francisco, a agropecuária emergiu como o principal vetor de substituição da vegetação nativa, com o LPI agropecuário superando o LPI da vegetação natural nos anos mais recentes da série (2021–2023), configurando uma inversão da hierarquia espacial da paisagem com potencial de comprometimento irreversível dos fluxos ecológicos. Nas sub-bacias SF5, SF6 e SF7 também no Médio São Francisco, a expansão das áreas não vegetadas foi o principal fator de transformação da paisagem, indicando processos ativos de degradação e desertificação do solo, com a SF6 registrando o caso mais grave: o LPI das áreas não

vegetadas superou o da vegetação natural a partir de 2018, sinalizando que a degradação atingiu um ponto crítico de reorganização da estrutura da paisagem.

Do ponto de vista metodológico, a integração dos dados anuais do MapBiomas com métricas calculadas no ambiente R demonstrou ser uma abordagem eficaz, reproduzível e de alto poder diagnóstico para o monitoramento da dinâmica da paisagem em biomas brasileiros. A análise comparativa entre múltiplas métricas especialmente a combinação de NP (fragmentação), PLAND (proporção de área) e LPI (conectividade) revelou padrões ecologicamente informativos que não seriam detectáveis por qualquer métrica isolada, reforçando a importância de abordagens multimétrica em estudos de monitoramento ambiental.

As implicações dos resultados para as políticas públicas de conservação são diretas e urgentes. As sub-bacias com expansão agropecuária acelerada (SF3, SF4, SF8, SF9) demandam: (i) implementação rigorosa do Código Florestal Brasileiro, especialmente no que concerne às Áreas de Preservação Permanente e à Reserva Legal; (ii) programas de pagamento por serviços ambientais que remunerem proprietários pelo mantenimento e restauração de vegetação nativa; (iii) incentivo à transição para sistemas de produção agropecuária mais sustentáveis. As sub-bacias com maior prevalência de degradação e desertificação (SF5, SF6, SF7) requerem: (iv) programas emergenciais de restauração ecológica ativa em solos com baixa capacidade de regeneração espontânea; (v) controle rigoroso do uso do fogo; (vi) alternativas econômicas para comunidades rurais que reduzam a pressão sobre a vegetação nativa. Em todas as sub-bacias, a (vii) implantação de corredores ecológicos ao longo dos cursos d'água principais constitui uma estratégia prioritária para a reconexão de fragmentos remanescentes.

Por fim, estudos futuros devem aprofundar a análise aqui iniciada em pelo menos três direções: (i) análise de conectividade funcional, incorporando informações sobre a permeabilidade da matriz e as capacidades de dispersão das espécies-alvo, para estimar se os fragmentos remanescentes ainda são funcionalmente conectados para a fauna e flora endêmica da Caatinga; (ii) modelagem preditiva de cenários futuros de transformação da paisagem, integrando projeções de mudanças climáticas com cenários de uso do solo baseados em tendências econômicas e políticas ambientais; e (iii) análise econômica dos serviços ecossistêmicos perdidos com a degradação da vegetação nativa hidrologia, carbono, polinização, controle de erosão, para subsidiar a formulação de incentivos financeiros e mecanismos de compensação ambiental adequados à realidade socioeconômica das comunidades da BHRSF.

ISSN: 2177-3246

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 – Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 – CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada. R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 – CTBIO – FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS – CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS ANA. GEO Brasil: recursos hídricos: resumo executivo. Brasília: ANA, 2007. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/wfa/sa/GEO%20Brasil%20Recursos%20H%C3%ADdricos%20-%20Resumo%20Executivo.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

AGÊNCIA DE BACIA HIDROGRÁFICA PEIXE VIVO. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Belo Horizonte: Agência Peixe Vivo, 2022. Disponível em: https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/. Acesso em: 10 jan. 2024.

ANTUNES, Andreza; SENA, Liana Mara Mendes; MOURA, Lucas Macêdo; NASCIMENTO, Marília Alves do; SILVA, Sandino Moreira. Conheça e conserve a Caatinga: a floresta que é a cara do Brasil. Fortaleza: Associação Caatinga, 2022.

AVANCINI, Maria Marta; TEGA, Glória. Caatinga: um bioma entre a devastação e a conservação. Com Ciência, Campinas, n. 149, 2013.

CALEGARI, Leandro; MARTINS, Sebastião Venâncio; GLERIANI, José Marinaldo; SILVA, Elias; BUSATO, Luiz Carlos. Análise da dinâmica de fragmentos florestais no município de Carandaí, MG, para fins de restauração florestal. Revista Árvore, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 871-880, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000500009.

CASTRO, César Nunes; PEREIRA, Caroline Nascimento. Revitalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco: histórico, diagnóstico e desafios. Brasília: IPEA, 2019. 366 p.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO CBHSF. A bacia. Belo Horizonte: CBHSF, [s.d.]. Disponível em: https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/. Acesso em: 10 jan. 2024.

DIAS, Silvia; NUNES, Luciana; MOTTA, Rachel. Dia Nacional em defesa do Rio São Francisco. São Paulo: MapBiomas, 2022.

FERNANDES, Jennifer Marinho do Nascimento; PEREIRA, Jose Charriere Gomes; SILVA, Richarde Marques; BATISTA, Elen Mayara de Sousa; PEREIRA, Alaine de Sousa; MONTE, Lucas Almeida; SILVA, Jorge Flávio Cazé Braga da Costa. Análise das mudanças no uso e ocupação da terra no bioma Caatinga através do sensoriamento remoto baseado em nuvem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA APLICADA, 20., 2024, Recife. Anais [...]. Recife: SBGFA, 2024.

FERNANDES, Milton Marques; LIMA, Alexandre Herculano Souza; WANDERLEY, Lilian Lins; FERNANDES, Márcia Rodrigues de Moura; FILHO, Renisson Neponuceno de Araújo. Fragmentação florestal na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 1227-1246, 2022. DOI: https://doi.org/10.5902/1980509866744.

FILHO, Britaldo Silveira Soares. Análise de paisagem: fragmentação e mudanças. Belo Horizonte: Instituto de Geociências UFMG, 1998.

FRANCISCO, Paulo Roberto Megna; CHAVES, Iêde de Brito; CHAVES, Lúcia Helena Garófalo; LIMA, Eduardo Rodrigues Viana. Detecção de mudança da vegetação de Caatinga. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 5, n. 6, p. 1473-1487, 2012.

GARDNER, Robert H.; MILNE, Bruce T.; TURNER, Monica; O'NEILL, Robert V. Neutral models for the analysis of broad-scale landscape patterns. Landscape Ecology, Dordrecht, v. 1, p. 19-28, 1987. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02275262.

GUSTAFSON, Eric J. Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art? Ecosystems, New York, v. 1, n. 2, p. 143-156, 1998. DOI: https://doi.org/10.1007/s100219900011.

IBAMA INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite PMDBBS. Brasília: IBAMA, 2008.

IBGE INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil. Série Relatórios Metodológicos, Rio de Janeiro, v. 45, 2019.

INPE INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Bioma Caatinga (PPCaatinga) 1ª fase (2024–2027). Brasília: MMA, 2024.

LANDAU, Elena Charlotte; SILVA, Gilma Alves; MOURA, Larissa; HIRSCH, André; GUIMARÃES, Daniel Pereira. Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas. Brasília: Embrapa, 2020.

LEAL, Inara R.; SILVA, José Maria C.; TABARELLI, Marcelo; LACHER JR., Thomas E. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. Megadiversidade, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 139-146, 2005.

MCGARIGAL, Kevin; MARKS, Barbara J. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Portland: USDA Forest Service, 1995. 122 p.

MEDEIROS, Marcelo Brilhante; FIEDLER, Nilton Cezar. Incêndios florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: desafios para a conservação da biodiversidade. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 157-168, 2004.

NASCIMENTO, Sandro Muniz. Efeitos da fragmentação de habitats em populações vegetais. 2007. Monografia Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PEREIRA, Jorge Luis Gavina; BATISTA, Getulio Teixeira; THALÊS, Marcelo Cordeiro; ROBERTS, Dar A.; VENTURIERI, Adriano. Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. Geografia, Rio Claro, v. 26, n. 1, p. 59-90, 2001.

PEREIRA FILHO, José Morais; BAKKE, Olaf Andreas. Produção de forragem de espécies herbáceas da Caatinga. In: GARIGLIO, Maria Auxiliadora (org.). Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro/MMA, 2010. p. 145-159.

PROJETO MAPBIOMAS. Coleção 9 da série anual de mapas de cobertura e uso do solo no Brasil. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/. Acesso em: 10 jan. 2024.

RATHCKE, Beverly J.; JULES, Erik S. Habitat fragmentation and plant-pollinator interactions. Current Science, Bangalore, v. 65, n. 3, p. 273-277, 1993.

REMPEL, R. S.; KAUKINEN, D.; CARR, A. P. Patch Analyst and Patch Grid. Thunder Bay: Ontario Ministry of Natural Resources, 2012.

SARTORI, Anderson Antônio da Conceição; SILVA, Ramon Felipe Bicudo; ZIMBACK, Célia Regina Lopes. Combinação linear ponderada na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. Revista Árvore, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1079-1090, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600009.

SCHULZ, Christian; KOCH, Robert; CIERJACKS, Arne; KLEINSCHMIT, Birgit. Land change and loss of landscape diversity at the Caatinga phytogeographical domain Analysis of pattern-process relationships with MODIS land cover products (2001–2012). Journal of Arid Environments, London, v. 136, p. 54-74, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.10.004.

SILVA, Ana Cecília da Cruz; PRATA, Ana Paula do Nascimento; SOUTO, Leandro Sousa; MELLO, Anabel Aparecida. Aspectos da ecologia da paisagem e ameaças à biodiversidade em uma unidade de conservação na Caatinga, em Sergipe. Revista Árvore, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 479-490, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300009.

SOUZA JR., Carlos M.; SHIMBO, Julia Z.; ROSA, Marcos R.; PARENTE, Laís L.; ALENCAR, Ane A.; RUDORFF, Bernardo F. T. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. Remote Sensing, Basel, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12172735.

TURNER II, Billie L.; LAMBIN, Eric F.; REENBERG, Anette. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences, Washington, v. 104, n. 52, p. 20666-20671, 2007. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104.

YU, Ming; HUANG, Yue; CHENG, Xin; TIAN, Jia. An ArcMap plug-in for calculating landscape metrics of vector data. Ecological Informatics, Amsterdam, v. 50, p. 207-219, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.02.004.

ZELLHUBER, Andreia; SIQUEIRA, Rodrigo. Rio São Francisco em descaminho: degradação e revitalização. Cadernos do CEAS, Salvador, n. 222, p. 13-36, 2016.