



VULNERABILIDADE À EROÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO SÃO FRANCISCO: UMA VISÃO INTEGRADA ENTRE GEOMORFOLOGIA E COBERTURA E USO DA TERRA

Jessyca Janyny de Oliveira Saraiva-Maia
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
janyny43@gmail.com

David Luiz do Nascimento Santos
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
david.santos.rag@gmail.com

Ana Luiza Epifanio de Souza
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
anaepifanioufpb@gmail.com

Milena Dutra da Silva
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
milena.dutra@ccae.ufpb.br

Nadjacleia Vilar Almeida
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
nadjacleia@ccae.ufpb.br

RESUMO – O processo erosivo é um fenômeno intrinsecamente natural, que tem sido agravado e acelerado ao longo do tempo pelas ações humanas. Variáveis geomorfológicas e de cobertura e uso da terra influenciam, tanto os processos naturais quanto os antrópicos. Este estudo visa analisar a vulnerabilidade à erosão com ênfase nos componentes da geomorfologia e da cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do baixo São Francisco. Utilizando a análise integrada da paisagem e a teoria da Ecodinâmica, os ambientes foram classificados em termos de estabilidade ou instabilidade. Os resultados revelam que a média estabilidade predomina em 66% da bacia, situando-a em uma preocupante fronteira entre a pedogênese e a morfogênese. Este estudo constatou que o uso e cobertura do solo são fatores-chave para determinação da vulnerabilidade à erosão da Bacia e que as características geomorfológicas estáveis da região tendem a estabilizar os processos erosivos em diversas áreas.

Palavras-chave: Planejamento Ambiental; Índices Morfométrico; Paisagem

VULNERABILITY TO SOIL EROSION IN THE LOWER SÃO FRANCISCO RIVER WATERSHED: AN INTEGRATED VISION BETWEEN GEOMORPHOLOGY AND LAND USE AND COVER

ABSTRACT – The erosion process is an intrinsically natural aspect, which has been aggravated and accelerated over time by human actions. Geomorphological and land cover and use variables influence both natural and anthropogenic processes. This study aims to analyze vulnerability to

erosion with an emphasis on the components of geomorphology and land cover and use in the lower São Francisco river basin. Using an integrated landscape analysis and Ecodynamic Theory, environments were classified in terms of stability or instability. The results reveal that average stability predominates in 66% of the basin, placing it on a worrying border between pedogenesis and morphogenesis. This study found that land use and coverage are key factors in determining the basin's erosion vulnerability and that the resulting geomorphological characteristics of the region tend to stabilize erosion processes in several areas.

Keywords: Environmental Planning; Morphometric Indices; Landscape

INTRODUÇÃO

O processo erosivo é, em sua raiz, um fenômeno natural que, ao longo dos anos, vem sendo intensificado e acelerado por ações antrópicas vinculadas, principalmente, ao uso intensivo dos recursos naturais, remoção da cobertura vegetal e manejo inadequado do solo (DOS SANTOS et al., 2021).

A vulnerabilidade à erosão do solo tende a aumentar com a ausência ou baixa cobertura vegetal, dando à vegetação um papel importante no controle dos processos erosivos (ARAÚJO et al., 2009; TRICART, 1977). Outro agente influenciador do processo erosivo do solo são as características geomorfológicas da paisagem ao ponto que altos valores de declividade criam um ambiente instável (GUERRA, 2018).

Segundo Vezzani (2015), o solo é considerado um dos recursos naturais mais importantes para a vida e para a população humana, oferecendo uma série de serviços ecossistêmicos. Com a crescente demanda pelos recursos naturais majoritariamente para a produção de alimentos, evidente ao longo dos anos, esses serviços ecossistêmicos vêm sendo comprometidos e/ou suprimidos (RIBEIRO e CAMPOS, 2007).

Conforme apontou Sousa e Nascimento (2015), às problemáticas que podem ser atribuídas ao uso inadequado do solo pelas populações vão desde a erosão e perda da biodiversidade, a implicações na manutenção dos recursos hídricos, a baixa fertilidade e produtividade do solo.

Tricart (1997) entende o ambiente como um emaranhado de trocas energéticas entre os componentes da paisagem e o equilíbrio das populações. A luz desse conceito, Crepani et al. (2001), analisando a vulnerabilidade com base em fatores indutores dos processos morfogênicos e pedogênicos, leva a compreensão da vulnerabilidade aos processos erosivos de origem antrópica e natural.

Para Sousa e Nascimento (2015), uma bacia hidrográfica está inter-relacionada aos diversos componentes da paisagem (geologia, geomorfologia, climatologia, hidrologia, uso da terra, etc). Assim, a utilização de seus recursos sem planejamento ambiental adequado terá como consequência a ocorrência de problemáticas econômicas e socioambientais existentes em diversos compartimentos ao longo da bacia hidrográfica. O diagnóstico da vulnerabilidade à erosão do solo, surge como ferramenta útil ao monitoramento ambiental de bacias hidrográficas e oferece possibilidades de identificação dos limites quanto aos usos do solo.

Nessa perspectiva, a área de estudo desta pesquisa é a quarta unidade fisiográfica da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, chamada de Bacia Hidrográfica do Baixo Rio São Francisco (BHBSF). Que perpassa por problemas socioambientais e econômicos elencados por Silva et al. (2021), como erosão, impermeabilização e pastejo intensivo.

Dentre os principais recursos para análises em larga escala temos as geotecnologias, que apresentam ferramentas como o SIG, o geoprocessamento e o sensoriamento remoto que possibilitam diversas alternativas viáveis e não destrutivas para análises ambientais (FERREIRA, 2019).

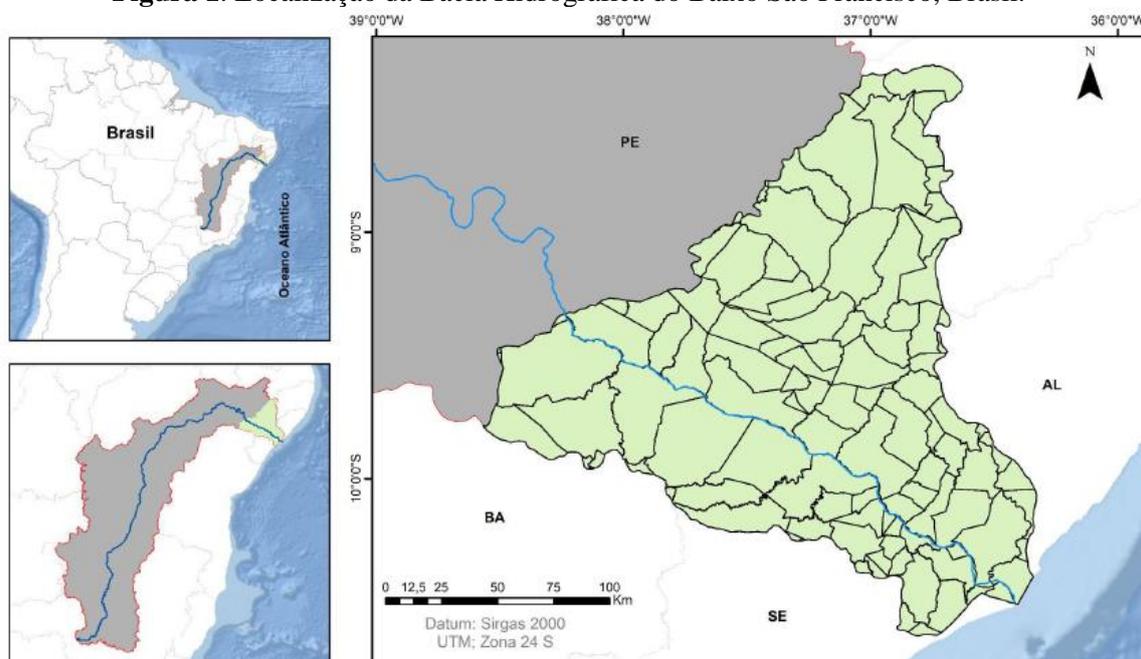
Diante das problemáticas elencadas e das potencialidades socioeconômicas da BHBSF, o objetivo deste trabalho é analisar a vulnerabilidade à erosão do solo, a partir da análise das componentes geomorfologia e uso e cobertura da terra na BHBSF.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco (BHBSF) (Figura 1) é um dos compartimentos fisiográficos e de regimes climáticos da Bacia Hidrográfica do São Francisco (LOPES et al., 2002); inclui 104 municípios e abrange os estados de Alagoas (48,08%), Sergipe (27,88%), Pernambuco (18,27%) e Bahia (5,77%), com área total de 29.873 km² (Figura 1). O Bioma Caatinga é predominante, mas também estão presentes fragmentos de Mata Atlântica, áreas de restinga e manguezais na sua região costeira. O clima varia entre semiárido e tropical semiúmido próximo a foz (MEDEIROS et al., 2014).

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco, Brasil.



Legenda

- Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.
- Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco (BHBSF)
- Municípios da BHBSF
- Rio São Francisco

Fonte: Agencia Nacional das Aguas (ANA 2020),
IBGE (2021), Portal Siga São Francisco

Org. Autores (2023)

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para analisar de forma integrada a paisagem na BHBSF, esse trabalho se baseou na análise da vulnerabilidade à perda de solo proposta nos trabalhos de Crepani et al. (2001), Almeida (2012) e Medeiros et al. (2018), tendo como eixo norteador a teoria da Ecodinâmica de Tricart (1977). Foram analisados os índices morfométricos de declividade, densidade de drenagem e amplitude altimétrica correlacionados aos aspectos geomorfológicos, assim como a cobertura vegetal e o uso da terra. Por fim, foram atribuídos valores de

vulnerabilidade para todas as variáveis conforme sua influência na intensificação dos processos erosivos. Todos os procedimentos metodológicos foram realizados no software de SIG, Arcgis 10.8.2 com licença do Laboratório de Cartografia e Geoprocessamento do Centro de Ciências Aplicadas e Educação da UFPB.

ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA

Seguindo os procedimentos propostos por Crepani et al. (2001), a vulnerabilidade geomorfológica é obtida a partir da integração dos índices morfométricos Declividade, Dissecção do relevo (a partir da densidade de drenagem) e Amplitude altimétrica.

A partir das imagens de radar Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) em resolução espacial de 30 metros das respectivas cenas: (S09W038, S09W037, S10W039, S10W038, S10W037, S11W039, S11W038, S11W037), foi criado um mosaico e calculados os índices morfométricos.

A declividade da BHBSF foi extraída de forma automática das imagens SRTM e classificada segundo os intervalos de porcentagem propostos pela Embrapa (1979). A partir da extração da rede de drenagem foi calculada a densidade de drenagem da bacia usando a equação 1:

$$\text{Equação 1: } Dd = \frac{Lt}{A}$$

Sendo: Dd = densidade de drenagem; Lt = comprimento total dos canais e A = área total da Bacia (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Para determinar a amplitude altimétrica da bacia foram extraídos da rede de drenagem os pontos correspondentes a cabeceira (nascente) e a foz e associados os valores de altitude de cada ponto. Assim, a amplitude altimétrica foi calculada de acordo com a equação 2:

$$\text{Equação 2: } Aa = (Alt_{cab}) - (Alt_{foz})$$

Sendo: Aa = Amplitude altimétrica, Alt_cab = representa a altitude da cabeceira destinado a cota máxima (do topo) da vertente, Alt_foz = representa a altitude da foz refere-se a cota mínima (fundo do vale) (MEDEIROS, 2016).

Após obter os valores de declividade, densidade da drenagem e amplitude altimétrica foram gerados os mapas temáticos de cada índice no formato raster. Assim, foi utilizado o método de Krigagem que utiliza a dependência espacial das amostras vizinhas para gerar a interpolação dos índices morfométricos (CARVALHO e ASSAD, 2005).

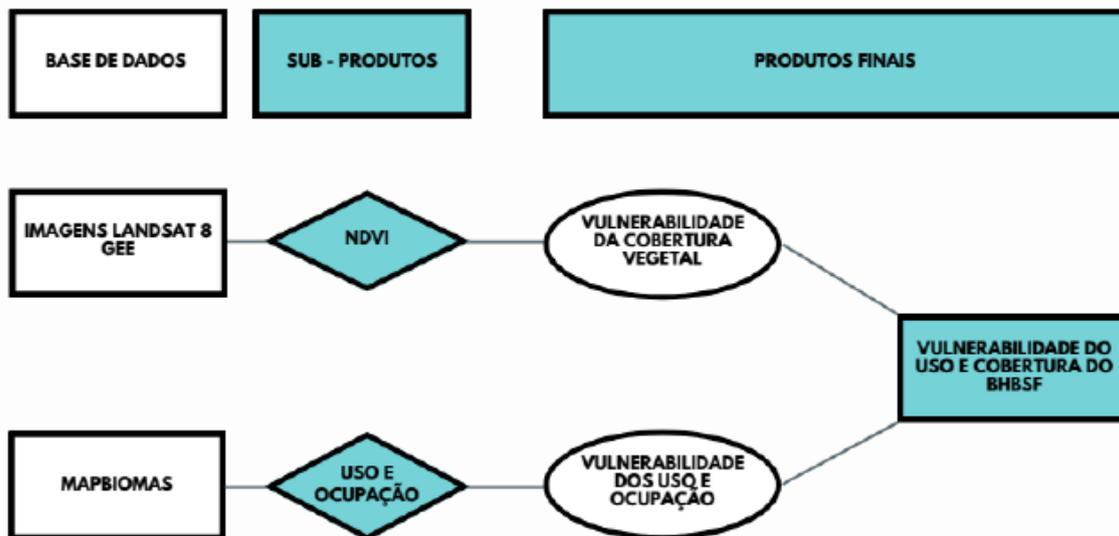
USO E COBERTURA

A BHBSF tem em sua composição três tipos principais de características fitogeográficas (caatinga, transição e mata atlântica). Dando a bacia no mínimo três tipos de respostas espectrais para vegetação dificultando a aquisição de cenas que quantifiquem de forma fidedigna o aspecto vegetativo da BHBSF. Nessa perspectiva o trabalho utilizou-se de dois métodos para analisar a vegetação e os diferentes usos da terra na BHBSF: (1) Uso e cobertura da terra a partir da classificação realizada pelo Mapbiomas (2) Densidade vegetacional obtida pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Figura 2).

(1) Para identificar e espacializar os principais usos e cobertura da terra na BHBSF, foram utilizados os dados da coleção 7 da plataforma MapBiomas Brasil lançada em 2022 com resolução espacial de 30x30 metros. Essa coleção utiliza-se de procedimentos de classificação automática pixel a pixel das melhores imagens obtidas do ano de 2021 pelo

satélite Landsat sensor OLI/TIRS (MAPBIOMAS BRASIL, 2022). Para esse trabalho foram consideradas todas as classes e suas subclasses descritas pelo MapBiomas, a saber: 1) Floresta; 2) Formação Natural Não-Florestal; 3) Agropecuária; 4) Área Não-Vegetada; e 5) Corpo D'água.

Figura 2. Fluxo metodológico da vulnerabilidade do uso e cobertura da Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco, Brasil.



Org. Autores (2023)

(2) O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi calculado a partir da plataforma Google Earth Engine, utilizando o conjunto de dados da coleção de imagens do Landsat 8 “Collection 2 Tier 1 and Real-Time data TO Reflectance”, com resolução 30 x 30 metros. Utilizando da linguagem de programação JavaScript foram adicionados dois filtros sendo eles: “filterMetadata”, onde a partir do banco de dados da plataforma seleciona-se as cenas com percentual de nuvens estabelecido, nesse caso, menor ou igual a 7% resultando em 32 cenas das órbitas 214, 215 e 216 dos pontos 066 e 067 no intervalo de tempo entre 2018-01-01 e 2021-12-30 e o filtro “median”, que basicamente reduz a coleção de imagens calculando a mediana de todos os valores de cada pixel para toda coleção correspondente ao intervalo de tempo pesquisado. Após esse pré-processamento, o NDVI foi calculado conforme equação referenciada por Rouse et al. 1974 apud Jensen (2009), utilizando as bandas B4 (Vermelho) e B5 (Infravermelho próximo), resultado em uma imagem com valores de NDVI entre -1 e 1 (Equação 3).

$$\text{Equação 3: } NDVI = (NIR - \text{Vermelho}) / (NIR + \text{Vermelho})$$

onde: NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; NIR = Infravermelho próximo (B5) e Vermelho (B4)

Os valores de NDVI para a área de estudo variaram entre -0,923 a 0,86 e foram convertidos a classes fitofisiográficas, que consideram a densidade de biomassa fotossintetizante, de acordo com uma adaptação da classificação fitofisiográfica utilizada por Silva et al. (2021) para a BHBSF, na qual: área não-vegetada (NDVI entre -0,923 e 0,100); áreas com vegetação rala (0,100 a 0,200); vegetação esparsa (0,200 a 0,400); vegetação de transição (0,400 a 0,525); e vegetação densa (0,525 a 0,866).

VULNERABILIDADE DOS COMPONENTES GEOMORFOLÓGICOS E DE COBERTURA E USO DO SOLO

A vulnerabilidade dos componentes se baseou nos pressupostos teóricos-metodológicos da ecodinâmica proposto por Tricart (1977) e adaptado por Crepani et al. (2001), que leva em consideração a interdependência dos processos morfogenéticos (processo de modificação do relevo) e pedogênicos (processo de formação do solo), dando origem a 5 categorias de vulnerabilidade (Quadros 1 e 2).

Quadro 1. Variáveis morfométricas, valores de vulnerabilidade e suas categorias ecodinâmicas.

Declividade (%)	Amplitude Altimétrica (m)	Densidade da drenagem (Km/Km ²)	Valores de vulnerabilidade	Categorias ecodinâmicas
<2%	<20 m	<0,5	1,0 - 1,3	Estável
2% a 6%	20 m a 40 m	0,5 a 3,0	1,4 - 1,7	Baixa Estabilidade
6% a 20%	40m a 100 m	3,0 a 7,5	1,8 - 2,2	Média Estabilidade / Instabilidade
20% a 50%	100 m a 200 m	7,5 a 20	2,3 - 2,6	Moderada Instabilidade
>50%	>200 m	>20	2,7 - 3,0	Instável

Fonte: Crepani et al. (2001, p.80) e Florenzano (2008, p.119)

Quadro 2. Densidade vegetacional, Cobertura e Uso, valores de vulnerabilidade e suas categorias ecodinâmicas.

Densidade Vegetacional		Cobertura e uso da BHSF	Vulnerabilidade	Categorias ecodinâmicas
NDVI	Fitofisiografia			
0,525 a 0,866	vegetação densa	Formação florestal; Rio lago e oceano	1,0-1,3	Estável
0,400 a 0,525	vegetação de transição	Formação Savânica; Mangue e restinga arborizada	1,4 - 1,7	Baixa Estabilidade
0,200 a 0,400	vegetação esparsa	Silvicultura, outras formações não florestais	1,8 - 2,2	Média Estabilidade
0,100 a 0,200	áreas vegetação rala	Campo alagado e área pantanosa; pastagem lavoura temporárias	2,3 - 2,6	Moderada Instabilidade
-0,770 a 0,86	áreas não-vegetada	Formação campestre; mosaico agricultura e pastagem; praia, duna e areal ; área urbana; afloramento rochoso; mineração; aquicultura; apicum; lavouras perenes; restinga herbácea	2,7 - 3,0	Instável

Fonte: Adaptado por Crepani et al. (2001, p. 88 a 90) e Silva et al. (2021, p. 20)

A vulnerabilidade geomorfológica foi definida a partir dos índices morfométricos e os valores de vulnerabilidade foram estabelecidos de acordo com Crepani et al. (2001), Almeida (2012) e Florenzano (2008), variando de acordo com as características de cada índice (Quadro 1).

A dissecação do relevo pela drenagem foi analisada a partir da densidade de drenagem. Segundo Crepani et al. (2001), Almeida (2012) e Almeida et al. (2018), quanto maiores forem os interflúvios menor a intensidade da dissecação e, portanto, menor os valores de vulnerabilidade (próximos a 1) determina a estabilidade das unidades naturais, do mesmo modo quanto menores forem interflúvios maior a intensidade da dissecação e os valores de vulnerabilidade (próximos a 3,0).

De acordo com Crepani et al. (2001), a amplitude altimétrica está baseada no aprofundamento da dissecação, tornando indicador da energia potencial disponível para o escoamento artificial ou “runoff”, então quando ocorre precipitação, as águas que caem dos pontos mais alto do

terreno adquiram maior energia cinética durante o seu percurso até a parte mais baixa, conseqüentemente apresenta maior capacidade para erosão contribuindo para morfogênese.

Crepani et al. (2001) e Lima e Silva (2018) complementam que quanto maior o valor da amplitude altimétrica, maior será o valor de vulnerabilidade (próximo a 3,0), no entanto valores de vulnerabilidade baixos (próximos a 1,0) apresentam menores valores de amplitude altimétrica, compõem uma maior estabilidade nas paisagens naturais, assim prevalecendo a pedogênese.

Segundo Crepani et al. (2001), os valores de vulnerabilidade a declividade estão associados a partir da inclinação do relevo em relação ao horizonte, aos relevos com menores ângulos de inclinação possuem valores próximo a 1,0 que indica a predominância dos processos pedogenéticos. Já os relevos com maiores declividades associam-se valores próximo a 3,0, pois à uma maior velocidade de massas de água e capacidade de transporte, favorecendo a erosão, nesse caso prevalecendo a morfogênese.

Para este trabalho, a vulnerabilidade geomorfológica foi gerada a partir da média aritmética das vulnerabilidades dos três índices morfométricos. A vulnerabilidade da cobertura e uso foi definida de acordo com a capacidade de proteção à erosão, variando de 1 (cobertura vegetal mais densa/menor proteção) à 3 (condições bioclimáticas agressivas/solo desnudo). Esse critério foi empregado tanto no Mapa de uso e ocupação quanto no de densidade vegetal (Quadro 2).

A integração dos resultados foi determinada a partir da média aritmética dos valores de vulnerabilidade, gerando como produto final o mapa de vulnerabilidade da cobertura e uso do solo à erosão.

ANÁLISE INTEGRADA

A integração dos dados de vulnerabilidade geomorfológica e de vulnerabilidade da cobertura e uso foi realizada em ambiente SIG, usando a equação 4. O maior peso empregado à vulnerabilidade da cobertura e uso levou em consideração a importância da vegetação para a proteção do solo contra os processos erosivos, evidenciada nos trabalhos Almeida (2012) e Medeiros et al. (2018).

$$\text{Equação 4: } Vul_{integrada} = (Vu_{geo} * 1 + Vul_{uso cob} * 2) / 3$$

onde: $Vul_{integrada}$ = Vulnerabilidade integrada

Vu_{geo} = Vulnerabilidade para o tema geomorfologia;

$Vul_{uso cob}$ = Vulnerabilidade para o tema Uso e cobertura da terra

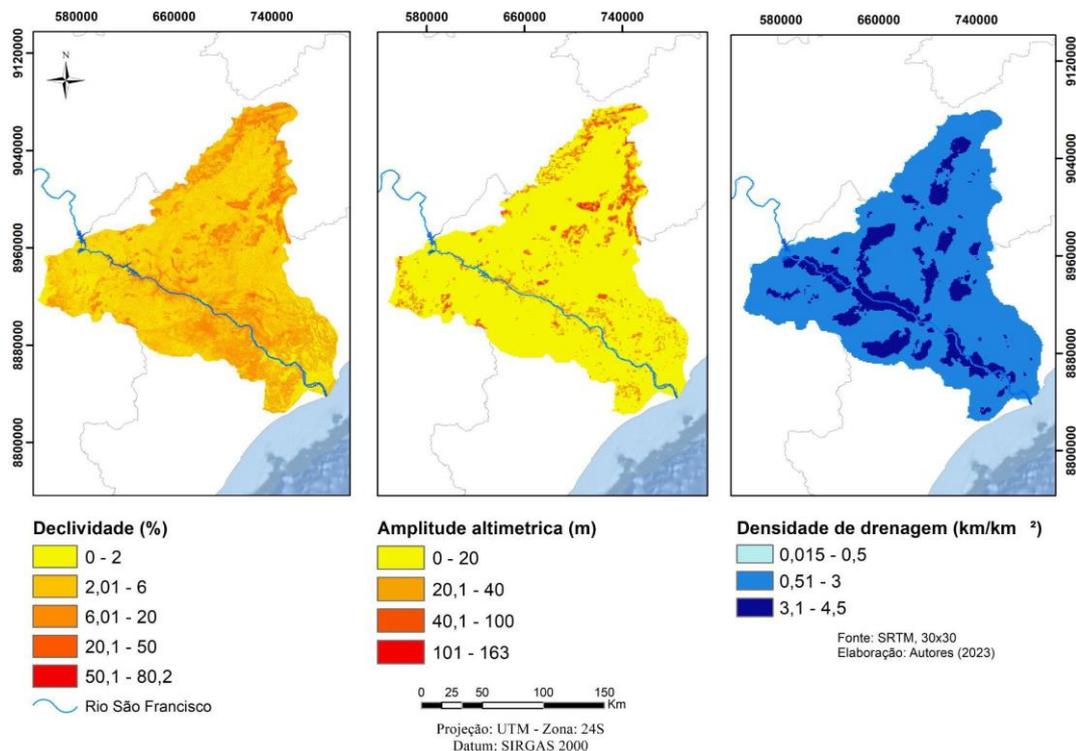
RESULTADOS E DISCUSSÕES

As classes predominantes da declividade na BHBSF foram a plana e a suave-ondulado representadas pelas classes 0 – 2% e 2 – 6% (76,56% da BHBSF), caracterizando a baixa declividade; a classe ondulada, 6% a 20%, ocupa 20,29% da Bacia (Figura 3).

As classes de declividade observadas decorrem do fato da BHBSF estar inserida no Domínio Morfoestrutural - Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, Cinturões Móveis

Neoproterozóicos, Depósitos Sedimentares Quaternários abrangendo dez unidades geomorfológicas: Chapadas de Tonã e Serra Talhada, Delta do São Francisco, Encostas do Planalto da Borborema, Pediplano Central do Planalto da Borborema, Pediplano do Baixo São Francisco, Planícies Litorâneas, Planícies e Terraços Fluviais, Planícies e Terraços Fluviais do Rio São Francisco, Tabuleiro Dissecado do Vaza-Barris e Tabuleiros Costeiros do Brasil Centro-Oriental (IBGE, 2022).

Figura 3. Índices morfométricos da Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco, Brasil



Org. Autores (2023)

A baixa declividade é característica da unidade geomorfológica Pediplano do Baixo São Francisco, que consiste em um relevo caracterizado por vastos planos homogêneos e elevações residuais que apresenta, originando uma depressão limitada pelos rebordos escarpados do Pediplano Central do Planalto da Borborema, e, próximo a calha do rio São Francisco, por margens escarpadas formando “canyons” (IBGE, 2022; MENKE et al. 2013) e composta por um conjunto de rochas metamorfizadas, embasamento cristalino, blocos de residuais de arenito, calcário e arenito (SÁ et al. 2011).

Os valores da declividade entre 20% e 50% (Figura 3) predominam nas unidades geomorfológicas Pediplano Central do Planalto da Borborema e Tabuleiros Dissecados do Vaza-Barris, com relevo típico de rebordos escarpados, principalmente nos divisores topográficos que delimitam a BHBSF nos limites noroeste e nordeste.

A amplitude altimétrica é predominantemente muito baixa, com valores que variaram entre 0 e 20 metros (Figura 3), ocupando 86% da área da Bacia. Segundo Medeiros et al. (2018) e Crepani et al. (2001), os baixos valores de amplitude representam uma menor energia potencial disponível para o escoamento artificial ou “runoff”, devido à baixa declividade do relevo, resultando na

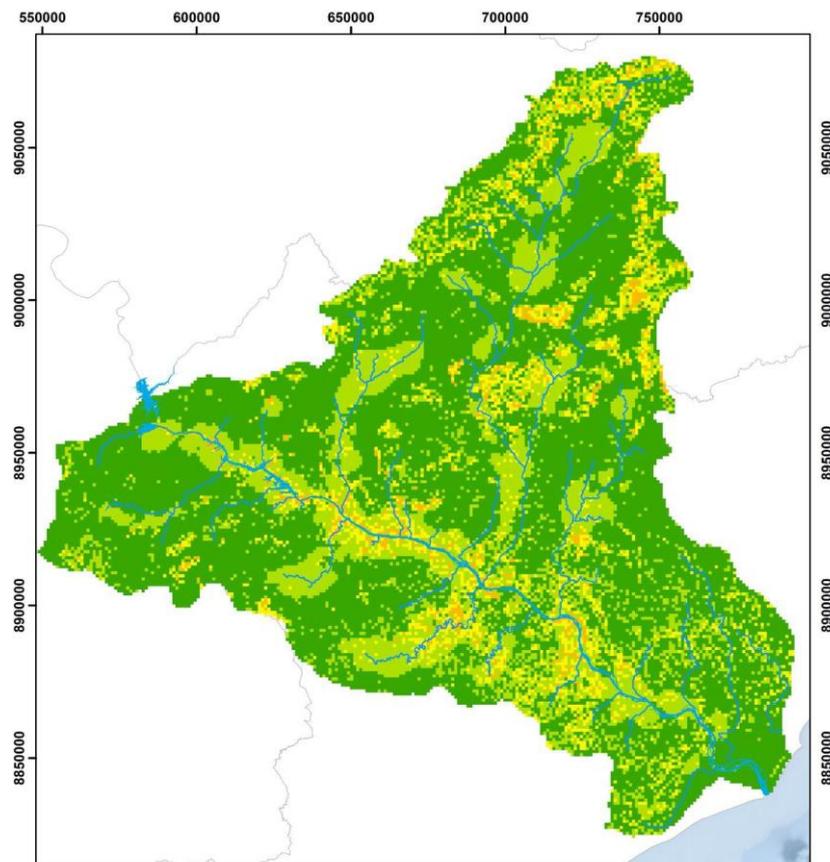
menor capacidade de atuação da morfogênese. As áreas onde obtiveram alta amplitude, com valores de 21 a 100 metros, coincidem com as áreas com alta declividade (Figura 3).

A BHBSF apresenta uma densidade de drenagem variando de 0,015 a 4,5 km/km². Os valores de densidade de drenagem entre 0,51 e 3 km/km² corresponde a uma baixa densidade, de acordo com a classificação de Florenzano (2008).

Essa característica também está correlacionada com o relevo, em domínios morfoestruturais e unidades geomorfológicas que são predominantemente planos. Os valores de 3,1 a 4,5 km/km² observados na BHBSF (Figura 3), correspondem a uma densidade de drenagem média e podem estar relacionados às outras características dos domínios morfoestruturais e unidades geomorfológicas que apresentam alinhamento de cristas, vales subseqüentes e perpendiculares (JUNQUEIRA, 2002).

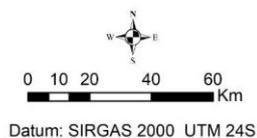
A integração dos índices morfométricos resultou nas categorias vulnerabilidade à erosão do solo na BHBSF, com classes variando entre estável e baixa estabilidade (Figura 4). Isto é justificado devido o relevo ser predominantemente plano, assim favorecendo os processos pedogenéticos apresentando-se estáveis.

Figura 4. Distribuição espacial das categorias de vulnerabilidade geomorfológica na Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco, Brasil.



Vulnerabilidade à erosão: Geomorfológica

- Estável
- Baixa estabilidade
- Media estabilidade
- Moderada instabilidade
- Hidrografia da BHBSF



Fonte: Autores, 2023

Datum: SIRGAS 2000 UTM 24S

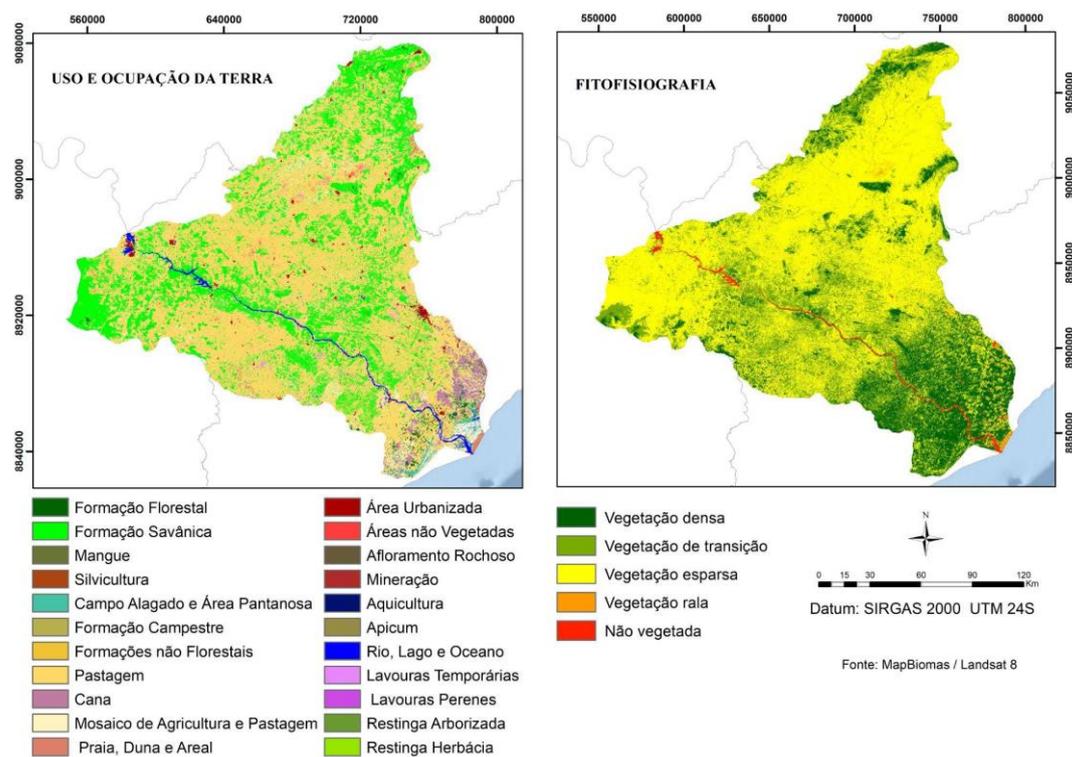
Org. Autores (2023)

Para os autores Costa et al. (2020) e Santos e Morais (2012), bacias de baixa declividade promovem uma menor intensidade erosiva do solo, contribuindo para que o escoamento superficial seja mais lento. Já nas áreas de relevo escarpado e rebordos escarpados, os altos valores de declividade e amplitude altimétrica configuram a classe de vulnerabilidade à erosão do solo de média estabilidade e moderada instabilidade (Figura 4). Crepani et al. (2001), afirma que quanto maior o declive do terreno, maior é conversão de energia potencial em cinética, levando em uma maior velocidade das correntes de água e em sua maior capacidade de transporte, desempenhando um papel fundamental na erosão prevalecendo assim o processo de modificação do relevo (morfogênese).

COBERTURA E USO DA TERRA NA BHBSF

A BHBSF apresenta cobertura e uso da terra com predominância da agropecuária (Figura 5), distribuída na paisagem como um contínuo de grandes áreas de pastagem ocupando 57,15% da Bacia. Destaca-se a presença de áreas totalmente ocupadas por monocultura de cana-de-açúcar e silviculturas, localizadas na parte sudeste da bacia, próximos à Foz do São Francisco (Figura 5).

Figura 5. Classes de cobertura e uso da terra e Fitofisiografia na Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco, Brasil.



Org. Autores (2023)

Moura (2017) e Paulino et al. (2012) chamam atenção para bacias hidrográficas com matrizes antrópicas elencando impactos ambientais advindos de atividades econômicas desenvolvidas de forma inadequada, a saber: supressão da cobertura vegetal, erosão do solo, pastejo extensivo, perda ou redução de biodiversidade e comprometimento do ciclo hidrológico. Esses impactos podem trazer uma maior vulnerabilidade, quando estabelecidos em áreas com

altos declives, principalmente se a intensidade pluviométrica local for alta, característica comum do semiárido brasileiro (MAFRA et al., 2020).

Apenas 30,08% da BHBSF possui cobertura vegetal natural (Figura 5), sendo a formação savânica a mais representativa (28%), distribuída de modo descontínuo e com área dos fragmentos reduzida, coincidindo com áreas de maior declive. Essa configuração evidencia a fragmentação da Bacia, principalmente em áreas onde a agropecuária tende a se instalar.

Nesse sentido, áreas com menores declives tendem a ter menos cobertura vegetal natural. Quanto a fitofisiografia (densidade de biomassa fotossintetizante), destaca-se que a classe vegetação esparsa ocupa 57% da Bacia (Figura 5), coincidindo quase sempre com a classe pastagem (uso e ocupação da terra). Para Francisco et al. (2013), a predominância da vegetação esparsa é preocupante do ponto de vista dos processos erosivos, pelo seu baixo grau de recobrimento da superfície do solo e por estar quase sempre vinculada a áreas de pastoreio, o que aumenta a sua vulnerabilidade à erosão.

A vegetação de transição ocupou cerca de 27,8% da Bacia (Figura 5), estando descontínua e fragmentada por toda área. Essa configuração pode ser explicada tanto pela área de transição entre os biomas Caatinga e Mata Atlântica existente na BHBSF, quanto pela diversidade fitofisiográfica na Caatinga.

A classe vegetação densa representa 13% na BHBSF (Figura 5), concentrada na região próximas à foz e em áreas com altos declives. É importante frisar que a concentração vegetação densa nos municípios alagoanos e sergipanos que circundam a foz e o rio principal são, em sua maioria, de cana-de-açúcar (Figura 5). Isso se dá devido à alta concentração de cloroplastos na estrutura anatômica foliar desse cultivo, apresentando alta concentração de pigmentos fotossintetizantes e que exibem valores semelhantes à formações florestadas com vegetação densa (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

A vegetação densa de origem natural tende a apresentar um aumento da concentração de biomassa fotossintetizante de maneira diretamente proporcional ao aumento da altitude, conforme resultados apresentados por Silva et al. (2009), em um diagnóstico vegetacional de um município do semiárido pernambucano.

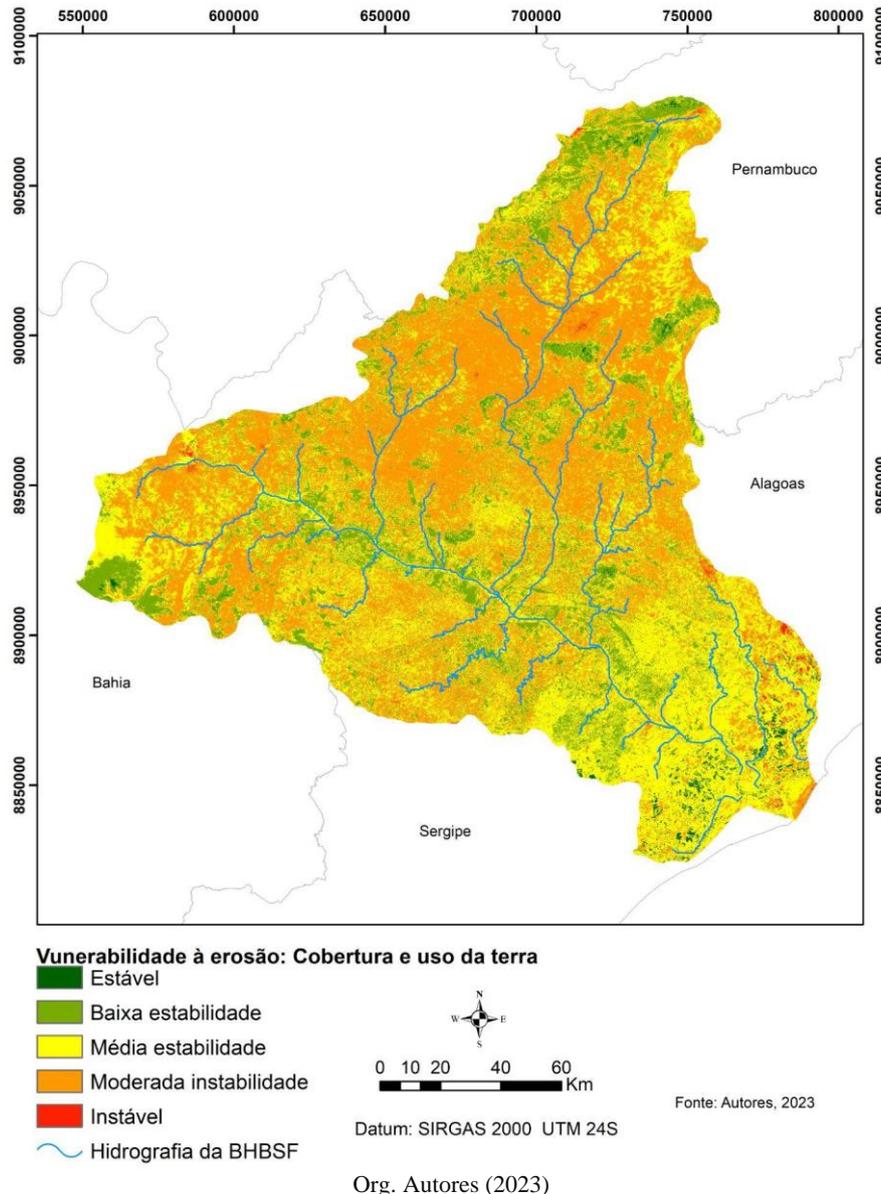
Quando determinada a vulnerabilidade da cobertura e uso na BHBSF, 44,5% da área corresponde a classe moderadamente instável (Figura 6), principalmente nos recortes circunscritos no bioma caatinga e correspondentes às classes como pastagem e vegetação rala. Essa configuração sugere que na BHBSF os processos morfogênicos são mais atuantes.

Salienta-se que, uma extensão considerável da Bacia está sobre média vulnerabilidade à erosão (38%), principalmente nos municípios ribeirinhos nos quais a monocultura de cana de açúcar é predominante. Crepani et al. (2001) avalia a vulnerabilidade a partir da presença ou não da cobertura vegetal, considerando que coberturas antrópicas como pastagem (com a proteção rala e normalmente o solo compactado por animais) e cana-de-açúcar (onde a proteção é sazonal e muitas vezes danosa ao solo) são, do ponto de vista erosivo, menos vulneráveis do que o solo exposto.

As classes “estável” e “baixa estabilidade”, referentes ao uso e cobertura da terra ocupam quase 16% da bacia (Figura 6), tendo sua presença vinculada sempre a vegetação densa e/ou presença de cobertura vegetal do tipo formação savânica, classes essas estabelecidas em um descontínuo de fragmentos. Bastos e Peulvast (2016) compreendem que essas classes de vegetação atuam como um agente protetor para os solos e os recursos hídricos em regiões de caatinga arbórea.

Nessa mesma perspectiva, nota-se que os maiores fragmentos de vegetação natural estão localizados em áreas declivosas como é o exemplo dos municípios Águas Belas -PE e Jeremoabo - BA. Melo et al. (2011) e Francisco et al. (2013), ao analisarem bacias semiáridas, constataram que a vegetação densa tende a estar em locais de difícil acesso, de solos rasos e declivosos. Entretanto, neste trabalho essa afirmação não se confirma para áreas sob clima subúmido.

Figura 6. Distribuição espacial das categorias de vulnerabilidade da cobertura e uso da terra à erosão do solo na Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco, Brasil.



Salienta-se que, uma extensão considerável da Bacia está sobre média vulnerabilidade à erosão (38%), principalmente nos municípios ribeirinhos nos quais a monocultura de cana de açúcar é predominante. Crepani et al. (2001) avalia a vulnerabilidade a partir da presença ou não da cobertura vegetal, considerando que coberturas antrópicas como pastagem (com a proteção rala e normalmente o solo compactado por animais) e cana-de-açúcar (onde a proteção é sazonal e muitas vezes danosa ao solo) são, do ponto de vista erosivo, menos vulneráveis do que o solo exposto.

As classes “estável” e “baixa estabilidade”, referentes ao uso e cobertura da terra ocupam quase 16% da bacia (Figura 6), tendo sua presença vinculada sempre a vegetação densa e/ou presença de cobertura vegetal do tipo formação savânica, classes essas estabelecidas em um descontínuo de fragmentos. Bastos e Peulvast (2016) compreendem que essas classes de vegetação atuam como um agente protetor para os solos e os recursos hídricos em regiões de caatinga arbórea.

Nessa mesma perspectiva, nota-se que os maiores fragmentos de vegetação natural estão localizados em áreas declivosas como é o exemplo dos municípios Águas Belas -PE e Jeremoabo - BA. Melo et al. (2011) e Francisco et al. (2013), ao analisarem bacias semiáridas, constataram que a vegetação densa tende a estar em locais de difícil acesso, de solos rasos e declivosos. Entretanto, neste trabalho essa afirmação não se confirma para áreas sob clima subúmido.

ANÁLISE INTEGRADA DA VULNERABILIDADE À EROSÃO DO SOLO NA BHBSF

A partir da integração da vulnerabilidade geomorfológica e de cobertura e uso da terra na BHBSF, destacou-se a predominância da média estabilidade (Figura 7), presente em 68,3% da Bacia; apenas 0,79% foi classificada como estável (Tabela 1). Essa configuração aponta para um cenário preocupante entre a pedogênese e a morfogênese, ainda mais quando se considera o crescimento da agropecuária na BHBSF ao longo dos anos.

Figura 7. Distribuição espacial das categorias de vulnerabilidade à erosão na Bacia Hidrográfica do Baixo São Francisco, Brasil.

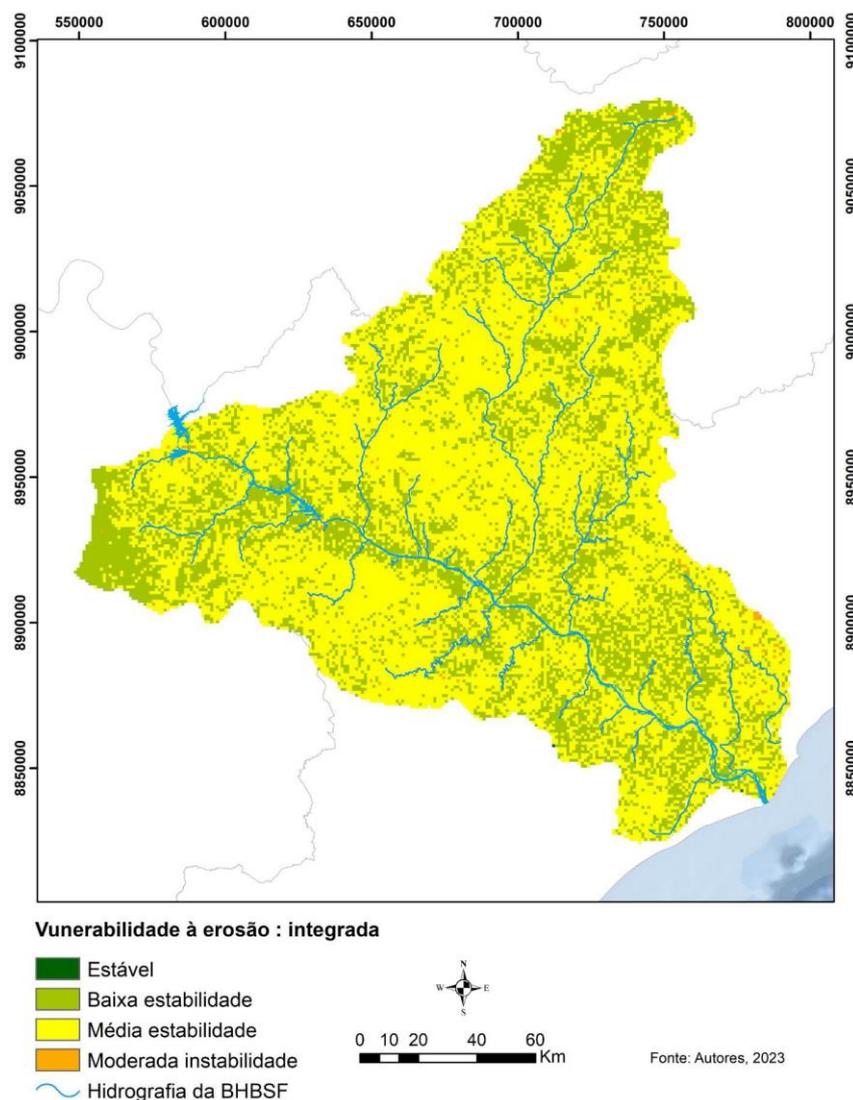


Tabela 1. Valores da distribuição espacial das categorias de vulnerabilidade à erosão da BHBSF.

Vulnerabilidade à erosão da BHBSF	Área (km ²)	Percentual
Estável	236,0044044	0,79%
Baixa Estabilidade	9109,884297	30,50%
Média estabilidade	20417,75722	68,35%
Moderadamente instável	109,3510441	0,37%
Instável	-	-
total	29.873,00	100,00%

Fonte: Autores(2023)

Deste modo, analisando todos os índices utilizados, pode se notar que as áreas de maior densidade vegetal coincidem com áreas mais estáveis quanto à vulnerabilidade à erosão do solo. Este paralelo entre a presença de vegetação e a proteção ao processo erosivo também foi visto por Almeida (2006) em uma Bacia semiárida de matriz antrópica.

Verificou-se que a região central do município de Águas Belas-PE, apesar da área possuir valores de declividade e amplitude altimétrica alta variando entre 20 - 50% e 15m a 163 m, respectivamente, estão mais estáveis em relação à erosão, isso pode ser explicado pela presença da vegetação densa. Santos (2016), em seu trabalho realizado entre os municípios de Águas Belas e Saloá - PE, apontam que os índices geomorfológicos, os índices vegetacionais e as formas de uso e ocupação são inter-relacionados e condicionantes em regiões de maiores topografias.

Já para áreas de menor densidade vegetacional estabelecidas em locais com características de maior declividade e amplitude altimétrica, constata-se que a região demonstrou uma maior vulnerabilidade ao processo erosivo. Esse cenário reforça a importância da vegetação na estabilidade erosiva quanto às características geomorfológicas apontadas por Almeida e Cunha (2012).

Vale ressaltar que as atividades humanas que contribuem para a (re)produção de um cenário de baixa cobertura do solo intensificam a vulnerabilidade à erosão. Moura et al. (2017, p. 19) aponta o solo exposto e atividades de agricultura, como o constante preparo do solo para culturas anuais e pastagem, como “atividades de alto valor de vulnerabilidade aos processos de perda do solo”.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os índices morfométricos da BHBSF, aponta-se que as áreas com maior declive, maior amplitude altimétrica e de maior densidade de drenagem apresentam maior vulnerabilidade à erosão do solo. Essas áreas correspondem, frequentemente, às áreas ciliares e de relevo escarpado do curso principal do Rio São Francisco e de seus tributários.

Para além dessas áreas, as características geomorfológicas na BHBSF indicam a predominância de um cenário geral de “estabilidade” quanto à vulnerabilidade à erosão do solo. No entanto, essa condição é asseverada pelo uso da terra na Bacia, uma vez que a BHBSF possui matriz antrópica, marcada pela predominância do uso agropecuário e baixa cobertura de matas nativas, com prejuízos à conservação do solo.

A análise da vulnerabilidade erosiva da cobertura e uso, revela uma Bacia com mais de 80% de seu território sob “média estabilidade” e “moderada instabilidade”. Quando analisa apenas a cobertura e uso, as porções de áreas estáveis foram sempre vinculadas a terrenos declivosos

onde, frequentemente, usos antrópicos como a agropecuária, não conseguem se instalar e persistem as coberturas vegetais naturais.

A avaliação integrada dos componentes geomorfológicos e de cobertura e uso da terra indica a predominância de “média estabilidade” aos processos erosivos. Nesse sentido, aponta-se que os processos mais atuantes na BHBSF são os morfogênicos. Esse fato demanda uma maior atenção ao planejamento ambiental para o adequado desenvolvimento socioambiental e econômico na Bacia, com vistas à conservação do solo.

É importante considerar que, sem um planejamento ambiental e monitoramento dos aspectos morfogenéticos, a “média estabilidade” poderá ser convertida em cenários de instabilidade. Visto que, tensores ambientais crescentes como monoculturas e pastagens atuam sobre estabilizadores aos processos erosivos como os remanescentes florestais.

Reforça-se, aqui, a importância do desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos impactos ambientais que o uso da terra vem causando à BHBSF, bem como o monitoramento dos processos erosivos e assoreamento do rio. Haja vista a influência desses aspectos na manutenção dos serviços ecossistêmicos prestados tanto pelo rio principal quanto por seus afluentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal da Paraíba ao CNPq, pela disponibilização de bolsas de pesquisa que possibilitaram o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, e a Expedição Científica do Baixo São Francisco pelo suporte em observações de campo..

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, N. V. Ordenamento territorial geoambiental da bacia hidrográfica do rio Taperoá, semiárido paraibano. 2012. 238 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói: [s.n.], 2012.

_____. CUNHA, S. B. A cobertura vegetal e sua importância na análise morfodinâmica da bacia hidrográfica do rio Taperoá–Nordeste do Brasil/Paraíba. Revista Geonorte, v. 3, n. 6, p. 365-378, 2012.

_____. NASCIMENTO, F. R.; CUNHA, S. B. Proposta metodologia ao ordenamento territorial ambiental em bacias hidrográficas. In: Ilana Damasceno; Tatiana Malheiros. (Org.). Espaços Plurais. 1ed. Rio de Janeiro: Consequência, 2018, v. 1, p. 331-358.

ARAÚJO, G. H de S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. Gestão ambiental de áreas degradadas, 4ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 320p, 2009.

BASTOS, F.; PEULVAST, J. P. Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Massa no Maciço de Baturité-Ceará, Brasil. Revista do Departamento de Geografia, v. 32, p. 124-142, 2016.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. Eng. Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.377-384, maio/ago. 2005.

COSTA, A. A. D. da; GALVANIN, E. A. S. dos; NEVES, S. M. A. S. da. Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica Paraguai / Jauquara, Mato Grosso - Brasil. Geosul, v. 35, n. 74, p. 483-500, jan/abr. 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. C. Geomorfologia. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.. CREPANI, E. et al. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

DOS SANTOS, P. S.; DOS SANTOS, M. E. de G.; DOS SANTOS, R. Uso e ocupação do solo: Reflexão sobre impacto ambiental. Agri-environmental sciences, v. 7, n. 1, p. 1-10, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10a Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p. 1979.

FLORENZANO, T. G. Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais. Oficina de Textos, 2008.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; CHAVES, L. H. G.; BRANDÃO, Z. N.; LIMA, E. R. V.; SILVA, B. B. Mapeamento da vulnerabilidade das terras da bacia hidrográfica do Rio Taperoá. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, n. 02, p. 271-286, 2013.

GUERRA, A. J. T. Geomorfologia e planejamento ambiental-conceitos e aplicações. Revista de Geografia (Recife), v. 35, n. 4, p. 269-287, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA. Banco de Dados de Informações. Disponível em :<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/geomorfologia> . Acesso em: 29 jul. 2023.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.

JUNQUEIRA, R. A. C. (Coord.) Mapeamento Temático de Uso da Terra no Baixo São Francisco (Resumo executivo do relatório final). Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Brasília, DF. 2002.

LIMA, M. M. P.; SILVA, L. da. Análise da Vulnerabilidade Natural da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, com Apoio de Geotecnologia. Revista Brasileira de Geografia Física, v.11, n.04 , p.1442-1457, 2018.

MAFRA, R. C.; PINHEIRO, M. M. F.; CICERELLI, R. E. Validação de mapa de vulnerabilidade a erosão por aprendizagem de máquina. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 13, n. 02, p. 564-575, 2020.

MAPBIOMAS BRASIL. Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil. Coleção 7.0 (1985-2021). 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. MEDEIROS, P. R. P.; SANTOS, M. M.; CAVALCANTE, G. H.; SOUZA, W. F. L.; SILVA, W. L.

Características ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continente-oceano. Geochimica Brasiliensis, v. 28, n. 1, p. 65-65, 2014.

MEDEIROS, I. S. Fragilidade Ambiental da Paisagem da Área de Proteção Ambiental (APA) da Barra do Rio Mamanguape-PB. 2016. 76 f. Monografia (Graduação) - Universidade Federal da Paraíba, Rio Tinto, 2016.

_____. FREIRES, J. de L.; DANTAS, M. de S.; ALMEIDA, N. V. Ecodinâmica e vulnerabilidade ambiental de uma sub-bacia inserida em uma Área de Proteção Ambiental. Journal of Environmental Analysis and Progress, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 296–309, 2018.

MENKE, A. B.; JÚNIOR, O. A. C.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; OLIVEIRA, S. N. Classificação pelo K-Médias das bacias de drenagem do Rio Ipanema (AL/PE) considerando os atributos morfométricos. Geo-UERJ, v. 2, n. 24, 2013.

MOURA, M. M. S.; NETO, J. R. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; BATISTA, F. J. A.; SOUSA, M. M. M. Vulnerabilidade à erosão quanto aos aspectos solo e vegetação em uma bacia hidrográfica no semiárido. Entorno Geográfico, [S. l.], n. 13, p. 100 - 1013, 2017.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

RIBEIRO, F. L.; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v. 11, p. 628-636, 2007.

SÁ, I. B. et al. Diagnóstico do meio físico. In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Brasília, DF, 2011.

SANTOS, L. S. dos. Perfil de paisagem entre os municípios de Águas Belas e Saloá (Pernambuco - Brasil), com ênfase na cobertura vegetal. Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 2, p. 991–1000, 2016.

SANTOS, D.A.R. dos; MORAIS, F. de. Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lagoa da Confusão – TO. Revista GEONORTE, Edição Especial, V.3, N.4, p. 617-629, 2012.

SILVA, D. G.; MELO, R. F. T. de; CORRÊA, A.C. de B. Influência da densidade de drenagem na interpretação da evolução geomorfológica do complexo de Tanques do município de Brejo da Madre de Deus – Pernambuco, Nordeste do Brasil. Revista de Geografia, v. 26, n. 3, p. 294-306, 2009.

SILVA, M. D; GALVÍNCIO, J. D; MENDONÇA PIMENTEL, R. M. Diagnóstico da ocupação vegetacional do município de Brejo da Madre de Deus, Pernambuco, Brasil, através do sensoriamento remoto. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 1, n. 2, p. 15- 29, 2009.

_____. Diagnóstico Ambiental da Mata Ciliar do Baixo São Francisco. In: SOARES, E.; SILVA, J.V. (Orgs.). Relatório da III Expedição do Rio São Francisco. Maceió: Agência Peixe Vivo, 2021.

SOUZA, M. L. M; NASCIMENTO, F. R. Estudos geoambientais de bacias hidrográficas em áreas suscetíveis à desertificação no Nordeste do Brasil. Revista Colombiana de Geografia, v. 24, n. 1, p. 346, 2015.

SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION. 30-Meter SRTM Tile Downloader. Disponível em: <https://dwtkns.com/srtm30m/TRICART>, J. Ecodinâmica. In: Série recursos naturais e meio ambiente. SUPREN/IBGE, Rio de Janeiro, 1977.

VEZZANI, F. M. Solos e os serviços ecossistêmicos. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 8, p. 673-684, 2015.