



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Análise da Fragilidade Ambiental em uma Sub-Bacia Hidrográfica na Metade Sul do Rio Grande do Sul com o uso de geoprocessamento*

Bruna Bohm Moura^{1*}, Leandra Martins Bressan², Victória de Souza Wojahn³, Lukas dos Santos Boeira⁴, Viviane Santos Silva Terra⁵

¹ Graduanda do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), CEP: 96.010-610, Pelotas (RS), Brasil, ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-8719-7779>, brunabmoura0304@gmail.com (autor correspondente). ² Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), CEP: 96.010-610, Pelotas (RS), Brasil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2290-5663>, leandrambressan13@gmail.com. ³ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), CEP: 96.010-610, Pelotas (RS), Brasil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0531-8726>, victoriawojahn@hotmail.com. ⁴ Doutor em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), CEP: 96.010-610, Pelotas (RS), Brasil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6139-5750>, lukasdossantosboeira@gmail.com. ⁵ Professora do curso de Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), CEP: 96.010-610, Pelotas (RS), Brasil, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9020-3148>, vssterra10@gmail.com. *Parte do Trabalho de Conclusão do Curso do primeiro autor.

Artigo recebido em 03/04/2023 e aceito em 06/05/2023

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo para determinar a fragilidade ambiental em bacias hidrográficas, com foco na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã-RS. Foram realizadas análises de fatores de declividade, solo, erosividade da chuva e uso e ocupação da terra analisados em ambiente Sistemas de Informações Geográficas para construção de fragilidade ambiental potencial e emergente seguindo a metodologia proposta por Ross (1994). Para avaliar os resultados da pesquisa foram estabelecidos pesos ou notas para cada variável, dessa forma a classe de fragilidade potencial com maior representatividade é a denominada de alta fragilidade e ocorre em extensão de 6679,3 km². A classe de fragilidade ambiental emergente mais representativa é a denominada como média fragilidade, presente em uma área de 6145,5 km². Como existe uma sazonalidade da produção agrícola devido ao clima, a classe de fragilidade ambiental emergente apresenta diminuição, ocasionando assim o aumento da classe de fragilidade média em demais áreas.

Palavras-chave: Geoprocessamento; Recursos naturais; Mapas de fragilidade; Rio Ibirapuitã. (Refazer com termos que não aparecem no título)

Analysis of environmental protection in a hydrographic sub-basin in the southern half of Rio Grande do Sul using geoprocessing

ABSTRACT

This paper presents a model to determine the environmental fragility in watersheds, focusing on the Ibirapuitã River Watershed-RS. The analysis of slope, soil, rainfall erosivity and land use and occupation factors were analyzed in a GIS environment to construct potential and emerging environmental fragility following the methodology proposed by Ross (1994). To evaluate the results of the research were established weights or scores for each variable, thus the potential fragility class with greater representativeness is called high fragility and occurs in an area of 6679.3 km². The most representative emerging environmental fragility class is denominated medium fragility, present in an area of 6145.9 km². As there is a seasonality of agricultural production due to climate, the emerging environmental fragility class presents a decrease, thus causing the increase of the medium fragility class in other areas.

Keywords: Geoprocessing; Natural resources; Fragility maps; Ibirapuitã River.

Introdução

A intensa exploração dos recursos naturais, observada nas últimas décadas, apresenta um importante desafio para conciliar a relação entre o

desenvolvimento econômico e a proteção do meio ambiente (Nandy *et al.*, 2015). Ações antrópicas atreladas a problemas naturais, como uso inadequado do solo e a remoção da cobertura do mesmo, permitem a ocorrência de alterações no

meio ambiente que estão relacionados ao aumento do escoamento, ocorrência de processos erosivos, assoreamento de rios, entre outros (Lima, 2008).

Anjinho *et al.* (2021) acreditam que a partir da necessidade de entender e quantificar a relação entre o ser humano e o meio ambiente surge o conceito de fragilidade ambiental, que avalia através de diferentes graus de fragilidade um determinado local, principalmente as bacias hidrográficas onde a degradação ambiental é influenciada por diversos fatores. Diversos estudos fazem uso dessa ferramenta como Belato *et al.* (2019) que analisou a fragilidade ambiental para a Bacia do Submédio Tocantins, Teixeira *et al.* (2021) para a Bacia Hidrográfica do Rio São João de Tiba, Almeida *et al.* (2020) no baixo curso do rio Mearim e Cavalcante *et al.* (2022) verificou a fragilidade ambiental para a bacia do rio Mocajuba.

A bacia hidrográfica, considerada uma unidade de manejo ambiental, apresenta características específicas, como relevo, tipo de solo e geologia que, em conjunto, tornam-se um atributo denominado vulnerabilidade natural. Estudos envolvendo bacias hidrográficas como unidades de planejamento tem crescido nas últimas décadas, como Arana *et al.* (2018), Farias (2020), Silva *et al.* (2020), e Mira *et al.* (2022), porém, faltam trabalhos que abordam os impactos gerados pelas atividades antrópicas, em bacias utilizadas como mananciais de abastecimento (Leite, 2011).

Um ponto importante que deve ser considerado é que as bacias hidrográficas desempenham importantes serviços ecossistêmicos, como Sutil (2020), Gonçalves (2020), Vieira (2020) que avaliou a fragilidade ambiental da bacia do rio Piracicaba a partir da aplicação de dois modelos metodológicos. Cavalcante *et al.* (2022) analisou a fragilidade potencial e emergente da bacia do rio Mocajuba no estado do Pará utilizando ambientes SIG's. Dentre as atividades humanas, a urbanização, a industrialização e a agropecuária, quando efetuadas sem planejamento integrado, são as que mais comprometem os serviços ambientais proporcionados por estas bacias (Machado, 2013). Com isso, a utilização de geotecnologias, vem para auxiliar na tomada de decisão no planejamento ambiental territorial, sendo possível realizar uma análise das áreas com maior interferência humana (Pimentel, 2019), podendo ocasionar um aumento na fragilidade do ambiente natural (Gonçalves, 2011).

Padilha (2013) considera importante o uso das ferramentas de geoprocessamento, no auxílio de estudos de fragilidade ambiental em bacias hidrográficas, sendo indispensável o uso das geotecnologias, pois as mesmas permitem que sejam realizados análises, planejamento e monitoramento da bacia.

A fragilidade ambiental é uma medida da sensibilidade intrínseca dos ecossistemas às pressões ambientais, associadas também a ameaças que consigam perturbar o equilíbrio de um sistema. Esses sistemas ambientais podem responder de diferentes maneiras às intervenções humanas nos componentes da paisagem, como relevo, solo, clima, recursos hídricos e cobertura vegetal (Kappes *et al.*, 2012). Por isso, que o estudo sobre a fragilidade ambiental é tão importante, pois permite definir as áreas mais frágeis e que precisam de maior atenção, sendo que a má utilização pode resultar no comprometimento de toda a bacia. O grau de um impacto pode depender do tipo de intervenção, que foi realizada naquela bacia, sendo bastante atrelada a diversos fatores, principalmente de uso e ocupação da terra (Duque, 2011).

De acordo com, Trentin (2012), Padilha (2013), Constantini (2012), Tavares (2015) a importância de estudos sobre a fragilidade ambiental, podem gerar mapas que serão utilizados por órgãos públicos no planejamento territorial, em escala regional ou local, além de pequenos proprietários e produtores rurais, uma vez que possibilita a avaliação das características ambientais de forma integrada, considerando suas potencialidades e restrições.

O Rio Ibirapuitã, localizado no sul do Brasil, é um importante recurso hídrico que abastece diversas cidades e é utilizado para atividades econômicas como a agricultura e a pecuária (Damolin, 2021).

No entanto, a região enfrenta desafios ambientais como a degradação do solo e a contaminação da água, que podem comprometer a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos. (Silva, 2021). Diante disso o uso de um índice de fragilidade ambiental para a bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã como forma de identificar áreas mais vulneráveis e auxiliar na tomada de decisão para a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais da região.

Com isso, o presente estudo tem como objetivo utilizar técnicas de geoprocessamento para identificação das áreas de fragilidade ambiental potencial e emergente da Bacia

Hidrográfica do Rio Ipirapuitã, comparando o uso e ocupação do solo.

Metodologia

Área de Estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Ibitapuitã (BHRI), localizada na porção oeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Possui uma área de drenagem no entorno de 7985,06 km², com uma extensão aproximada de 259 km, sendo 180 km no

município de Alegrete, sua nascente ocorre no oeste do município de Santana do Livramento, mais precisamente na Coxilha do Haedo e Rivera no Uruguai. Um dos principais tributários da margem esquerda é o rio Ibicuí, sendo o maior e o principal rio que compõem a chamada região hidrográfica do rio Uruguai (SEMA, 2010).

A BHRI está situada no município de Santana do Livramento, em seu alto curso, e nos municípios de Quaraí e Rosário do Sul encontram-se nas porções oeste e leste, respectivamente, e também drena do médio abaixo curso, áreas do município de Alegrete-RS.

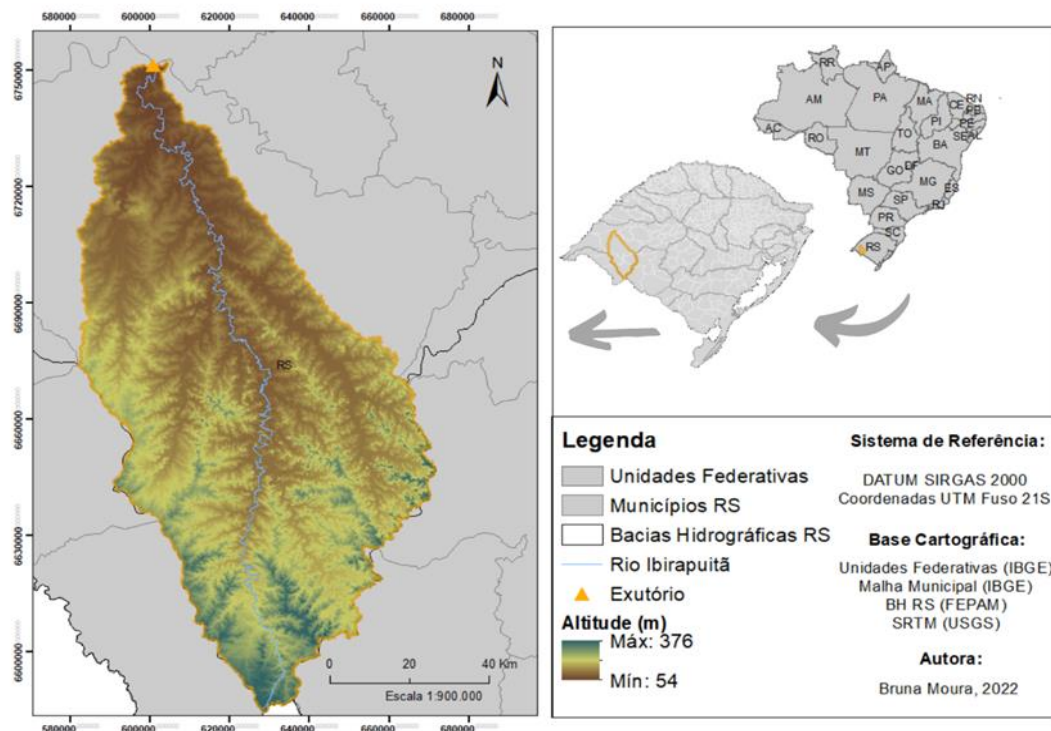


Figura 1. Localização da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Ipirapuitã

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo "Cfa", ou seja, temperado úmido com verões quentes. A região possui uma precipitação média mensal de 158 mm e com chuvas bem distribuídas durante o ano (Peel; Finlayson e McMahon, 2007).

No que se refere ao contexto geológico, a BHRI encontra-se sobre as rochas do grupo São Bento, representada pelas formações Guará, Botucatu e Serra Geral (Mota, 2004). Do ponto de vista econômico, é caracterizada pela agricultura extensiva, principalmente no cultivo do arroz irrigado e pecuária (Bonetti, 2020).

Inicialmente para realização do estudo foi realizado o download do *shapefile* da rede hidrometeorológica obtida através do site HIDROWEB, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), para posteriormente ser identificadas as estações fluviométricas inseridas na bacia.

Através do mosaico de imagens do SRTM obtidos pelo site da *US Geological Survey* (USGS), identificou-se a seção de controle e com o auxílio da ferramenta *Fill* do ArcGis, retirou-se as inconsistências do Modelo Digital de Elevação (MDE), esse processo é realizado inicialmente,

pois geralmente arquivos matriciais, apresentam sumidouros e picos, e desta forma, essa ferramenta é utilizada para o preenchimento destas depressões. Após o preenchimento das depressões utilizou-se a ferramenta *Flow Direction* (FDR) para identificar a direção do escoamento e, também para extrair informações da rede de drenagem como por exemplo, a direção do escoamento, curvas de nível e o fluxo presente na bacia. A partir dessas informações obteve-se os mapas das características indispensáveis para o estudo de fragilidade na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

O mapa de declividade foi obtido através da ferramenta *Slope* no Arcgis, em porcentagem (%). Para a determinação da fragilidade das classes de declividade foram estabelecidos intervalos de classes de acordo com a metodologia de Ross (1994) (Tabela 1). As classes de declividade definidas por Ross (1994), foram utilizadas em diversos estudos devido a sua praticidade de identificar as áreas de maior ou menor risco de erosão. Outro fator que influência no comportamento dos processos erosivos são as ações antrópicas presentes na bacia.

As informações referentes ao tipo de solo existente na BHRI foram obtidas pelo site GeoInfo da Embrapa (EMBRAPA, 2021). Para a determinação dos diferentes tipos de solos presentes na área de estudo foi realizado o recorte do *shapefile* e verificada a presença do tipo do solo através do nome e nomenclatura do Mapa de Solos do Brasil (EMBRAPA, 2021). Para hierarquização desta variável foram considerados os solos encontrados no mapeamento da área, conforme tabela 2. Os solos foram classificados de acordo com o grau de fragilidade baseado na metodologia de Ross (1994).

Tabela 1 - Classes de declividade e seus respectivos graus de fragilidade.

Classes de declividade	Classes de fragilidade	Valor
Até 6%	Muito baixa	1
de 6 a 12%	Baixa	2
de 12 a 20%	Média	3
de 20 a 30%	Alta	4
acima de 30%	Muito alta	5

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Tabela 2 – Classes de solo e seus respectivos graus de fragilidade.

Classes de solo	Classes de fragilidade	Valor
Latossolo Bruno, Latossolo Roxo, Latossola Vermelho escuro e Vermelho amarelo de textura argilosa	Muito baixa	1
Latossolo Amarelo e Vermelho Amarelo de textura média/argilosa	Baixa	2
Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolos, Argissolos textura média/argilosa	Média	3
Cambissolos, Argissolos textura média/arenosa;	Alta	4
Neossolos, Organossolos, Planossolos	Muito alta	5

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Outra variável importante na verificação da fragilidade ambiental é o comportamento hídrico no solo, pois adota medidas de controle preventivo e corretivo da erosão (TUCCI, 1997).

Para a análise dos parâmetros de erosividade da chuva foi utilizada a metodologia proposta por Mello *et al.* (2013), na qual foram ajustados modelos de regressão multiparamétricas para determinar a estimativa média anual do fator R, através do método de mapeamento de fluxo da informação (MFI). O MFI é um método que considera a latitude, longitude e altitude como variáveis de entrada para as diversas regiões geográficas do Brasil.

A ferramenta *Add XY Coordinates* do ArcGis, foi utilizada para a obtenção das coordenadas de latitude e longitude de cada ponto no referido estudo. Após conter todos os parâmetros necessários para obtenção dos dados, empregou-se a ferramenta *Raster Calculator* para determinação do fator R através da equação de modelo ajustado (Equação 1), utilizada na bacia hidrográfica do Arroio Duro, localizada no Sul do Rio Grande do Sul (RODRIGUES, 2018).

$$R = 2610770 + (-60,44 * A) + (98839 + L0) + (-1114,68 * LA^2) + (938,47 + L0^2) + (-1,185 * A * L0) + (1,1885 * L0 * LA^2) + (0,01494 * LA^2 * L0^3) \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

R fator Erosividade média anual em MJ mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹

A é altitude; em metros;

L0 é longitude, em graus decimais negativos;

LA é a latitude em graus decimais negativos.

Para a classificação da erosividade anual foram adotadas as classes conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de erosividade e seus respectivos graus de fragilidade.

Valores de erosividade (MJ mm.há ⁻¹ .h ⁻¹ .ano ⁻¹)	Classes de fragilidade	Valor
R < 2,500	Muito baixa	1
2,500 < R < 5,000	Baixa	2
5,000 < R < 7,000	Média	3
7,000 < 10.000	Alta	4
R > 10,000	Muito alta	5

A cobertura do solo também é uma variável que influencia na determinação da fragilidade ambiental, pois sofre influência em função do tamanho da planta (TAKIKAWA, 2020). Através dessa variável é possível verificar o grau de proteção do solo, período de exposição, grau de cobertura e a redução ou aumento dos processos erosivos, que consequentemente darão uma boa visão das ações antrópicas na área da bacia do Rio Ibirapuitã.

Para a determinação dos mapas de uso e ocupação do solo foram utilizados os dados do MAPBIOMAS, da coleção 7, do ano 2021. Os dados matriciais foram inseridos no ArcGis para fazer a identificação das classes de uso e ocupação do solo inseridas na BHRI. Com o auxílio da legenda de classes disponibilizada pelo MAPBIOMAS, as respectivas classes encontradas foram classificadas. E posteriormente, foram calculadas as áreas e suas respectivas porcentagens para cada classe encontrada. Ribeiro, (2022) realizou um estudo para observar o comportamento do mapa de uso e ocupação do solo do Rio Mulato fazendo a classificação pixel a pixel e comparou com dados do MapBiomias e os resultados foram bastante satisfatório em ambos métodos. Na classificação foram analisadas 12 classes de uso e ocupação do solo sendo elas: formação florestal, silvicultura, campo alagado e área pantanosa, formação campestre, mosaico de usos, urbanização, áreas não vegetadas, afloramento rochoso, rio, lago e oceano, soja, arroz e outras

lavouras temporárias. Após isso, adotou-se a classificação da metodologia das classes proposto por Ross (1994) (Tabela 4).

Tabela 4 -Classes de uso e ocupação do solo e seus respectivos graus de fragilidade.

Classes de Uso e Ocupação	Classes de fragilidade	Valor
Cobertura Florestal Densa /Floresta Nativa	Muito baixa	1
Campos naturais	Baixa	2
Agricultura de ciclo curto e Pastagens	Média	3
Agricultura irrigada e Áreas desmatadas	Alta	4
Solo exposto e Áreas urbanizadas	Muito alta	5

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Para a realização dos mapas de fragilidade potencial e emergente foram realizados os cruzamentos dos respectivos mapas (declividade, solo, erosividade da chuva, uso e ocupação do solo) através das ferramentas do ArcGis, *Spatial Analyst* – *Overlay* – *Weighted Overlay*, onde consiste em atribuir pesos para cada variável conforme sua importância. Sendo que todo o procedimento realizado foi respeitando a metodologia proposta por Ross (1994). O modelo seguiu a hierarquização em cinco classes de fragilidade ambiental sendo elas: muito baixa – peso 1; baixa – peso 2; média – peso 3; alta – peso 4; e muito alta – peso 5.

No mapa de fragilidade potencial foram analisadas as variáveis sem ações antrópicas sendo as classes, de declividade, solos e erosividade da chuva da BHRI. Para determinar o mapa de fragilidade potencial a cada critério avaliado atribui-se pesos e importância, e por meio do método de combinação linear ponderada foram gerados os resultados.

O mapa de fragilidade emergente foi elaborado através do resultado obtido na fragilidade potencial com as informações das classes de fragilidade do uso e ocupação do solo. Ou seja, foi realizada a hierarquização das classes, atribuindo valores correspondentes aos graus de fragilidade de uso e ocupação, juntamente com o mapa de fragilidade potencial obtido, esse cruzamento de informações segue a proposta de Ross (1994). A partir dessa metodologia aplicada e com os mapas de Fragilidade Potencial e

Emergente foi possível realizar uma síntese dos diversos elementos que influenciam na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, possibilitando assim identificar as áreas consideradas frágeis e que necessitam de maior atenção na realização do planejamento ambiental.

Resultados e discussão

Os estudos em escala de bacias hidrográficas são de extrema importância e possuem diversos fatores que se analisados de forma combinada podem trazer informações sobre determinada região. Um fator considerado importante em escala de bacia para realizar o mapeamento de fragilidade ambiental é a declividade, pois permite observar, dependendo do grau de inclinação que a bacia hidrográfica apresenta, o comportamento do processo erosivo da região de interesse.

Nesse contexto, pode-se observar que a bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã possui uma declividade abaixo de 12% da sua área total (88,59%), que de acordo com Ross (1994) é caracterizada de fragilidade muito baixa e baixa. Outro número que chama atenção é de que apenas 3,16% da área total do estudo possui declividade acima de 20%, ou seja, apresenta uma classe de fragilidade alta e muito alta, conforme tabela 5. Estudos como Oliveira *et al.* (2019) ao analisar a declividade da bacia hidrográfica do Arroio

Pessegueiro, que fica próxima a bacia do presente estudo, verificou também uma declividade baixa, de 8 a 12%, evidenciando uma região mais plana.

De acordo com Dalmolin (2021), os resultados mostraram que as áreas mais vulneráveis à degradação ambiental são aquelas com declividades mais íngremes e cobertura vegetal reduzida, principalmente devido à atividade agrícola confirmando o estudo em questão.

A figura 2, apresenta visivelmente a classificação de fragilidade ambiental em relação a declividade conforme o seu grau (ROSS, 1994). Nota-se que a declividade acima de 30% apresenta um grau de fragilidade considerado muito alto e está localizado na região leste da cidade de Santana do Livramento-RS.

Com relação ao tipo de solo encontrado na BHRI, sendo este outro fator importante no estudo de fragilidade, a tabela 6 apresentou uma classe de fragilidade baixa de aproximadamente 0,58%, correspondendo a uma área de 462,915km² para um solo classificado como Latossolos Vermelhos Distróficos. Analisando a mesma tabela, foi possível verificar que a classe de fragilidade que representa uma porcentagem significativa de área da BHRI com aproximadamente 1348,78km², foi considerada média, destacando na sua totalidade o solo classificado como Argissolos Vermelhos Distróficos.

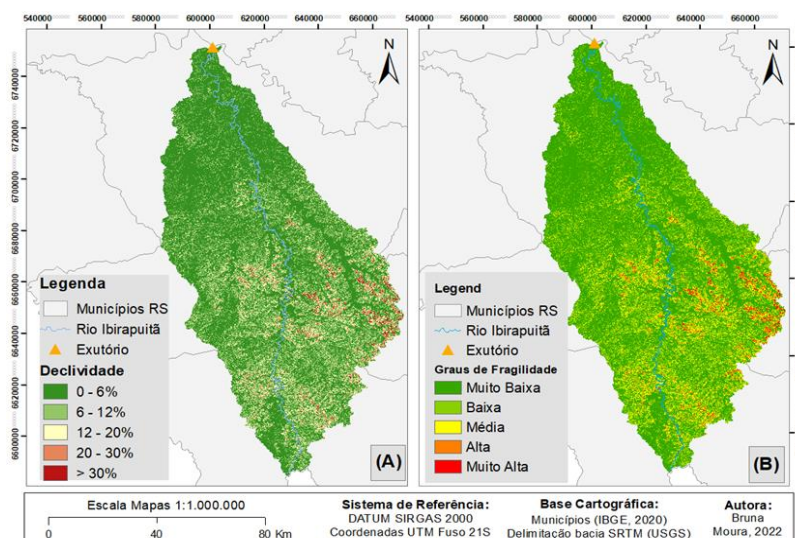


Figura 2 – Mapa de (A) declividade e (B) dos graus de fragilidade em relação a declividade, ambos da bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, conforme Ross (1994).

Tabela 5 – Classes de declividade para determinação da Fragilidade e as áreas correspondentes a cada classe encontrada no interior da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Classes de fragilidade	Classes de declividade	Área BH (km ²)	Área (%)
1 - Muito baixa	Até 6%	4889,65	61,23
2- Baixa	de 6 a 12%	2184,63	27,36
3 - Média	de 12 a 20%	659,08	8,25
4 - Alta	de 20 a 30%	182,21	2,28
5 - Muito alta	acima de 30%	69,49	0,87
Total		7985,06	100,0

Ainda na tabela 6, é possível verificar que solos correspondentes a fragilidade muito alta ganharam destaque na bacia, onde foram encontrados uma área total de 6594,78 km², sendo 937,44 km² de solos do tipo Planossolos Háplicos Eutróficos (11,74%), 5595,29 km² de solos do tipo Neossolos Litólicos Eutróficos (70,07%) e 62,53 km² de Plintossolos Háplicos Distróficos (0,78%) presentes na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã. De acordo com Santos (2022), que analisou a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do córrego Cachoeirinha verificou valores

expressivos de fragilidade alta e muito alta da região tendo como a pecuária e agricultura como a principal atividade econômica, o que, certamente, poderá contribuir para a degradação dos solos da bacia similar com a do Rio Ibirapuitã.

Ao realizar o mapa de fragilidade é possível verificar que a fragilidade muito alta ganha destaque na bacia correspondendo a 6594,78 km² o que representa 82,58% da área total (Figura 3).

Tabela 6 – Unidades de solo e suas respectivas áreas (km²), e classes de fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Classe de Fragilidade	Sigla	Unidades de Solo	Área BH (km ²)	Área (%)
2 - Baixa	LVd	Latossolos Vermelhos Distróficos	43,50	0,55
3 - Média	PVd	Argissolos Vermelhos Distróficos	1346,78	16,86
5 - Muito alta	Sxe	Planossolos Háplicos Eutróficos	937,44	11,74
5 - Muito alta	Rle	Neossolos Litólicos Eutróficos	5595,29	70,07
5 - Muito alta	FXd	Plintossolos Háplicos Distróficos	62,05	0,78
Total			7985,06	100,00

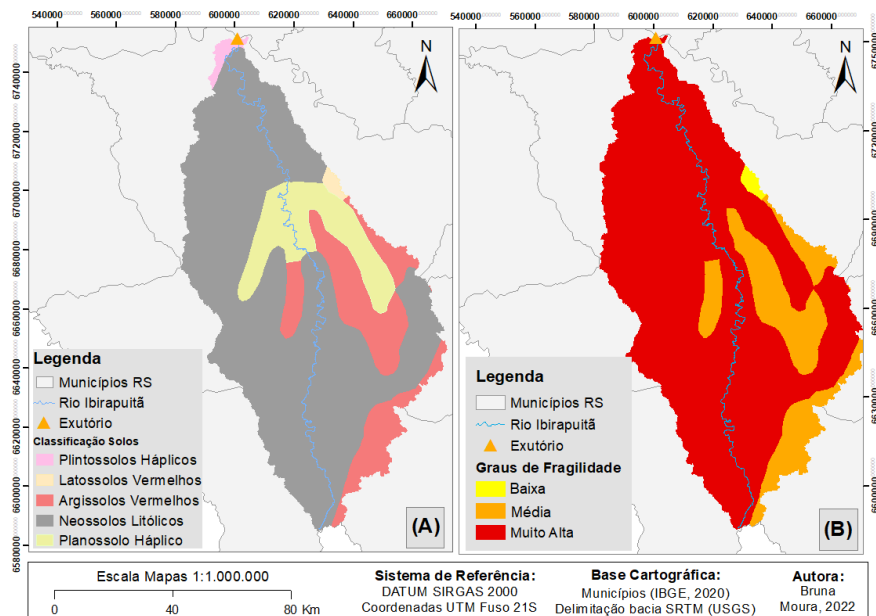


Figura 3 – Mapa (A) de solo e (B) dos graus de fragilidade em relação ao solo, ambos da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, conforme Ross (1994).

Bisognin (2012) ao realizar um estudo sobre a resistência a impactos ambientais quanto ao tipo de solo na bacia hidrográfica a montante do reservatório de Ernestinha, observou que as características do rio Ibirapuitã que se concentra a leste do reservatório citado, apresenta resistência média para impactos ambientais, possuindo solos com forte ou acentuada drenagem, erodibilidade moderada a forte e relevo ondulado, além de um solo de bom a regular para aptidão agrícola.

Na avaliação da erosividade da chuva na bacia foram adotadas 5 classes, conforme os fatores anteriores, porém, os resultados obtidos a partir da metodologia utilizada no estudo, enquadra toda a área da BHRI em uma única classe, com índices variando em torno de $9226,66 \text{ MJ mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ a $10572,50 \text{ MJ mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, sendo considerada como classe de erosividade muito alta, conforme a classificação de Santos (2008) (Figura 4).

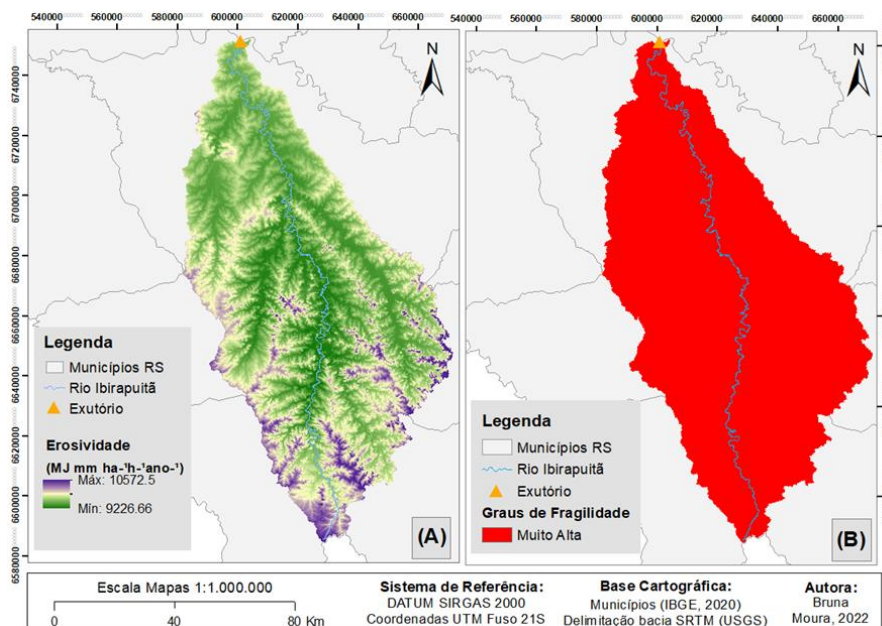


Figura 4 – Mapa (A) de erosividade da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, conforme metodologia de Mello *et al.* (2008) e (B) dos graus de fragilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã em relação a erosividade, conforme Santos (2008).

A metodologia aplicada na determinação da erosividade da chuva só foi utilizada devido à distribuição espacial das estações pluviométricas e pela ausência de dados das séries históricas de precipitação.

Para a análise do uso e ocupação do solo, fator de importância para o estudo devido a ser considerado subsídio básico de planejamento, por conta da identificação de diferentes paisagens possibilita a previsão e ampliação das áreas cultiváveis, determinando locais prioritários, possibilitando os mais diversos usos e ocupação do solo, como por exemplo, agricultura, pecuária, silvicultura entre outros (PADILHA, 2008). Sendo assim no estudo da bacia do Rio Ibirapuitã foi possível analisá-la de duas formas, na qual se destacam a ocupação natural, composta por florestas e campos, e áreas que sofrem com a ação antrópica como, por exemplo, o cultivo agrícola que varia entre pequena, média e grande escala.

A ocupação por florestas considerou a classificação de formação a cobertura florestal densa e floresta nativa, ocorrendo de forma expressiva em toda área da bacia, correspondendo 83,51% de uma área total de 6668,43 km², sendo classificada como classe muito baixa de fragilidade, segundo a metodologia de Ross (1994)

(Figura 5). Esse fato ocorre devido às áreas se encontrarem em locais que possuem declividades maiores, dificultando o acesso e não sendo adequadas para a agricultura, segundo Guadagnin (2015) áreas onde a silvicultura é predominante existe grande produção de lenha na região.

Outra variável que também se destaca na figura 7, são os corpos d'água correspondendo a 1,25% da área total da BHRI, porém a mesma não possui classificação de fragilidade referente a proposta por Ross (1994), isto porque corpos d'água não causam impactos. A agricultura irrigada e áreas desmatadas representam uma ocupação referente a 1064,69 km² da área total da bacia, representando 13,33%, sendo classificada como classe alta, onde apresenta grau de proteção muito baixa em função da sua característica de produção (Tabela 7).

A figura 5 apresenta uma área urbanizada e de solo exposto com grau de fragilidade considerado muito alto para a bacia (49,30 km²). Outras variáveis que também merecem destaque na classificação do grau de fragilidade para a Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã são as culturas do arroz e soja, que para região de estudo apresentam um grau de fragilidade ambiental considerado alto.

Tabela 7 – Uso e ocupação do solo e classes de fragilidade presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Ibitapuitã e suas respectivas áreas.

Classes de fragilidade	Classes de Uso e Ocupação	Área (km²)	Área (%)
-	Corpos d'água	99,53	1,25
	Cobertura Florestal		
1 – Muito baixa	Densa/	6668,43	83,51
	Floresta Nativa		
2 – Baixa	Campos naturais	101,5	1,27
	Agricultura de ciclo curto		
3 – Média	e	1,61	0,02
	Pastagens		
4 – Alta	Agricultura irrigada e	1064,69	13,33
	Áreas desmatadas		
5 – Muito alta	Solo exposto e	49,30	0,62
	Áreas urbanizadas		
Total		7985,06	100,0

A união dos atributos naturais como a declividade, o solo e a erosividade da chuva, possibilitaram determinar a fragilidade potencial, conforme Ross (1994). A tabela 8 apresenta o percentual e as respectivas áreas de cada classe de fragilidade potencial, destacando que a classe de fragilidade baixa e muito baixa não foi encontrada na área da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Na tabela 8, é possível verificar que a classe de fragilidade alta apresentou um percentual significativo na área de estudo representando 83,66%, sendo equivalente a 6679,3 km² da área total da bacia. Seguida pela classe de fragilidade média com 14,22% de percentual para uma área de 1135,7 km², nessa região a classe de declividade varia de 6% a 12% associados com a presença de Plintossolos.

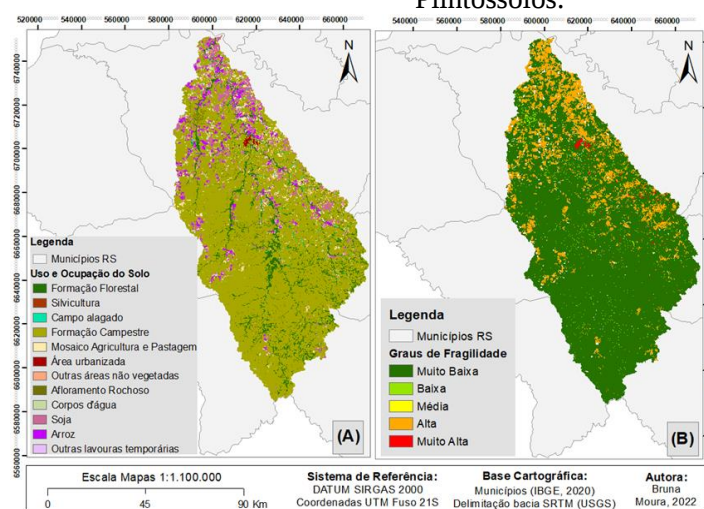


Figura 5 – Mapa de (A) uso e ocupação do solo e (B) dos graus de fragilidade, ambos da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã, conforme Ross (1994).

Tamiosso (2011), observou também diferentes tipos de uso da terra, onde se destacavam o cultivo da soja, arroz, trigo e milho. Essas culturas necessitam de água para sua irrigação, principalmente no que se refere a soja e o arroz,

ocasionando assim maior aporte de sedimento, ou seja, contribuem para o assoreamento e diminuição da profundidade, comprometendo assim os diversos usos (MOREIRA *et. al.*, 2019).

Tabela 8 - Áreas e percentuais correspondentes a fragilidade ambiental potencial da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Classes de fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1 - Muito baixa	0,0	0,0
2 – Baixa	0,0	0,0
3 – Média	1135,7	14,22
4 – Alta	6679,3	83,66
5 - Muito alta	170,06	2,12
Total	7985,06	100,0

A classe de fragilidade potencial com maior representatividade é a denominada de alta estando distribuída ao longo de toda a bacia, desde a parte mais alta até ao exutório do BHRI (Figura 6). Também é possível encontrar 70,85% dos solos presentes na área da bacia principalmente os Plintossolos e Neossolos, sendo esses solos considerados pouco evoluídos por terem pouca profundidade, e todas essas características combinam com a declividade alta e são determinantes para a classificação de uma fragilidade forte, na qual na área de estudo se distribui uniformemente em toda a região da bacia hidrográfica (ROBAINA *et al.*, 2017).

A partir dos resultados obtidos em relação a fragilidade potencial que a Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã apresenta, pode-se inferir que a mesma se encontra instável devido a variação da declividade, da erosão hídrica alta e predominância de solos com profundidade baixa. Shimizu (2000) verificou os solos da região e observou que os mesmos apresentavam essas características. Sendo assim, as áreas que apresentam fragilidade maior

necessitam de um cuidado especial no que se refere ao uso e conservação do solo.

Vargas (2021) ao realizar um estudo na área observou que grande parte da região conta com produtividade agrícola em áreas de preservação sem nenhum método de conservação do solo, facilitando para que a área esteja sobre alerta quanto a sua fragilidade.

Na tabela 9 podem-se verificar as áreas e as porcentagens das classes de fragilidade ambiental emergente da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã destacando-se que não foi encontrada a classe de fragilidade muito baixa na área em estudo. Também foi possível observar para a fragilidade ambiental emergente que a classe média apresentou o maior percentual (76,96%) para área do estudo, o que representa uma área de 6145,5 km². Seguida da classe de fragilidade muito alta com área de 6,2 km² para um percentual de 0,08%.

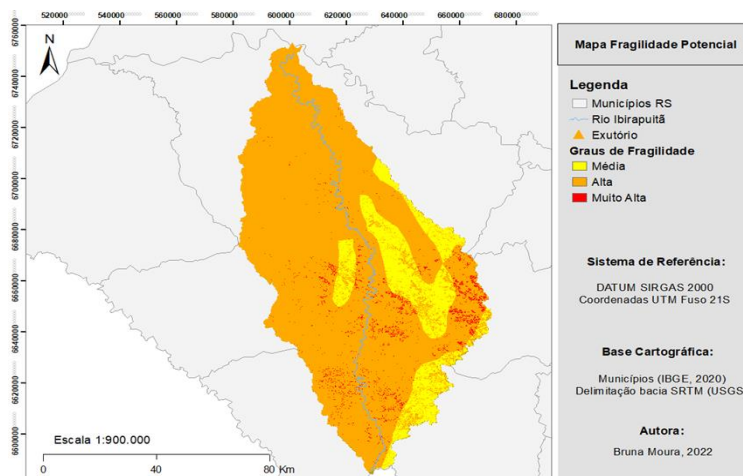


Figura 6 - Mapa de fragilidade ambiental potencial da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã bem como seus graus de fragilidade.

Tabela 9 - Áreas e percentuais correspondentes a fragilidade ambiental emergente da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã.

Classes de fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1 - Muito baixa	0,0	0,0
2 - Baixa	18,3	0,22
3 - Média	6145,5	76,97
4 - Alta	1815,06	22,73
5 - Muito alta	6,2	0,08
Total	7985,06	100,0

Com base no mapa da figura 7, a classe média de fragilidade constitui a maior área da bacia, contendo todos os tipos de solos identificados anteriormente. Embora a fragilidade ambiental emergente apresente em sua totalidade a classificação média, se torna necessário tomar alguns cuidados em relação ao uso do solo nesta classe, visto que a fragilidade potencial identificada anteriormente apresentou classe alta.

Os resultados indicam que a bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã apresenta alta fragilidade ambiental, especialmente nas áreas de encosta, onde a declividade e a cobertura vegetal são fatores limitantes para a sustentabilidade ambiental. A análise também mostrou que as áreas de baixa fragilidade estão associadas a solos mais desenvolvidos e planícies aluviais (Amaral et. Al 2021).

Seguido da classe média, a fragilidade ambiental emergente que mais se destaca na BHRI é a classificada como alta, possuindo uma área de 1815,06 km², representando 22,73% da área total.

A bacia nesta região apresenta alta produtividade agrícola, principalmente das culturas de arroz e soja.

A alta produtividade agrícola é ocasionada pelo cultivo na época de maior ocorrência de chuvas, onde nesta região a permeabilidade do solo, o clima e os demais atributos da bacia, sofrem devido a alteração sazonal do nível do lençol freático, dificultando a adoção de um adequado manejo do solo (WREGE et al., 2016) conforme apresenta-se na figura 7.

Na figura 7, apenas 6,2 km², representando 0,08% da área total da bacia apresentou classificação muito alta de fragilidade ambiental emergente. Isto ocorre devido a existência de uma sazonalidade na produção agrícola, principalmente em função do clima, na qual a variável chuva é predominante na região no período em que o solo não está exposto, ou quando é ocupado por outras atividades agrícolas como soja e feijão, a classe de fragilidade ambiental emergente apresenta diminuição, ocasionando assim o aumento da classe de fragilidade média em demais áreas.

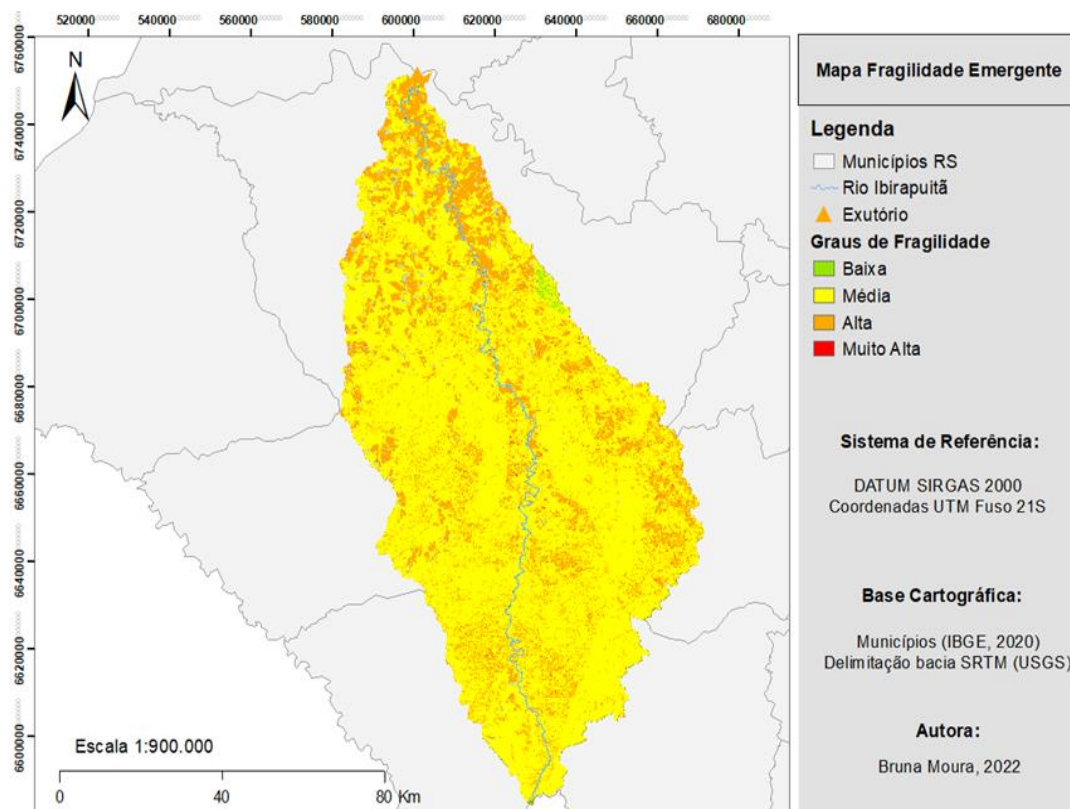


Figura 7 - Mapa de fragilidade ambiental emergente da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã bem como seus graus de fragilidade.

O solo exposto também é um fator que interfere no processo de erosão, onde vale destacar que nesta região concentram-se os solos classificados como de forte e muito forte (Neossolos e Plintossolos) requerendo para região a adoção de práticas conservacionistas e a implantação de reflorestamento, possibilitando uma maior preservação dos solos da BHRI. Os autores como Nascimento (2021) e Silva (2021) enfatizam a importância de considerar a fragilidade ambiental nas tomadas de decisão relacionadas à gestão ambiental da bacia hidrográfica.

Neste estudo e diversos outros como Silva (2016); Megiato (2011) e Vasconsellos (2017), a fragilidade ambiental em bacias que apresentam características similares à área de estudo, demonstrando a importância de trabalhos relacionados à temática, pois contribuíram para o conhecimento da realidade ambiental de cada área. Além disso, proporciona informações e dados atualizados na região, com a finalidade de auxiliar na gestão e planejamento de políticas públicas compatíveis com a sua realidade, sendo que apresenta algumas restrições no que se refere a utilização do solo, gerando alternativas mais adequadas para o seu uso e ocupação.

Conclusões

A metodologia de Ross (1994) se mostrou eficaz na elaboração deste estudo, pois, permitiu a elaboração de uma cartografia detalhada da bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã, evidenciando aspectos que devem ser priorizados, quando se trata da preservação do ambiental e da relação harmônica do homem com a natureza.

Os resultados mostraram que a declividade foi o fator mais importante na determinação da fragilidade ambiental da bacia, enquanto a vegetação e o uso do solo também desempenharam um papel importante.

A análise espacial indicou que as áreas de alta fragilidade estão localizadas nas partes mais elevadas da bacia, enquanto as áreas de baixa fragilidade estão nas planícies aluviais do rio.

A discussão realizada ao longo deste trabalho permitiu identificar em sua maior totalidade uma fragilidade potencial alta e fragilidade emergente média na Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã devido à falta de

gestão e planejamento, principalmente em função do uso e ocupação do solo associados com os dados de declividade e unidades de solos que a compreendem.

O uso do geoprocessamento foi uma ferramenta essencial para identificação e análise das áreas que apresentam maiores graus de fragilidade, assim como para a elaboração dos mapas que possibilitou de forma visual e clara onde se encontravam áreas que necessitavam de maiores cuidados.

A aplicação da metodologia proposta por Ross (1994) de fragilidade ambiental pode ser útil para orientar a tomada de decisões e a implementação de políticas de gestão ambiental na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã e outras regiões semelhantes.

Referências

- Almeida, J. L.; Silva, V. A. R.; Santos, J. S.; Nascimento, J. R.; Araujo, M. L.; Pyles, M. V.; Silva, F. B. O cenário de fragilidade ambiental do baixo curso do rio Mearim. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, (2020).
- Amaral, A. L. (2021). Environmental fragility index applied to the Ibirapuitã River watershed, southern Brazil. *Journal of Environmental Management*, 290, 112618.4. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112618.
- Anjinho, P. da S., Barbosa, M. A. G. M., Costa, C. M., Mauad, F. F. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. *Land Use Policy*. 2021. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105755
- Arana, A. R. A.; Ramos, A. P. M.; Osco, L. P.; Gonçalves, D. L.; Bezerra, J. P.; Leal, A. C. Gestão das águas e planejamento ambiental: áreas de preservação permanente no manancial do alto do rio Santo Anastácio. *Revista Brasileira de Geografia e Física* 11, (2018).
- Belato, L. S.; Serrão, S. L. C.; Dias, R. P., 2019. Diagnostico da fragilidade ambiental na Bacia do Submédio Tocantins: UHE Tucuruí. *Natural Resources*, 9, 28-37
- Bisognin, R. P. Análise da Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica à Montante do Reservatório de Ernestina/Rs. 2018. 12p. *Geografia, Ensino & Pesquisa*, Vol. 22

- (2018).
- Bonetti, I. Radiografia da Agropecuária Gaúcha. Departamento de Políticas Agrícolas e Desenvolvimento Rural, 2020.
- Cavalcante, J. C.; Lima, A. M. M.; Silva, J. C. C.; Holanda, B. S.; Almeida, C. A. Fragilidade ambiental potencial e emergente da bacia do rio Mocajuba – PA. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15, (2022).
- Constantini, M. L., Zaccarelli N., Mandrone S., Rossi D., Calizza, E., Rossi, L. NDVI spatial pattern and the potential fragility of mixed forested areas in volcanic lake watersheds. *Forest Ecology and Management*, 2012 p. 133-141.
- Dalmolin, R. S. D., de Souza, E. D., Jardim, L. F., Mariani, V. C., & Amaral, A. L. (2021). Environmental fragility index applied to the Ibirapuitã River watershed, southern Brazil. *Journal of Environmental Management*, 290, 112618.
- Duque, M. F. C. A. O contributo da Gestão de Recursos Humanos para a Sustentabilidade Ambiental das Empresas Portuguesas: uma reflexão. 2011. Dissertação de Mestrado.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Acesso em 11 de set. de 2022 Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104>.
- Farias, J. F. Aporte teórico e metodológico da geocologia das paisagens para os estudos em bacias hidrográficas. *Revista Programa de Pós-Graduação em Geografia*, 11, 01 (2020).
- Gonçalves, E. S. O Uso de Geotecnologias na Construção das Relações entre as Mudanças na Paisagem Rural da Bacia do Rio São João-RJ e a Dinâmica Socioeconômica Regional. 2011. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado. Departamento de geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- Kappes M. S., Papathoma-Köhle M., Keiler M. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicatorbased methodology. *Applied Geography* (Sevenoaks, England) 2012; 32(2): 577-590. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002>.
- Leite, E. F. Caracterização, diagnóstico e zoneamento ambiental: o exemplo da Bacia Hidrográfica do Rio Formiga-TO. 2011.
- Lima, S. T.; Souza, J. B. O Geoprocessamento Aplicado na Identificação de Áreas com Susceptibilidade a Movimento de Massas no Parque das Mangabeiras em Belo Horizonte –MG. *Revista e-Scientia UniBH*, V.1, n.1, 2008.
- MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 10 de set. de 2022. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR
- Machado, M. D. A fragilidade ambiental e suas relações com a vulnerabilidade social em São Sebastião (litoral norte de São Paulo): um enfoque na bacia do córrego Mãe Isabel. *CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem*, 9, 42-62, 2013.
- Megiato, E. I. Análise da Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas, RS. Programa de Pós-Graduação em Geografia UFRGS, p. 103 2011
- Mello C. R., Viola M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37:37-44. (2013)
- Mira, Í. R. C.; Carvalho, D. S.; Souza, D. S. L.; Silva, M. L. Vulnerabilidade Ambiental da Sub-Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15, (2022).
- Moreira, J. G.; Oppelert, M.; Maciel, R. G. O Dilema do Pampa ou Campo Natural/Rangeland: Complexidade do desenvolvimento devido à concorrência pela terra e os recursos naturais. In: VIII Encontro da rede de estudos rurais, 2019. Anais... Florianópolis, SC: REDES, 2019.
- Nandy, S., Sindh, C., Das, K.K., Kingma, N. C., Kushwaha, S. P. S. Environmental vulnerability assessment of the eco-development zone of Great Himalayan National Park, Himachal Pradesh, India. *Ecological Indicators*. 57:182–195. 2006.
- Padilha D. G. Geoprocessamento aplicado na caracterização da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Grande - RS. Dissertação - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, p. 87, 2008.
- Santos, M.; Souza, C. A.; Sousa, J. B.; A fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do córrego Cachoeirinha, município de Cáceres – Mato Grosso. *Reserash Society and Development*, v. 11, n. 10
- Ribeiro, K. V. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio

- Mulato (PI): Uma análise integrada. *Ciência Geográfica – Bauru – XXVI – (4) 2022*. DOI: <https://doi.org/10.57243/26755122.XXV14003>.
- SEMA (Secretaria Estadual do Meio Ambiente). Serviços e Informações. Disponível em: Acesso em: 26 de jul de 2022.
- Shimizu, J. Y. Primeira aproximação na indicação de eucaliptos para produção de madeira na região de Quará, RS. *Bol. Pesq. Fl.*, Colombo, n.40 2000.
- Silva, F. L.; Fushita, A. T.; Santino, M. B. C.; Bianchini, I. J.; Veneziani, J. C. T. Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, históricos e estratégias. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, (2021).
- Silva, M. D. Estudo da dinâmica da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, RS. Tese, Programa de Pós-Graduação em Geografia - UFBH, pg 55. 2016.
- Sutil, S. C.; Gonçalves, J. A. C.; Vieira, E. M. Análise comparativa da fragilidade ambiental da bacia do rio Piracicaba a partir da aplicação de dois modelos metodológicos: suporte para o estabelecimento e proposição de Corredores Ecológicos. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, (2020).
- Spörl C.; Ross J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *GEOUSP. Espaço e Tempo*, São Paulo, 15. 39-49, 2004.
- Ross, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*. São Paulo, 8, 2004.
- Robaina, L. E. S.; Kormann T. C.; Wiggers, M. M.; Sccoti, A. A. V. Análise espaço-temporal das ocorrências de inundações e movimentos de massa no município de Caxias do Sul, RS. *Ciência e Natura.UFSM – RS*. p 159-172, 2017.
- Takikawa, B. Y. Proposta metodológica para elaboração de um indicador de fragilidade ambiental para fragmentos florestais. *Revista do Departamento de Geografia* 41 2020.
- Tamiosso, C. F. Análise de Fragilidades Ambientais aplicada à Gestão da Qualidade das Águas: Estudo de caso da Bacia do Rio Santa Maria, RS. 2011. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Tavares J. A. Fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Punaú (RN) e área litorânea adjacente Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN; 2006. 178p.
- Teixeira T. M. A. Fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio São João de Tiba, Extremo sul da Bahia. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, (2021).
- Trentin R, Robaina L. E. S. Unidades Geoambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Itu – Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia – USP*. 2012. (23), p. 267-287.
- Tucci, C. E. M. Impacto da mudança da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 2 1 1997.
- Vargas, D. P., de Paula, J. C. R., Trindade, J. P., & de Almeida, T. A. (2021). Assessment of the environmental fragility of the Ibirapuitã River watershed in the Pampa biome, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(6), 355. DOI: <http://10.5433/1679-0359.2020v41n2p661>
- Vasconcellos, B. N. Geoprocessamento aplicado na análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Pardo, RS. Programa de Pós-graduação em Geomática UFSM, 15 2013.
- Wregue, M. S.; Fritzsons E.; Caramori, P. H.; Ricce, W. S.; Radin, B.; Steinmetz, S.; Reisser, C. J.; Regiões com similitude de comportamento hídrico no sul do Brasil. *RAEGA, Espaço Geográfico em Análise*, 38, 365-384, 2016