

FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URU (GOIÁS): COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS

Rosana Márcia da Costa Silva Herculano¹
José Carlos de Souza²

Resumo: As Bacias hidrográficas são palco de interações bióticas e abióticas, portanto, é importante o conhecimento das suas potencialidades, fragilidades, para uso do ambiente, respeitando suas limitações. O objetivo do trabalho foi avaliar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Uru, Goiás, comparando o modelo tradicional de álgebra de mapas com o método multicritério AHP. Foram mapeadas fragilidades ambientais das variáveis solo, declividades, uso e cobertura, seguida pelo cruzamento das bases, gerando dois mapas de fragilidade, das médias dos atributos e pelo método multicritério. Os resultados indicaram predominância das fragilidades baixa e média, relacionadas às características morfométricas, pedológicas, a relevos aplainados e Latossolos. Quanto ao quantitativo de área, a classe baixa apresentou valores próximos em ambos modelos, as demais registraram resultados distintos, as classes alta e muito alta, indicaram redução no modelo AHP. Para aprimoramento das análises, sugere-se incremento de variáveis, que interferem nos níveis fragilidade ambiental, ao método multicritério.

Palavras-chaves: Modelagem Ambiental; Cerrado; Agropecuária; Análise Multicritério.

ENVIRONMENTAL FRAGILITY OF THE URU RIVER HYDROGRAPHIC BASIN (GOIÁS): COMPARISON BETWEEN MODELS

Abstract: Hydrographic basins are the juncture for biotic and abiotic interactions; therefore, it is important to know the potential, weaknesses, for use of the environment, concerning its boundaries. This study aims to evaluate the environmental fragility of the Uru river basin, Goiás, comparing the traditional map algebra model with the AHP multicriteria method. Environmental fragilities of soil variables were mapped, slopes, usage and shield were mapped followed by the intersection of the bases, engendering two attribute feebleness average maps, by the application of the multicriteria method. The results indicated a low-medium fragilities predominance, morphometric and pedological conditions characteristics related to trodden respites and Latosols. Therefore, the quantity of area, presented Low class had similar values in models, the other register ended up in different fallouts the High and Very High classes indicated a reduction in the AHP model. To enhance the

¹ Mestre em Geografia pela Universidade Estadual de Goiás (UEG) Campus Cora Coralina. Email: rosanaherculano2010@gmail.com

² Professor do curso de Geografia da Universidade Estadual de Goiás (UEG) Campus Anápolis. Email: jose.souza@ueg.br

analyses, it is suggested to increase the variables, which interfere in the levels of environmental fragility, using the multicriteria method.

Keywords: Environmental Modeling; Cerrado; Agriculture; Multicriteria Analysis.

INTRODUÇÃO

No processo de planejamento de gestão em bacias hidrográficas é preciso considerar a fragilidade dos ambientes naturais, que podem ser maiores ou menores em função de suas características genéticas e, que qualquer alteração dos componentes do ambiente, provocadas pelas ações humanas, podem comprometer a funcionalidade do sistema bacia, evidenciando impactos ambientais negativos e/ou processos de degradação dos recursos naturais (SPÖRL; ROSS, 2004; ROSS, 2009).

No contexto das discussões sobre fragilidade ambiental, Ross (1994) e Amaral e Ross (2009) afirmam que os ambientes naturais apresentam uma fragilidade potencial onde há naturalmente algum grau de fragilidade e estes, quando submetidos às constantes e intensas alterações em razão da intensificação das intervenções humanas, provocadas pelo complexo desenvolvimento tecnológico, científico e econômico, evoluem para a fragilidade emergente.

Para Ross (1994) a fragilidade é a vulnerabilidade natural do ambiente provocada por suas condições genéticas, que pode ser amplificada em decorrência das interferências humanas no equilíbrio dinâmico. Crepani et al. (2001) ainda afirma que a atuação do homem sobre o ambiente, sem o prévio conhecimento do equilíbrio dinâmico de seus componentes, bem como de sua estrutura, pode desencadear situações desastrosas do ponto de vista ecológico e econômico.

É importante considerar que as bacias hidrográficas, por serem importantes ambientes sistêmicos, devem ser estudadas sob a ótica da necessidade de se mapear os níveis de fragilidade potencial e emergente. Diante do contexto, destaca-se que a análise integrada da paisagem se configura como um importante método para se entender a dinâmica de funcionamento do ambiente natural, pois permite estudos que consideram as inter-relações dos atributos naturais e os processos de ocupação e apropriação do território (ROSS, 1994; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014).

Outro instrumento que possibilita grandes contribuições ao processo de identificação das fragilidades ambientais são as modelagens, uma vez que estas resultam em produtos que podem ser utilizados no planejamento ambiental e que são produzidas por meio de dispositivos tecnológicos que possibilitam avaliar as potencialidades do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando suas características naturais com suas restrições, definindo áreas mais frágeis e que merecem maior atenção, uma vez que sua utilização de forma inadequada pode resultar no comprometimento de todo o sistema (VALLE et al., 2015; AMORIM et al., 2021).

As modelagens ambientais se aplicam muito bem a estudos sobre bacias hidrográficas, por serem estas, ambientes sistêmicos, onde os componentes ambientais e antrópicos são interdependentes, dinâmicos e provocam trocas constantes de matéria e energia (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014; AZEVEDO; GOMES; MORAES, 2016). Em bacias hidrográficas nas quais ocorrem atividades ligadas ao agronegócio, que se utilizam de extensas áreas para cultivos agrícolas e

pastagens plantadas, verificam-se mudanças importantes na paisagem, e, neste caso, os modelos ambientais podem contribuir na identificação de áreas fragilizadas, com potencial a ocorrência de degradação do solo e dos recursos hídricos.

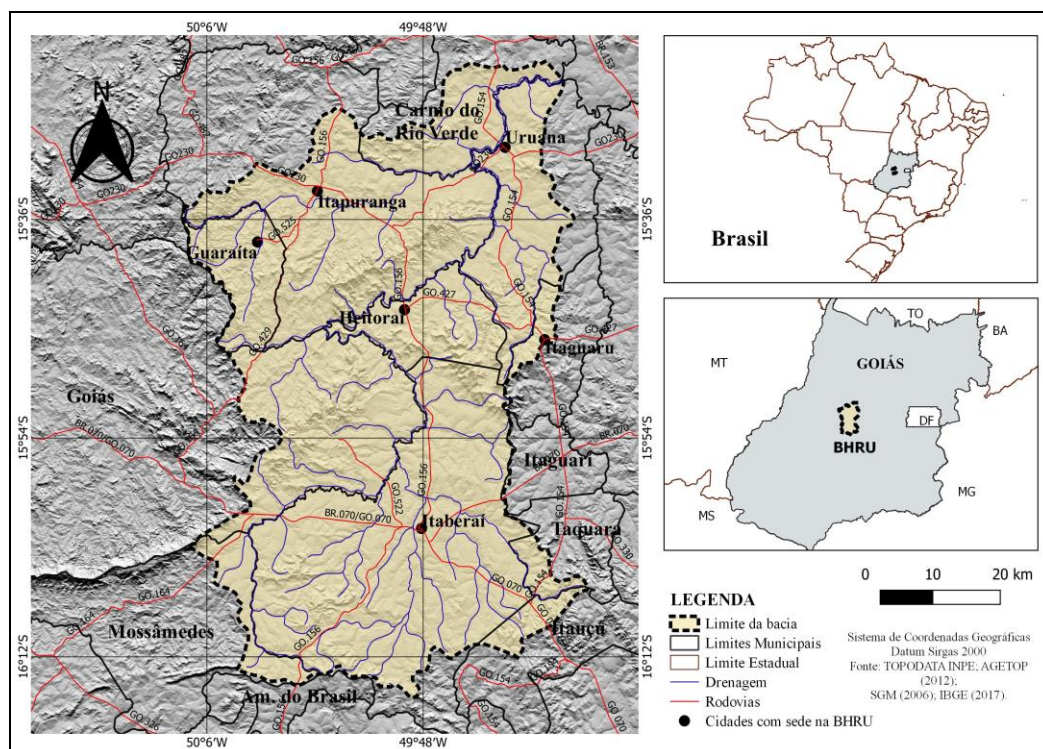
Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Uru (BHRU), localizada no estado de Goiás, a partir de uma abordagem comparativa entre um modelo tradicional de álgebra de mapas, que gerou o mapa das médias dos atributos, com o modelo obtido pelo incremento de técnicas de análise multicritério. A BHRU localiza-se em região de continuas e significativas alterações em função da implementação das atividades do agronegócio, induzidas pelas características do meio físico da região que apresenta relevos predominantemente de ondulado a plano, com grande disponibilidade hídrica e com formações de solo que permitem a introdução de variados cultivos.

MATERIAL E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A BHRU está localizada entre as coordenadas geográficas 16°16'00"; 15°20'00" de Latitude Sul e 49°36'00"; 50°08'00" de Longitude Oeste (Figura 1). A bacia ocupa uma área de 3.868,91 km² e seu território é composto pelos municípios de Americano do Brasil, Mossâmedes, Goiás, Itaberaí, Taquaral de Goiás, Itauçu, Itaguarí, Itaguaru, Heitoraí, Itapuranga, Guaraitá, Uruana e Carmo do Rio Verde.

Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Uru (Goiás)



Fonte dos dados: AGETOP (2012); SGM (2006); IBGE (2017). Elaboração: Herculano, 2021

Considerando a classificação climática de Köppen (1948), o tipo climático que ocorre na região é o clima tropical úmido (A), com inverno seco e chuvas máximas

de verão (w). De acordo com a série histórica do INMET para o município de Itaberaí, referente ao período de 1981 a 2010, entre os meses de outubro e abril, predominam a ocorrência das chuvas, com médias anuais entre 1.535mm e 1.425mm. As médias mensais das temperaturas máximas variam entre 30°C e 33°C e as mínimas, entre 15°C e 20°C.

Quanto aos aspectos do meio físico a bacia está localizada na Província Estrutural do Tocantins, composta por estruturas de diversas idades, do Arqueano ao Neoproterozóico, com espessas sequências de rochas supracrustais dobradas e metamorfozadas e por terrenos formados por fragmentos arqueanos de composição granítico-gnáissica, que abrange ainda sequências vulcanossedimentares e por terrenos granulizados (LACERDA FILHO et al., 1999). Sobre essa composição geológica se desenvolveram geoformas, com fraco ou sem controle estrutural, que permitiram dissecação e aplainamentos e áreas com forte controle estrutural se apresentando como estruturas dobradas (GOIÁS, 2006). As elevações da bacia variam entre 500m a 1104m, com média de 724m, sendo que aproximadamente 70% da área apresentam elevações entre 600m e 780m.

LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS

Para mapear os tipos de solos que compõem a BHRU, foi utilizada a base de dados vetorial da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER, 2017), disponível em <http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/solos> e a descrição das tipologias se deu com base em Reatto et al. (2008) e Brasil (2018).

O mapeamento das classes de uso e cobertura do solo foi realizado a partir de imagens do sensor OLI (*Operational Land Imager*), do satélite Landsat 8, disponibilizada pelo *United States Geological Survey* (USGS), referente a data de 07/05/2021, com resolução espacial de 30 metros. Foi gerada uma composição colorida R2, G5 e B6. A classificação da imagem ocorreu no *software* QGIS 3.16, com utilização do *plugin Semi-Automatic Classification* (SCP). Para validação das informações obtidas e verificação da exatidão da classificação supervisionada, por meio do coeficiente kappa, a análise de acurácia foi realizada através da ferramenta *postprocessing/acuracy*, do referido *plugin*.

O mapa de declividades da bacia foi produzido a partir do modelo digital de elevação *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros. As imagens SRTM são disponibilizadas pelo *United States Geological Survey* (USGS), na plataforma <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

APLICAÇÃO DOS MODELOS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL

As variáveis utilizadas nos modelos foram reclassificadas de acordo com as propostas metodológicas de Ross (1994), Spörl e Ross (2004) e Amaral e Ross (2009) e todo o processamento ocorreu no *software* QGIS 3.16.

Com base no mapeamento dos tipos de solos, foi estruturada uma reclassificação utilizando a ferramenta *r.reclass* do QGIS, que identificou cinco níveis de fragilidade que relacionadas aos solos com ocorrência na BHRU, gerou uma escala hierárquica numérica, onde os Latossolos foram correlacionados à classe de fragilidade muito baixa – 1, a classe 2 não se correlacionou aos solos da área, os Argissolos à fragilidade média – 3, os Cambissolos à fragilidade alta – 4 e os Neossolos à muito alta – 5. Em seguida a base foi convertida de base vetorial para *raster*, na resolução 30x30m.

As declividades foram classificadas em graus de fragilidade, para os quais foram gerados valores de 1 a 5, onde a classe de 0 – 6% refere-se ao nível de fragilidade muito baixo, com valor 1, de 6 – 12% ao baixo, com valor 2; 12 – 20% ao nível médio, com valor 3; de 20 – 30% ao nível alto de valor 4 e > 30% ao nível muito alto com valor 5.

O mapa de fragilidades em relação ao uso e cobertura do solo foi gerado a partir da reclassificação do mapeamento produzido para essa variável, considerando o grau de proteção do solo, gerando 5 níveis de fragilidades, onde o Cerrado - formação florestal e hidrografia, que oferecem proteção muito alta tem valor 1; o Cerrado - formação savânica, com proteção alta, valor 2; pastagens, proteção média apresentam valor 3; agricultura, proteção baixa, valor 4 e áreas urbanas e solo exposto, proteção muito baixa apresentam valor 5.

A partir das fragilidades das variáveis, o passo seguinte foi o desenvolvimento das modelagens. O **primeiro modelo aplicado** foi a **integração dos mapas das classes de fragilidade** do solo, fragilidade em relação às declividades e grau de proteção em relação ao uso e cobertura do solo, utilizando como ferramenta a calculadora *raster* e a técnica de álgebra de mapas, no *software* QGIS 3.16. Os valores das imagens *raster* das três variáveis foram convertidos em intervalos de 0 a 1. Assim, efetuou-se a soma dos valores dos pixels das imagens que resultou numa imagem síntese também com valores entre 0 e 1. Isso resultou, como produto, a identificação de cinco categorias de fragilidade com os seguintes parâmetros: (0,0 e 0,2) Muito Baixa, (0,2 – 0,4) Baixa, (0,4 – 0,6) Média, (0,6 – 0,8) Alta e (0,8 - 1) Muito Alta.

O **segundo modelo aplicado** foi com a utilização do **método de Análise Hierárquica de Processos** (*Analytic Hierarchy Process*), que compreende uma modelagem para elaboração de indicadores a partir da inter-relação de variáveis. Esse procedimento de acordo com Padilha, Trevisan e Cruz (2014), tem como característica a possibilidade de contemplar a diversidade natural em *n* fatores, atribuindo a eles pesos de importância dentro da composição do modelo.

A aplicação do método AHP seguiu as seguintes etapas: atribuição de hierarquia que determinou a relação de importância entre as variáveis, seguida de obtenção de pesos de ponderação, por revisão de literatura, tendo por base análises e comparações entre trabalhos que se utilizaram do método AHP e atribuíram pesos às variáveis em questão; normalização dos dados das variáveis; geração da carta de fragilidade ambiental, a partir da Combinação Linear Ponderada - WLC, que é a técnica de agregação dos dados, onde os fatores homogeneizados são multiplicados por seus respectivos pesos e somados para obtenção do resultado final, conforme a seguinte equação:

$$FA = (Us * Pw1) + (De * Pw2) + (Pe * Pw3)$$

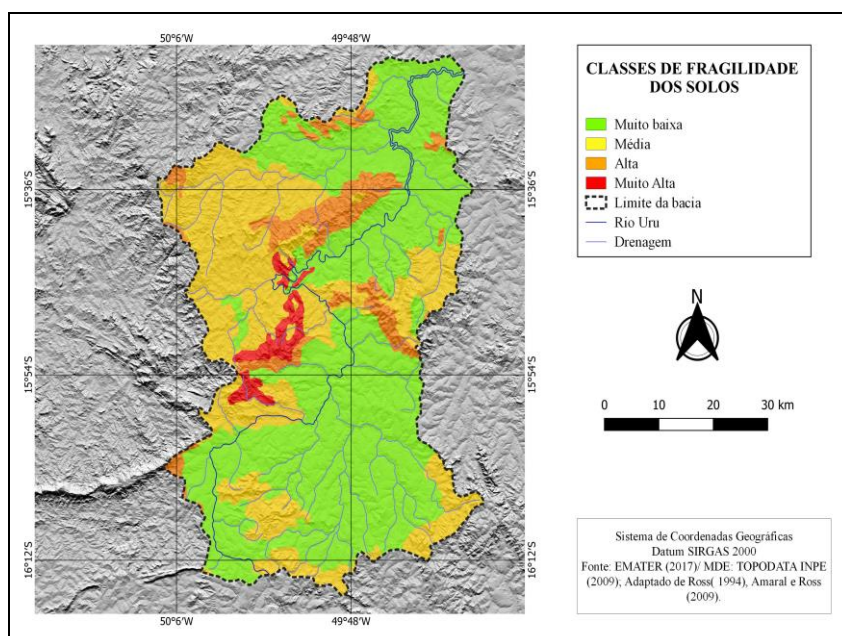
Onde: FA = Fragilidade Ambiental; Pw = Pesos; Us = Uso e cobertura do solo; De = Declividade e Pe = Solo

Destaca-se que, em relação às variáveis selecionadas na pesquisa, estabeleceram-se a seguinte hierarquia e pesos: uso do solo – 0,45, declividade – 0,35 e solo – 0,20, considerando que a soma dos pesos é igual a 1,00.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No mapa (Figura 2) são apresentadas as classes de fragilidades dos solos da BHRU e na Tabela 1 a descrição de cada classe em relação ao tipo de solo, aspectos texturais e áreas de cada classe. A partir do conceito de fragilidade, e entendendo que o mesmo se aplica aos variados elementos do meio físico, Ross (1994) classifica os níveis de fragilidade do solo, em relação ao escoamento das águas pluviais, em cinco classes hierárquicas. Fundamentado nessa classificação, foi possível identificar na BHRU quatro classes de fragilidade: muito baixa, média, alta e muito alta.

Figura 2. Mapa de reclassificação dos tipos de solos para classes de fragilidades dos solos na BHRU



Fonte dos dados: Ross (1994), Amaral e Ross (2009). EMATER (2017). Organização: Herculano, 2021

Tabela 1. Classes de fragilidade em relação aos tipos de solo na BHRU

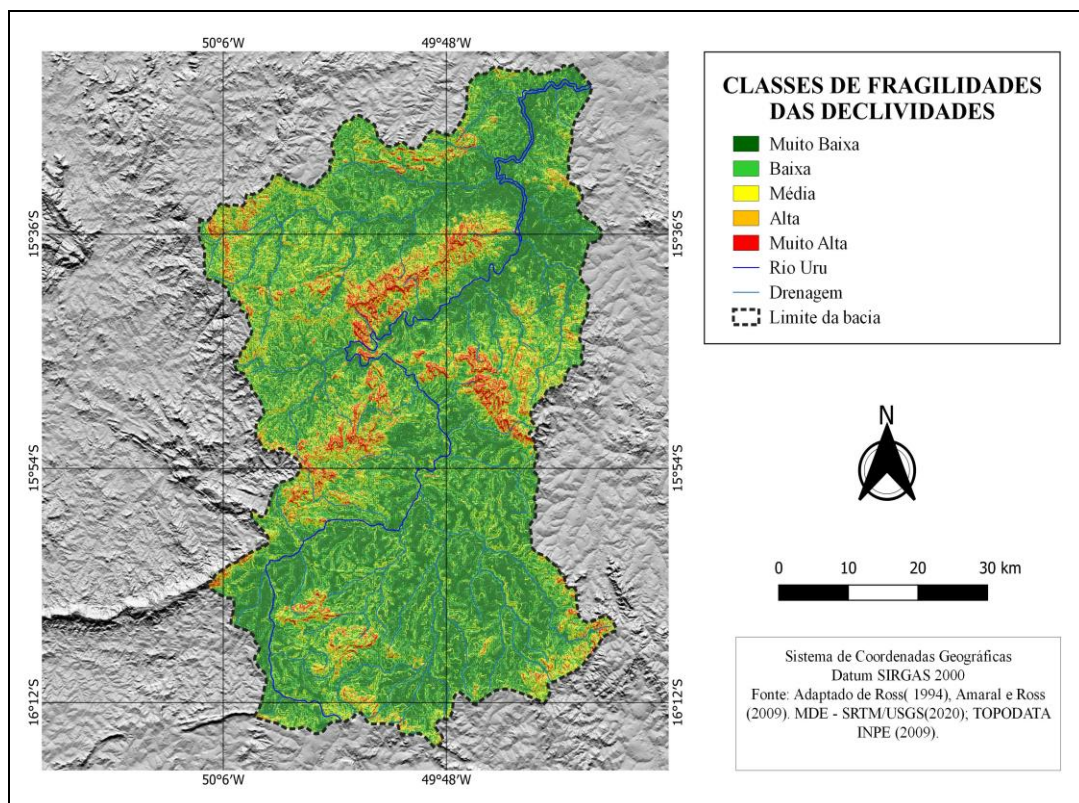
Atributo	Classe de fragilidade	Grupo de solos	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito baixa	Latossolo Vermelho - textura argilosa	2.222,91	57,45%
2	Baixa	-	-	-
3	Média	Argissolo Vermelho - textura média a argilosa	218,0	5,63%
		Argissolo Vermelho - Amarelo - textura média a argilosa	1029,0	26,59%
4	Alta	Cambissolo Háplico - textura média	296,0	7,65%
5	Muito Alta	Neossolo Litólico - textura média a arenosa	103,0	2,68%
Total			3.868,91	100%

Fonte dos dados: Ross (1994), Amaral e Ross (2009). EMATER (2017)
Organização: Herculano, 2021

Os dados possibilitam a observação de que a classe de fragilidade muito baixa e média são as de maior ocorrência, ocupando aproximadamente 57% e 32% da área. As classes alta e muito alta, que requerem maior atenção, em relação às formas de manejo, compreendem cerca de 10,3%. Destaca-se que, em relação aos tipos de solo com ocorrência na BHRU, os Latossolos, seguidos pelos Argissolos, são predominantes e neste caso, apresentam muito baixa e média fragilidades, respectivamente. As maiores fragilidades ocorrem nos Cambissolos e Neossolos Litólicos, que evidenciam fragilidade potencial. Em ambos os casos, a condição pode avançar para o estado de fragilidade emergente, a depender das formas de manejo desses solos.

Os percentuais de declividade são elementos importantes, na análise da fragilidade ambiental, pois quanto mais acentuados e sob intensa ação antrópica, mais a superfície se torna suscetível aos processos erosivos hídricos e mais riscos a escorregamentos e deslizamentos. Logo, por determinar a velocidade do escoamento (CRUZ; PINESE JUNIOR; RODRIGUES, 2010), podem provocar importantes perdas de solo e degradação dos recursos hídricos (IBGE, 2009). Além disso, as declividades também se constituem variável determinante para influenciar na indicação de áreas com aptidão agrícola (AMORIM et al., 2021). No mapa (Figura 3) estão espacializadas as classes de fragilidade da BHRU em relação às declividades e, na tabela , a descrição quantitativa das classes.

Figura 3. Mapa de reclassificação das declividades na BHRU



Fonte: Adaptado de Ross (1994), SRTM (2020). Organização: Herculano (2021)

Tabela 2 - Classes de fragilidades da declividade na BHRU

Atributo	Classes de fragilidade	Declividades	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito baixa	0 - 6%	1686,06	43,6%
2	Baixa	6 - 12%	1252,58	32,4%
3	Média	12 - 20%	569,35	14,7%
4	Alta	20 - 30%	220,12	5,7%
5	Muito alta	> 30%	140,80	3,6%
Total			3.868,91	100%

Fonte: Adaptado de Ross (1994), SRTM (2021). Organização: Herculano (2021)

Observa-se a predominância das classes de fragilidades muito baixa e baixa, que, juntas, ocupam 76% da área da bacia em relevos mais planos ou suave ondulados. Destaca-se, no entanto, que as classes de declividades média, alta e muito alta abrangem 24% da BHRU, em regiões de relevos mais movimentados, e que, portanto, fundamentado nos conceitos de Ross (1994), caracterizam uma condição de Fragilidade Potencial, que oportunizam a Fragilidade Emergente.

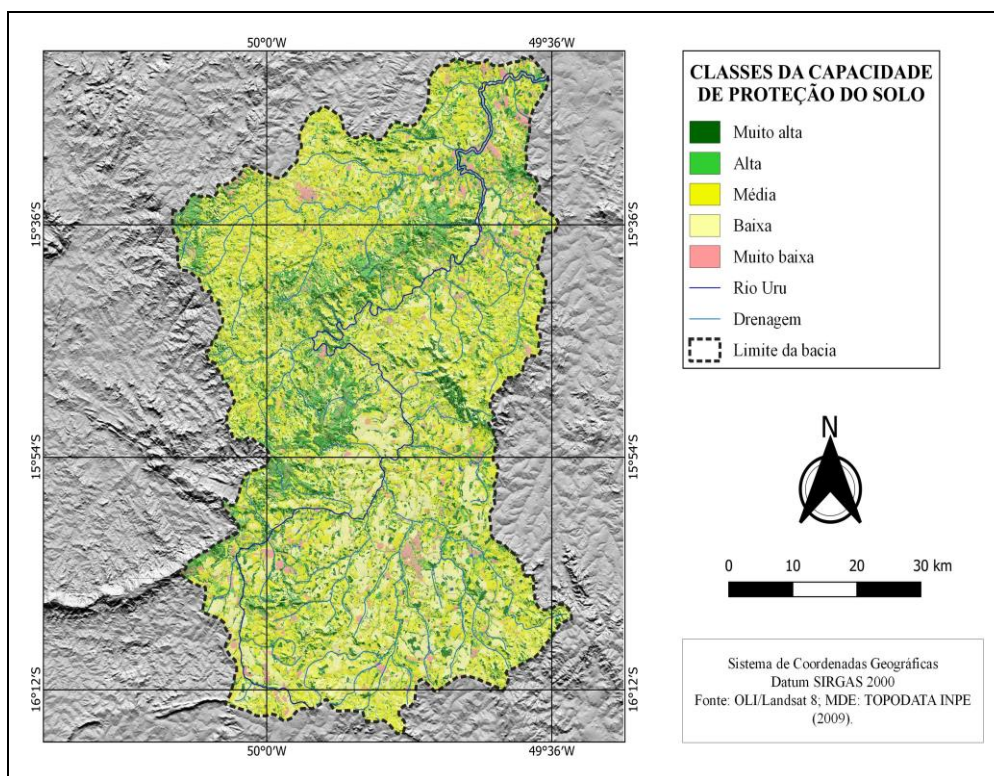
Os tipos de usos do solo e a cobertura vegetal caracterizam-se como variáveis importantes no processo de análise da fragilidade ambiental, pois determinam a fragilidade emergente de uma área. Esta variável indica o grau de proteção do solo e relevo frente às dinâmicas ambientais e processos humanos de uso e ocupação dos territórios (NAKASHIMA, 2001). Assim, áreas com coberturas naturais mais densas apresentam níveis maiores de proteção e áreas de atividades humanas intensivas, como agricultura e ocupação urbana, apresentam níveis muito baixos de proteção (CREPANI et al., 2001; KAWAKUBO et al., 2005), e com possibilidade de ocorrências de impactos geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos, considerando que os processos de degradação do ambiente têm origem na intensa ação antrópica.

Na aplicação do coeficiente Kappa na imagem classificada, para elaboração do mapa de uso e cobertura do solo, obteve-se índice Kappa de 0,81 e exatidão global de 85,43%. Este resultado indica que o produto final apresentou qualidade excelente de acordo com os parâmetros propostos por Landis e Koch (1977).

Os dados e informações apresentados no mapa (Figura 4) e na Tabela 3, permitem evidenciar cinco classes de proteção do solo, sendo: Cerrado - formação florestal e hidrografia, que oferecem proteção Muito Alta; o Cerrado - formação savânica, com proteção Alta; pastagens, proteção Média; agricultura, proteção Baixa e áreas urbanas e solo exposto, proteção Muito Baixa.

Os dados relacionados aos tipos de uso do solo e cobertura vegetal na BHRU evidenciam a predominância de níveis médios e baixos de proteção do solo, uma vez que 65,10% da área da bacia é ocupada por pastagem e agricultura. Conforme Faria, Vecchiato e Salomão (2013) e Bertoni e Lombardi Neto (2014), os processos erosivos, em áreas de atividades agropecuárias, ocorrem em razão do uso do solo sem critérios técnicos relacionados ao meio físico, como, por exemplo, práticas inadequadas de manejo do solo associadas à ausência de medidas conservacionistas.

Figura 4. Mapa das classes de proteção do uso e cobertura do solo na BHRU



Fonte dos dados: Ross (1994), Amaral e Ross (2009). OLI/Landsat 8. Organização: Herculano, 2021

Tabela 3. Classes de fragilidades em relação aos tipos de uso e cobertura do solo na BHRU

Atributo	Grau de proteção do solo	Classe de ocupação	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito alta	Cerrado - Formação florestal e hidrografia	482,97	12,5%
2	Alta	Cerrado - Formação savânica	575,83	14,9%
3	Média	Pastagem	1.471,10	38,0%
4	Baixa	Agricultura	1.048,38	27,1%
5	Muito baixa	Solo exposto e área urbana	290,63	7,5%
Total			3868,91	100%

Fonte dos dados: Ross (1994), Amaral e Ross (2009). OLI/ Landsat 8. Organização: Herculano, 2021

Observa-se que as formações vegetais de Cerrado, na forma florestal e a hidrografia oferecem grau de proteção muito alto e a formação savânica oferece alta proteção. As citadas classes juntas ocupam 27,40% da região. As formações vegetais florestais apresentam-se em fragmentos, nas áreas aplainadas e as savânicas estão concentradas nos relevos mais declivosos. Amaral e Ross (2009) afirmam que, nas áreas cobertas por matas naturais, o grau de proteção é muito alto e alto em razão da densidade da vegetação e presença de serrapilheira, que impedem que o solo seja atingido diretamente pelas águas pluviais, evitando a ação do salpicamento, além de dissipar a energia do escoamento superficial.

Os dados ainda mostram que as áreas urbanas e os solos expostos, que são resultado direto da ação antrópica, oferecem muito baixa proteção e abrangem

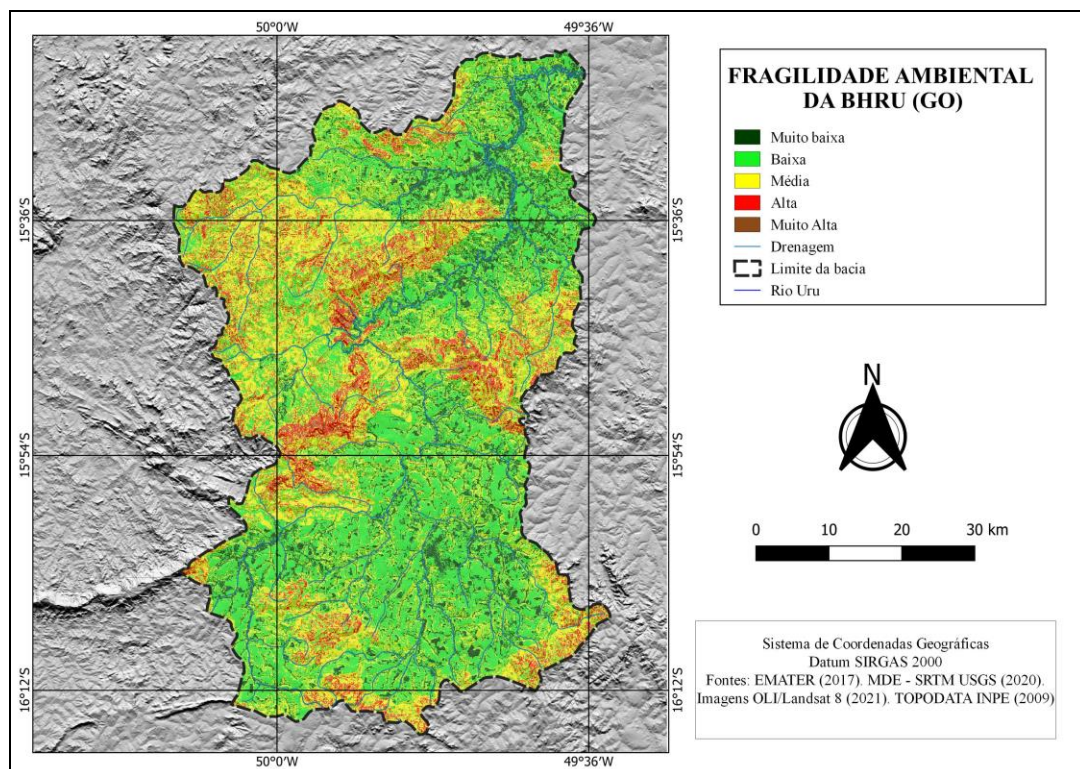
7,52% da área em questão. Nas áreas urbanas, em função da impermeabilização do solo, tem-se a ruptura do processo hidrogeológico de absorção da água, com consequências na recarga do lençol freático e potencialização de enchentes e contaminação dos recursos hídricos. Nas áreas de solos expostos, há a possibilidade de processos erosivos e de redução de recarga no lençol freático e com potencial ocorrência de assoreamento e contaminação dos recursos hídricos, além da aceleração do processo de lixiviação.

FRAGILIDADE AMBIENTAL POR MEIO DO MÉTODO TRADICIONAL.

O mapa (Figura 5) e a Tabela 4 apresentam as classes de fragilidades da BHRU e seus aspectos quantitativos. A análise dos dados evidencia a ocorrência das cinco classes de fragilidades que, descritas nas suas individualidades e sob a ótica da análise sistêmica, explicam as condições de fragilidade da bacia.

A identificação das classes se deu a partir da álgebra de mapas, em que correlações entre as variáveis foram estabelecidas, determinando o nível de fragilidade. Assim, regiões de solo vulneráveis, altas declividades e ausência de cobertura vegetal apresentaram altas fragilidades. Já em áreas com Latossolos, relevo aplainado e vegetação florestal de Cerrado, as fragilidades tendem a serem menores.

Figura 5. Mapa de fragilidade ambiental da BHRU pelo método tradicional de álgebra de mapas



Fonte dos dados: EMATER (2017). MDE - SRTM USGS (2020). Imagens OLI/Landsat 8 (2021).
Organização: Herculano, 2021

Tabela 4 - Classes de fragilidade ambiental da BHRU e respectivas áreas

Atributo	Classe de fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito baixa	474,19	12,3%
2	Baixa	1606,68	41,5%
3	Média	1403,80	36,3%
4	Alta	363,01	9,4%
5	Muito Alta	21,23	0,5%
Total		3868,91	100%

Fonte dos dados: EMATER (2017). MDE - SRTM USGS (2020). Imagens OLI/Landsat 8 (2021)
Organização: Herculano, 2021

É possível identificar que a classe de fragilidade muito baixa ocorre em 12,3% da BHRU e mostra-se particularizada pela ocorrência de manchas de áreas cobertas pelas formações florestais, em superfícies aplainadas e ocorrência de Latossolos, ou seja, em condições de cobertura vegetal de maior proteção, baixas declividades, solos mais desenvolvidos, planos e que limitam a ocorrência de processos de degradação dos recursos naturais.

Destaca-se, no entanto, que as condições apontadas são também propícias ao desenvolvimento de atividades agropecuárias, o que coloca essas áreas, já em quantidades muito reduzidas, em situação de vulnerabilidade, sobretudo por estarem ameaçadas pelo desmatamento, prática que é comum em períodos de preparação do solo para o plantio, em muitos casos por conta do objetivo de expansão das áreas das lavouras de grãos na região.

Observa-se que, na BHRU, ocorre a predominância das classes de fragilidade baixa e média, que juntas, ocupam 77,8% da área da bacia. A classe de baixa fragilidade se evidencia nas áreas ocupadas também por Latossolos, em superfícies de aplainamento, predominantemente ocupadas pelas atividades agrícolas e pastagens plantadas que, em razão das formas de uso e ocupação do solo, estão sujeitas a processos de degradação ambiental, como processos erosivos capazes de provocar a perda de solos, assoreamento dos cursos d'água e contaminação por agrotóxicos e fertilizantes químicos, além de estarem sujeitas ao desmatamento.

É importante afirmar que as áreas de fragilidade média se distribuem pelas regiões com declividades mais acentuadas, onde ocorrem Argissolos e ocupadas predominantemente por pastagens. Isso revela a suscetibilidade aos processos de compactação pelo pisoteio de animais, que dificulta a infiltração da água e favorecem a erosão dos solos pelo escoamento superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014). As condições descritas também comprometem as áreas de nascentes e recarga do lençol freático, em razão do desmatamento e soterramento destas. Assim, frente às fragilidades identificadas na BHRU, observa-se que as situações descritas, demandam planejamento sistematizado que permita a implementação de práticas de manejo adequadas, capazes de minimizar os impactos negativos das formas de uso do solo.

As classes de fragilidade alta e muito alta, embora em menores percentuais (9,9%), coincidem com relevos fortemente ondulados, de maiores altitudes, nas cabeceiras de drenagem, compostas por Cambissolos e Neossolos Litólicos. Estes solos são significativamente mais suscetíveis aos processos erosivos, em razão de

serem pouco desenvolvidos e com texturas de média a arenosa. Os Argissolos, que também ocorrem nessas mesmas classes estão associados a maiores declividades.

As áreas de maiores declividades, por serem impróprias para a agricultura, se mantêm favorecidas pela permanência da cobertura vegetal, nesse caso, composta pelo Cerrado na formação savânica, situação que ameniza os processos de degradação ambiental e mantém a área na condição de fragilidade potencial. No entanto, é possível perceber que as pastagens avançam por estas áreas. Para Crepani et al. (2001) quanto maior a declividade mais rapidamente a energia potencial das águas pluviais transformam-se em energia cinética e maior a capacidade de transporte de partículas do solo.

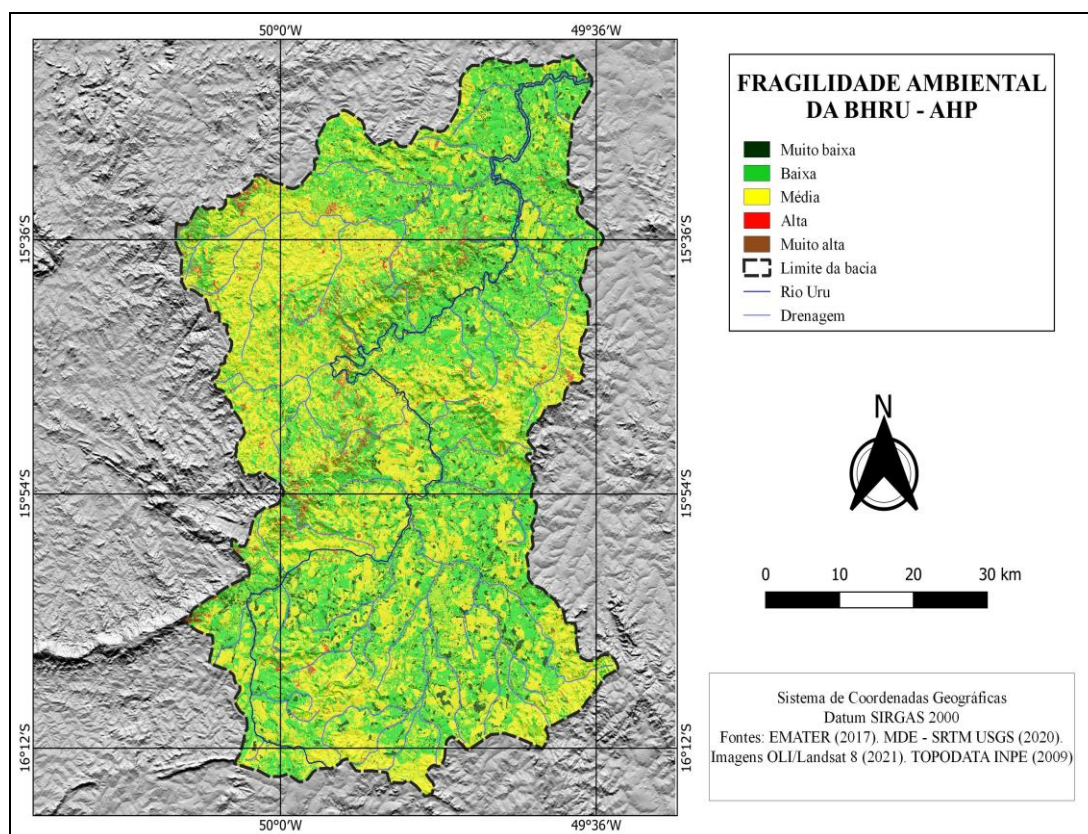
Dessa forma, as descrições permitem a interpretação de que, embora prevaleçam as classes de baixa e média fragilidade na BHRU, as formas de uso e ocupação do solo desprovidas de planejamento com o direcionamento para práticas adequadas de manejo do solo, colocam toda a região da bacia em condição de vulnerabilidade, uma vez que a classe de fragilidade muito baixa está ameaçada, sobretudo pelo desmatamento, e as classes de alta e muito alta fragilidade apresentam elevada fragilidade potencial em razão das suas condições genéticas.

FRAGILIDADE AMBIENTAL POR MEIO DO MÉTODO MULTICRITÉRIO AHP

No mapa (Figura 6) são apresentadas as classes de fragilidade da BHRU, identificadas por meio do método multicritério AHP e na Tabela 5 são apresentadas as informações quantitativas.

A classe de fragilidade muito baixa ocupa 6,85% da bacia e pode ser identificada em forma de manchas distribuídas por toda a área. Em relação a ocorrência das classes de fragilidade baixa e média, observa-se a predominância destas que juntas ocupam 90,36% da área da BHRU. Neste caso, a de fragilidade baixa ocupa, predominantemente, áreas com superfícies de aplainamento com ocorrência de Latossolos, onde a principal atividade de uso do solo é a agricultura. A classe de fragilidade média se estende por regiões de relevo ondulado e fortemente ondulado, nas quais as pastagens plantadas se apresentam como principal cobertura do solo. Ressalta-se que, em ambas as classes, as formas de uso e ocupação do solo, associadas as condições geomorfológicas e tipos de solos podem ter seus níveis de fragilidade aumentados com a ocorrência de práticas inadequadas de manejo do solo.

Figura 6. Mapa de fragilidade da BHRU produzido pelo método AHP



Fonte dos dados: EMATER (2017). MDE - SRTM USGS (2020). Imagens OLI/Landsat 8 (2021).
Organização: Herculano, 2021

Tabela 5 - Área em Km² e em porcentagem das classes de fragilidade ambiental, para cada classe de fragilidade da BHRU, segundo o método AHP

Atributo	Classe de fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito baixa	265,12	6,85%
2	Baixa	1.645,13	42,52%
3	Média	1.850,71	47,84%
4	Alta	107,63	2,78%
5	Muito alta	0,318	0,01%
TOTAL		3.868,91	100%

Fonte dos dados: EMATER (2017). MDE - SRTM USGS (2020). Imagens OLI/Landsat 8 (2021)
Organização: Herculano, 2021

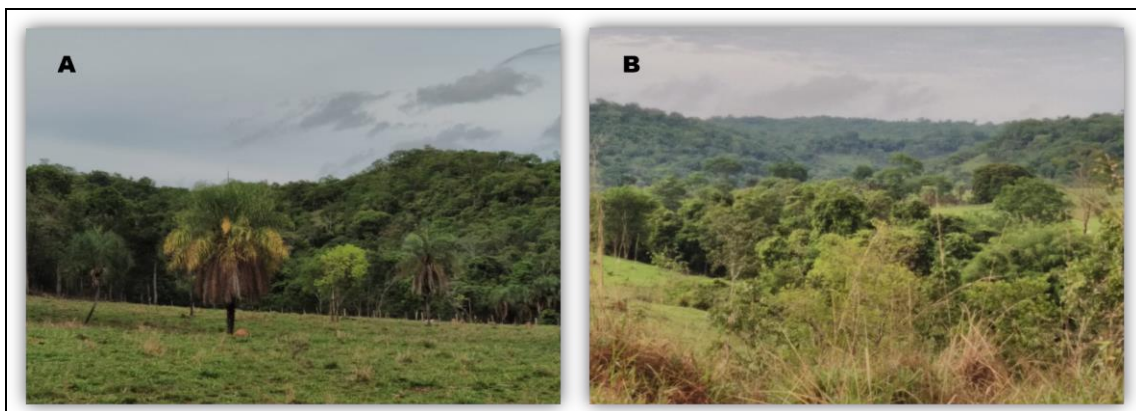
As classes de fragilidade muito alta e alta, que juntas ocupam 2,78% da área da BHRU, podem ser percebidas nas regiões de morros e colinas de maiores altitudes, onde há ocorrência de maiores percentuais de declividade e de solos mais vulneráveis como Argissolos, Cambissolos e Neossolos Litólicos. Nota-se, neste caso e em detrimento das formas de relevo, regiões com predomínio da vegetação savânica natural, mas já ameaçadas pelo desmatamento para prática da agropecuária.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS APLICADOS.

Ao se estabelecer relação comparativa entre os resultados de fragilidade ambiental obtido pela aplicação do método tradicional de álgebra de mapas e pelo método multicritério AHP, observa-se que, no primeiro modelo, é possível notar a delimitação bem definida de áreas compostas por cada classe de fragilidade, enquanto no segundo caso, as classes baixa e média se destacam como predominantes e as demais se apresentam de forma mais discreta.

A fragilidade muito baixa ocupa uma área de 12,3% da BHRU, segundo o método tradicional, enquanto que pelo método AHP esse percentual é de 6,85%. A diferença dos percentuais pode estar relacionada ao maior peso atribuído à variável uso e cobertura do solo na aplicação do método multicritério. Situação parecida ocorre com as fragilidades muito alta e alta. No primeiro caso, o percentual de 0,5%, obtido pelo método tradicional, se reduz para 0,01%, quando aplicado o método AHP. Quanto às fragilidades altas, o percentual se reduz de 9,4%, para 2,78%. Nas imagens (Figura 7) temos, em segundo plano, áreas classificadas nos dois modelos, com fragilidade muito baixa.

Figura 7. Áreas que registraram fragilidade ambiental muito baixa na BHRU



Fonte: Herculano, 2021

Os dados indicam que em ambos os modelos, as classes de baixa e média fragilidade são predominantes. A fragilidade baixa apresenta valores percentuais de áreas ocupadas próximos, sendo 41,50% na modelagem tradicional e 42,52% na modelagem AHP. Já a fragilidade média, apresenta uma diferença significativa entre os percentuais, apresentando maior área no método AHP, chegando a 47,84%, sendo que no modelo tradicional ocorre em 36,3% da bacia. Tais resultados se justificam pela ocorrência de relevos aplainados onde predominam as atividades agropecuárias. Na Figura 8 temos a localização das áreas classificadas com fragilidade baixa, sendo lavoura de soja em relevos aplainados (A) e, em segundo plano, lavouras de laranja também em relevos planos.

Figura 8. Áreas que registraram fragilidade ambiental baixa na BHRU



Fonte: Herculano, 2021

Nas imagens (Figura 9) são apresentadas as áreas, que nos dois modelos registraram fragilidade média onde temos pastagens degradadas em relevos ondulados (A) e solo exposto em relevos suavemente ondulados, possivelmente sendo preparados para o plantio (B).

Figura 9. Áreas que registraram fragilidade ambiental média na BHRU



Fonte: Herculano, 2021

Observa-se que a aplicação dos dois métodos demonstrou a predominância das classes de fragilidade baixa e média e a ocorrência das demais classes em menores valores percentuais. Cita-se, ainda, como elemento semelhante, a confirmação, de modo generalizado, da localização geográfica da ocorrência das classes de fragilidades. Nesse caso, observou-se que as classes de fragilidade alta, representada na Figura 10 (segundo plano), e a muito alta, representada pela Figura 11 (segundo plano), são predominantes, em ambos modelos, em regiões de relevos ondulados a fortemente ondulados.

Figura 10. Áreas que registraram fragilidade ambiental alta na BHRU



Fonte: Herculano, 2021

Figura 11. Áreas que registraram fragilidade ambiental muito alta na BHRU



Fonte: Herculano, 2021

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características morfopedológicas da BHRU evidenciaram altos percentuais da classe de fragilidade baixa, em ambos os modelos, e isto se explica pela ocorrência das superfícies aplainadas, que, por sua vez, possuem baixas declividades e onde ocorrem predominantemente os Latossolos, que são planos, mais desenvolvidos e apresentam reduzida vulnerabilidade. Nas áreas de relevo mais ondulado predominam os Argissolos, onde os níveis de fragilidade se elevam, prevalecendo a classe de fragilidade média. Os menores percentuais das classes alta e muito alta estão associadas a ocorrência de maiores declividades, relevos fortemente ondulados, em regiões de solos mais vulneráveis com introdução de pastagens.

A classe muito baixa está associada a elevados níveis de proteção, ocorre em áreas com cobertura vegetal florestal preservada e aparece em quantitativo reduzido, demonstrando a importância da variável uso e cobertura que está em processo de mudanças que poderão elevar os níveis de fragilidade. Ainda, observa-se que, embora os níveis de fragilidade alto e muito alto não sejam predominantes, a bacia hidrográfica do rio Uru apresenta uma situação que demanda atenção, pois em razão das formas de usos do solo, que tem a agropecuária como atividade principal e por ser esta uma atividade econômica de grande impacto sobre os atributos naturais, há a tendência de evolução dos níveis de fragilidade.

A aplicação do método AHP, executada com o objetivo de comparação com a modelagem tradicional, no qual se considera pesos iguais para as variáveis, confirmou a predominância da ocorrência das classes de fragilidade baixa e média, no entanto, em relação ao quantitativo de área, somente a classe baixa apresentou valores próximos nos modelos aplicados, e as demais classes registraram resultados bem distintos, com destaque para as classes alta e muito alta, que indicaram significativa redução de área no modelo AHP, evidenciando a importância da determinação de pesos distintos para as variáveis.

Sugerimos, para tornar o produto final mais robusto, o incremento de outras variáveis ambientais, que interferem diretamente nos níveis de fragilidade, como por exemplo: a geologia, os de chuva, o comprimento da encosta, a proximidade com as estradas e rodovias, dentre outras, sendo que nestes casos orienta-se a aplicação do método AHP. Também vale ressaltar a importância do uso das geotecnologias nessas modelagens, bem como da aplicação dos resultados em iniciativas de gestão e manejo de áreas intensivamente antropizadas.

REFERÊNCIAS

AMARAL, R. do; ROSS, J. L. S. As unidades ecodinâmicas na análise da fragilidade ambiental do Parque Estadual do Morro do Diabo e entorno, Teodoro Sampaio/SP. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 26, p. 59-78, 2009.

AMORIM, A. T. et al. Geomorphometric environmental fragility of a watershed: a multicriteria spatial approach. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 193, n. 12, p. 327-345. 2021.

AZEVEDO, D. G. de; GOMES, R. L.; MORAES, M. E. B. de. Bacia do Rio Buranhém: análise integrada da paisagem. *In*: MORAES, M. E. B. de; LORANDI, R. **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas**. Ilhéus - BA: Editus, 2016.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014.

BRASIL (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

CREPANI, E. et al.; **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CRUZ, L. M.; PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. Abordagem Cartográfica da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Glória – MG. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 62/04, 2010.

EMATER. **Distribuição dos solos de Goiás**: Classes de solos dos municípios goianos. Goiânia: Emater, 2016.

FARIA, T. de O.; VECCHIATO, A. B.; SALOMÃO, F. X. de T. Abordagem morfopedológica para diagnóstico e controle de processos erosivos. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, ed. 12, p. 215 - 232, 2013.

GOIÁS (estado). Secretária de Indústria de Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Por Edgar do M. Latrubesse, Thiago Morato de Carvalho. Goiânia, 2006.

GOIÁS (estado). EMATER. **Refinamento do mapeamento de solos para escala de 1:250.000**. [S. l.: s. n.], 2017. Base de dados. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/>. Acesso em: 15 mar. 2021.

IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

KAWAKUBO, F. S. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 16 a 21 de abril 2005, Goiânia. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2005.

KOPPEN, W. **Climatologia**: con un studio de los climas de la tierra. 1º edición em español. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

LACERDA FILHO, J. V. de et al, (org.). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal (Conv. CPRM/METAGO S.A./UnB)**: 1:500.000. Goiânia: CPRM, 1999.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, (33) p. 159-174. 1977.

NAKASHIMA, M. S. R. Carta de fragilidade ambiental da bacia do rio Keller, Estado do Paraná: subsídio ao estudo dos processos erosivos. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 23, n. 6, p. 1547-1560, 2001.

PADILHA, D. G.; TREVISAN, M. L.; CRUZ, J. C. Sensibilidade do modelo de fragilidades ambientais à ponderação multicriterial: Aspectos físicos da Bacia Hidrográfica do Alto Uruguai. **Floresta**, Curitiba - PR, v. 44, ed. 33, p. 535 - 548, 2014.

REATTO, A. et al. Solos do Bioma Cerrado: Aspectos Pedológicos. *In*: SANO, S. M. et al. **Cerrado: Ecologia e Flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 1, cap. 5, p. 107 - 134.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil**: subsídios para Planejamento Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia** n°8, FFLCH-USP, São Paulo, 1994.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise Comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Geosp - Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 15, p. 39 - 49, 2004.

VALLE, I. C. et al. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, p. 295-308, 8 nov. 2015.