


Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP

Classification of environmental fragility in watershed using Fuzzy logic and AHP method

*Karen Carrilho da Silva Lira*¹ 

*Humberto Rodrigues Francisco*² 

*Aldi Feiden*³ 

Palavras-chave:

Análise multicritério
Software QGIS
Vulnerabilidade ambiental

Resumo

A avaliação da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas é uma importante ferramenta para auxiliar gestores no planejamento e intervenções para produção sustentável e conservação ambiental. O objetivo deste trabalho foi utilizar a lógica Fuzzy e o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para classificação de fragilidade ambiental. Como modelo de estudo foi utilizada a bacia hidrográfica do Arroio Marreco, Toledo, Paraná, Brasil. Para classificar as áreas foi utilizado um sistema de informação geográfico (SIG) e dados de um modelo digital de elevação (MDE), bem como dados de ocupação e tipo de solo. A análise constatou que 71,3% da área da bacia tem fragilidade média. Ao comparar com outras 2 formas de atribuição de peso aos elementos do mapa de declividade, as 3 apresentaram diferença estatística, mas todas indicaram que a bacia em estudo tem fragilidade ambiental média em sua maior parte. A utilização da lógica Fuzzy permitiu aplicar uma variação de pesos contínua conforme a variação das características ambientais, podendo representar de forma eficaz a realidade e, conseqüentemente, apresentar resultados mais confiáveis. Este método pode ser uma ferramenta útil no planejamento adequado das atividades antrópicas e práticas econômicas para evitar processos de degradação ambiental em uma bacia hidrográfica.

Keywords:

Multi-criteria analysis
QGIS software
Environmental vulnerability

Abstract

Assessment of environmental fragility in watersheds is an important tool to assist managers in planning and interventions for sustainable production and environmental conservation. The objective of this work was to use Fuzzy logic and the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to classify environmental fragility using data obtained from public institutions. The Marreco River watershed in western Paraná, Brazil, was the study model. To classify areas, a geographic information system (GIS) and data from a digital elevation model (DEM), as well as data on soil occupation and type were used. The analysis found that 71.3% of the basin area has average fragility. Compared to two other forms of weighing elements of the slope map, the three presented statistical difference, but all indicated that the basin under study mostly has average environmental fragility. The use of fuzzy logic allowed application of a continuous variation of weights according to the variation of environmental characteristics, which may more effectively represent the reality and, therefore, provide more reliable results. This method may represent a useful tool to appropriately manage sustainable production and environmental conservation in watershed areas.

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Toledo, PR, Brasil. karenc@utfpr.edu.br

² Universidade Federal da Fronteira Sul -UFFS, Laranjeiras do Sul, PR, Brasil humberto.francisco@uffs.edu.br

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Toledo, PR, Brasil aldi.feiden@unioeste.br

INTRODUÇÃO

Bacias hidrográficas constituem um sistema natural equilibrado, onde alterações podem comprometer sua funcionalidade (CHRISTOFOLETTI, 1980; REGGIANI e HASSANIZADEH, 2016). Exemplificando, extrações da cobertura vegetal podem afetar temperatura, regime hídrico e resistência do solo (TRICART, 1977). Nesse contexto, fragilidade ambiental representa a vulnerabilidade do ambiente ao sofrer intervenções, englobando processos erosivos, assoreamentos e inundações (SPÖRL, 2007).

Tricart (1977) observou que o ambiente se mantém em equilíbrio dinâmico com relações naturais de troca e sugeriu um modelo de avaliação dos graus de instabilidade usando informações sobre pedogênese e morfogênese. Ross (1994) adaptou esse modelo com informações sobre intervenção humana, geomorfologia, solos, cobertura vegetal e clima e estabeleceu importância diferente para cada variável. Crepani (2001) utilizou as variáveis índice de dissecação do relevo, rocha, solo e cobertura vegetal e estabeleceu igual importância para as variáveis ambientais no estudo de fragilidade. Destaca-se que os resultados sobre fragilidade são distintos ao comparar esses modelos. Dalla Corte et al. (2015) inferiram que a metodologia para análise de fragilidade ambiental depende da escolha dos fatores de ponderação e está relacionada ao contexto em que é realizada.

Estudos recentes apontam a importância da análise de fragilidade ambiental em bacias hidrográficas como dos Santos e Nascimento (2021) para a bacia do Rio de Janeiro na Bahia, Albuquerque e de Medeiros (2017) no Ceará, dos Santos et al. (2021) para a bacia hidrográfica do Rio Piracuruca no Piauí e Abrão e Bacani (2018) para a bacia do Rio Santo Antônio no Mato Grosso do Sul.

Neste trabalho foi utilizada a lógica fuzzy objetivando melhor representar a variação de características ambientais. Com estrutura matemática e propriedade de inexatidão de fronteira entre objetos, a lógica fuzzy é capaz de tratar problemas com imprecisão e abstração em seus modelos e conceitos e permite representar a variação e a importância relativa de cada critério no fenômeno estudado, possibilitando resultados mais confiáveis (BURROUGH, 1992; BURROUGH e MCDONNELL, 1998; ROSENDO, 2019). A teoria de conjuntos fuzzy começou a ser observada em aplicações para dados geográficos nas décadas de 80 e 90 em Burrough (1989), Kollias e Voliotis (1991) e

Burrough et al. (1992), pois se tornou útil em problemas cuja classificação dos elementos é questão de interpretação (BANAI, 1993). Pesquisas recentes envolvendo lógica fuzzy e dados geográficos podem ser encontradas nos trabalhos de Cornwell et al. (2020), Parsian et al. (2021) e Madhu et al. (2021).

Dando suporte ao estudo, foi utilizado o método de análise multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desenvolvido por Thomas L. Saaty. O AHP é um método de escolha baseado na comparação pareada e escala pré-definida para expressar a importância de um critério sobre o outro em relação à tomada de decisão (SAATY, 1990; SAATY, 1991; SAATY e VARGAS, 2012). Tem preocupação com nível de consistência dos cálculos e pode ser aplicado a informações quantitativas ou qualitativas (SAATY, 1987).

Neste trabalho foram consideradas características como tipo de solo, declividade, altitude e uso/ocupação do solo para análise de fragilidade ambiental, usando como base a bacia hidrográfica do Arroio Marreco localizada no oeste do Paraná, numa das regiões de maior produção de grãos, suínos e peixe e pertencente a bacia hidrográfica do Paraná 3, cujos afluentes lançam águas na Usina Hidrelétrica de Itaipu (SEAB, 2018; PMRH, 2017; PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ 3, 2014). Assim, é importante um estudo sobre a fragilidade desse ambiente para fornecer informações para um manejo adequado na região.

Os dados obtidos foram processados utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os SIG foram desenvolvidos na década de 80 e têm como principal característica a capacidade de integrar e transformar dados espaciais com aplicações em diversas áreas (SILVA, 2003; MIRANDA, 2005).

Em síntese, o objetivo deste trabalho foi implementar a lógica fuzzy e o método AHP para análise de fragilidade ambiental baseando-se na bacia hidrográfica do Arroio Marreco. E, para apresentar a importância da utilização da lógica fuzzy na representação da variação de características ambientais e verificar sua influência no mapa de fragilidade final, foi realizada uma comparação entre três formas de ponderação dos elementos do mapa de maior peso.

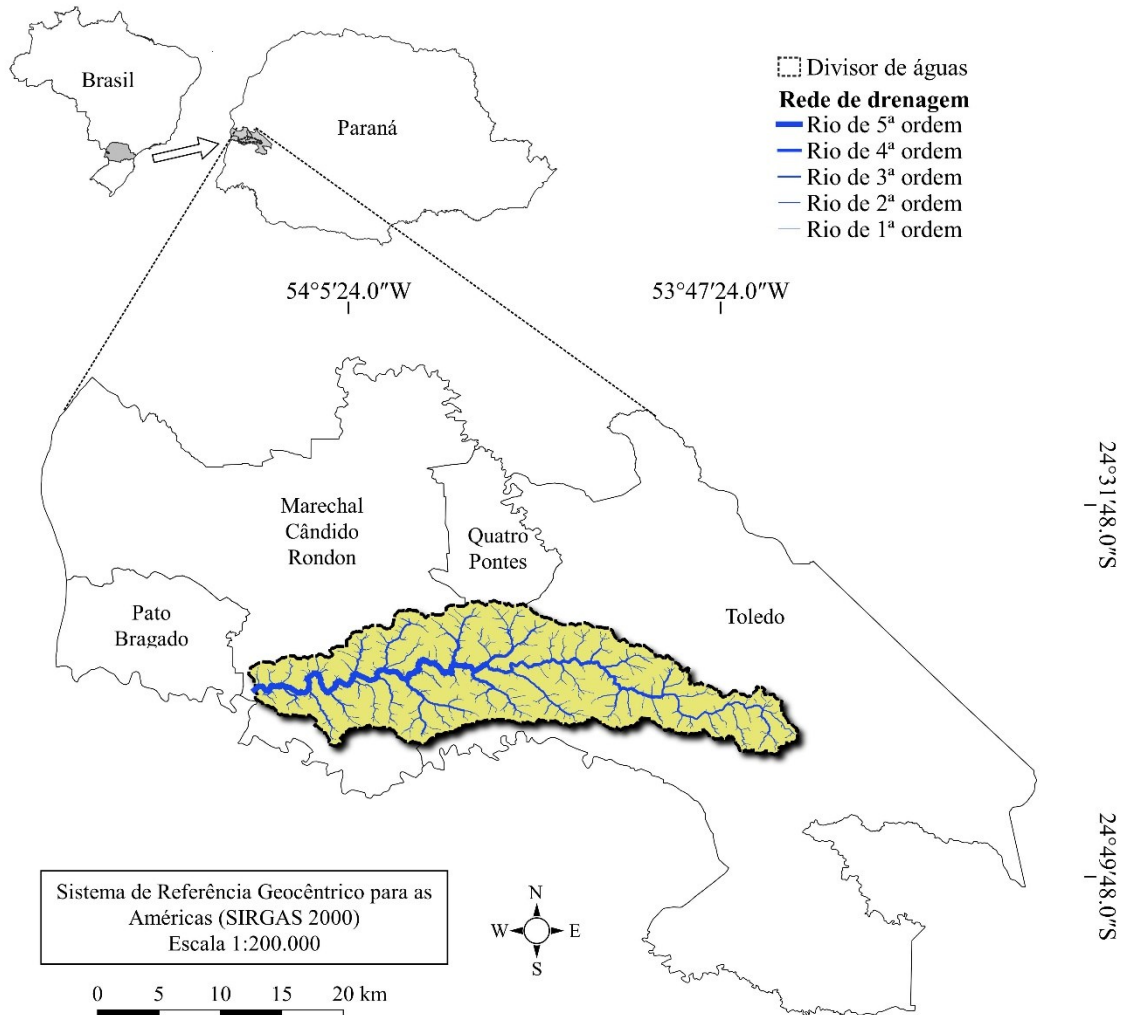
MATERIAL E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do Arroio Marreco está localizada entre os municípios de Toledo, Quatro Pontes, Marechal Cândido Rondon e Pato

Bragado (Figura 1) no oeste do estado do Paraná, na região Sul do Brasil, com aproximadamente 338,8 km² de área. O Arroio Marreco tem nascente na área urbana de Toledo e foz no Rio São Francisco, na divisa entre os

municípios de Pato Bragado e Marechal Cândido Rondon. Conforme sistema de classificação climática de Köppen, a bacia está localizada numa região de clima Cfa, clima subtropical com verão quente (IAPAR, 2020).

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Arroio Marreco.

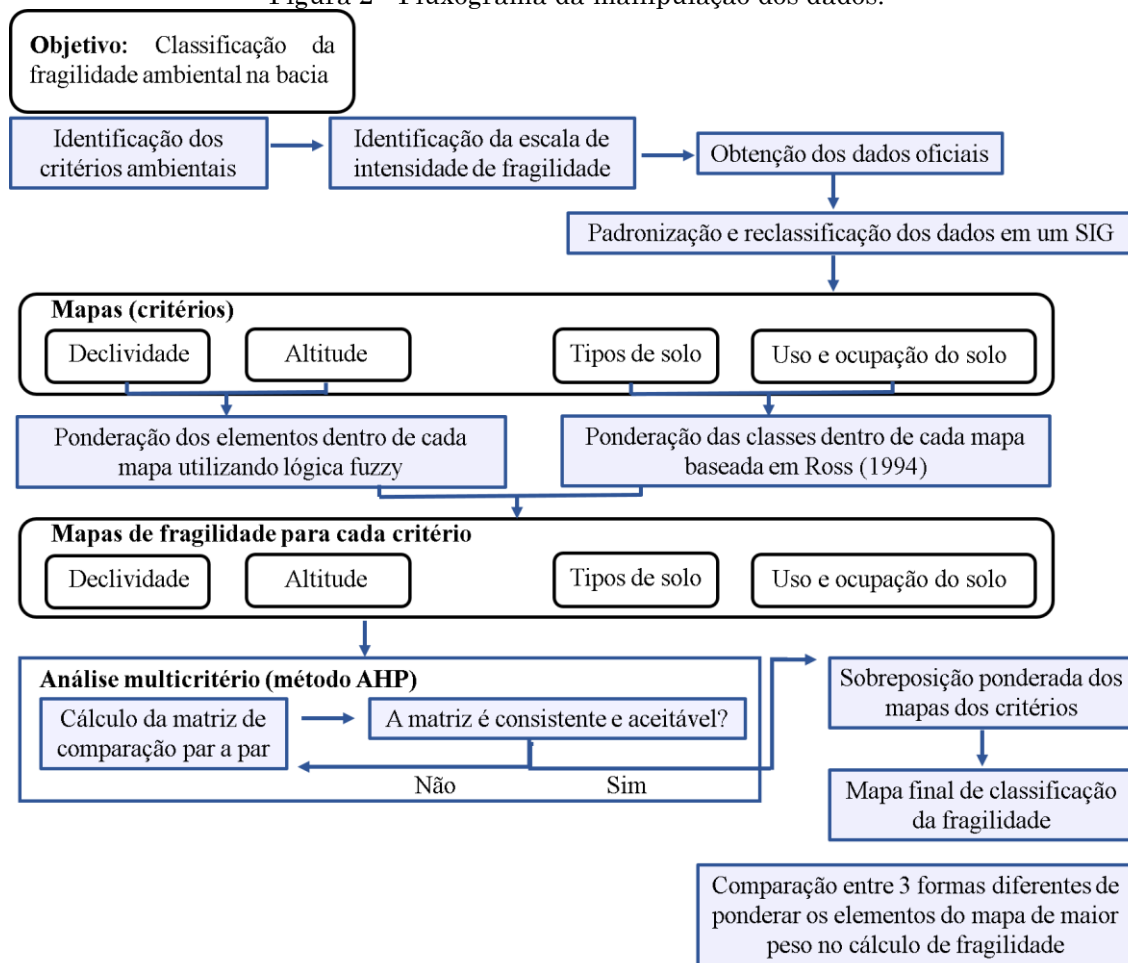


Fonte: Os autores (2021).

A metodologia de análise seguiu as etapas abaixo (Figura 2):

- Definição dos critérios ambientais, da escala de intensidade de fragilidade, obtenção dos dados e processamento em um SIG;
- Ponderação dos elementos e classes nos mapas baseada na literatura científica e utilizando lógica fuzzy;
- Ponderação de cada critério utilizando o método AHP;
- Sobreposição ponderada dos critérios;
- Comparação entre três formas de atribuição de peso aos elementos do mapa de maior importância no cálculo de fragilidade.

Figura 2 - Fluxograma da manipulação dos dados.



Fonte: Os autores (2021).

Software

Foram utilizados dados disponibilizados gratuitamente por instituições públicas que foram organizados através de planos de informação representados por mapas. Os dados foram analisados e processados no *software* QGIS Las Palmas, versão 2.18.28.

Aquisição dos dados

A delimitação da bacia e informações sobre declividade e altitude foram obtidas através da aquisição de duas imagens (SRTM1S25W054V3 e SRTM1S25W055V3) utilizando Modelo Digital de Elevação (MDE) oriundo da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 1Arc-Second equivalente a 30m. As cenas foram adquiridas da *United States Geological Survey* (USGS, 2019) e processadas no *software* QGIS. Para delimitação da bacia foram realizadas análises hidrológicas baseadas no MDE através da ferramenta *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM) do QGIS de acordo com Tarboton (2011).

Os dados cartográficos em formato vetorial do tipo de solo foram obtidos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2020), com escala 1:250.000, sistema de referência de coordenadas Universal Transverso de Mercator (UTM), fuso 22Sul, Sistema de Referência: Córrego Alegre. Foram consideradas as classes do segundo nível categórico para realizar reclassificação e identificação dos tipos de solo.

As informações sobre uso e ocupação do solo foram obtidas no formato matricial na coleção 5 do Projeto MapBiomass em escala 1:100.000 e resolução espacial média de 30m (MAPBIOMAS, 2020).

Padronização dos dados

Os dados foram reprojeto para SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geodésico para Américas 2000), UTM (fuso 22Sul). Após conversão do tipo de solo para formato matricial, todos os arquivos foram padronizados: resolução espacial de 30m (pixel), tipo de dados 16 bit sinalizado, dimensões de linha e coluna com 464 e 1564 pixels, respectivamente, e foi definido um

valor para área sem dados para ocultar borda indesejável. Tais procedimentos visaram simplificar cálculos métricos e uniformizar parâmetros para realização da análise multicritério (FRANCISCO et al., 2019).

Modelagem fuzzy

Neste trabalho foi abordada uma classificação que atribui valores (pesos) a uma região conforme variação de determinada característica. Tal classificação é descrita por conjuntos fuzzy e definida como generalização da álgebra Booleana (ZADEH, 1965).

Seja G um espaço de objetos representados por pontos e x um elemento de G . Um conjunto fuzzy A em G é caracterizado pela função de pertinência $f_A(x)$ que associa a cada ponto x em G um número real no intervalo $[0,1]$, onde o valor de $f_A(x)$ representa o grau de pertencimento de x em A . Ou seja,

$$A = (x, f_A(x)), x \in G$$

e

$$f_A: G \rightarrow A: [0,1]$$

Assim, quanto mais próximo $f_A(x)$ for de 1, maior o grau de pertencimento de x em A ; quanto mais próximo $f_A(x)$ for de 0, menor o grau de pertencimento de x em A . A função $f_A(x)$ pode ser discreta ou contínua. (ZADEH, 1965).

No modelo Booleano a função de pertinência é expressa com valores 0 ou 1, se $x \notin A$ ou se $x \in A$, respectivamente. Inferências baseadas em regras booleanas são frequentemente ineficientes devido a sua classificação rígida (MEIRELLES, 1997).

A modelagem fuzzy pode ser representada por diferentes funções de pertinência dependendo das características do conjunto no problema (BURROUGH et al., 1992). A escolha dessa função não é arbitrária, mas é subjetiva e reflete o contexto em que o problema está inserido e é tratado (KANDEL, 1986). Funções do tipo linear, quadrática, gaussiana ou sigmoide são as mais utilizadas.

Determinação dos pesos usando modelagem fuzzy

Os planos de informação utilizados foram os mapas de declividade, tipo de solo, uso/ocupação do solo e altitude. E para facilitar os cálculos optou-se pelo intervalo $[0,10]$ ao invés de $[0,1]$ na função de pertinência.

Cada ponto x representa um elemento ou classe ambiental em determinado espaço no mapa. Foi atribuído um valor (peso) no intervalo $[0,10]$ para as classes de solo e uso/ocupação do solo; para os elementos de declividade e altitude foram utilizadas funções de pertinência contínuas. Esta ponderação foi realizada de forma empírica baseada em Crepani et al. (2001), Ross (1994) e Spörl (2001).

Os graus de fragilidade foram adaptados a modelagem fuzzy baseando-se em Crepani et al. (2001) e Ross (1994) com 5 intensidades: Fragilidade muito fraca, fraca, média, forte e muito forte, expressos por valores no intervalo $[0,10]$ (Tabela 1). Portanto, quanto mais próximo de 10, maior a vulnerabilidade do ambiente.

Tabela 1 - Graus de fragilidade.

Graus de fragilidade	Valores
Muito fraca	até 2
Fraca	de 2 a 4
Média	de 4 a 6
Forte	de 6 a 8
Muito forte	de 8 a 10

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Fragilidade ambiental quanto ao tipo de solo e uso/ocupação do solo

A classificação da fragilidade ambiental dos tipos de solo e uso/ocupação do solo foi baseada em Ross (1994) (Tabela 2). Para a classificação do solo o autor considerou escoamento superficial difuso e concentrado das águas

pluviais e, para a classificação de uso/ocupação do solo, considerou a capacidade de proteção que oferecem ao solo. Para aplicação dos pesos foi realizada uma reclassificação dos dados *raster* utilizando o algoritmo *r.reclass* no *software* QGIS conforme Westervelt e Shapiro (2022).

Tabela 2 - Classes nos mapas de solo e uso/ocupação do solo, graus de fragilidade ambiental e pesos.

Variáveis	Graus de fragilidade ambiental e Pesos				
	Muito fraca	Fraca	Média	Forte	Muito forte
	2	4	6	8	10
Solo	Latossolo Vermelho, Vermelho-Amarelo, textura argilosa	Latossolo Amarelo, Vermelho-Amarelo, textura média/argilosa	Nitossolo Vermelho, Argissolo Vermelho, textura argilosa	Argissolo Vermelho-Amarelo, textura média	Neossolo, Cambissolo, Gleissolo
Uso/ocupação do solo	Formação de floresta	Pasto	Mosaico agricultura-pasto	Agricultura	Área urbana

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Fragilidade ambiental quanto a declividade

O termo declividade é o grau de inclinação do relevo em relação ao plano horizontal; quanto maior a declividade do terreno, maior a velocidade e capacidade de transporte das águas pluviais, contribuindo para o processo erosivo do solo (CREPANI et al., 2001; GEMITZI et al., 2011; WU, 2014). Neste trabalho, o valor de declividade foi tratado em porcentagem.

Para distribuição dos valores de declividade na escala de fragilidade baseou-se em Crepani et al. (2001) e Ross (1994), os valores de fragilidade mais próximos de 0 (zero) foram associados a menor declividade, regiões onde predominam processos formadores de solo; os valores mais

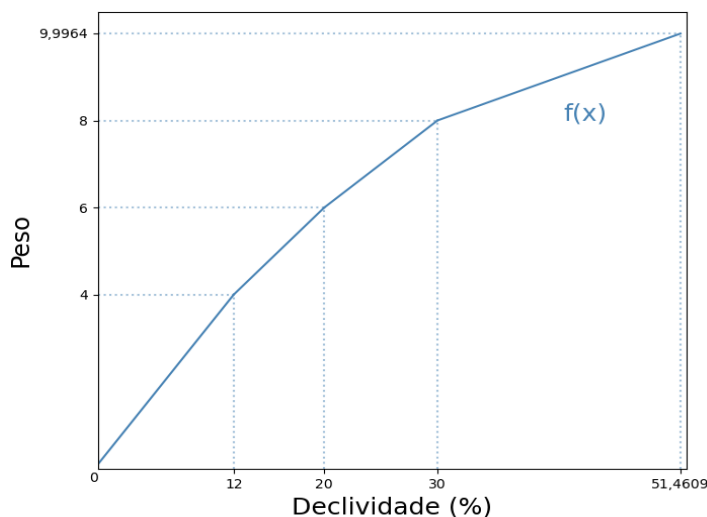
próximos de 10 foram associados a maior declividade, regiões onde predominam processos erosivos.

Para elaboração da função de pertinência $f(x)$ que atribuiu pesos aos elementos do mapa de declividade foram utilizados os valores de declividade mínima e máxima (51,46%) encontrados na bacia, os limites das categorias hierárquicas de Ross (1994) e uma interpolação linear desses valores (Figura 3).

$$f(x) = \begin{cases} 0,325x + 0,1; & 0 \leq x \leq 12 \\ 0,25x + 1; & 12 < x \leq 20 \\ 0,2x + 2; & 20 < x \leq 30 \\ \frac{20x + 1120}{215}; & 30 < x \leq 51,4609 \end{cases} \quad (1)$$

tal que x são os elementos do mapa de declividade.

Figura 3 - Gráfico da função $f(x)$ aplicada aos elementos do mapa de declividade.



Fonte: Os autores (2021).

Para aplicação da função foi utilizada a calculadora *raster* do *software* QGIS conforme QGIS Project (2019).

Fragilidade ambiental quanto a altitude

Sinais de mudanças em determinadas altitudes, como temperatura e padrões de precipitação, são perceptíveis (LÓPEZ et al., 2011). Fritzons et al. (2008), através de análise de regressão entre temperatura e altitude para o conjunto de estações do Paraná, concluiu que 74% da variação de temperatura pode ser explicada pela diferença de altitude. Ávila et al. (2016) apresentaram relação entre precipitação e altitude na região Sul. Wischmeier (1959) relacionou quantidade de perda de solo com energia das chuvas e dos Santos e Nascimento (2021) utilizaram pluviometria como um dos fatores para estimar perda de solo em uma bacia hidrográfica. E de Mello et al. (2020) relacionaram erosividade das chuvas e altitude.

Waltrick et al. (2015) calcularam uma estimativa da erosividade de chuvas no estado do Paraná e observaram que os maiores valores ocorreram no período de implantação das

culturas de verão e no inverno, quando há menor cobertura vegetal sobre o solo nas regiões oeste e sudoeste. Resultado que indica a importância da utilização dessa característica em estudos ambientais na região.

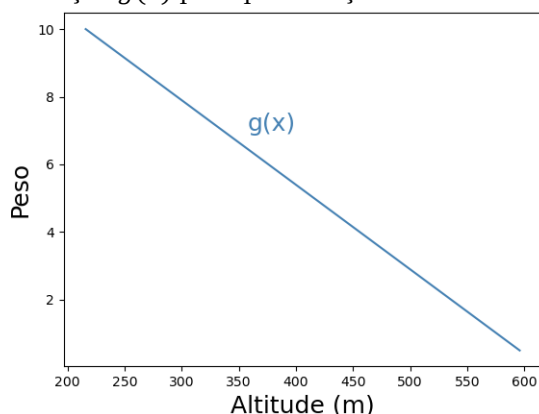
Mello et al. (2013), através de modelos multivariados, concluíram que a erosividade pode ser explicada pelas coordenadas geográficas e altitude e, nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, quanto maior altitude menor erosividade média anual das chuvas. Estudos como os de Nel et al. (2010) e Hoyos et al. (2005) apresentaram relação análoga em outros países com características ambientais diferentes.

Baseado nessas informações, foi utilizada uma função de pertinência linear e com coeficiente angular negativo para distribuição dos pesos aos elementos no mapa de altitude. Os valores de fragilidade mais próximos de 0 (zero) foram associados a altitude máxima (596m), regiões com menor erosividade causada pelas chuvas; os valores de fragilidade mais próximos de 10 foram associados a altitude mínima (216m) conforme função $g(x)$ (Figura 4).

$$g(x) = -0,025x + 15,4 \quad (2)$$

tal que x são os elementos do mapa de altitude.

Figura 4 - Gráfico da função $g(x)$ para ponderação dos elementos do mapa de altitude.



Fonte: Os autores (2021).

Para aplicação da função foi utilizada a calculadora *raster* do *software* QGIS conforme QGIS Project (2019).

O método AHP

O método AHP desenvolvido por Saaty (1977) foi utilizado por sua capacidade de analisar problemas através da construção de níveis hierárquicos e atribuição de pesos aos múltiplos critérios, enquanto executa uma comparação por pares intuitiva e consistente através de escala pré-definida (SAATY, 1987; PINESE JÚNIOR E RODRIGUES, 2012; SCHMIDT, 1995).

Determinação dos pesos usando AHP

Na etapa de julgamento foi realizada uma comparação pareada que resultou no peso de cada critério, representando sua importância no mapa de fragilidade ambiental. Esta importância foi atribuída com base na opinião profissional dos autores e na literatura científica, como Tricart (1977), Ross (1994), Crepani (2001), Leandro (2013), Cereda Junior e Röhm (2014), Pinese Júnior e Rodrigues (2012) e Spörl (2001). Para a comparação foi utilizada escala de importância relativa desenvolvido por Saaty (1977) (Tabela 3). Através da comparação pareada construiu-se a matriz de comparação

quadrada, de valores recíprocos e diagonal unitária.

Tabela 3 - Escala de importância relativa entre dois critérios.

Menos importante	Extremamente	$\frac{1}{9}$
		$\frac{1}{8}$
	Muito fortemente	$\frac{1}{7}$
		$\frac{1}{6}$
	Fortemente	$\frac{1}{5}$
	$\frac{1}{4}$	
	Moderadamente	$\frac{1}{3}$
		$\frac{1}{2}$
	Igualmente	1
Mais importante	Moderadamente	2
		3
	Fortemente	4
		5
	Muito fortemente	6
	7	
	Extremamente	8
		9

Fonte: Adaptado de Hossain e Daz (2010).

A subjetividade dos julgamentos baseados nas experiências dos pesquisadores pode resultar em inconsistências na matriz final. A inconsistência é medida através da razão de consistência (RC) que relaciona o índice de consistência (IC) da matriz em questão com o índice de consistência obtido da matriz recíproca

de ordem n , com elementos não-negativos e randômicos (IR) (Tabela 4). O valor de RC deve ser menor do que 0,1 ou 10% para garantir consistência satisfatória e um julgamento confiável. (SAATY, 1990).

Tabela 4 - Índice de consistência randômico.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

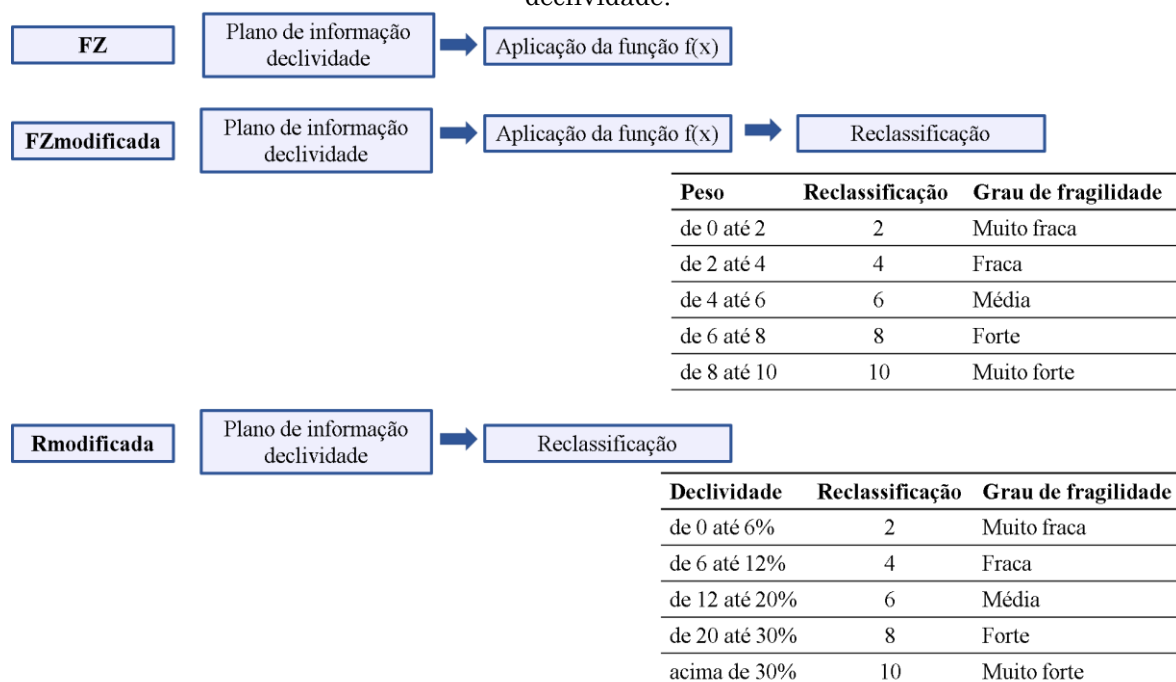
Fonte: Saaty (1990).

Para comparar cada um dos critérios entre si (declividade, solo, altitude e uso/ocupação do solo) foi combinado o método AHP e o complemento Easy AHP do *software* QGIS para realizar uma combinação linear ponderada conforme Malczewski (2000)

Comparação de métodos

Foi realizada uma comparação entre três formas de ponderação dos elementos do mapa de maior peso (declividade) para verificar sua influência

no mapa de fragilidade final. A primeira técnica é a descrita nesse trabalho, determinada pela aplicação da função de pertinência $f(x)$, a segunda é determinada pela utilização da função $f(x)$ e posterior reclassificação do arquivo *raster* resultante, a terceira é determinada pela reclassificação do arquivo *raster* utilizando as categorias hierárquicas de Ross (1994) (Figura 5). As três maneiras são denominadas Fuzzy (FZ), Fuzzy modificada (FZmodificada) e Ross modificada (Rmodificada), respectivamente.

Figura 5 - Fluxograma de implementação das três formas de ponderação dos elementos do mapa de declividade.

Fonte: Os autores (2021).

O resultado de cada uma das três técnicas foi utilizado juntamente com os outros três mapas (altitude, solo e uso/ocupação) e seus respectivos pesos para a geração de mapas de fragilidade.

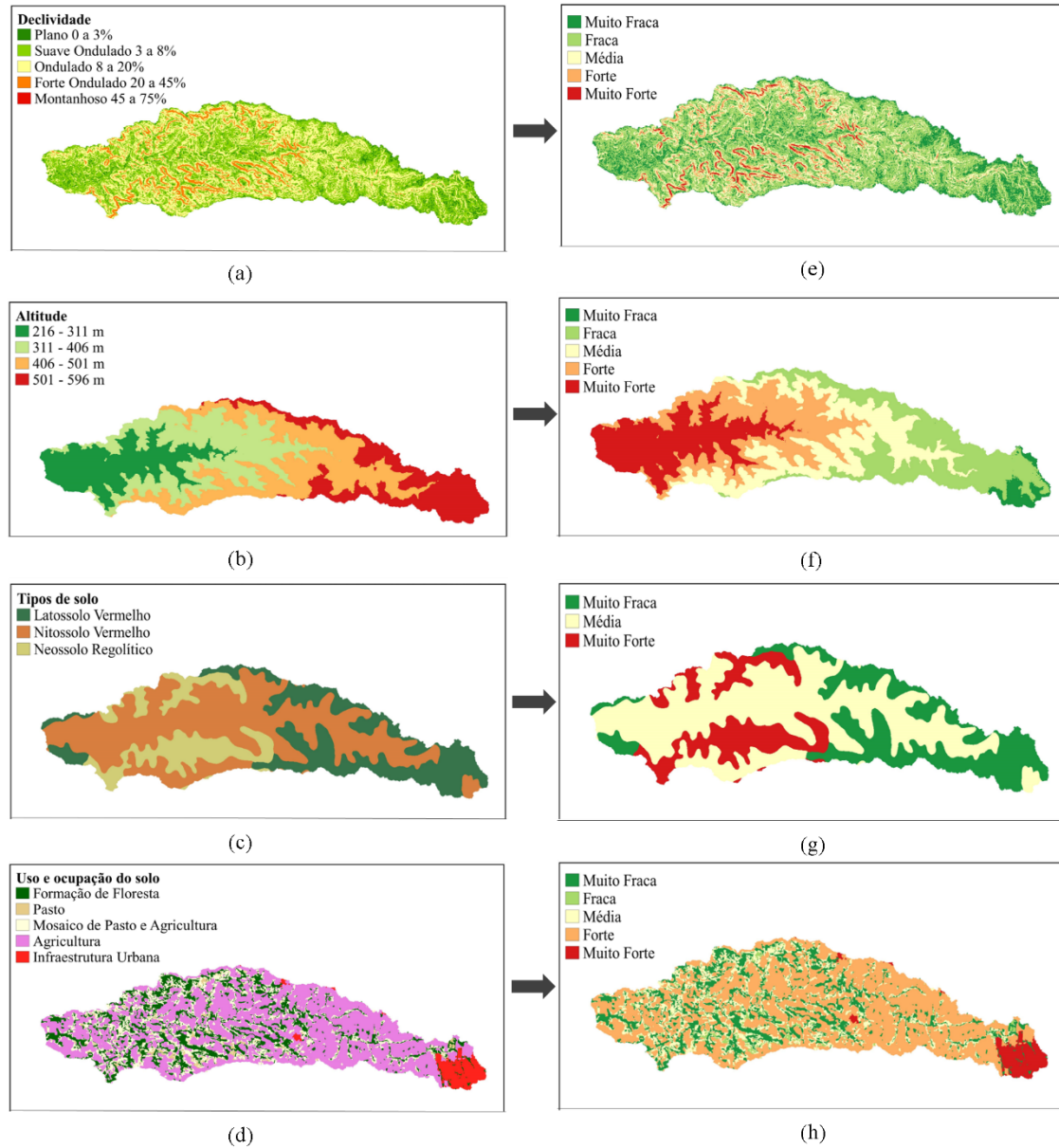
Em cada mapa de fragilidade foram distribuídos pontos de amostragem igualmente espaçados (30 m) utilizando a ferramenta “Pontos Regulares” do QGIS. Posteriormente foi realizado o recorte dos pontos em relação a camada limite da bacia hidrográfica do Arroio Marreco, concentrando os pontos dentro do polígono. Foi utilizado o algoritmo *point sampling tools* para extrair os valores contidos nos pontos de amostragem especificados em cada mapa de fragilidade. O objetivo foi extrair para uma planilha os valores dos arquivos resultantes de cada método para realizar uma análise estatística (Análise de Variância de Efeitos Principais) utilizando o *software R* (R CORE TEAM, 2020).

RESULTADOS

Primeiro analisou-se as características da região da bacia hidrográfica do Arroio Marreco. Foram gerados os mapas temáticos relacionados ao tipo de solo, uso/ocupação do solo, declividade e altitude (Figura 6, a - d). O declive predominante é suave ondulado e ondulado (Figura 6a). A menor altitude se localiza próximo a cidade de Marechal Cândido Rondon e o início da bacia na cidade de Toledo apresenta altitude de 596 m (Figura 6b). Os tipos de solo encontrados são Latossolo Vermelho, Nitossolo Vermelho e Neossolo (Figura 6c). E a área é amplamente utilizada para agricultura (Figura 6d).

Nas Figuras 6 e - h são apresentados os mapas reclassificados de acordo com o grau de fragilidade apresentado nas Tabelas 1, 2 e as funções de pertinência $f(x)$ e $g(x)$. Em relação aos tipos de solo predominam regiões de fragilidade média (54,5%) representada pelo Nitossolo Vermelho. Com relação ao uso/ocupação do solo predominam regiões de fragilidade forte (57,1%) representada pela agricultura (Tabela 5). Quanto a declividade e altitude, predomina a fragilidade fraca (50,4% e 25,7%, respectivamente) (Tabela 6).

Figura 6 - Mapas temáticos da bacia hidrográfica do Arroio Marreco: a) Declividade; b) Altitude; c) Tipos de solo; d) Uso e ocupação do solo; Mapas de grau de fragilidade: e - h.



Fonte: Os autores (2021).

Tabela 5 - Graus de fragilidade ambiental relacionados aos tipos de solo e uso/ocupação do solo na bacia hidrográfica do Arroio Marreco.

Graus de fragilidade	Solo		Uso e ocupação do solo			
	Área(km ²)	%	Área(km ²)	%		
Muito fraca	Latossolo Vermelho	93,5	27,6	Formação de floresta	63,9	18,9
Fraca	-	0,0	0,0	Pasto	8,1	2,4
Média	Nitossolo Vermelho	184,6	54,5	Mosaico agricultura-pasto	59,2	17,5
Forte	-	0,0	0,0	Agricultura	193,3	57,1
Muito forte	Neossolo	60,7	17,9	Área urbana	14,3	4,2
Σ		338,8	100		338,8	100

Fonte: Os autores (2021).

Tabela 6 - Graus de fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Arroio Marreco calculados para declividade e altitude utilizando as funções $f(x)$ e $g(x)$, respectivamente.

Graus de fragilidade	Declividade		Altitude	
	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)
Muito fraca	70,2	20,7	9,6	2,8
Fraca	170,6	50,4	86,9	25,7
Média	65,6	19,4	85,4	25,2
Forte	24,7	7,3	83,7	24,7
Muito forte	7,7	2,3	73,2	21,6
Σ	338,8	100	338,8	100

Fonte: Os autores (2021).

O parâmetro mais importante através do método AHP foi a declividade (51,42%), seguido do uso/ocupação do solo (29,55%), solo (12,14%) e altitude (6,89%) (Tabela 7).

Tabela 7 - Matriz de comparação por pares apresentando a importância relativa de cada critério na fragilidade ambiental.

	Matriz de comparação				Matriz de comparação normalizada ^a				(ω) ^b
	D	S	U	A	D	S	U	A	
D	1	4	2	7	0,5283	0,4706	0,5581	0,5000	0,5142
S	1/4	1	1/3	2	0,1321	0,1176	0,0930	0,1429	0,1214
U	1/2	3	1	4	0,2642	0,3529	0,2791	0,2857	0,2955
A	1/7	1/2	1/4	1	0,0755	0,0588	0,0698	0,0714	0,0689
Σ	1,893	8,5	3,583	14					1
		λ_{max} ^c	IC ^d	IR ^e	RC ^f				
		4,02285	0,0076	0,90	0,0085				

D=declividade; S=solo; U=uso/ocupação do solo; A=altitude; ^a A matriz de comparação normalizada é obtida através da divisão de cada elemento da matriz de comparação pela soma de todos os elementos da sua coluna; ^b O autovetor (ω) são os pesos de cada critério e é obtido através da média dos valores de cada linha da matriz de comparação normalizada; ^c λ_{max} é o maior autovalor da matriz de comparação; ^d O índice de consistência IC é calculado por $\frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$, onde n é a ordem da matriz; ^e O índice de consistência randômico IR para $n = 4$ é 0,90; ^f A razão de consistência é definida por $RC = IC/IR$.

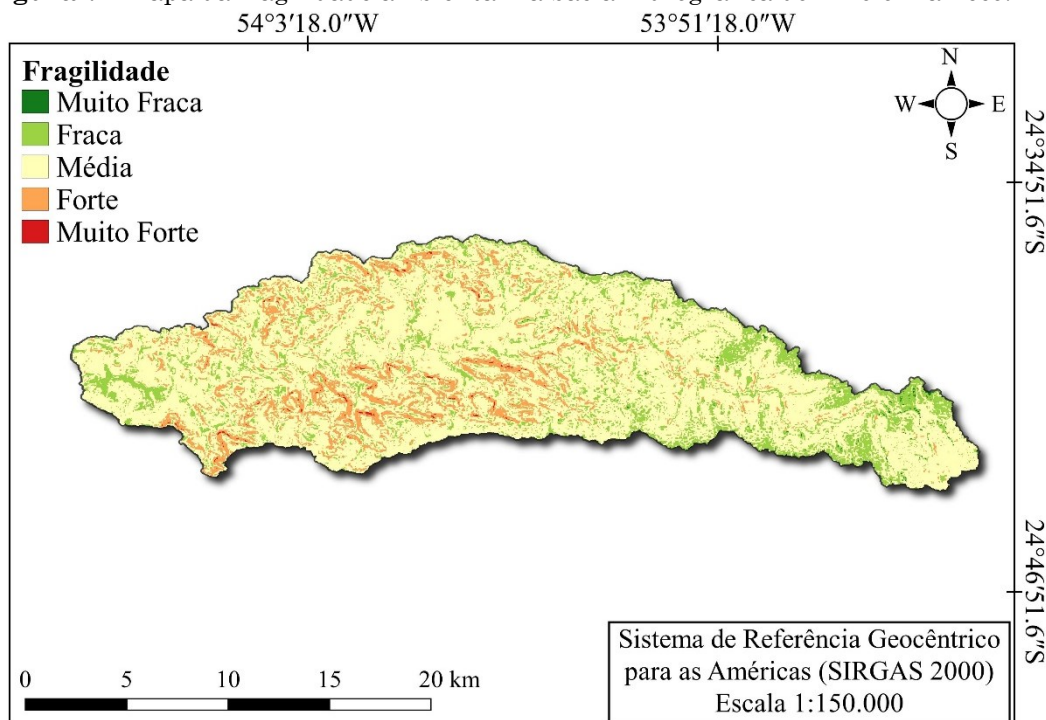
Fonte: Os autores (2021).

A fragilidade ambiental foi calculada através da sobreposição ponderada dos quatro mapas (resultado da utilização da Tabela 2 e funções $f(x)$ e $g(x)$) utilizando o Easy AHP e a equação 3 no QGIS.

$$Fragilidade\ ambiental = 0,5142 \times (Declividade) + 0,1214 \times (Solo) + 0,2955 \times$$

$$(Uso/ocupação) + 0,0689 \times (Altitude) \quad (3)$$

O resultado desse cálculo indica que 71,3% da área da bacia tem fragilidade média, 15,1% tem fragilidade fraca e 13,2% tem fragilidade forte (Figura 7 e Tabela 8).

Figura 7 - Mapa da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Arroio Marreco.

Fonte: Os autores (2021).

Tabela 8 - Área e graus de fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Arroio Marreco.

Graus de fragilidade	Área (km ²)	(%)
Muito fraca	0,5	0,2
Fraca	51,2	15,1
Média	241,6	71,3
Forte	44,7	13,2
Muito forte	0,8	0,2
Σ	338,8	100

Fonte: Os autores (2021).

Acerca da comparação entre as três formas de ponderação dos elementos do mapa de declividade pode-se inferir que todas indicaram que na bacia predomina fragilidade média (Tabela 9). O método FZ classificou com fragilidade muito fraca (0,2%) e fraca (15,1%) uma área maior em relação ao método FZmodificada (0% e 3,4%, respectivamente) e Rmodificada (0% e 4,6%, respectivamente). Essa diferença pode ser explicada pela variação dos pesos conforme variação dos elementos do mapa no método FZ, ao contrário dos outros dois que classificaram elementos diferentes com o mesmo peso (Figura 5).

A extração dos valores do mapa de fragilidade oriundo de cada método resultou em três planilhas com 845.209 dados cada,

totalizando 2.535.627. Para comparação dos resultados foi utilizado o *software* R para calcular 999 análises de variância de efeitos principais, cada uma realizada para uma amostragem de 999 pontos em cada planilha. A análise foi realizada a partir da média dos valores encontrados, considerando nível de significância de 5%. Pode-se inferir que existe diferença significativa entre os métodos e a posição geográfica. O método utilizado para aplicar os pesos no mapa de declividade tem influência sobre o grau de fragilidade ambiental ($F_{posição} = 8,807, p - valor_{posição} = 1,383 \cdot 10^{-310}$ e $F_{método} = 484,015, p - valor_{método} = 1,391 \cdot 10^{-146}$; $p - valor =$ significância estatística e $F =$ estatística F).

Tabela 9 - Efeito dos métodos de ponderação dos elementos do mapa de declividade no grau de fragilidade ambiental.

Graus de fragilidade	Método de atribuição de peso aos elementos do mapa de declividade		
	FZ	FZ modificada	R modificada
	Área (%)	Área (%)	Área (%)
Muito fraca	0,2	0	0
Fraca	15,1	3,4	4,6
Média	71,3	57,2	63,1
Forte	13,2	37,7	31,1
Muito forte	0,2	1,7	1,3
Σ	100	100	100
Média do grau de fragilidade calculado*	5,94_c	6,80_a	6,60_b

*Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Os autores (2021).

DISCUSSÃO

A teoria de conjuntos fuzzy tem sido importante para dados geográficos desde as décadas de 80 e 90 pela possibilidade de tratar imprecisão e abstração nas classificações (BANAI, 1993).

A classificação convencional através da atribuição de valores fixos para uma área pode contribuir na propagação de erros na modelagem da paisagem. Geotecnologias e análise multicritério com lógica fuzzy têm desempenhado um papel importante em estudos ambientais, pois permitem representar a variação e a importância relativa de cada característica ambiental no fenômeno estudado. (MEIRELLES, 1997; ROSENDO, 2019).

Exemplos de estudos incluem Junior et al. (2016) que utilizaram dados como solos, declividade, população, altitude e formas de terreno para estudar a susceptibilidade a deslizamentos em bacias hidrográficas e concluíram que a lógica fuzzy e AHP são essenciais para resolução de problemas relacionados ao conhecimento empírico dos especialistas. Cereda Junior e Röhm (2014) utilizaram modelo fuzzy para fragilidade ambiental através das variáveis solo, cobertura vegetal e comportamento das chuvas, apresentando resultados satisfatórios quando comparados a pesquisa de campo e estudos anteriores. Miara e Oka-Fiori (2007) estudaram fragilidade ambiental através do AHP e padronização fuzzy com as variáveis erosividade, geologia, vertentes, solos e declividade; os resultados se correlacionaram com a realidade. Guerrero et al. (2021) elaboraram uma carta de vulnerabilidade natural utilizando inferência fuzzy e AHP com

as variáveis relevo, geologia, pluviosidade, uso do solo e declividade e consideraram o método eficaz, com resultados mais satisfatórios. Cheng et al. (2020) analisaram a saúde do ecossistema de um deserto utilizando conceito fuzzy, critérios fisiológicos, ecológicos, ambientais e observaram precisão, objetividade e confiabilidade nos resultados. Rosendo (2019) analisou a vulnerabilidade socioambiental à seca em regiões brasileiras utilizando conjuntos fuzzy e variáveis ambientais como índice de anomalia de chuva, áreas de lavoura, áreas degradadas, entre outros. Observa-se que diversas variáveis podem ser adicionadas ao modelo para atender aos objetivos propostos.

Neste trabalho, os pesos dos elementos nos mapas de declividade e altitude utilizando lógica fuzzy através das funções $f(x)$ e $g(x)$, respectivamente, permitiu considerar os potenciais para deslizamentos e erosividade causada pelas chuvas. A função $f(x)$ classificou 50,4% da bacia com fragilidade fraca quanto a declividade e a função $g(x)$ classificou aproximadamente 25% da bacia para cada grau de fragilidade fraca, média e forte quanto a altitude (Tabela 6). A interpolação linear para construção das funções foi utilizada pela simplicidade de execução e fácil adaptação em outras áreas e contextos. É importante observar que as funções escolhidas dependem do conjunto de dados e em qual contexto são tratados (BURROUGH et al., 1992; KANDEL, 1986).

O método AHP resultou na declividade como critério mais importante, seguido do uso/ocupação do solo, solo e altitude (Tabela 7). Spörl (2001) comparou modelos e indicou o mapa mais detalhado o com apoio no mapa de declividade. A análise constatou que na bacia

predomina a fragilidade média (71,3%) (Tabela 8).

As formas de ponderação dos elementos do mapa de declividade apresentaram diferença estatística, porém todas indicaram que na bacia predomina a fragilidade média, embora o método FZ tenha classificado uma área maior com grau de fragilidade menor (Tabela 9). Isso pode ser explicado pelo método FZ permitir representar a variação dos elementos do mapa enquanto FZ modificada e R modificada atribuem valores fixos a regiões com características diferentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho considerou a declividade, tipo de solo, uso do solo e altitude para analisar a fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Arroio Marreco localizada no oeste do Paraná, Brasil.

O uso da lógica fuzzy permitiu representar a variação das características ambientais e seu grau de importância na análise de fragilidade. E o método AHP estabeleceu níveis hierárquicos para os critérios através de cálculos consistentes.

A análise constatou que na bacia predomina a fragilidade média, indicando que a região requer planejamento adequado de ações. Baseando-se nas discussões, pode-se afirmar que a combinação da lógica fuzzy, método AHP e geotecnologias pode ser uma ferramenta promissora para auxiliar na tomada de decisões e manejo adequado de atividades antrópicas em bacias hidrográficas. Sugere-se o aprofundamento e exploração da lógica fuzzy em análises a nível de planejamento ambiental.

AGRADECIMENTOS

A Unioeste e ao GEMaQ pela estrutura para o desenvolvimento da pesquisa. Ao aluno de doutorado Jhony Ferry Mendonça da Silva pelas colaborações relacionadas ao uso do software QGIS.

FINANCIAMENTO

Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento de agências de fomento nos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, C. M.R.; BACANI, V. M. Diagnóstico da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio, MS: subsídio ao zoneamento ambiental. *Boletim Goiano De Geografia*, v.38, n. 3, p. 619–645, 2018. <https://doi.org/10.5216/bgg.v38i3.56362>
- ALBUQUERQUE, E. L.S., de MEDEIROS, C. N. Vulnerabilidade socioambiental em bacias hidrográficas no Setor Leste Metropolitano de Fortaleza, Ceará, *Ateliê Geográfico*, v. 11, n. 1, p.109–126, 2017. <https://doi.org/10.5216/ag.v11i1.39018>
- ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil, *Environmental. Research. Letter*, v. 11, 114029, 2016. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/114029>
- BANAI, R. Fuzziness in Geographical Information Systems: contributions from the analytic hierarchy process. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7:4, p. 315-329, 1993. <https://doi.org/10.1080/02693799308901964>
- BURROUGH, P. A. Development of intelligent geographical information system. *International Journal of Geographical Information Systems*, v.1, p. 1-11, 1992. <https://doi.org/10.1080/02693799208901891>
- BURROUGH, P. A.; McDonnell, R. A. Principles of Geographic Information Systems. Oxford: Oxford University, 1998.
- BURROUGH, P.A.; MCMILLAN, R.A.; DEURSEN, W. Fuzzy Classification Methods for Determining Land Suitability from Soil Profile Observation and Topography. *Journal of Soil Science*, v. 43, p. 193-210, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00129.x>
- BURROUGH, P. A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science*, v. 40, p. 477-492, 1989. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01290.x>
- CEREDA JUNIOR, A, RÖHM, S.A. Analysis of environmental fragility using multicriteria analysis (mce) for integrated landscape assessment. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.8, n.1, p.28-37, 2014. <https://doi.org/10.4090/juee.2014.v8n1.028037>
- CHENG, W.; Xi, H.; SINDIKUBWABO, C.; SI, J.; ZHAO, C.; YU, T.; LI, A.; WU, T. Ecosystem health assessment of desert nature reserve

- with entropy weight and fuzzy mathematics methods: A case study of Badain Jaran Desert, *Ecological Indicators*, v. 119, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106843>.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2a ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1980.
- CORNWELL E., SPOSITO V., FAGGIAN R., Land suitability projections for traditional sub-alpine cropping in the Australian Alps and Chilean Dry Andes. A combined biophysical and irrigation potential perspective, *Applied Geography*, v. 121, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102248>
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.C.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.; BARBOSA, C. Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial. INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2001. Disponível em: <http://sap.ccst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>. Acesso em: 13 fev. de 2020.
- DALLA CORTE, A. P.; KLEIN HENTZ, A. M.; DOUBRAWA, B.; SANQUETA, C.R. Environmental fragility of Iguazu river watershed, Paraná, Brazil. *Bosque*, vol. 36, n. 2, p. 287-297, 2015. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002015000200014>
- de MELLO, C.R.; ALVES, G.J.; BESKOW, S.; NORTON, L.D. Daily rainfall erosivity as an indicator for natural disasters: assessment in mountainous regions of southeastern Brazil, *Natural Hazards*, v. 103, p. 947–966, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04020-w>
- dos SANTOS, F. de A., MENDES, L. M.S., da CRUZ, M. L.B. Suscetibilidade biofísica a inundações da Sub-bacia Hidrográfica do rio Piracuruca. *Ateliê Geográfico*, v. 15, n.1, p.266–285, 2021 <https://doi.org/10.5216/ag.v15i1.64590>
- dos SANTOS, J. Y.G., NASCIMENTO, R.Q. Efeitos das alterações no uso e ocupação do solo nas perdas de solo da bacia do Rio de Janeiro, Oeste da Bahia, *Boletim Goiano De Geografia*, v. 41, n.1, 2021. <https://doi.org/10.5216/bgg.v41.65397>
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 2ªed. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 17 fev. de 2020.
- FRANCISCO, H.R.; CORRÊIA, A.F.; FEIDEN, A. Classification of areas suitable for fish farming using geotechnology and multi-criteria analysis, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v.8, p.394, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijgi8090394>
- FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; AGUIAR, A. V. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no estado do Paraná. *Revista de estudos ambientais*, v.10, n. 1, p. 49-64, 2008. <http://dx.doi.org/10.7867/1983-1501.2008v10n1p49-64>
- GEMITZI, A.; FALALAKIS, G.; ESKIOGLOU, P.; PETALAS, C. Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, fuzzy membership functions and gis. *Global NEST Journal*, v. 13, n.1, p. 28-40, 2011. <https://doi.org/10.30955/gnj.000734>
- GUERRERO, J.V.R.; PESTANA, L.F.A.; SOARES, J.A.H.; RUIZ, I.H.; MOSCHINI, L.E. Carta de vulnerabilidade natural como instrumento de apoio ao Zoneamento Ecológico-Econômico do município de Pirassununga (São Paulo), *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.2, n.2, p.25-42, 2021. Disponível em: <https://zenodo.org/record/5548230>. Acesso em: 08 out. de 2021
- HOSSAIN, M.S.; DAS, N.G. GIS-based multi-criteria evaluation to land suitability modelling for giant prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) farming in Companigonj Upazila of Noakhali. *Computers and Electronics in Agriculture*, Bangladesh, v.70, p.172–186, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.003>
- HOYOS, N.; WAYLEN, P.R.; JARAMILLO, A. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, v.314, p.177–191, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.014>
- IAPAR, Instituto Agrônomo do Paraná. Köppen's classification. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=2533>. Acesso em: 30 abr. de 2020.
- JUNIOR, C.H.L.S., BEZERRA, D.S., ANDERSON, L.O., DE ANDRADE, M.R.M., PEREIRA, D.C.A., BEZERRA, V.L.A.R., SILVA, F.B., de ARAGÃO, L.E.O.C. Zoneamento da susceptibilidade a deslizamentos induzidos com base na lógica fuzzy e no processo analítico hierárquico (AHP): o caso da bacia hidrográfica do Rio Anil, São Luís – MA, *Revista Brasileira de Cartografia*, n.68/9, p. 1819-1837, 2016. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileira-cartografia/article/view/44445>. Acesso em: 21 jan. de 2022.
- KANDEL, A. *Fuzzy mathematical techniques with applications*. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1986.

- KOLLIAS, V. J.; VOLIOTIS, A. Fuzzy reasoning in the development of geographical information systems. *International Journal of Geographical Informalion Systems*, v.5, p.209-223, 1991. <https://doi.org/10.1080/02693799108927844>
- LEANDRO, D. Modelagem de fragilidade ambiental usando índices baseados em dados especiais e com suporte de sistema especialista, Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- LÓPEZ, A.; AQUINO, A.M.; ASSIS, R. Agricultura de montanha: uma prioridade latente na agenda da pesquisa brasileira. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2011.
- MADHU, A.; KUMAR, A.; JIA, P. Exploring Fuzzy Local Spatial Information Algorithms for Remote Sensing Image Classification, *Remote Sensing*, v. 13, 4163, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13204163>
- MALCZEWSKI, J. On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches, *Transactions in GIS*, 4, 5–22, 2000. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
- MAPBIOMAS. Coleção da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. Acesso em: 17 fev. de 2020.
- MEIRELLES, M.S.P. Análise Integrada do Ambiente Através de Geoprocessamento – Uma Proposta Metodológica Para Elaboração de Zoneamentos, Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.
- MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; BESKOW, S.; NORTON, L.D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil, *Geoderma*, 202–203, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.009>
- MIARA, M.A.; OKA-FIORI, C. Análise por múltiplos critérios para a definição de níveis de fragilidade ambiental – um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-cará, Ponta Grossa/PR, *Revista RA'E GA*, Curitiba, n. 13, p. 85-98, 2007 <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v13i0.6642>
- MIRANDA, J.I. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas, Brasília, DF, Embrapa Informação Tecnológica, 2005.
- NEL, W.; REYNHARDT, D.A.; SUMNER, P.D. Effect of altitude on erosive characteristics of concurrent rainfall events in the northern KwaZulu-Natal Drakensberg. *Water AS*, v. 36, p.509–512, 2010. <https://doi.org/10.4314/wsa.v36i4.58429>
- PARSIAN, S.; AMANI, M.; MOGHIMI, A.; GHORBANIAN, A.; MAHDAVI, S. Flood Hazard Mapping Using Fuzzy Logic, Analytical Hierarchy Process, and Multi-Source Geospatial Datasets. *Remote Sensing*, v.13, 4761, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13234761>
- PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). *Revista Do Departamento De Geografia*, v.23, p.4-26, 2012. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>
- PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ 3, Águas Paraná, 2014. Disponível em: http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/Parana_3/plano_de_bacia/Produto_01_Caracteristicas_Gerais_da_Bacia_BP3_2014_v07_Final.pdf. Acesso em: 08 abril de 2020.
- PMRH, Plano Municipal de Recursos Hídricos de Toledo, 2017. Disponível em: <https://www.toledo.pr.gov.br/porta/plano-municipal-de-recursos-hidricos/plano-municipal-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 12 out. de 2018.
- QGIS Project, QGIS User Guide, Release 2.18, 2019. Disponível em: <https://docs.qgis.org/2.18/pdf/en/QGIS-2.18-UserGuide-en.pdf> Acesso em: 04 fev. 2022R
- CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 15 jul. de 2020.
- REGGIANI, P.; HASSANIZADEH, S.M. MEGASCALE thermodynamics in the presence of a conservative field: The watershed case. *Advances in Water Resources.*, v.97, p.73–86, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.09.002>
- ROSENDO, E.E.Q. Vulnerabilidade à seca nas regiões semiárida brasileira e portuguesa: uma avaliação baseada em lógica fuzzy, Tese (Doutorado em Geografia), Universidade do Porto, Portugal, 2019.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*. São Paulo, n. 8, 1994. <https://doi.org/10.7154/rdg.1994.0008.0006>
- SAATY, T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychol.*,

- v.15, p.234–281, 1977. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- SAATY, R.W. The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Math. Model.*, v. 9, p.161–176, 1987. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- SAATY, T.L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v.48, p.9–26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica, Tradução de Wainer da Silveira e Silva, São Paulo: McGraw-Hill, 1991.
- SAATY, T.L.; VARGAS, L.G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. *International Series in Operations Research & Management Science*, Berlin/Heidelberg: Springer, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- SCHMIDT, A.M.A. Processo de apoio a tomada de decisão abordagens: AHP e MACBETH, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- SEAB, Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento, Departamento de Economia Rural, 2018. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br>. Acesso em: 14 jul. de 2019.
- SILVA, A.B. Sistemas de Informações Georeferenciadas: conceitos e fundamentos, Campinas, SP, Editora Unicamp, 2003.
- SPÖRL, C. Análise de fragilidade ambiental relevo-solo com aplicação de três modelos alternativos nas altas bacias do Rio Jaguari-Mirim, Ribeirão do Quartel e Ribeirão da Prata, Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Universidade de São Paulo, 2001.
- SPÖRL, C. Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais, Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, 2007.
- TARBOTON, D.G., Watershed delineation using TAUDEM, A tutorial for using TauDEM to delineate a single watershed, Utah State University, 2011. Disponível em: <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/TauDEM5DelineatingASingleWatershed.pdf> Acesso em: 04 fev. de 2022.
- TRICART, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro, IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977.
- USGS, United States Geological Survey, EarthExplorer. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 mar. 2019.
- WALTRICK, P. C.; MACHADO, M.A.M.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, D. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.256-267, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150147>
- WESTERVELT, J., SHAPIRO, M., U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass76/manuals/r.reclass.html> Acesso em: 04 fev. 2022.
- WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.23, p.246–249, 1959. <https://doi.org/10.2136/sssaj1959.03615995002300030027x>
- WU, X.Z. Development of fragility functions for slope instability analysis, Technical Note, Landslides, v.11, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0536-3>
- ZADEH, L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p.338–353, 1965. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Karen Carrilho da Silva Lira realizou a concepção, metodologia, curadoria de dados, análise formal, administração do projeto, visualização, software, o esboço original da redação e a revisão e edição do texto. Humberto Rodrigues Francisco realizou a concepção, metodologia, curadoria de dados, análise formal, visualização, software, supervisão, e a revisão e edição da redação. Aldi Feiden realizou a concepção, metodologia, análise formal, supervisão e revisão e edição da redação.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.