

**ORDENAMENTO TERRITORIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
BARREIRO: UMA MEDIDA ORIENTATIVA AO DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

SPATIAL PLANNING OF THE BARREIRO RIVER BASIN: A GUIDING MEASURE FOR SUSTAINABLE
DEVELOPMENT

Karla Nadal

Doutora em Desenvolvimento Comunitário - UNICENTRO
knadal@gmail.com
Orcid: 0000-0002-3413-0140

Ronaldo Ferreira Maganhotto

Doutor em Geografia - UFPR
Professor Adjunto da Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO
ronaldomaganhotto@gmail.com
Orcid: 0000-0003-0659-1481

Luiz Claudio de Paula Souza

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas - ESALQ
Professor Titular da Universidade Federal do Paraná - UFPR
lsouza@ufpr.br
Orcid: 0000-0003-1492-9446

Marciel Lohmann

Doutor em Geografia - UFPR
Professor Adjunto da Universidade Estadual de Londrina - UEL
marciel@uel.br
Orcid: 0000-0001-9243-5412

Resumo

As mudanças no uso e cobertura do solo têm comprometido a manutenção e a conservação dos ecossistemas, resultando em danos ao meio ambiente, à economia e ao bem-estar da sociedade. A análise integrada das características físicas ambientais possibilita a inferência das limitações e aptidões do uso do solo. Ancorada nessa perspectiva, a pesquisa teve como objetivo analisar a aplicação dos Índices de Representação do Relevo (IRR) como instrumento de orientação ao Ordenamento Territorial da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro (BHRB), localizada no Município de Fernandes Pinheiro-PR. Para tanto, foram gerados atributos resultantes do Modelo Numérico do Terreno (MNT), a saber: *Altitude Above Channel Network* (AACN) - altitude em relação ao canal de drenagem, *Topographic Wetness Index* (TWI) - índice de umidade, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF) - potencial erosivo, *Ls Factor* (Fator LS) - produto da relação entre a declividade e o comprimento de rampa e *Slope* - declividade. O processamento dos IRR resultou na obtenção das Classes Limitantes classificadas como Aptas, Moderadas, Restritas e Inaptas denotando, assim, os níveis de fragilidade física ambiental na BHRB. Os resultados da pesquisa demonstram sua natureza inovadora e ratificaram a viabilidade da aplicação dos IRR como suporte à determinação da fragilidade física ambiental e subsídio à elaboração de propostas de ordenamento territorial de bacias hidrográficas, devido a sua confiabilidade, celeridade e possibilidade de associação às condições dos solos. Além disso, o estudo poderá servir como apoio técnico-científico para implementação de políticas públicas firmadas na conservação dos recursos naturais, a partir de diretrizes que potencializam a produtividade agrícola, a geração de renda e a melhoria das condições de vida da população.

Palavras-chave: Planejamento Ambiental. Geotecnologias. Desenvolvimento Sustentável.

Abstract

Changes in land use and land cover have compromised the maintenance and conservation of ecosystems, resulting in damage to the environment, the economy and the well-being of society. The integrated analysis of the physical environmental characteristics enables the inference of the limitations and aptitudes of land use. Anchored in this perspective, the research aimed to analyze the application of the Relief Representation Indices (RRI) as an instrument to guide the Territorial Planning of the Barreiro River Basin (TPBRB), located in the Municipality of Fernandes Pinheiro-PR. To this end, attributes resulting from the Numerical Terrain Model (MNT) were generated, namely: *Altitude Above Channel Network* (AACN) - altitude in relation to the drainage channel, *Topographic Wetness Index* (TWI) - moisture index, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF) - erosive potential, *Ls Factor* (LS Factor) - product of the relationship between slope and slope length and *Slope* - slope. The processing of the IRR resulted in obtaining the Limiting Classes classified as Apt, Moderate, Restricted and Inapt, thus denoting the levels of physical environmental fragility in the TPBRB. The results of the research demonstrate its innovative nature and ratified the feasibility of applying the RRI as a support to the determination of the physical environmental fragility and subsidy to the elaboration of proposals for territorial planning of hydrographic basins, due to its reliability, celerity and possibility of association with soil conditions. In addition, the study may serve as technical-scientific support for the implementation of public policies based on the conservation of natural resources, based on guidelines that enhance agricultural productivity, income generation and improvement of living conditions of the population.

Keywords: Environmental Planning. Geotechnologies. Sustainable Development

1. Introdução

A Revolução Industrial alavancou a demanda por produtos e serviços, intensificando a exploração dos recursos naturais. Ademais, o manejo inadequado dos solos e a adoção de práticas não sustentáveis desequilibram a dinâmica ambiental, afetando os elementos físicos e biológicos do ambiente. Como consequência desses fatores, ocorre o desgaste dos ecossistemas, que prejudica a manutenção e a conservação dos recursos hídricos e edáficos, resultando na perda da qualidade ambiental e de vida das populações, comprometendo, assim, o usufruto destes recursos às gerações futuras.

Neste contexto, a compreensão da dinâmica física ambiental configura-se como princípio fundamental ao planejamento ambiental, instrumento imprescindível à conservação da natureza, permitindo que as inserções tecnológicas da sociedade sejam menos nocivas ao meio ambiente e mais favoráveis ou produtivas aos seres humanos, potencializando a utilização dos recursos naturais (ROSS, 2006).

De acordo com tal abordagem, entende-se que as técnicas de geoprocessamento e suas aplicações em estudos ambientais mostram-se como uma ferramenta auxiliar ao planejamento e ordenamento territorial. A espacialização, em ambiente de geoprocessamento, das informações físicas como: Modelo Numérico do Terreno (MNT), dados clinográficos, uso do solo, dados pedológicos, geológicos e rede de drenagem, facilitam o entendimento da dinâmica ambiental, fornecendo subsídios para a elaboração de políticas de planejamento e gestão de uso e cobertura de superfície.

Como objeto de análise ambiental, as bacias hidrográficas fazem-se presentes em uma série de pesquisas. Sendo consideradas unidades sistêmicas de planejamento, devido à relação social e natural que exercem entre si, as bacias devem ser utilizadas para a criação e aplicação de modelos capazes de identificar diferentes níveis de fragilidade física ambiental, bem como um meio para se oportunizar um sistema ambientalmente equilibrado (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Dentre os modelos metodológicos aplicados em pesquisas ambientais, destacam-se a Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados, proposta por Ross (1994), e a Análise da Vulnerabilidade Natural à Erosão, desenvolvida por Crepani *et al.* (1996). Para isso, consideraram, em seus trabalhos, informações clinográficas, pedológicas, de uso, entre outras.

Seguindo um viés semelhante, Maganhotto *et al.* (2013) e Maganhotto *et al.* (2020), propuseram, como ferramenta de suporte no planejamento ambiental da Floresta Nacional de Irati e da Reserva Biológica das Araucárias, a aplicação de Índices de Representação do Relevo (IRR), sendo eles: *Altitude Above Channel Network* (AACN) - altitude em relação ao canal de drenagem, *Topographic Wetness Index* (TWI) - índice de umidade, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF) - potencial erosivo, *LS Factor* (Fator LS) - produto da relação entre a declividade e o comprimento de rampa e *Slope* (declividade).

Quando comparado o processamento dos IRR, como produto a ser associado à fragilidade física ambiental, por meio da determinação de Classes Limitantes (MAGANHOTTO *et al.*, 2013 e MAGANHOTTO *et al.*, 2020), com as metodologias de Ross (1994) e Crepani *et al.* (1996), percebe-se que os produtos gerados a partir dos IRR não dependem de informações pedológicas, uma vez que, os valores destes atributos são passíveis de associação às condições dos solos, contornando assim, a limitação das metodologias de Ross (1994) e Crepani *et al.* (1996), as quais dependem diretamente de informações pedológicas, normalmente disponíveis em escalas pequenas, restringindo as análises a serem estudadas.

Desta feita, a presente pesquisa tem como objetivo analisar a aplicação dos IRR no Ordenamento Territorial da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro. Logo, orientando o cumprimento deste objetivo, seguem descritos os específicos:

- Elaborar mapas temáticos da área de estudo (rede de drenagem, declividade, solos, uso do solo, disposição espacial dos IRR);
- Gerar a fragilidade física ambiental (Classes Limitantes) da Bacia Hidrográfica a partir do processamento dos IRR.

A Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro, área de estudo em questão, configura-se como uma sub-bacia do Rio Imbituvão pertencente à bacia do Rio Tibagi, figura 1. Possui uma área de aproximadamente 6600 hectares, localizada no município de Fernandes Pinheiro, estado do Paraná. A Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro tem como rios principais o Barreiro, com cerca de 21,8 quilômetros e o Manducas com 6,8 quilômetros, aproximadamente. De considerável importância econômica e social para o município de Fernandes Pinheiro, totaliza, cerca de 294 propriedades rurais, as quais exercem atividades Agropecuárias, segundo dados do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (CAR).

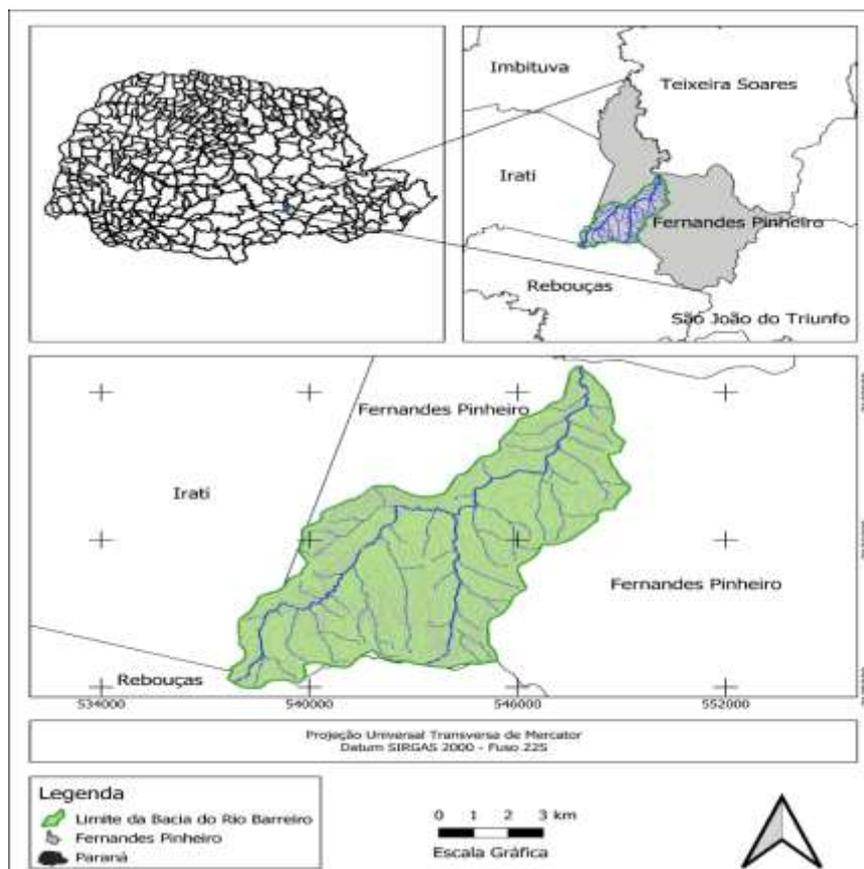


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb (temperado), com verões amenos, invernos com geadas severas e frequentes, sem estação seca. Apresenta estações climáticas bem definidas, com chuvas distribuídas durante todo o ano (NITSCHKE *et al.*, 2019).

O recorte físico-territorial investigado caracteriza-se por uma paisagem heterogênea e fragmentada, possivelmente pelo uso e ocupação da terra pela agricultura e pecuária. A estrutura geológica é constituída predominantemente de arenitos, cuja textura varia de fina a grosseira (SALAMUNI; HERTEL; SILVA, 1969).

Os solos encontrados nesta bacia foram classificados como argissolos vermelho-amarelos, cambissolos háplicos e húmicos, latossolos vermelhos e neossolos regolíticos (na escala de 1:250.000), conforme levantamento e reconhecimento dos solos do estado do Paraná (EMBRAPA, 2006). Os argissolos vermelho-amarelos e cambissolos háplicos e húmicos predominam, abrangendo, respectivamente em torno de 2640,22 hectares e 1872,00 hectares, totalizando, cerca de 67,34% da área da bacia. Já os latossolos vermelhos ocupam uma área de 2091,26 ha (31,42%) e os neossolos regolíticos (1,24%) apresentam-se em menor quantidade, 52,62 hectares.

Com relação ao Uso do Solo, de acordo com pesquisa realizada no MapBiomias (2019), constatou-se a existência de oito classes de uso correspondentes à Formação Florestal, Floresta Plantada, Pastagem, Mosaico de Agricultura e Pastagem, áreas não Vegetadas, Corpos d'água, Soja e Lavouras Temporárias.

A cultura da Soja corresponde à forma de uso com maior extensão da bacia, ocupando cerca de 2640,14 hectares, 39,67% da área, concentrando-se na porção sul. Correspondendo a 12,54% da bacia, 835,41 hectares, localizam-se as Lavouras Temporárias, com maior abrangência também na região sul. Mosaico de Agricultura e Pastagem compreendem 750,42 hectares, 11,27%, presentes em maior proporção na região central da bacia hidrográfica. A superfície composta por Formação Florestal ocupa 2111,53 hectares, ou seja, 31,72% da bacia, com maior ocorrência da classe na região norte, contudo encontram-se porções fragmentadas ao longo de toda a área de estudo. A Floresta Plantada equivale a 313,64 hectares, 4,71% da bacia, com maior concentração ao norte e ao sul. Por fim, estão as áreas não vegetadas com 3,01 hectares, 0,04% e os corpos d'água que ocupam em torno de 1,95 hectares, ou seja, 0,02% da bacia hidrográfica.

Neste trabalho, entendeu-se que o processamento dos IRR (AACN, TWI, MRVBF, *LS Factor* e *Slope*), obtidos a partir do Modelo Numérico do Terreno (MNT), possibilitou a aquisição de informações passíveis de associação aos processos geomorfológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro, facilitando a compreensão do processo de causa e efeito presente na bacia, diretriz determinante à compreensão da dinâmica ambiental na referida unidade de planejamento, inferindo uma orientação ao Ordenamento Territorial da BHRB.

Seguindo tais abordagens compreende-se que a aplicação dos IRR no processo de Ordenamento Territorial da BHRB poderá servir como projeto-piloto à elaboração de uma

consistente proposta de Ordenamento Territorial da sub-bacia do Rio Imbituvão, configurando-se como uma possibilidade metodológica a ser adotada para outras áreas de interesse. Além disso, a investigação poderá subsidiar o fortalecimento ou a elaboração de ações de políticas públicas para este território.

Aplicação dos Índices de Representação do Relevo em pesquisas relacionadas ao planejamento ambiental de bacias hidrográficas

Para Arabameri *et al.* (2020), Trentin e Robaina (2020) e Yang, Chen e Jiang (2020), o desenvolvimento de geotecnologias associadas à análise ambiental proporciona a incorporação de procedimentos e técnicas que auxiliam na análise do relevo por meio de modelagens e interpretações de MNT. Por isso, essa ferramenta tem sido utilizada para descrever numericamente e qualitativamente as características espaciais de bacias hidrográficas, oferecendo medidas mais reproduzíveis do que as técnicas manuais tradicionais.

A análise digital do terreno apresenta-se como uma ferramenta rápida e econômica em relação ao processo tradicional, por ser realizada com base na análise estereoscópica de fotografias aéreas, que pode ser aplicada à quantificação e classificação do relevo. Esse tipo de investigação possibilita a definição automática ou semiautomática das unidades morfológicas da paisagem com maior confiabilidade e precisão, solucionando problemas detectados no mapeamento convencional e, conseqüentemente, o desenvolvimento de estudos relacionados ao ordenamento territorial como suporte ao planejamento ambiental desses espaços (IPPOLITI *et al.*, 2005).

Na visão de Montgomery (2003), o MNT trata de uma representação espacial da superfície, a partir de pontos que descrevem a elevação tridimensional de uma grade de dados a intervalos regulares ou irregulares. Seu processo de elaboração é dividido em três etapas: aquisição dos dados planialtimétricos secundários, geração da grade e derivação dos atributos do relevo.

A empregabilidade do MNT auxilia na compreensão dos processos erosivos e de deposição de sedimentos, assim como a redistribuição dos solos, permitindo predições de índices dos processos geomorfológicos e suas relações com a paisagem, bem como a influência do relevo sobre a drenagem (SCHOORL; SONNEVELD; VELDKAMP, 2000; MONTGOMERY, 2003).

Essa representação digital, quando associada aos mapas de variabilidade, pode figurar-se como meio para a visualização e entendimento das relações de causa e consequência da distribuição espacial dos atributos do solo (HAMMER *et al.*, 1995).

A obtenção dos IRR com a geração do MNT constitui parâmetros fundamentais para a aquisição de elementos pedológicos e geomorfológicos que se relacionam com a vulnerabilidade ambiental (MAGANHOTTO, 2013). Dito isso, o produto tridimensional da superfície resultante do MNT e o processamento dos IRR possibilitam a interpretação das relações físico-naturais,

favorecendo a caracterização do relevo e da rede de drenagem, bem como de parâmetros e processos condicionados pela variabilidade espacial, inerentes ao desenvolvimento dos solos.

Pesquisas realizadas por Moore *et al.* (1993), Giles e Franklin (1998), Hermuche *et al.* (2003) e Ippoliti *et al.* (2005) evidenciaram que os IRR passaram a ser utilizados como subsídio de análise ambiental desde a década de 1990. O avanço da tecnologia computacional, associado ao crescimento do volume de dados geográficos, possibilitou a avaliação desses atributos por meio do MNT e a correlação deles com a geomorfologia e seus processos.

Deste modo, “[...] a utilização dos IRR, apoiada na elaboração de variáveis derivadas de um MNT e associadas à distribuição de ocorrência das classes pedológicas, assume considerável importância pelo custo-benefício para o mapeamento em escalas detalhadas e semidetalhadas” (COELHO, 2010, p. 1).

Sirangelo e Guasselli (2017) entendem que os IRR são identificados por Sistema de Informação Geográfica (SIG) e pelo levantamento de atributos quantitativos da topografia de um MNT. A análise do terreno permite descrever quantitativamente as formas da superfície terrestre por meio de equações aplicadas a Modelos Numéricos de representação altimétrica.

Na acepção de Moore, Grayson e Ladson (1991), os atributos topográficos podem ser divididos em primários e secundários (ou compostos): os primários são calculados diretamente do MNT, incluindo variáveis como elevação, declividade, comprimento de rampa, orientação das vertentes, plano e perfil de curvatura, entre outros; já os secundários envolvem combinações dos primários, sendo utilizados para caracterizar a variabilidade espacial de processos que ocorrem na paisagem como fatores relacionados à erosão (transporte de sedimentos, movimento da água superficial e subsuperficial do solo, índice de umidade, entre outros).

Os IRR possibilitam a identificação da fragilidade física ambiental de determinada região por meio da geração de dados quantitativos e espacializáveis, passíveis de associação à geomorfologia e à pedologia, configurando-se assim como instrumento de planejamento ambiental e territorial de bacias hidrográficas. Além disso, permite o reconhecimento de diferentes graus de vulnerabilidade, e pode servir de parâmetro para orientar o uso em cada classe de fragilidade e viabilizar a compatibilização entre as características físicas naturais e seu uso a partir de suas limitações e aptidões físicas (MAGANHOTTO *et al.*, 2013; MAGANHOTTO *et al.*, 2016; MAGANHOTTO; LOHMANN; SOUZA, 2020; MAGANHOTTO *et al.*, 2020).

Considerando o contexto descrito, diversos autores, como Ippoliti *et al.* (2005), Sirtoli *et al.* (2008), Sousa Junior e Demattê (2008), Prates, Souza e Oliveira Junior (2012), Nowatzki (2013), Sirangelo e Guasselli (2017) e Maganhotto *et al.* (2020), constataram a eficácia da aplicação de IRR.

Ippoliti *et al.* (2005) realizaram uma análise quantitativa da superfície de uma microbacia, com o objetivo de delinear e classificar as geofomas da paisagem e a sua posterior associação aos

diferentes tipos de solo. Os autores verificaram que o método utilizado, baseado na geração de um MNT e no cálculo dos IRR (elevação, declividade, orientação e curvatura da superfície terrestre), se apresenta como uma opção rápida e econômica, podendo ser aplicado à quantificação e classificação do relevo.

Sirtoli *et al.* (2008) desenvolveram um mapeamento de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Canguiri, Curitiba-PR, com auxílio da geologia, empregando atributos do terreno como índice de umidade, curvatura, declividade, elevação e orientação de vertente. Os autores comprovaram que algumas classes de solos estão associadas a atributos do relevo, determinando, com isso que: as áreas mais elevadas apresentaram maior incidência da classe latossolo, enquanto os gleissolos se localizavam em locais de menor elevação e com declividade menor que 3%. Por sua vez, os cambissolos se situavam em locais com declividades intermediárias entre as que propiciam ocorrência dos gleissolos e latossolos, concluindo, por meio dos resultados da pesquisa, que a metodologia aplicada é adequada à melhoria da qualidade dos levantamentos preliminares de solos.

Sousa Junior e Demattê (2008) caracterizaram unidades de mapeamento de solos das regiões de Ibaté e São Carlos, no estado de São Paulo, formados por materiais basálticos e areníticos em função da declividade e altitudes correspondentes, com base em MNT. Os pesquisadores concluíram “[...] que o conhecimento da distribuição dos solos no relevo é de grande importância, pois facilita a execução do levantamento de solos. O modelo de elevação apresenta semelhanças com o mapa de solos, podendo auxiliar na sua determinação” (SOUSA JUNIOR; DEMATTÊ, 2008, p. 449).

Prates, Souza e Oliveira Junior (2012) utilizaram os atributos AACN, CNBL, TWI e MRVBF como suporte na delimitação dos diferentes compartimentos da paisagem, comprovando sua eficácia no apoio ao mapeamento dos solos a nível de subordem do sistema brasileiro de classificação de solo.

Nowatzki (2013) desenvolveu uma pesquisa empregando atributos topográficos com o propósito de verificar sua aplicabilidade no mapeamento do solo. O estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno, localizada no município de Antonina-PR. Seus resultados confirmaram o êxito do método de Tabulação Cruzada na espacialização de Unidades Geomórficas.

Sirangelo e Guasselli (2017) empregaram quatro métodos de obtenção de IRR (declividade, índice de umidade, índice de corrente de máximo fluxo e índice de capacidade de transporte de sedimentos) da Bacia Hidrográfica do Rio Maquiné, no estado do Rio Grande do Sul, com suporte de técnicas de geoprocessamento e aplicação de dados orbitais. O estudo mostrou-se relevante no que concerne à relação entre as características topográficas da bacia em seus diferentes setores e o comportamento morfogenético que altera as características de erosão, transporte e deposição ao longo da bacia hidrográfica como um todo.

Maganhotto *et al.* (2020) propuseram o Zoneamento Ambiental da Reserva Biológica das Araucárias, localizada na região centro sul do Paraná, mediante o processamento dos atributos topográficos: *Altitude Above Channel Network* (AACN), *Topographic Wetness Index* (TWI), *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF), declividade (*Slope*) e do potencial de perda de solo (*Slope Length - LS Factor*), derivados do MNT e das suas correlações com o uso do solo. A investigação reconhece que a utilização dos atributos topográficos possibilitou o entendimento das informações pedológicas e de limitação de uso.

Considerando as razões discutidas, o reconhecimento das características geomorfológicas e pedológicas, adquiridas por meio do processamento dos IRR, pode ser considerado pertinente no ordenamento territorial de bacias hidrográficas, contribuindo, dessa forma, para a conservação dos recursos naturais, refletindo na melhoria da qualidade de vida da população. Estas aplicações, além de fornecerem subsídios para o planejamento ambiental e ordenamento territorial, podem servir de apoio para elaboração de políticas direcionadas ao fomento do desenvolvimento sustentável.

Portanto, pesquisas sobre os atributos do relevo por meio do processamento dos IRR representam mais uma opção de avaliação e interpretação da paisagem, que se devem fazer presentes no processo de ordenamento de bacias hidrográficas.

2. Materiais e Métodos

Compilação dos mapas temáticos

Para a elaboração e compilação dos dados cartográficos utilizou-se do *Software System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA), versão 8.0.0 (2021), onde realizaram-se o processamento das informações resultando nos seguintes mapas temáticos:

- Localização e rede hidrográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro: base cartográfica do SIMEPAR;
- Classes pedológicas: levantamento sistematizado realizado pela Embrapa na escala de 1:250.000 (EMBRAPA, 2006);
- Modelo Numérico do Terreno (MNT): elaborado a partir das curvas de nível com 20 metros de equidistância (obtidas por meio de arquivos cartográficos da Companhia Paranaense de Energia, COPEL), as quais foram processadas, com o auxílio do interpolador *B-Spline Approximation*, ferramenta disponível no SAGA;
- Uso e cobertura do solo: produtos do mapeamento anual do uso e cobertura da terra no Brasil (MAPBIOMAS, 2019);
- Propriedades rurais: dados do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (CAR, 2022);
- Classes Limitantes: a partir do processamento do MNT.

Caracterização dos Índices de Representação do Relevo

De posse do MNT, foram gerados cinco IRR: *Altitude Above Channel Network* (AACN) - altitude em relação ao canal de drenagem, *Topographic Wetness Index* (TWI) - índice de umidade, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF) - potencial erosivo, *LS Factor* (Fator LS) - produto da relação entre a declividade e o comprimento de rampa e *Slope* (declividade). A nomenclatura utilizada na descrição dos atributos foi mantida conforme descrita no *Software SAGA*, versão 8.0.0 (2021).

A altitude em relação ao canal de drenagem (AACN), configura-se como a distância vertical da célula, a partir da célula mais próxima localizada na rede de drenagem, expressa em metros (MÖLLER *et al.*, 2012). De acordo com Romão (2006), a altitude é diferente em cada ponto da rede de drenagem, estimando a energia potencial do terreno.

O índice de umidade (TWI), foi definido em função da declividade e da área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo, isto é, o tamanho da superfície que está captando água da chuva e direcionando esse volume ao ponto calculado (CHAGAS, 2006). Com isso, maiores valores de TWI indicam maior tendência em acumular água e, portanto, maior conteúdo de água no solo (GRUBER; PECKHAM, 2009).

O MRVBF, foi projetado para mapear o potencial erosivo (sedimentação e deposição) na paisagem, definindo e distinguindo fundos de vale, de encostas, combinando diferentes paisagens em um único índice (GALLANT; DOWLING, 2003; WANG *et al.*, 2010). Esse atributo quantifica quão plano é o topo de uma encosta, o que favorece a formação de solos profundos, a mecanização e drenagem da área (OLAYA; CONRAD, 2008).

O Fator LS, expressa o efeito da topografia sobre a erosão, interferindo na dinâmica erosiva, por meio da combinação da declividade média do terreno com o comprimento de encostas, fatores fundamentais para a compreensão do processo de escoamento hídrico superficial. Quanto maior o LS, maior o potencial erosivo (RUHOFF *et al.*, 2006; PINHEIRO; CUNHA, 2011).

A declividade (*Slope*), refere-se à inclinação da superfície do terreno em relação à inclinação horizontal, podendo assumir valores variando de 0 a 90 graus, sendo mais comumente expressa em porcentagem (CÂMARA *et al.*, 1996; VALERIANO, 2008).

O quadro 1, sintetiza os valores dos atributos e as condições físicas ambientais a eles associadas, seguido de suas referências.

Quadro 1. Parâmetros estabelecidos para o processamento dos IRR

Altitude em relação ao canal de drenagem - <i>Altitude Above Channel Network (AACN)</i>		
Condição pedológica	Parâmetros (valores)	Referência
Lençol freático mais próximo da superfície do solo; acúmulo de sedimentos	Menores que 5	Böhner <i>et al.</i> (2002)
Locais de declive; transferências de sedimentos (encostas)	Entre 5 e 20	
Perda de sedimentos; menor vulnerabilidade às inundações (topos de morros)	Maiores que 20	
Umidade - <i>Topographic Wetness Index (TWI)</i>		
Condição pedológica	Parâmetros (valores)	Referência
Solos bem drenados	Entre 4 e 5	Lin <i>et al.</i> (2006)
Solos moderadamente drenados	Entre 5 e 7	
Solos mal drenados	Entre 7 e 12	Prates, Souza e Oliveira Junior (2012)
Solos hidromórficos	Maiores que 8	
Potencial erosivo - <i>Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)</i>		
Condição pedológica	Parâmetros (valores)	Referência
Superfícies de erosão	Inferiores a 0,5	Mckenzie e Gallant (2007)
Superfícies de deposição	Superiores a 0,5	
Encostas	Inferiores a 0,5	
Pequenos fundos de vale	Superiores a 0,5 e menores que 1	Mckergow, Gallant e Dowling (2007)
Grandes fundos de vale	Superiores a 1	
Fator topográfico - <i>LS Factor (Fator LS)</i>		
Condição pedológica	Parâmetros (valores)	Referência
Potencial erosivo baixo	Entre 0 a 4	Mansor <i>et al.</i> (2002)
Potencial erosivo médio	Entre 4 a 6	
Potencial erosivo alto	Entre 6 a 10	
Declividade - <i>Slope</i>		
Condição pedológica	Parâmetros (valores)	Referência
Fragilidade ambiental muito baixa	0 a 6%	Ross (1994)
Fragilidade ambiental baixa	6 a 12%	
Fragilidade ambiental média	12 a 20%	
Fragilidade ambiental alta	20 a 30%	
Fragilidade ambiental muito alta	Maior que 30%	

Fonte: Adaptado de Maganhotto, 2012.

Os parâmetros e variáveis sintetizados no quadro 1 auxiliaram na definição dos pontos de inflexão da Lógica *Fuzzy* para o estabelecimento das Classes Limitantes, bem como na análise dos resultados.

O avanço da geotecnologia, ocorrido nas últimas décadas, facilitou a espacialização de dados, permitindo sua integração em SIG por intermédio da aplicação de técnicas de inferência espacial. No contexto atual, de acordo com Krishnan *et al.* (2020) e Hannan *et al.* (2019), os modelos de inferência mais usados são a Lógica *Fuzzy*, os Operadores Boleanos e a Sobreposição de Índices, todavia, os métodos baseados na Lógica *Fuzzy* destacam-se com melhores resultados em estudos envolvendo dados geográficos ambientais, conforme constatado nas pesquisas de Cornwell, Robert e Gordon (2020), Madhu, Kumar e Jia (2021) e Parsian *et al.* (2021).

Estimou-se a fragilidade física ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro com a espacialização das Classes Limitantes a partir do processamento dos IRR, utilizando-se da Lógica *Fuzzy* e da Análise por Múltiplos Critérios (*Multi Criteria Evaluation – MCE*).

Desde a década de 1980, a teoria de conjuntos *Fuzzy* tem se mostrado uma importante ferramenta no tratamento de dados geográficos, principalmente pela metodologia empregada para solucionar imprecisão e abstração nas classificações, diminuindo a propagação de erros na modelagem da paisagem, que possivelmente ocorreriam na classificação convencional, tendo em vista a atribuição de valores fixos (LIRA; FRANCISCO; FEIDEN, 2022).

A metodologia *Fuzzy* pode ser representada por diferentes funções de pertinência dependendo das características do conjunto no problema. A escolha do tipo de função a ser aplicada (linear, j-amoldado, sigmoidal, entre outras), a curva empregada (crescente ou decrescente) e o ponto de inflexão, são definidos após análise dos fatores e entendimento de uma representação apropriada.

Ao final da padronização *Fuzzy*, as imagens enquadram-se em uma classificação comum, assumindo valores de 0 a 1, diferenciando-se no delineamento de sua função de pertinência, tipologia de curva e ponto de inflexão.

Convém reiterar que, os valores próximos a zero, representam condições com maiores fatores de risco, devido à susceptibilidade aos processos erosivos e ao acúmulo de água e, níveis com valores mais altos, próximos a 1, indicam áreas com menores restrições de uso (OLIVEIRA, 2010; MAGANHOTTO, 2016).

Quadro 2. Parâmetros adotados na Lógica *Fuzzy*

IRR	Função	Curva	Ponto de Inflexão	Caracterização	Condição em Campo	Referência
AACN	linear	crescente	3	Até 3: valor 0 Acima de 3: valores variam de 0,1 a 1	Até 3: áreas sujeitas a constantes inundações	Maganhotto (2013)
TWI	linear	decrecente	7	Até 7: valor 1 Acima de 7: valores variam de 0 a 0,99	Acima de 7: solos mal drenados ou saturados	Lin <i>et al.</i> (2006) Prates, Souza e Oliveira Junior (2012)
MRVBF	linear	simétrica	0,4 e 1,2	Até 0,4: valores variam de 0 a 0,99 De 0,4 a 1,2: valor 1 Acima de 1,2: valores variam de 0,99 a 0	Até 0,4: áreas associadas à erosão Acima de 1,2: áreas associadas à sedimentação	Mckenzie e Gallant (2007) Maganhotto <i>et al.</i> (2013)
LS Factor	linear	decrecente	4	Até 4: valor 1 Acima de 4: valores variam de 0,99 a 0	Acima de 4: áreas propensas à erosão	Mansor <i>et al.</i> (2002)
Slope	linear	decrecente	3%	Até 3%: valor 1 Acima de 3%: valores variam de 0,99 a 0	Acima de 3%: áreas com necessidade de avaliação	Ross (1994)

Fonte: Adaptado de Maganhotto *et al.*, 2016.

De posse das imagens *Fuzzy*, partiu-se para a Análise por Múltiplos Critérios (MCE). Esta etapa pautou-se no grau de relevância entre os atributos topográficos (IRR), atribuindo-se, conseqüentemente, valores de um índice em relação ao outro, determinando o grau de importância relativa entre eles.

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), foi desenvolvida por Tomas L. Saaty na década de 70, e representa um modelo de avaliação que auxilia de forma mais compreensiva a criação de hierarquias, critérios e metas, sendo considerado um dos métodos multicritérios mais utilizados no auxílio das tomadas de decisões complexas, pois pode avaliar sistematicamente seus elementos, por meio de comparações. Além de ser um instrumento para a elaboração de propostas de planejamento e adequação do uso do solo, a partir da análise da fragilidade física ambiental (GOMES; BIAS, 2018).

A determinação dos pesos e sua importância relativa foi realizada no *Software SAGA*, utilizando uma técnica de comparação pareada entre fatores, comparados relativamente uns aos outros, sempre de dois a dois, para desenvolver um conjunto de pesos e fatores (tabela 1), representando sua importância no mapa de Classes Limitantes.

Tabela 1. Valores estabelecidos na comparação pareada

IRR	AACN	TWI	MRVBF	LS	Slope
AACN	1	0,33	0,14	0,2	0,5
TWI	3	1	0,17	0,33	3
MRVBF		6	1	4	7
<i>LS Factor</i>	5	3	0,25	1	4
<i>Slope</i>	2	0,33	0,14	0,25	1

Fonte: *Software SAGA*, 2021.

De posse dos pesos confirma-se sua pertinência, a partir da Razão de Consistência (*Consistency Ratio* - CR) apresentada. A CR constata inconsistências ocorridas durante o processo de atribuição dos pesos pois, a subjetividade na análise dos resultados, baseada, muitas vezes, na experiência do pesquisador, pode suceder em inconsistências na atribuição dos pesos. Para Saaty e Vargas (1991), o valor do CR deve ser menor que 0,1 para garantir consistência satisfatória e um julgamento confiável, caso resulte em valores acima de 0,1, faz-se necessário reavaliar o processo. O cálculo da Razão de Consistência obtido para estes pesos (tabela 1) apresentou-se de forma aceitável (0,05).

A partir da análise visual do histograma da imagem MCE, resultante da síntese das imagens *Fuzzy*, realizou-se a reclassificação da imagem em quatro Classes, denominadas de Classes Limitantes Apta, Moderada, Restrita e Inapta.

Considerando a definição de meio ambiente presente na Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981 (inciso III, do artigo 3º) e sua relação com a vida no planeta terra, entende-se que a proteção ambiental se reporta ao cuidado com as condições que possibilitam que a vida ocorra.

Neste contexto, na esfera de precaução, a falta de certeza científica não é uma autorização para agir de forma imprudente, ao contrário, nas situações ainda desconhecidas pela ciência, havendo a potencialidade ou a probabilidade, ainda que remota, de dano sério ou irreversível ao meio ambiente, a conduta deverá ser a da cautela. Há o dever da coletividade de promover a proteção do meio ambiente e agir com prudência (JAPIASSU e GUERRA, 2017).

De acordo com tal abordagem vale ressaltar que os valores utilizados como ponto de inflexão para geração das imagens *Fuzzy* e pesos atribuídos, buscaram identificar áreas livres de limitações, tal medida seguiu o intuito de conservação, a fim de orientar o uso racional da BHRB. Logo, se vislumbrar o uso da área sob a conotação de potencial de produção, levando-se em consideração

as técnicas de manejo a fim de otimizar áreas com produção, os valores e pesos podem ser revistos, testados e averiguados em campo.

De posse do produto cartográfico Classes Limitantes, buscou-se caracterizar a disposição dos IRR sob cada Classe Limitante. Para tanto, criou-se de forma aleatória uma malha de pontos e com a função *extract*, verificou-se as informações dos IRR associadas a cada ponto (figura 8).

3. Resultados e Discussões

Disposição dos Índices de Representação do Relevo na bacia hidrográfica do Rio Barreiro

Maganhotto *et al.* (2013) e Maganhotto *et al.* (2020) apontaram os índices *Altitude Above Channel Network* (AACN) - altitude em relação ao canal de drenagem, *Topographic Wetness Index* (TWI) - índice de umidade, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF) - potencial erosivo, *LS Factor* (Fator LS) - produto da relação entre a declividade e o comprimento de rampa e *Slope* (declividade), como atributos pertinentes à aquisição de informações relevantes à quantificação e à representação espacial de áreas com diferentes limitações ao uso, caracterizando-se como variáveis importantes à obtenção da suscetibilidade ambiental.

A análise do processamento dos atributos AACN, TWI, MRVBF, *LS Factor* e *Slope*, amparada por pesquisas realizadas por Böhner *et al.* (2002), Mansor *et al.* (2002), Lin *et al.* (2006), Mckergow, Gallant e Dowling (2007), Mckenzie e Gallant (2007), Prates, Souza e Oliveira Junior (2012) e Maganhotto (2013) determinaram, para esses índices, valores correspondentes à erosão, deposição e acúmulo de água, os quais podem ser utilizados como parâmetros auxiliares à obtenção da fragilidade ambiental.

A altitude em relação ao canal de drenagem, *Altitude Above Channel Network* (AACN), figura 2, variou de 0 a 131,62 metros, com valores menores associados à proximidade da drenagem e maiores aos topos de morro. Na tabela 2 representa-se a disposição numérica e na figura 2 a espacial do AACN.

Tabela 2. Disposição do AACN na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro

Classes (m)	Área (ha)	Porcentagem
0 a 5	2000,44	30,05
5 a 10	770,15	11,57
10 a 20	1241,01	18,64
20 a 40	1585,55	23,82
Acima de 40	1058,95	18,90

Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

Infere-se que 2000,44 hectares, área correspondente a 30,05% da bacia, estão inseridos no intervalo de 0 a 5 metros de distância da rede de drenagem, recebendo influência direta do canal, com risco à inundação. Para Böhner *et al.* (2002), valores menores do índice caracterizam superfícies mais próximas do nível do canal, com acúmulo de sedimentos e proximidade do lençol freático. Os valores intermediários desse atributo encontram-se a uma distância de 10 a 20 metros da drenagem, totalizando 1241,01 hectares, indicando zonas de transferência de material, geralmente nas encostas, onde o declive é maior (BÖHNER *et al.*, 2002). As zonas de menor vulnerabilidade às inundações estão a uma distância mínima de 20 metros do canal, presentes em 42,72% da área da bacia.

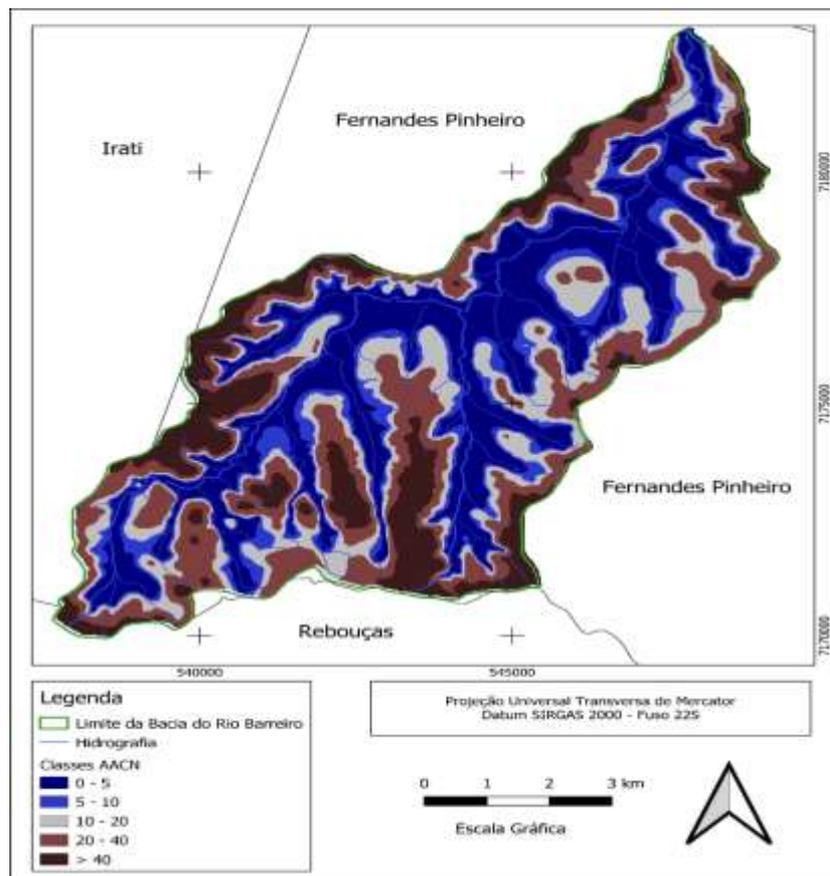


Figura 2. Disposição espacial do AACN na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

O processamento da variável umidade, *Topographic Wetness Index* (TWI), apresentou variação de 0 a 23,16 metros, sendo que, valores maiores associam-se a solos hidromórficos e menores a solos bem drenados, conforme se mostra na tabela 3 e figura 3.

Tabela 3. Disposição do TWI na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro

Classes (m)	Área (ha)	Porcentagem
0 a 5	28,20	0,43
5 a 7	2397,24	36,01
7 a 8	1675,09	25,71
8 a 10	1799,06	27,02
Acima de 10	756,50	11,36

Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

A ocorrência de solos bem drenados foi verificada em 28,20 hectares, entre os valores de 0 a 5; solos moderadamente drenados em 36,01% da área. Entretanto, as superfícies mal drenadas estão em 64,09% da bacia, com valores de TWI maiores que 7.

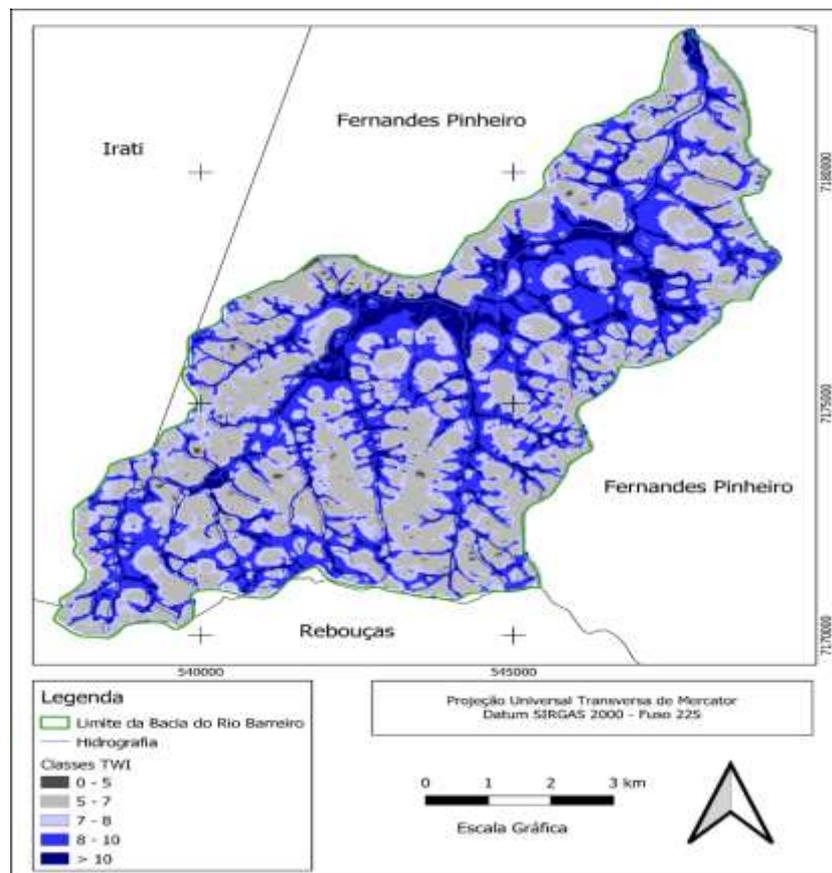


Figura 3. Disposição espacial do TWI na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

O potencial erosivo, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF), variou de 0 a 7,91 metros. Foram identificados como encosta, os pontos em que o MRVBF assumiu valores menores que 0,5; valores superiores a 0,5 e inferiores a 1, pequenos fundos de vale; e maiores que 1 a grandes fundos de vale, de acordo com a tabela 4 e figura 4.

Tabela 4. Disposição do MRVBF na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro

Classes (m)	Área (ha)	Porcentagem (%)
0 a 0,25	1696,84	25,49
0,25 a 0,5	1248,63	18,76
0,5 a 2,5	2205,36	33,13
2,5 a 5	1338,25	20,10
Acima de 5	167,02	2,51

Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

Utilizando os parâmetros estabelecidos por McKenzie e Gallant (2007), constata-se que 44,25% da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro apresenta valores inferiores a 0,5, demonstrando áreas de encostas com potencial erosivo. As regiões com valores superiores a 0,5 totalizam 3710,63, caracterizando-se como superfícies com sedimentação, sendo 22,61%. A área livre de erosão/sedimentação pertence ao intervalo de 0 - 0,4; 1,2 - 4, equivalente a 33,13% da área de estudo.

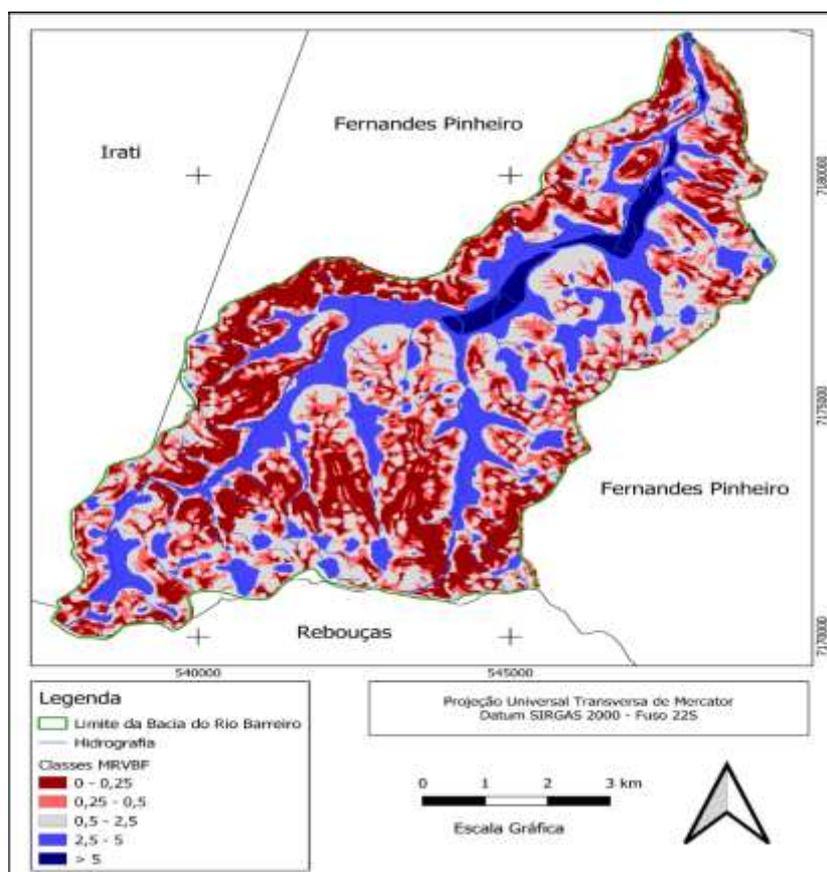


Figura 4. Disposição espacial do MRVBF na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

O índice *LS Factor* (Fator LS) apresentou variação de 0 a 9,88 metros, expressando o efeito da topografia sobre a erosão, combinando a declividade média do terreno com o comprimento da encosta. Quanto maior o LS, maior o potencial erosivo. A tabela 5 expressa essa quantificação.

Tabela 5. Disposição do *LS Factor* na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro

Classes (m)	Área (ha)	Porcentagem
0 a 2	5663,44	85,08
2 a 4	812,25	12,20
4 a 6	167,50	2,51
6 a 10	12,91	0,18

Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

A mensuração desse índice resultou em 12,91 hectares da área total da bacia, entre os valores de 6 a 10, com indicativo de regiões potencialmente susceptíveis aos processos erosivos. Em torno de 167,50 hectares, isto é, 2,51% apresentaram *LS Factor* com valores entre 4 e 6, sendo superfícies que podem desencadear processos erosivos. Todavia, 97,28% da Bacia Hidrografia do Rio Barreiro estão livres dos processos erosivos. Dados representados espacialmente na figura 5.

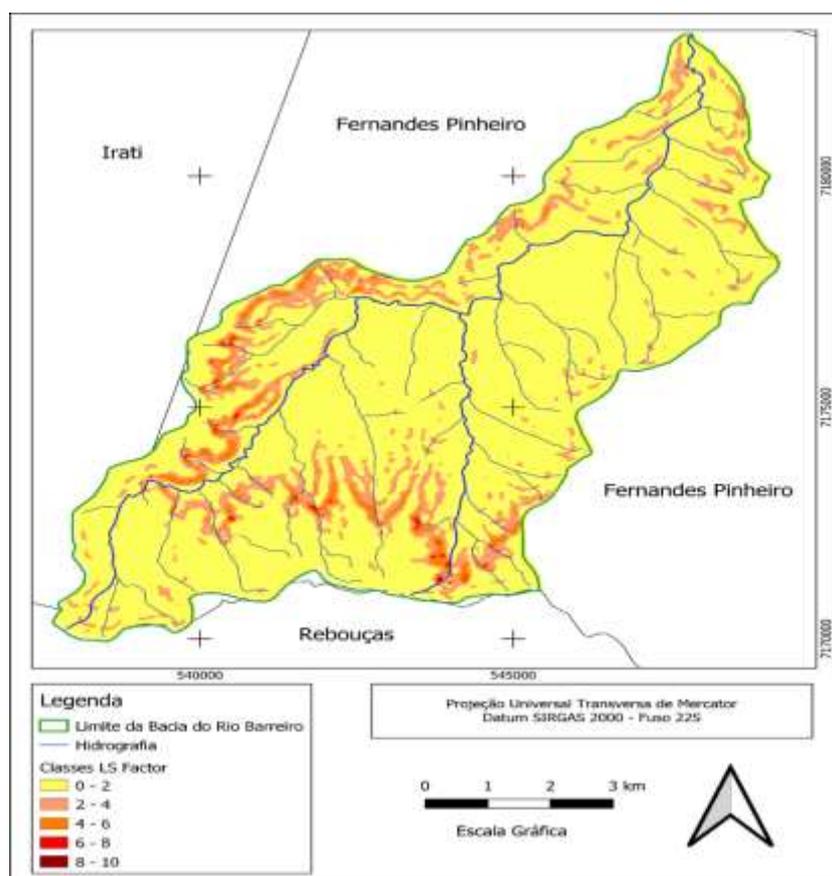


Figura 5. Disposição espacial do LS Factor na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

Para o *Slope* (declividade) os valores identificados variaram de 0 a 87,82 metros. Logo, para elaboração do mapa de declividade, a partir da reclassificação do produto gerado com a função *reclass*, utilizou-se dos intervalos propostos por Ross (1994), descritos na tabela 6, figura 6.

Tabela 6. Disposição da declividade na Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro

Classes (%)	Área (ha)	Porcentagem
0 a 6	3854,24	57,90
6 a 12	1527,98	22,95
12 a 20	820,74	12,33
20 a 30	340,15	5,11
Acima de 30	112,99	1,70

Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

A quantificação dessa variável permitiu a identificação de 80,85% da bacia com áreas de 0 a 12% de declividade, representando porções territoriais com baixa suscetibilidade à erosão. As regiões propensas a processos erosivos estão entre 12 e 20% de declividade, correspondendo a 820,74 hectares. As porções territoriais com alta fragilidade ambiental, com declividade acima de 20%, totalizam 453,14 hectares, ou seja, 6,81% da área de estudo.

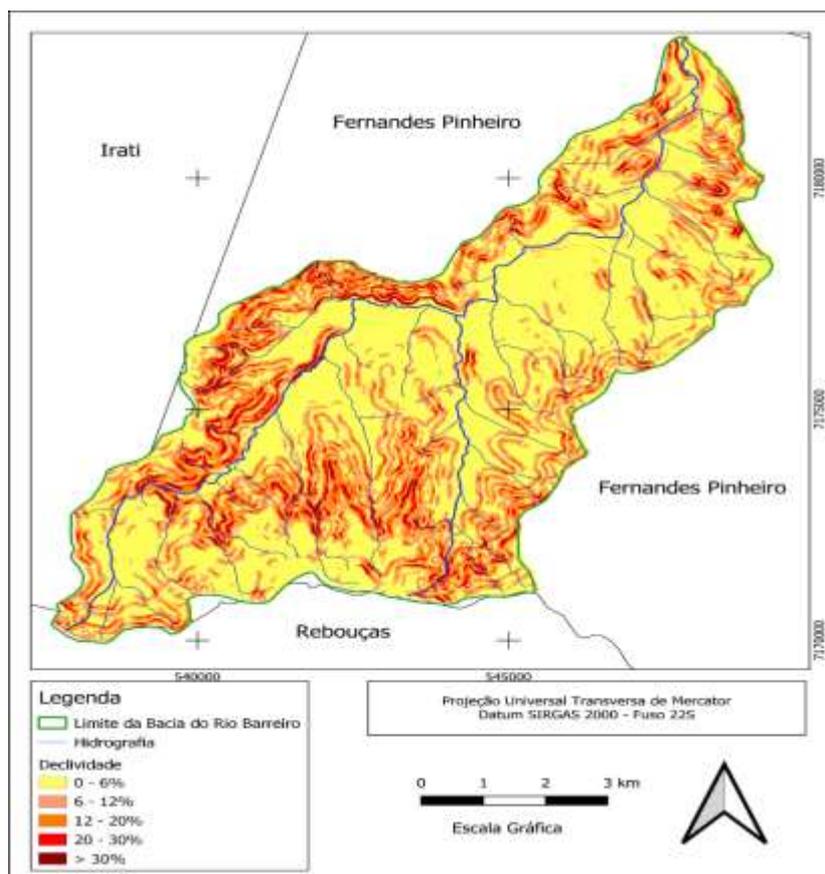


Figura 6. Carta Clinográfica. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2021.

O processamento dos índices AACN, TWI, MRVBF, *LS Factor* e *Slope*, gerados por meio de informações derivadas do MNT, propiciou a caracterização do relevo e da drenagem. A quantificação e espacialização dessas variáveis forneceu parâmetros à obtenção de elementos geomorfológicos e pedológicos, comprovando a aplicabilidade dos IRR como atributo pertinente à aquisição dos diferentes graus de vulnerabilidade ambiental e consequente proposta de adequação do uso do solo.

Disposição dos Índices de Representação do Relevo nas Classes Limitantes

A caracterização dos tributos topográficos *Altitude Above Channel Network* (AACN), *Topographic Wetness Index* (TWI), *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF), *LS Factor* (Fator LS) e *Slope*, e o estabelecimento de parâmetros apoiaram a aquisição de elementos passíveis de associação ao relevo, importantes para a compreensão dos processos geomorfológicos (erosão, sedimentação e acúmulo de água). Logo, à obtenção das Classes Limitantes (Apta, Moderada, Restrita e Inapta) partiu da associação destes atributos, facultando um

produto síntese dos mesmos (MAGANHOTTO *et al.*, 2013; MAGANHOTTO; LOHMANN; SOUZA, 2020).

A tabela 7 apresenta os valores máximos, mínimos e médios dos IRR nas Classes Limitantes e a figura 7 ilustra a disposição das Classes Limitantes Apta, Moderada, Restrita e Inapta na Bacia Hidrográfica analisada.

Tabela 7. Disposição dos IRR nas Classes Limitantes

Classe Limitante Apta					Classe Limitante Moderada				
IRR	Min.	Max.	Média	Desvio	IRR	Min.	Max.	Médi	Desvio
AACN	0,00	90,43	20,77	17,79	AACN	0,00	91,8	19,6	18,57
TWI	5,43	14,54	7,64	0,94	TWI	5,14	21,6	8,01	1,82
MRVBF	0,27	2,00	0,79	0,45	MRVBF	0,12	3,01	1,33	1,12
LS Factor	0,00	3,18	0,74	0,51	LS Factor	0,00	7,98	0,73	0,73
Slope	0,00	17,11	6,50	3,17	Slope	0,00	18,7	6,17	4,52
Classe Limitante Restrita					Classe Limitante Inapta				
IRR	Min.	Max.	Média	Desvio	IRR	Min.	Max.	Médi	Desvio
AACN	0,00	94,83	16,42	20,61	AACN	0,00	92,3	20,1	21,01
TWI	4,23	22,62	8,38	2,68	TWI	4,02	23,0	8,08	3,32
MRVBF	0,00	7,05	1,98	1,77	MRVBF	0,00	7,52	1,74	2,35
LS Factor	0,00	6,67	0,85	0,71	LS Factor	0,00	9,88	2,11	1,74
Slope	0,00	19,85	6,13	6,04	Slope	0,00	43,2	14,7	10,85

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

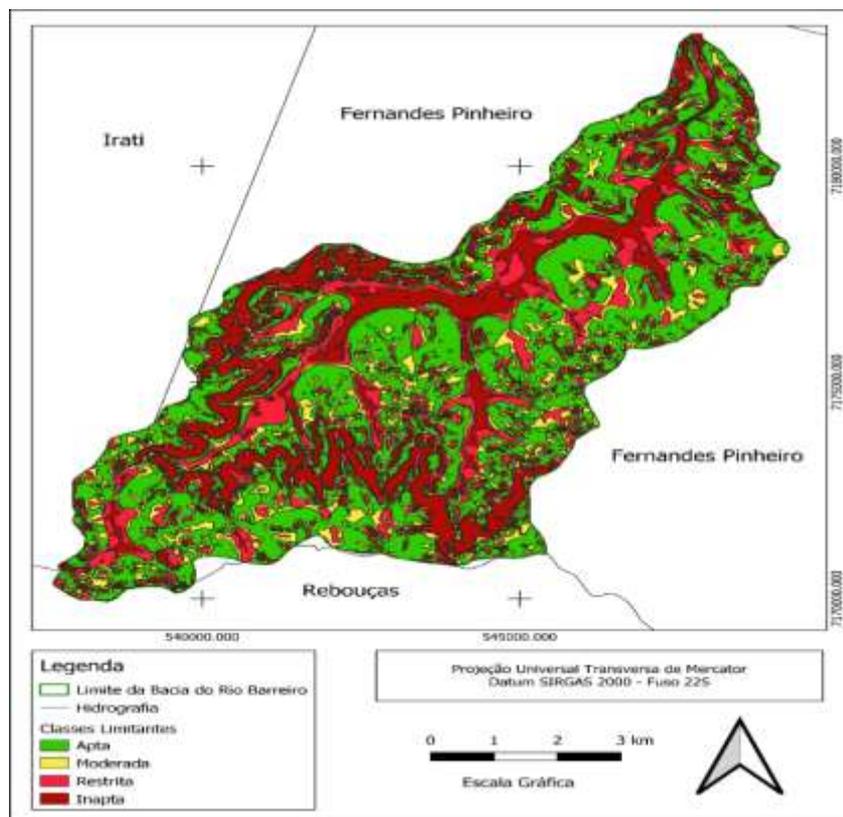


Figura 7. Classes Limitantes. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2022.

As áreas classificadas como Aptas, equivalem a cerca de 2767,23 ha (41,42%) da bacia, distantes verticalmente em torno de 20,77 metros, afastamento em relação ao canal de drenagem que garante superfícies livres de inundações. A média dos valores de TWI de 7,64, se analisada individualmente, poderia ser compreendida como porção mal drenada, no entanto, somente essa varável não é suficiente para caracterizar o ambiente como tal. Os valores médios do MRVBF e do *LS Factor* indicam superfícies livres de processos erosivos. A declividade média de 6,50% indica superfícies de baixa fragilidade ambiental, em que o escoamento lateral da água ocorre de forma suave, sem predisposição aos processos erosivos (tabela 7).

Por sua vez, as regiões classificadas como de Limitação Moderada, somam 1364,17 ha (20,46%) da área de pesquisa. Como na Classe anterior, o AACN apresenta valores médios altos de 19,62 metros, registrando regiões distantes do canal de drenagem. O MRVBF médio de 1,33, aponta áreas propensas à sedimentação, motivo pelo qual a Classe foi enquadrada como Moderada. O índice de umidade, TWI, também sugere atenção, com valores médios de 8,01, contudo, como na Classe anterior, a média do *Ls Factor* menor que 1 e a declividade média próxima a 6%, salvaguarda a baixa fragilidade ambiental sob o ponto de vista de processos erosivos (tabela 7).

As Classes Limitantes Apta e Moderada representam em torno de 4128,40 hectares, ou seja, 61,88% da bacia, diferenciando-se entre si na intensidade e tamanho de área associada a indicativos de processos sedimentares e acúmulo de água. Apesar disso, a associação dos valores médios dos índices avaliados, resultam em parâmetros aceitáveis, não evidenciando condições susceptíveis aos impactos ambientais (tabela 7).

A Classe Limitante Restrita ocupa 1326,96 ha (19,90%) da área total da bacia. Os principais atributos que a distingui das classes anteriores é o menor valor médio do AACN, de 16,42 metros e o maior valor médio do TWI de 8,38 e MRVBF de 1,98, os quais denotam área de sedimentação, com umidade e possíveis problemas com acúmulo de água. A média dos valores do *LS Factor* e *Slope* se manteve dentro dos parâmetros aceitáveis (tabela7).

A quantificação dos IRR das áreas classificadas como Classe Limitante Inapta distribui-se em cerca 1201,11 hectares (18,02%) da BHRB. Seus valores médios de AACN, TWI e MRVBF apresentaram pouca variação quando comparados aos mesmos atributos das classes anteriores. No entanto, quando confrontados com os atributos *Ls Factor* e *Slope* com os mesmos índices das classes anteriores, verificou-se alteração representativa. A declividade com 14,73%, possui uma inclinação que predomina o movimento lateral da água, com reduzida infiltração no perfil e o *LS Factor* de 2,11, o qual considerada além da declividade, o comprimento de rampa, revelam registros de processos erosivos (tabela 7).

As Classes Limitantes Moderada e Inapta totalizam cerca de 2528,07 hectares, 37,92% da bacia e sua destinação deve estar associada às Condições de Uso Adequadas a sua condição física ambiental evitando a potencialização de impactos.

A fim de ilustrar e fortalecer esta discussão, foram selecionados dez pontos em cada Classe Limitante (Apta, Moderada, Restrita e Inapta), identificando a correlação destes com os IRR, demonstrados na figura 8.

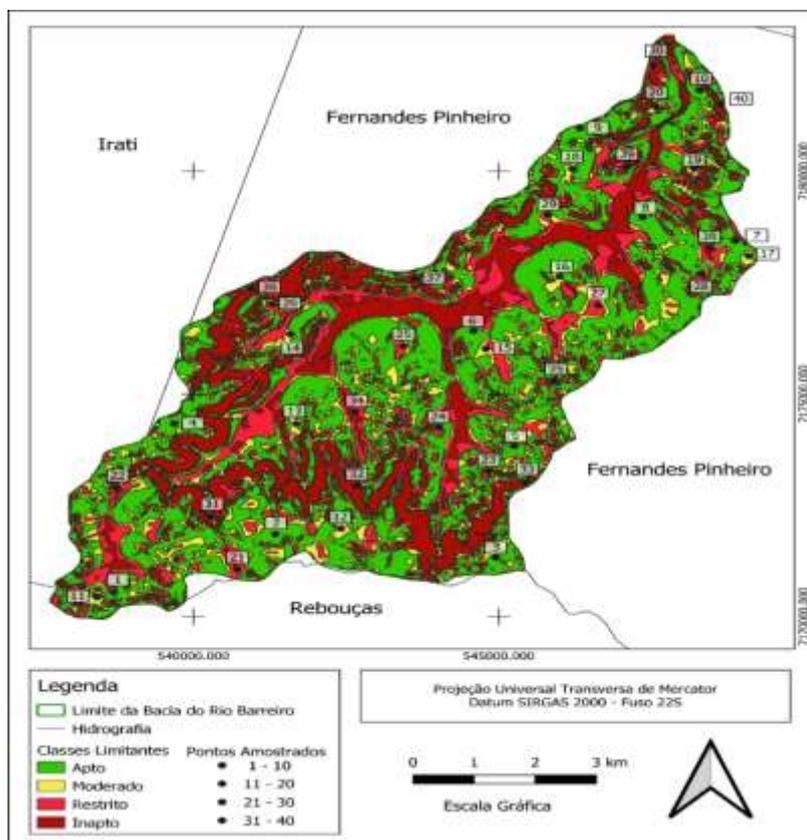


Figura 8. Pontos selecionados nas Classes Limitantes. Fonte: Elaborado pela própria autora, 2023.

Os valores de AACN, localizados nos pontos 2, 4 e 9, da Classe Limitante Apta, situam-se de 19,22 a 61,27 metros de altitude em relação ao canal de drenagem, estes registros interpretados conjuntamente com os valores de TWI abaixo de 8 e MRVBF acima de 0,5, apontam solos relativamente drenados e de baixo potencial erosivo. Os valores dos pontos 1 (MRVBF - 0,38) e 7 (MRVBF - 0,47), considerando este atributo isoladamente, pode-se inferir pontos passíveis de associação aos processos erosivos, no entanto, ao extrapolar a análise para os valores de *Slope* e *Ls Factor*, nota-se que tal condição não se configura. Para os pontos 3, 5, 6, 8 e 10 observou-se valores de TWI passíveis de associação a superfícies úmidas, porém, a análise integrada dos demais atributos, evidencia-se valores associados a condições com baixa limitação de uso. Percebe-se ainda, que as seleções 5, 6, 8 e 10, estão localizadas mais próximas ao Rio Barreiro ou afluentes, em comparação aos demais pontos, fato que elucida valores menores que 12 metros para o AACN.

Os pontos 11 a 18, associados à Classe Limitante Moderada, apresentaram-se susceptíveis a umidade e a sedimentação, condição clara, quando observado os valores de TWI e MRVBF. Situação que não se aplica aos pontos 19 e 20, também associados a mesma classe. Para estes pontos o MRVBF menor que 0,5 (0,22 e 0,44, respectivamente), qualifica regiões de encostas, com tendência aos processos erosivos. A variação dos valores do TWI e MRVBF em relação a Classe Limitante Apta, justifica a inclusão desta Classe como de moderado risco ambiental.

A análise da quantificação dos índices AACN, TWI, MRVBF, *LS Factor* e *Slope*, nos pontos selecionados nas Classes Apta e Moderada assinala, em geral, valores correspondentes a uma boa drenagem, baixo potencial erosivo, declividade moderadamente ondulada e *Ls Factor* baixo, não registrando correlações problemáticas relacionadas aos processos erosivos, sedimentação e umidade, configurando-se como locais de menor restrição e de melhor aptidão ao uso.

Para a Classe Limitante Restrita, associa-se aos pontos 21, 22, 25, 26, 27 e 29 valores de AACN abaixo de 4 metros (1,89; 2,31; 3,64; 1,33; 0,22 e 1,59), TWI acima de 8 (8,62; 8,15; 8,08; 10,94; 9,62 e 11,92) e MRVBF superior a 2,5 (3,83; 2,98; 2,98; 2,96; 2,98 e 2,95) denotando proximidade com o canal de drenagem, conseqüentemente, acúmulo de água e processos sedimentares. No entanto, para os pontos 23, 24, 28 e 30 verificou-se susceptibilidade aos processos erosivos, fato verificado a partir do MRVBF (0,05; 0,09; 0,20 e 0,08) e do *Slope* (12,88; 11,97; 8,35 e 12,24), de posse destas informações verificou-se, para esta Classe, três atributos pesando para o delineamento da Classe.

Ao avaliar os pontos inseridos na Classe Limitante Inapta, os valores dos pontos 31, 32, 33, 36, 39 e 40 registram MRVBF inferior a 0,5 (0,00), *Ls Factor* superior a 2,5 (2,87; 3,89; 2,85; 3,44; 2,47 e 3,91) e *Slope* superior a 15% (25,05; 22,04; 27,16; 26,97; 14,96 e 29,66). Estes valores juntamente do AACN acima de 18 metros e TWI abaixo de 7, confirmam a correlação das condições ambientais altamente propícias à erosão. Também se evidenciaram pontos recorrentes a áreas de inundação, de acúmulo de água e sedimentação, conforme constatado nos pontos 34 e 38, fato confirmado com os registros de 10,12 e 8,90, respectivamente, para o TWI, e 0,22 e 0,23 metros para o AACN, indicadores de alto índice de umidade e acúmulo de água. Nestes dois pontos o MRVBF apontou valores acima de 3,5 (3,98 e 3,95) com existência de processos sedimentares, comuns em regiões de várzea.

4. Considerações Finais

A presente investigação teve como objetivo averiguar a aplicação dos IRR como instrumento auxiliar ao Ordenamento Territorial, tendo como objeto de estudo a Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro. Neste contexto, foram utilizados os seguintes atributos topográficos AACN, TWI, MRVBF, *LS Factor* e *Slope*, selecionados pela relação que possuem com os processos geomorfológicos,

parâmetros pedológicos e susceptibilidade ambiental, inferências constadas em estudos realizados por Böhner *et al.* (2002), Mansor *et al.* (2002), Lin *et al.* (2006), Mckergow, Gallant e Dowling (2007), Mckenzie e Gallant (2007), Prates, Souza e Oliveira Junior (2012) e Maganhotto *et al.* (2013).

A orientação para o Ordenamento Territorial da Bacia Hidrográfica do Rio Barreiro surgiu diante da importância de otimizar e ordenar a utilização dos espaços, em especial das bacias hidrográficas, proporcionando a utilização sustentável dos recursos. A compreensão da dinâmica natural da BHRB, baseada em evidências científicas, pode auxiliar na formulação de estratégias e na proposição de políticas públicas de conservação dos recursos naturais, a partir de diretrizes capazes de assegurar a qualidade ambiental, a melhoria das condições de vida da população, a continuidade da produção agrícola e o desenvolvimento sustentável, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às próprias necessidades.

Desta forma, o estudo pautou-se na análise da fragilidade física ambiental, mediante a obtenção das Classes Limitantes (Apta, Moderada, Restrita e Inapta) e sua correlação com as formas de Uso do Solo (Formação Florestal, Floresta Plantada, Pastagem, Mosaico de Agricultura e Pastagem, áreas não Vegetadas, Corpos d'água, Soja e Lavouras Temporárias).

Os resultados da pesquisa demonstram sua natureza inovadora e ratificaram a viabilidade da aplicação dos IRR como suporte à determinação da fragilidade física ambiental e subsídio à elaboração de propostas de ordenamento territorial de bacias hidrográficas, devido a sua confiabilidade, celeridade e possibilidade de associação às condições dos solos, permitindo, desta forma, uma análise sistêmica da paisagem. Entende-se que estas ações servirão de subsídio para a tomada de decisão pelos gestores públicos e incentivo à participação da comunidade no adequado uso da terra.

Referências

ARABAMERI, A. *et al.* Morphometric analysis for soil erosion susceptibility mapping using novel gis-based ensemble model. **Remote Sensing**, v. 874, n. 12, 2020.

BÖHNER, J. *et al.* Soil Regionalization by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation. In: MICHELI, E.; NACHTERGALE, F.; MONTANARELLA, L. Soil Classification. **European Soil Bureau - Research Report**. Luxembourg, n. 7, p. 213-222, 2002.

BRASIL. Lei n. 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] União - Seção 1 - 2/9/1981**, Página 16509. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1980-1987/lei-6938-31-agosto-1981-366135-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 17 abr. 2022.

CADASTRO AMBIENTAL RURAL – CAR. **Imóveis**. Disponível em: <https://www.car.gov.br/publico/imoveis/index>. Acesso em: 15 de jul. 2022.

CÂMARA, G. *et al.* Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, p. 395-403, 1996.

CHAGAS, C. da S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica de domínio de mar de morros**. 2006, 223 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Viçosa, 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

COELHO, F. F. **Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variáveis geomorfométricas e sistemas de informações geográficas**. 2010, 80 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CORNWELL, E.; ROBERT, V. S.; GORDON, F. 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, n. 102248, 2020.

CREPANI, E. *et al.* **Metodologia desenvolvida para subsidiar o zoneamento ecológico-econômico e capacitar os técnicos dos estados da Amazônia Legal**. São José dos Campos: SAE/INPE, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Agricultura e preservação ambiental: uma análise do cadastro ambiental rural**. Campinas: Embrapa, 2006.

GALLANT, J. C., DOWLING, T. I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional áreas. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, p. 1347-1359, 2003.

GILES, P. T.; FRANKLIN, S. E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 21, p. 251-264, 1998.

GOMES, R. de C.; BIAS, E. S. Integração do método AHP e SIG como instrumentos de análise do nível de conservação ambiental em bacias hidrográficas. **Revista de Geociências**, São Paulo, v. 37, p. 167-182, 2018.

GRUBER, S.; PECKHAM, S. Land-surface parameters and objects in hydrology, In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (ed.). **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009.

HAMMER, R. D, *et al.* Slope Class Maps Form Soil Survey and Digital Elevation Models, **Soil Science Society American Journal**, Madison, v, 59, p, 509-519, 1995.

HANNAN, M. A. *et al.* Fuzzy logic inverter controller in photovoltaic applications: Issues and recommendations. **IEEE Access**, v. 7, p. 2169-3536, 2019.

HERMUCHE, P. M. *et al.* Compartimentação geomorfológica em escala regional da Bacia do Rio Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGFA, 10, 2003.

IPPOLITI, R. G. A. *et al.* Análise digital de terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “mar de morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 269-276, 2005.

JAPIASSU, C. E; GUERRA, I. F. 30 anos do Relatório Brundtland: nosso futuro comum e o desenvolvimento sustentável como diretriz constitucional brasileira. **Revista de Direito da Cidade**, v. 9, n. 4, p. 1884-1901, 2017.

KRISHNAN, R. S. *et al.* Fuzzy logic based smart irrigation system using internet of things. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119902, 2020.

LIN, H. S. *et al.* Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydrogeological perspective. **Geoderma**, v. 131, p. 345-368, 2006.

LIRA, K. C. da S.; FRANCISCO, H. F.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando Lógica Fuzzy e método AHP. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, MG, v. 34. e62872, p. 1-17, 2022.

MADHU, A.; KUMAR, A.; JIA, P. Exploring Fuzzy Local Spatial Information Algorithms for Remote Sensing Image Classification. **Remote Sensing**, v. 13, 4163, 2021.

MAGANHOTTO, R. F. *et al.* A aplicação dos Índices de Representação do Relevo como ferramenta de suporte no planejamento ambiental de unidades de conservação – estudo de caso Floresta Nacional de Irati. **Revista Geografar**, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 205-236, 2013.

MAGANHOTTO, R. F. *et al.* Os Índices de Representação do Relevo como suporte para o zoneamento ambiental de unidades de conservação - estudo de caso da Floresta Nacional de Irati. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 20, n. 3, p. 168-181, 2016.

MAGANHOTTO, R. F. *et al.* Proposta de zoneamento ambiental para a reserva biológica das araucárias com base em atributos topográficos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 6, p. 3025-3041, 2020.

MANSOR, M. T. C. *et al.* Parâmetro para avaliação do potencial de risco de erosão. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 1., 2002, **Anais**, Aracaju, SE, 17 e 18 de outubro de 2002.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil** – MapBiomas, Mapas de uso da terra - coleção 3,1 (base digital georreferenciada), 2019. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR. Acesso em: 20 set. 2021.

MCKENZIE, N. J.; GALLANT, J. C. Digital soil mapping with improved environmental predictors and models of pedogenesis. **Developments in Soil Science**, v. 31, 2007.

MCKERGOW, L.A.; GALLANT, J.C.; DOWLING, T.I. Modelling wetland extent using terrain indices, Lake Taupo, NZ. In: **INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION**, Christchurch, 10-14 December 2007.

MÖLLER, M. *et al.* Plausibility test of conceptual soil maps using relief parameters. **Catena**, v. 88, p. 57-67, 2012.

MONTGOMERY, D. R. Predicting landscape-scale erosion using digital elevation models, **Comptes Rendus Geoscience**, v. 335, p. 1121-1130, 2003.

MOORE, I. D. *et al.* Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 2, p. 443-452, 1993.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. **Digital terrain modeling**: a review of hydrological, geomorphological and biological applications, hydrological processes. v. 5, p. 3-30, 1991.

NITSCHKE, P. R. *et al.* Atlas Climático do Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2019.

NOWATZKI, A. **A utilização de atributos topográficos no mapeamento preliminar de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno, Antonina, PR.** 2013, 113 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OLAYA, V.; CONRAD, O. Geomorphometry in SAGA. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (ed.). **Geomorphometry**: concepts, software, applications. Amsterdam: Elsevier, p. 293-308, 2008.

OLIVEIRA, W. C. F. de. **Determinação de risco ambiental na drenagem fluvial da bacia do Rio Verde – PR - através do uso de sistemas de informação geográfica.** 2010, 184 f. Dissertação (Mestrado Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

- PARSIAN, S. *et al.* Flood Hazard Mapping Using Fuzzy Logic, Analytical Hierarchy Process, and Multi-Source Geospatial Datasets. **Remote Sens.** Canada, v.13, p. 4761. 2021.
- PINHEIRO, L. de S.; CUNHA, C. M. L. da. A importância da geração do fator topográfico (LS) da EUPS para a modelagem erosiva de bacia hidrográfica. **Revista Geográfica da América Central**, v. 2, p. 1-13, 2011.
- PRATES, V.; SOUZA, L. C. P.; OLIVEIRA JUNIOR, J. C. Índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online], v. 16, n. 4, p. 408-414, 2012. Disponível: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/sgKSfcX5bLQsRvJBHzZkGgq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso: 3 fev. 2019.
- ROMÃO, P. A. **Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - Região de Goiânia, GO.** 2006, 19 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. In: **Revista do Departamento de Geografia.** 8.ed, São Paulo: Editora da USP, 1994.
- ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil:** subsídios para planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- RUHOFF, A. L. *et al.* Avaliação dos processos erosivos através da equação universal de perdas de solos, implementada com algoritmos em legal. **Geomática**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 12-22, 2006.
- SAATY, T. L.; VARGAS, L.G. **Prediction, Projection and Forecasting.** Kluwer Academic Boston, MA, USA, 1991.
- SAGA. **System for Automated Geoscientific Analyses.** Software - version: 8.0.0, 2021. Disponível em: <http://www.saga-gis.org>. Acesso em: 15 set. 2021.
- SALAMUNI, R.; HERTEL, R.; SILVA, J. **História do Paraná.** 2.ed, Curitiba: Grafipar, 1969.
- SCHOORL, J. M.; SONNEVELD, M. P. W.; VELDKAMP, A. Threedimensional landscape process modeling: the effect of DEM Resolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, p. 1025-1034, 2000.
- SIRANGELO, F. R.; GUASSELLI, L. A. Aplicação de índices de representação de relevo na Bacia Hidrográfica do Rio Maquiné, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, **Anais...** São Paulo: INPE Santos, 18, p. 6827-6833, 2017.
- SIRTOLI, A. E. *et al.* Atributos de relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008.
- SOUSA JR., J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 32, p. 449-456, 2008.
- TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Formas de relevo da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: obtidas por classificação topográfica automatizada. **Confins**, n. 45, p. 1-20, 2020.
- VALERIANO, M. M. **Topodata:** guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008.
- WANG, D. *et al.* Morphometric characterisation of landform from DEMs. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 24, p. 305-326, 2010.
- YANG, G.; CHEN, Z.; JIANG, J. Drainage morphometry of the Lishui catchment in the middle Yangtze basin, China: morphologic and tectonic implicati. **Arabian Journal of Geosciences**, n. 561, p. 1-14, 2020.