



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Marcos Vinicius da Silva Ferreira

Geindicadores como critério de validação de metodologias de análise da vulnerabilidade da paisagem

UBERABA – MG
2023

Marcos Vinicius da Silva Ferreira

Geoindicadores como critério de validação de metodologias de análise da vulnerabilidade da paisagem

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, área de concentração Qualidade Ambiental, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

UBERABA – MG
2023

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

F442g Ferreira, Marcos Vinicius da Silva
Geoindicadores como critério de validação de metodologias de
análise da vulnerabilidade da paisagem / Marcos Vinicius da Silva
Ferreira. -- 2023.
68 p. : il., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2023
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Vicente Ferreira
Coorientador: Prof. Dr. Leandro de Godoi Pinton

1. Erosão. 2. Análise multivariada. 3. Indicadores ambientais.
4. Análise de vulnerabilidade. I. Ferreira, Ricardo Vicente. II. Univer-
sidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 504.121:303.211

MARCOS VINICIUS DA SILVA FERREIRA

GEOINDICADORES COMO CRITÉRIO DE VALIDAÇÃO DE METODOLOGIAS DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DA PAISAGEM

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 22 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Vicente Ferreira
Orientador - UFTM

Prof. Dr. Isabel Cristina Moroz Caccia Gouveia
Membro Titular - UNESP

Prof. Dr. Alex Garcez Utsumi
Membro Titular – UFTM



Documento assinado eletronicamente por **RICARDO VICENTE FERREIRA, Professor do Magistério Superior**, em 22/08/2023, às 16:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art.34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **Isabel Cristina Moroz Caccia Gouveia, Usuário Externo**, em 25/08/2023, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEX GARCEZ UTSUMI, Professor do Magistério Superior**, em 29/08/2023, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art.34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site



http://sei.ufm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1035649** e o código CRC **3BBD6B3A**.

AGRADECIMENTOS

À minha família: Lilian, Marcos, João Pedro e Felipe, bases estruturantes que constroem os alicerces do meu caminhar. Sem vocês, nada disso teria a menor possibilidade de acontecer.

Aos amigos do coração, Eduardo, Yuri, Caio e Henrique, portos seguros que muitas vezes estiveram à disposição para ouvir minhas tristezas e lamentos, e por mais vezes ainda proporcionaram os momentos mais felizes da minha vida.

Aos colegas da Turma 6 do PPGCTA, em especial Ronielson, Teresa e Lara, que tornaram todo esse caminho cheio de obstáculos que é o mestrado, em uma jornada feliz, leve e divertida. Minha eterna gratidão a vocês.

A todos os colegas da SEPLAN-PMU, em especial a Jéssica, Wilton, Leonara, e Viviane, por tornarem a labuta do dia a dia um ambiente maravilhoso. Seria impossível mensurar o quanto cresci e fui feliz ao lado de pessoas tão incríveis.

Aos moradores da República Lisossomos, Andrei, Gabriel, Lucas e Victor, por me oferecerem a felicidade de tornar da morada um lar onde sempre me senti acolhido.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Vicente Ferreira, por ser não só apenas uma relação acadêmica, mas sim um amigo que levarei para toda a vida. Meu agradecimento eterno por todos esses anos de parceria, conversas, orientações, risadas e cafés. Espero ter retribuído ao menos uma parte de toda a confiança depositada em mim.

Ao membro da banca do Exame de Qualificação, Prof. Dr. Lauro Osiro. Ao membro da banca do Exame de Defesa, Prof. Dr. Alex Garcez Utsumi. E um agradecimento especial a pessoa que é referência e inspiração pessoal dentro dessa linda ciência que denominamos Geografia, Prof^a Dr^a Isabel Cristina Moroz-Caccia Gouveia, presente em ambas as bancas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro e todo o corpo de funcionários e docentes, em especial a secretária Luciana e a professora Ana Paula, que não mediram esforços para tornar todo esse sonho realidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão

da bolsa de mestrado que tornou a realização desta pesquisa possível.

“Temos a necessidade de propor um entendimento do que é o mundo, do que são os lugares, e a partir daí participar da compreensão de quem nós somos hoje para, quem sabe, propor algo que permita que o mundo seja amanhã melhor.”

Milton Santos.

RESUMO

Ao longo das últimas décadas, a análise diagnóstica de cenários propícios ao desenvolvimento de processos erosivos vem sendo testada considerando diferentes variáveis e metodologias. No Brasil, duas importantes correntes surgem com esse intuito: a da fragilidade ambiental (FA), e a da vulnerabilidade natural a erosão (VNE). Tais modelos consideram variáveis e pesos de importância diferentes para a análise, gerando resultados distintos. Tendo em vista ainda a particularidade de cada ambiente natural, a derivação de pesos associados aos mapas por meio da análise multicritério surge como uma proposta no sentido de aprimoramento desse diagnóstico, que visa propiciar uma forma de prever a ocorrência de processos erosivos. Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi o de aplicar as diferentes metodologias citadas e uma variação com a incorporação de método multicritério com a finalidade de comparar as aplicações por validação quali-quantitativa das mudanças morfológicas superficiais na paisagem. Para isso foram confeccionados mapeamentos temáticos em uma Bacia Hidrográfica (BH) para construção dos mapas de susceptibilidade dos ambientes. Aplicou-se como método multicritério o Analytical Hierarchy Process para a derivação dos pesos de importância de cada variável. Em seguida, gerou-se mapa da densidade de processos erosivos lineares, que permitiu a comparação entre os métodos diagnósticos e a realidade da BH. Aferiu-se que a incorporação do método multicritério resultou em uma ponderação mais condizente com as características ambientais da área de estudo, suavizando a generalização resultante da aplicação direta dos métodos originais da FA e VNE. Todavia, a validação quali-quantitativa na Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente, por meio das sobreposições e correlação estatística, exteriorizou uma conjuntura em que os métodos aplicados não corresponderam a expectativa de prever a configuração do cenário da superfície, representado pelos geoindicadores.

Palavras-chave: Processos erosivos lineares; Fragilidade ambiental; Vulnerabilidade natural à erosão; AHP; Análise ambiental;

ABSTRACT

Over the past decades, the diagnostic analysis of scenarios conducive to erosive processes development has been tested considering different variables and methodologies. In Brazil, two significant approaches emerge for this purpose: environmental fragility (FA) and natural erosion vulnerability (VNE). These models consider different variables and weights of importance for the analysis, resulting in distinct outcomes. Considering the uniqueness of each natural environment, deriving weights associated with maps through multicriteria analysis emerges as a proposal to enhance this diagnosis, aiming to provide a way to predict the occurrence of erosive processes. In this context, the objective of this study was to apply the aforementioned methodologies and a variation incorporating a multicriteria method to compare the applications through qualitative and quantitative validation of superficial morphological changes in the landscape. Thematic mappings were created in a Hydrographic Basin (BH) for constructing susceptibility maps of the environments. The Analytical Hierarchy Process was used as the multicriteria method to derive the weights of importance for each variable. Subsequently, a map of linear erosive process density was generated, allowing for comparison between diagnostic methods and the reality of the BH. It was observed that the incorporation of the multicriteria method resulted in a weighting more consistent with the environmental characteristics of the study area, mitigating the generalization resulting from the direct application of the original FA and VNE methods. However, qualitative and quantitative validation in the Hydrographic Basin of Água Quente Stream, through overlays and statistical correlation, revealed a scenario where the applied methods did not meet the expectation of predicting the surface configuration represented by geoindicators.

Keywords: Linear erosive processes; Environmental fragility; Natural erosion vulnerability; AHP; Environmental analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos, SP	23
Figura 2 - Mapas temáticos da Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente	25
Figura 3 - Carta de feições erosivas lineares da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)	30
Figura 4 – Chave de interpretação das feições erosivas lineares da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)	31
Figura 5 – Organograma de sistematização das etapas metodológicas da pesquisa. Os números em vermelho indicam as variáveis utilizadas por cada metodologia	44
Figura 6 – Mapas da fragilidade ambiental da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)	46
Figura 7 - Mapas da vulnerabilidade natural a erosão da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)	49
Figura 8 – Mapa de densidade de feições erosivas lineares da BH do Córrego da Água Quente	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre as metodologias de Tricart (1977), Ross (1994) e Crepani et al. (2001)	19
Tabela 2 - Escala fundamental de números absolutos do AHP	19
Tabela 3 – Fonte de dados dos Mapeamentos temáticos.	26
Tabela 4 – Geoindicadores e propriedades quantitativas da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)	31
Tabela 5 – Graus de fragilidade ambiental dos atributos naturais e antrópicos da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)	32
Tabela 6 – Valores de vulnerabilidade dos solos	34
Tabela 7 – Valores de vulnerabilidade das classes de declividade	34
Tabela 8 – Valores de vulnerabilidade das formações geológicas	35
Tabela 9 – Valor de vulnerabilidade da intensidade pluviométrica	35
Tabela 10 – Valores de vulnerabilidade das classes de uso da terra e cobertura vegetal	35
Tabela 11 – Matriz com dados de entrada para comparação par a par dos critérios da Fragilidade Ambiental	36
Tabela 12 – Índice Randômico	38
Tabela 13 – Razão de consistência (RC) das matrizes geradas pelas respostas dos avaliadores	38
Tabela 14 – Pesos de importância dos critérios para a metodologia de Ross (1994)	39
Tabela 15 – Pesos de importância dos critérios para a metodologia de Crepani et al. (2001)	39
Tabela 16 – Classes para densidade de feições erosivas lineares	42
Tabela 17 – Porcentagens de cada grau de fragilidade para o mapa de fragilidade ambiental e fragilidade ambiental com o método AHP	47
Tabela 18 - Porcentagens de cada grau de vulnerabilidade para o mapa VNE e VNEA	50
Tabela 19 – Relação entre os graus de fragilidade do mapa da “Fragilidade Ambiental” com as classes de densidade de feições erosivas	53

Tabela 20 - Relação entre os graus de fragilidade do mapa da “Fragilidade Ambiental + AHP” com as classes de densidade de feições erosivas	52
Tabela 21 - Relação entre os graus de vulnerabilidade do mapa da “Vulnerabilidade Natural a Erosão” com as classes de densidade de feições erosivas	55
Tabela 22 - Relação entre os graus de vulnerabilidade do mapa da “Vulnerabilidade Natural a Erosão + AHP” com as classes de densidade de feições erosivas	56
Tabela 23 – Valores de correlação entre os mapas de Fragilidade/Vulnerabilidade com a densidade de feições erosivas	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	MODELOS DE ANÁLISE DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NO BRASIL	17
3.2	A ANÁLISE MULTICRITÉRIO: ANALYTICAL HIERACHY PROCESS (AHP)	19
3.3	GEOINDICADORES	21
4	ÁREA DE ESTUDO	23
5	MATERIAIS	26
5.1	FONTE DE DADOS DOS MAPEAMENTOS TEMÁTICOS	26
5.2	EQUIPAMENTOS E SOFTWARES	27
6	MÉTODOS E METODOLOGIA	28
6.1	MAPEAMENTOS TEMÁTICOS	28
6.1.1	<i>Pedologia</i>	28
6.1.2	<i>Geologia</i>	28
6.1.3	<i>Declividade</i>	28
6.1.4	<i>Formas de vertente</i>	28
6.1.5	<i>Uso da terra e cobertura vegetal</i>	28
6.1.6	<i>Precipitação</i>	29
6.2	GEOINDICADORES	29
6.3	FRAGILIDADE AMBIENTAL PROPOSTA POR ROSS (1994)	32
6.4	VULNERABILIDADE NATURAL A EROÇÃO (VNE), PROPOSTA POR CREPANI (1996, 2001)	34
6.5	APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)	36
6.6	DENSIDADE DE FEIÇÕES EROSIVAS LINEARES	38
6.7	ANÁLISE DAS RELAÇÕES ESPACIAIS	42
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
7.1	MODELOS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL E VULNERABILIDADE NATURAL A EROÇÃO..	45
7.2	GEOINDICADORES: DENSIDADE DE FEIÇÕES EROSIVAS LINEARES	52

7.3 VALIDAÇÃO DOS MAPEAMENTOS DE SUSCEPTIBILIDADE AMBIENTAL PELOS GEOINDICADORES	53
8 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de sua existência, as atividades humanas têm buscado formas de modificar e moldar a superfície da Terra para atender de maneira mais eficiente ao crescimento populacional e às demandas crescentes por alimentos e necessidades do mercado. Nesse sentido, em meados do século XX, surgem novas correntes de pensamento que passam a considerar o homem como um componente modificador dos sistemas ambientais, e não apenas um subordinado das dinâmicas naturais (NIR, 1983; GOUDIE; VILES, 2016;). Essas perspectivas repercutiram tanto nas discussões sobre as políticas ambientais quanto na condução das pesquisas científicas.

Rodrigues (2005), baseada nos princípios da Teoria Geral dos Sistemas aplicados à ciência geográfica (CHRISTOFOLETTI, 1979), aborda as interferências antrópicas enquanto ações geomorfológicas que podem romper com o *steady state* (equilíbrio) de um sistema. Ross (1994) nesse sentido irá dissertar que a natureza apresenta uma funcionalidade própria que integra os seus componentes físicos e bióticos. Todavia, a ação humana tem impactado e provocado transformações significativas na paisagem natural, alterando o meio em uma velocidade muito mais intensa do que os processos originários.

Tais alterações no estado natural dos ambientes têm intensificado os processos erosivos. O manejo dos solos, por vezes prejudicado pelo uso inadequado do território, interfere de forma ativa nesses processos, retirando a cobertura vegetal que protege o solo contra a perda de material e o deixando suscetível a ocorrência de efeitos modificadores das formas de relevo (KAWAKUBO et al., 2005). Nesse contexto, baseado na teoria da Ecodinâmica de Tricart (1977), surgem no Brasil correntes metodológicas que buscam realizar análises diagnósticas de cenários propícios ao desenvolvimento processos erosivos, por exemplo, a análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados (ROSS, 1994), e a análise de vulnerabilidade natural à erosão (Crepani et al., 1996, 2001). Apesar de tais metodologias se apresentarem como importantes ferramentas na identificação de áreas prioritárias a conservação e recuperação de ambientes, não devem substituir as análises de campo para validação de seu levantamento (GUIRRA et al., 2016). Relevante parcela dos estudos conduzidos

na temática não avançam no sentido de buscar formas de comprovar a efetividade do diagnóstico por meio de técnicas de validação.

Diante desse cenário, as técnicas de geoprocessamento configuram vital importância para construção das análises de sistemas ambientais (XAVIER-DA-SILVA, 2000). Câmara e Medeiros (1996) apontam o relevante impacto que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm para a investigação dos problemas ligados aos estudos ambientais, e consideram quatro dimensões diretamente ligadas ao contexto das análises supracitadas: Mapeamento temático; Diagnóstico ambiental; Avaliação de impacto ambiental; e Ordenamento territorial. Entende-se, nesse sentido, que os SIG's, como recursos para a análise ambiental permitem um maior acesso e flexibilidade na representação gráfica das informações geográficas (ROSA e ROSS, 1999), auxiliando a análise.

Em conjunto às técnicas de geoprocessamento, muitos estudos passaram a incorporar os métodos de análise multicritério, como o Analytical Hierarchy Process (SAATY, 1994), na busca de um produto final que fosse mais adequado as características naturais e antrópicas da área de estudo. A ponderação de pesos específicos para as variáveis utilizadas na análise ambiental pode ser uma interessante alternativa metodológica ao se considerar que determinadas variáveis têm maior importância na construção de um cenário de vulnerabilidade dos ambientes. Malczewski (2006) afirma que o método multicritério pode ser utilizado com os SIG na derivação de pesos associados aos atributos das camadas de mapas, além de outras aplicações específicas ao que se pretende estudar.

Diante dessa conjuntura, o presente estudo pretende empregar as metodologias propostas por Ross (1994), Crepani (2001), e Saaty (1994) com a finalidade de comparar as aplicações por validação quali-quantitativa das mudanças morfológicas superficiais na paisagem.

A presente dissertação de mestrado está organizada inicialmente com o capítulo "2 OBJETIVOS", que elenca os principais propósitos e objetos do estudo. Em seguida, o capítulo "3 REFERENCIAL TEÓRICO" apresenta as principais discussões das temáticas que norteiam esse trabalho, a Fragilidade/Vulnerabilidade ambiental, os geoindicadores e o método AHP. O capítulo "4 ÁREA DE ESTUDO" objetiva apresentar as características

socioespaciais e físicas da Bacia Hidrográfica adotada para o estudo. No capítulo seguinte “5 MATERIAIS” são elencados os dados utilizados, assim como suas fontes, além dos softwares necessários para os procedimentos metodológicos descritos no capítulo “6 MÉTODOS E METODOLOGIA”. O capítulo “7 RESULTADOS E DISCUSSÃO” está disposto em seguida para apresentar todos os levantamentos e realizar a análise proposta. Por fim, o capítulo “8 CONCLUSÕES” faz um compilado que sintetiza e avalia o que o estudo apresenta.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar metodologias de análise ambiental diagnóstica em uma Bacia Hidrográfica com o intuito de validar as propostas por meio da presença de feições geomórficas na paisagem.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Elaborar os produtos cartográficos dos parâmetros naturais e antrópicos da Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente.
2. Aplicar metodologias multicritério de análise ambiental.
3. Mapear e quantificar as feições erosivas lineares da área de estudo com base na utilização de princípios da cartografia geomorfológica em escala de detalhe.
4. Avaliar a relação entre a distribuição espacial dos geoindicadores e os mapeamentos derivados da aplicação das propostas de análise ambiental.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 MODELOS DE ANÁLISE DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NO BRASIL

O conceito da Ecodinâmica postulado por Tricart (1977) teve fundamental importância no desenvolvimento de metodologias de análise dos ambientes no território brasileiro. Ao constatar que os ambientes naturais mantêm um equilíbrio dinâmico, o autor propõe a visualização de setores onde prevalecem os processos de morfogênese (meios instáveis), pedogênese (meios estáveis), e os de equilíbrio entre os processos (intermediários).

Diante desse contexto, Ross (1994) e Crepani et al. (1996, 2001) idealizaram, respectivamente, os modelos da fragilidade ambiental e da vulnerabilidade natural à erosão, que têm desempenhado fundamental papel como subsídio ao zoneamento ambiental e socioeconômico de bacias hidrográficas (GUIRRA et al., 2016). Observa-se que tais metodologias não são limitadas a abrangência do meio acadêmico, a exemplo da implantação do Decreto nº 4.297/2002, que estabelece a elaboração de Zoneamentos Ecológicos-Econômicos (ZEE) pela Política Nacional do Meio Ambiente, que tem sido amplamente aplicada a nível nacional (GOUVEIA; ROSS, 2019). Guirra et al. (2016) afirmam que apesar de se diferenciarem, ambos os modelos são importantes ferramentas de identificação de áreas prioritárias à recuperação ambiental, ainda que não excluam a necessidade de análises de campo.

A proposta metodológica da fragilidade ambiental elaborada por Ross (1994) apresenta o conceito das Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial e as Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Emergente, de forma a promover a análise integrada dos elementos físicos, biológicos e antrópicos, um conjunto único e indissociável da paisagem (BERTRAND, 1971). Ross (1997) afirma que o mapa de fragilidade ambiental é um instrumento estratégico para a compreensão da vulnerabilidade dos ambientes, servindo como recurso para o planejamento estratégico, uma vez que relaciona aspectos das características naturais e antrópicas da paisagem. Devido a popularidade adquirida, tal metodologia tem sido empregada amplamente a nível nacional (ANJINHO et al., 2021; VALLE et al. 2016; COSTA et al., 2015; GONÇALVES et al., 2011; BACANI et al., 2015; ABRÃO e BACANI, 2018; MESSIAS et al.; 2012). Algumas propostas buscaram aprimorar a metodologia, como o exemplo de

Sporl, Castro e Luchiari (2011), que promoveram a utilização de redes neurais na construção dos modelos.

A metodologia de Ross (1994) sugere o mapa da fragilidade ambiental potencial (FAP), representando os atributos naturais, fatores intrínsecos a composição da paisagem, e o mapa da fragilidade ambiental emergente (FAE), que irá somar a atividade antrópica a análise, por meio do uso e cobertura da terra. Para a FAP, as variáveis utilizadas são o solo, declividade, precipitação anual, e o relevo. Para escalas de maior detalhe, superiores a 1:25.000, o autor recomenda a utilização das formas de vertente e classes de declividade como representativas da geomorfologia, enquanto para escalas pequenas (inferiores a 1:50.000) propõe os padrões de formas com a rugosidade topográfica ou os índices de dissecação. Enfatiza-se que a metodologia de Ross (1994) tem forte relação com a dinâmica geomorfológica dos processos erosivos e de sedimentação que decorrem principalmente da aceleração promovida pelas ações antrópicas na modificação da paisagem.

Com o objetivo de fornecer uma metodologia de Zoneamento Ecológico Econômico da Amazônia por meio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Crepani et al. (2001) irá propor a construção do mapa de Vulnerabilidade Natural a Erosão (VNE). Com base também em Tricart (1977), o autor organiza uma escala de valores relativos de acordo com a relação entre pedogênese e morfogênese. Para essa análise, Crepani et al. faz uso da interpretação de imagens de satélite para compor as Unidades Territoriais Básicas (UTB) por meio da identificação e delimitação de conjuntos estruturais e paisagísticos homogêneos (FAGUNDES, 2013). O autor ainda apresenta o conceito dos Polígonos de Intervenção Antrópica, de forma a orientar as atividades e ações corretivas a serem desenvolvidas nas áreas indicadas. Ainda que a metodologia tenha se desenvolvido inicialmente para o bioma amazônico, estudos têm se desenvolvido em outras partes do território nacional, a exemplo do semiárido brasileiro, o que demonstra o potencial de aplicabilidade em ecossistemas diferenciados (CREPANI et al., 2005).

A tabela 1 sintetiza as similaridades entre os métodos de Tricart (1977), Ross (1994) e Crepani et al. (2001).

Tabela 1 - Relação entre as metodologias de Tricart (1977), Ross (1994) e Crepani et al. (2001)

Autor	Metodologia	Conceitos	
Tricart, 1977	Ecodinâmica	Unidades estáveis	Unidades instáveis
Ross, 1994	Fragilidade ambiental	Unidades ecodinâmicas de instabilidade potencial	Unidades ecodinâmicas de instabilidade emergente
Crepani et al. (1996, 2001)	Vulnerabilidade natural a erosão	Unidades territoriais básicas estáveis	Unidades territoriais básicas vulneráveis

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 A ANÁLISE MULTICRITÉRIO: ANALYTICAL HIERACHY PROCESS (AHP)

O AHP é um método de análise multicritério para tomada de decisão baseado na lógica da comparação pareada, onde diferentes fatores que influenciam na escolha objetivada são hierarquizados, permitindo assim uma visão global das relações inerentes ao processo estudado (JÚNIOR; RODRIGUES, 2012). Desenvolvido por Thomas Saaty na década de 70, o método tem sido utilizado e aprimorado para diversas áreas do conhecimento, dada sua maleabilidade de aplicação e efetividade ao que se propõe. Para a criação das matrizes de comparação por meio de consultas, Saaty (2004) afirma que quanto maior o nível de conhecimento específico do avaliador, mais preciso e consistente são os resultados. Para expressar a importância de um critério sobre outro nas comparações em par o autor estabeleceu a escala fundamental de números absolutos, na qual deve-se atribuir o nível de prioridade entre os atributos analisados (tabela 2).

Tabela 2 - Escala fundamental de números absolutos do AHP

Intensidade de importância	Definição	Escala conceitual
1	Igual importância	As duas variáveis contribuem

		igualmente ao objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente uma variável em relação a outra
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	A variável é fortemente favorecida em relação a outra. Seu domínio é demonstrado na prática
9	Extrema importância	A evidência que favorece uma variável em detrimento de outra é da mais alta possível ordem de afirmação
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando há dúvida entre duas classificações

Fonte: Adaptado de Saaty (2004).

No que tange aos estudos relativos as questões ambientais, o AHP tem aumentado sua relevância, em especial em pesquisas de análise de fragilidade dos ambientes. Kiker et al. (2005) discorre sobre a potencialidade combinada do AHP com os SIG na avaliação da qualidade ambiental, pela possibilidade das análises espaciais de combinação multicamadas.

Júnior e Rodrigues (2012) utilizaram o método para atribuir pesos aos atributos internos de cada critério ambiental adotado para a construção da vulnerabilidade ambiental da BH do Rio Piedade – MG. Dias e Silva (2014) realizaram a comparação par a par diretamente entre os critérios, o que pode ser observado como tendência entre os estudos que aplicam a metodologia (TRAFICANTE et al., 2017; GIMENES e FILHO, 2013; FERREIRA e SILVA, 2020; PEREIRA et al., 2019). Lira et al. (2022) incorporou a lógica *Fuzzy* em conjunto ao AHP para construção da fragilidade ambiental em uma BH, enquanto Gonçalves et al. (2016) produziu estudo semelhante, utilizando a abordagem

Fuzzy Gama. Takikawa et al. (2021) buscou a utilização do método para atribuir pesos ao índice de circularidade, índice de efeito de borda, e índice de qualidade biofísica do fragmento para construção de um indicador de fragilidade florestal.

De forma geral, afere-se que tais estudos buscam aprimorar as metodologias de Ross (1994) e Crepani et al. (2001) por meio da incorporação do AHP durante a fase de ponderação de pesos de importância para os critérios naturais e antrópicos, hierarquizando assim os mapeamentos temáticos na construção dos mapas de fragilidade ambiental (para Ross) e vulnerabilidade natural a erosão (para Crepani).

3.3 GEOINDICADORES

Advinda da iniciativa da União Internacional da Ciência Geológica (IUGS) surge a proposta dos geoindicadores como indicadores para o monitoramento de sistemas geomorfológicos, considerando intervalos temporais de cem anos ou menos. Precursora dos estudos da Antropogeomorfologia a nível nacional, Rodrigues (2010) desenvolveu um quadro de indicadores e parâmetros para a avaliação dos impactos e alterações ambientais da intervenção antrópica em sistemas hidro geomorfológicos urbanizados. Tal sistematização permitiu uma visualização da formação de morfologias antropogênicas relacionadas ao uso da terra, estando diretamente relacionada com a dinamização dos processos erosivos lineares e alterações nas formas de vertente (PINTON; CUNHA, 2015). Nota-se que a quantificação de parâmetros das feições erosivas lineares (sulco, ravina e voçoroca) permitem sua configuração como geoindicadores de origem denudativa, respaldando o monitoramento de processos morfodinâmicos susceptíveis a intensas mudanças em curto intervalo temporal (FERREIRA; PINTON, 2022).

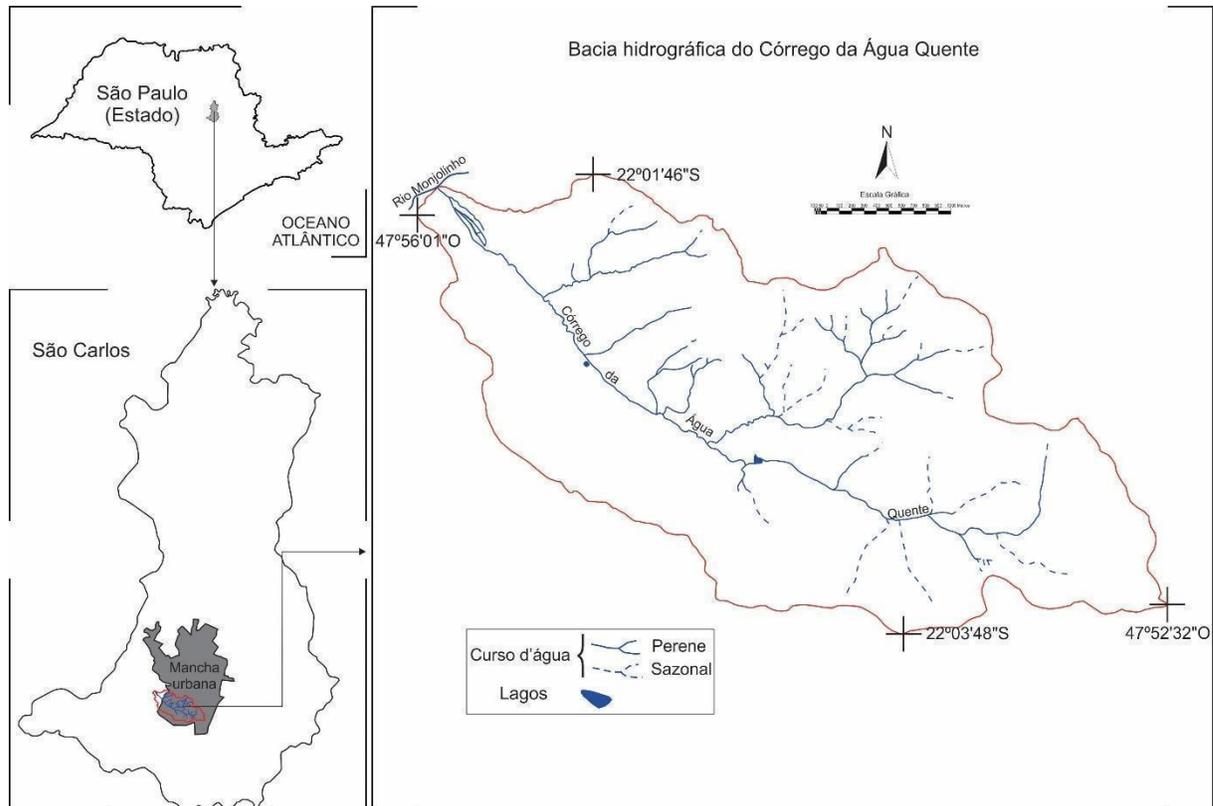
Por estarem integradas ao sexto táxon da classificação de Ross (1992) para a pesquisa geomorfológica (correspondente as menores formas, e que indicam os processos geomórficos recentes), ressalta-se a importância da utilização das feições erosivas lineares como meio de validação dos mapeamentos de análise ambiental de Ross (1994) e Crepani et al. (2001), por responderem a dinâmica de processos morfológicos atuais, e tendo em vista o caráter diagnóstico que tais metodologias assumem. Nessa mesma linha de pensamento, Gouveia e Ross (2019) fizeram uso do coeficiente de determinação linear como forma de correlacionar os resultados de modelos de fragilidade ambiental por meio da ocorrência de processos erosivos lineares

identificados pelo IPT (2012). Tercini et al. (2021) elaboraram estudo similar em uma Bacia Hidrográfica de Monte Alto – SP, utilizando como variável as classes de fragilidade de um mesmo modelo.

4 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Córrego da Água Quente se localizada no município de São Carlos, no setor centro-leste do Estado de São Paulo (Figura 1). A área em que bacia se insere caracteriza-se também pela presença de loteamentos destinados a baixa renda, evidenciando um cenário de vulnerabilidade social associado a vulnerabilidade natural, por estar inserida na zona de qualificação e ocupação controlada pelo Plano Diretor vigente do município (SÃO CARLOS, 2016).

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente – São Carlos, SP

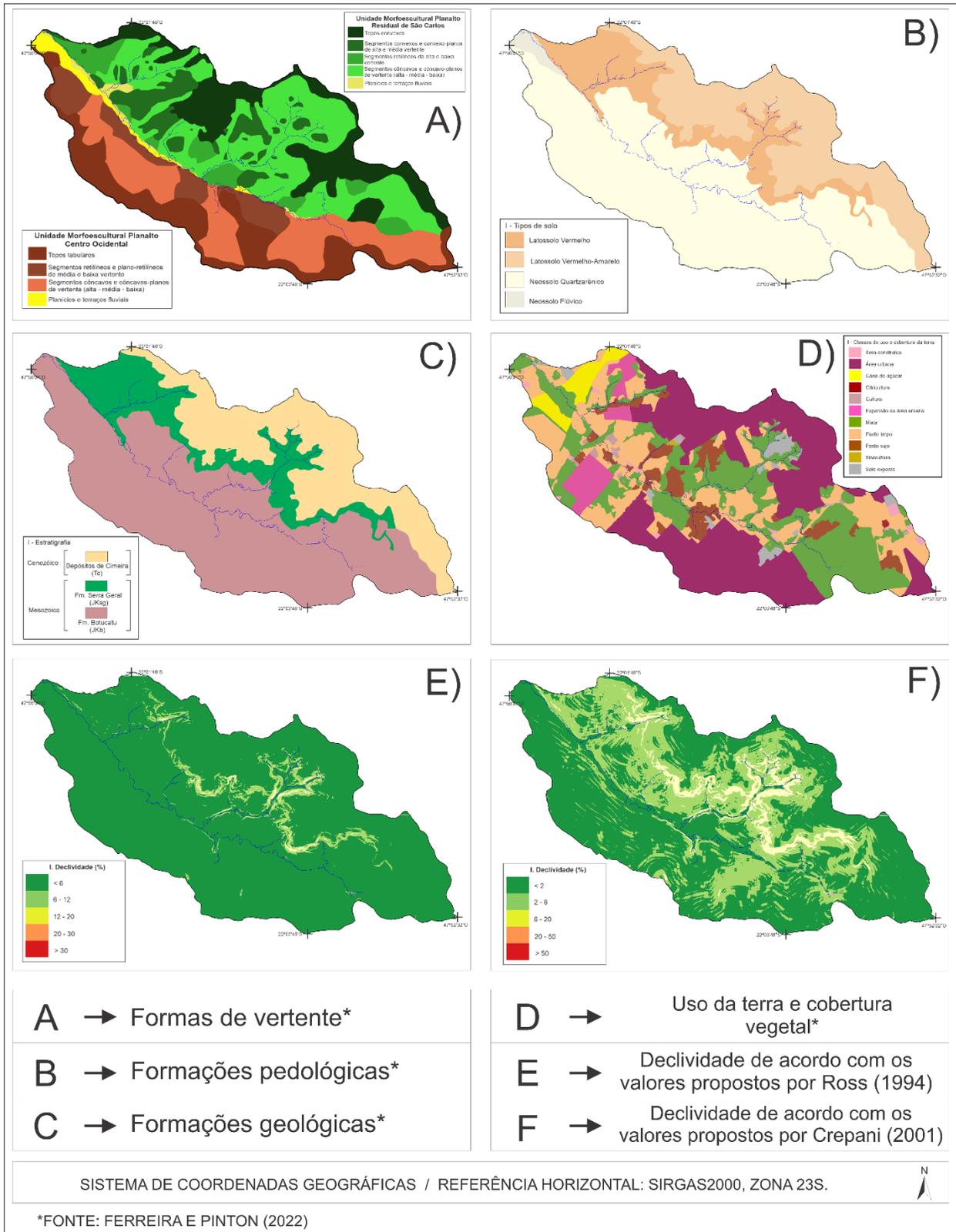


Fonte: Ferreira e Pinton (2022).

De acordo com Ross e Moroz (1997) a área de estudo está disposta no limite entre o Planalto Residual de São Carlos (marcado por colinas de topos convexos) e o Planalto Centro Ocidental (caracterizado por colinas amplas e baixas com topos tabulares), com a existência de escarpas erosivas (figura 2 – A). Quanto aos solos, a área caracteriza-se pela presença do Neossolo Flúvico, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e o Neossolo Quartzarênico, que representa a maior parte da área e que segundo o

Instituto Agronômico de Campinas (2015) apresenta característica de baixa coesão e alta permeabilidade (figura 2 – B). De acordo com São Paulo (1982) foram identificadas litologias de variados períodos (figura 2 – C), como a Formação Botucatu e Serra Geral (Mezosoico), e os depósitos de cimeira integrados a Formação Adamantina (Cenozoico). As características climáticas da área são identificadas como de tipo Cwa (DUBREIL et al., 2018). Pela classificação realizada por Monteiro (1973), a área integra a subunidade Centro-Norte quanto à dinâmica das massas de ar, caracterizada por climas regionais tropicais que se alternam entre seco e úmido. Por fim, em relação ao uso da terra e cobertura vegetal observa-se uma diversidade paisagística comumente observada em setores pouco consolidados da malha urbana, com fragmentos de vegetação originária, bairros periféricos em expansão, e alguns arranjos destinados ao uso agropecuário (figura 2 – D).

Figura 2 - Mapas temáticos da Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 MATERIAIS

5.1 FONTE DE DADOS DOS MAPEAMENTOS TEMÁTICOS

Os recursos utilizados na pesquisa são descritos na tabela 3, que sintetiza as fontes e escalas dos critérios adotados na área de estudo para a aplicação dos métodos.

Tabela 3 – Fonte de dados dos Mapeamentos temáticos.

Critério	Escala	Fonte
Pedologia	1:55.000	Mapa pedológico do município de São Carlos – S P, disponibilizado pela Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano (SMHDU) de São Carlos (SP)
Geologia	1:250.000	Mapa geológico de São Paulo (Folha SF-23-Y-A), elaborado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE
Declividade	1:10.000	Cartas topográficas São Carlos I (SF-23-Y-A-I-1-NO-B) e São Carlos IV (SF-23-Y-A-I-1-NO-D), executadas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), adquiridas pelo Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Precipitação	-	Dados da estação da DAEE de código 2247002, extraídos da plataforma HIDROWEB, da Agência Nacional de Águas (ANA)
Formas de vertente	1:25.000	Pares estereoscópicos de fotografias aéreas do levantamento aerofotogramétrico de 1962, disponibilizadas pelo Laboratório de Aerofotogeografia e Sensoriamento Remoto (LASERE) do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (USP)
Uso da terra e	1:10.000	Ortofotos do Projeto de Atualização

cobertura vegetal;
Geindicadores

Cartográfica do Estado de São Paulo, da Empresa
Paulista de Planejamento Metropolitano S.A.
(EMPLASA), do ano de 2010.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES

Equipamentos computacionais disponíveis no Laboratório de Cartografia e Geoprocessamento (CARTOGEO) e no Laboratório de Geomorfologia, Clima e Solos (LAGECS), ambos do Curso de Geografia da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Campus Uberaba. Para os procedimentos de geoprocessamento em todas as etapas foi utilizado o software Quantum Gis (Qgis), versão 3.16.11. Para geração dos anáglifos das fotografias aéreas, foi utilizado o software StereoPhoto Maker. Para diagramação dos mapas e demais figuras, utilizou-se o software CorelDRAW 2020. Para tratamento e geração de dados estatísticos, recorreu-se ao Excel e Jamovi.

6 MÉTODOS E METODOLOGIA

6.1 MAPEAMENTOS TEMÁTICOS

6.1.1 Pedologia

O mapeamento pedológico do município de São Carlos, que foi executado originalmente na escala de 1:55.000, foi adaptado para a escala de 1:10.000, tendo como guia as curvas de nível da carta topográfica. As cores adotadas para as classes são as sugeridas pelo Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007).

6.1.2 Geologia

O material base do mapeamento do Estado de São Paulo na escala de 1:250.000 foi adaptado para a escala de 1:10.000, levando-se em consideração as curvas de nível da carta topográfica e os limites das formações pedológicas. As cores adotadas para as classes estão de acordo com o material de São Paulo (1982).

6.1.3 Declividade

Para obtenção do modelo digital de elevação (MDE), vetorizou-se as curvas de nível da carta topográfica. Em seguida, foram gerados dois mapas de declividade, um de acordo com os valores de fragilidade sugeridos por Ross (1994), e outro com os valores de vulnerabilidade sugeridos por Crepani (2001).

6.1.4 Formas de vertente

O mapeamento das formas de vertente foi executado por meio da estereoscopia de imagens tridimensionais geradas pela técnica Anáglifo das fotografias aéreas de 1962. A geração dessas imagens considera as potencialidades apresentadas por Souza e Oliveira (2012) para o mapeamento geomorfológico. As unidades morfoesculturais foram extraídas da representação do relevo paulista, de Ross e Moroz (1997).

6.1.5 Uso da terra e cobertura vegetal

Mapeou-se de acordo com a interpretação visual das ortofotos de 2010. As classes e cores estão de acordo com o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).

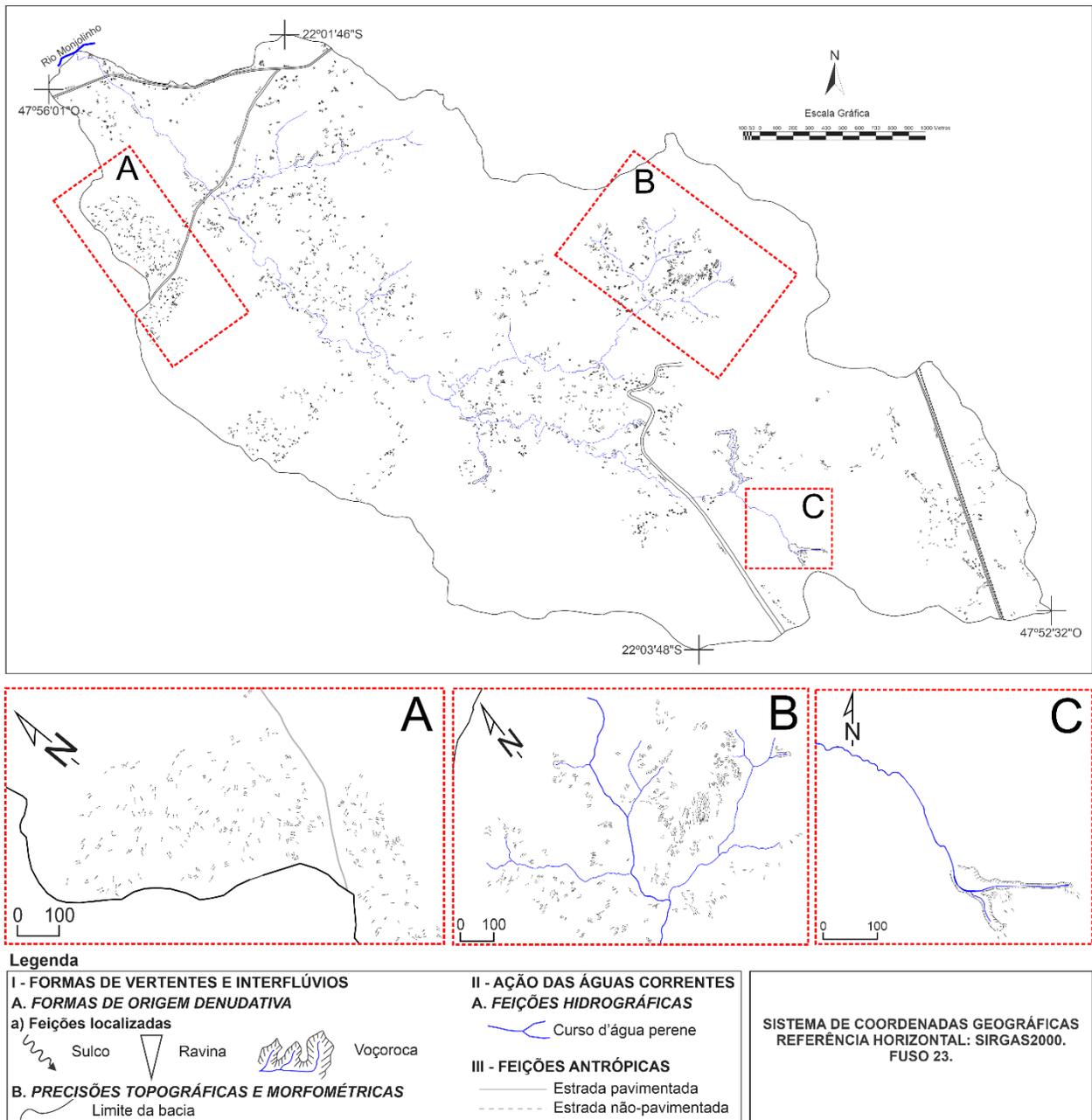
6.1.6 Precipitação

Os cálculos para a obtenção da precipitação média anual foram feitos com base na normal climatológica 1961-1990. Obteve-se assim, uma precipitação anual média de 1390mm.

6.2 GEOINDICADORES

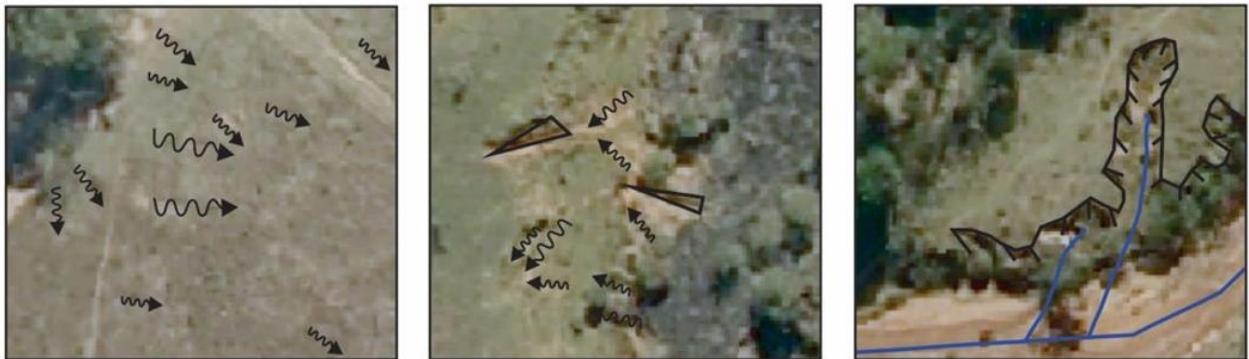
Adotou-se como geoindicadores de processos erosivos as feições erosivas lineares - sulco, ravina e voçoroca. O mapeamento foi realizado pela interpretação visual em escala de 1:10.000 das ortofotos de 2010 (figura 3). Estruturou-se uma chave de interpretação para reconhecimento dos três estágios de desenvolvimento das feições erosivas lineares, de forma a tornar o procedimento mais apurado (Figura 4). Para a representação dessas feições, foram utilizados os símbolos das propostas de Tricart (1965) e de Verstappen e Zuidam (1975).

Figura 3 - Carta de feições erosivas lineares da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)



Fonte: Adaptado de Ferreira e Pinton (2022).

Figura 4 – Chave de interpretação das feições erosivas lineares da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)



EMPLASA S.A. Ortofoto. São Paulo, 2010. Escala 1:10.000.

Legenda

Feições erosivas lineares

(a) 	Sulco	Pequenos canais de reduzida profundidade formados pela concentração do escoamento superficial em setores do terreno compostos por irregularidades provenientes de atributos naturais e/ou de modificações induzidas pela ação antropogênica. São feições representativas do estágio inicial dos processos erosivos lineares.
(b) 	Ravina	Canais de maior profundidade com inclinações laterais consolidadas, que constituem evidente ruptura de superfície. São feições associadas ao aumento da capacidade de transporte de sedimentos pelas linhas de fluxo d'água de superfície, representando um estágio subsequente ao desenvolvimento dos sulcos. Na paisagem, distinguem-se dos sulcos pela composição em canais que não podem ser facilmente obliterados por operações elementares de práticas conservacionistas do solo.
(a), (b) 	Voçoroca	Canais profundos constituídos em sua base pelo afloramento do lençol freático, que potencializa a capacidade erosiva das linhas de fluxo d'água de superfície. São feições representativas do estágio mais avançado dos processos erosivos lineares, configurando um cenário de degradação da paisagem que compromete a produtividade do solo, restringe o uso da terra e coloca em risco distintas estruturas antrópicas.
<small>(a)Verstappen; Zuidam (1975);(b)Tricart (1965) (GOUDIE, 2013; LEPSCH, 2016; SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA, c2020)</small>		

Fonte: Adaptado de Ferreira e Pinton (2022).

Os dados obtidos pelo mapeamento foram quantificados em extensão e quantidade (Tabela 4).

Tabela 4 – Geoindicadores e propriedades quantitativas da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)

Geoindicadores	Extensão	Quantidade
----------------	----------	------------

Sulco	31.704m	3.641
Ravina	2.467m ²	99
Voçoroca	31.309m ²	18

Fonte: Adaptado de Ferreira e Pinton (2022).

6.3 FRAGILIDADE AMBIENTAL PROPOSTA POR ROSS (1994)

Para a construção da metodologia da fragilidade dos ambientes a processos erosivos, Ross sugere a atribuição de graus específicos as classes dos mapeamentos temáticos da pedologia (P), declividade (D), formas de vertente (Fv), uso da terra e cobertura vegetal (USO), e precipitação (Pr). Assim, estabelece um sistema hierárquico de análise para expressar a fragilidade, onde: (1) muito fraca; (2) fraca; (3) média; (4) forte; (5) muito forte. A tabela 5 apresenta a classificação dos atributos da BH do Córrego da Água Quente.

Tabela 5 – Graus de fragilidade ambiental dos atributos naturais e antrópicos da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)

Grau de fragilidade	Solo	Uso da terra e cobertura vegetal	Declividade (%)	Forma de relevo	Precipitação
1	Latossolo Vermelho-Escuro	Mata nativa	0 - 6	-	-
2	Latossolo Vermelho-Amarelo	Pasto sujo, Silvicultura	6 - 12	Topos convexos e tabulares	-
3	-	Área construída, Área urbana,	12 - 20	Vertentes convexas e plano-	1390mm

		Citricultura, Pasto limpo,		convexas	
4	-	Cana-de- Açúcar, Culturas temporárias, Loteamentos	20 - 30	Vertentes retilíneas	-
5	Neossolo Quartzarênico, Neossolo Flúvico	Solo exposto	30 - 100	Vertentes côncavas e plano- côncavas, Planícies fluviais	-

Fonte: Adaptado de Ross (1994) e Gouveia e Ross (2019).

Após o mapeamento e identificação dos graus de fragilidade dos atributos, deve-se obter a fragilidade ambiental potencial (FAP) pela Eq. (1), que combina as variáveis naturais da área de estudo, traduzidas em termos numéricos de acordo com os pesos.

$$FAP = \frac{P+D+Fv+Pr}{4} \quad (1)$$

Em seguida, obtém-se a fragilidade ambiental emergente (FAE), por meio da Eq. (2), que irá incorporar o uso da terra e cobertura vegetal como variável antrópica.

$$FAE = \frac{FAP+USO}{2} \quad (2)$$

É importante mencionar que o estudo de Ross e Fierz (2017) faz importante menção as áreas de planícies inundáveis relacionadas a graus de fragilidades Muito Alta. O presente estudo não faz tal diferenciação do nível de fragilidade nessas áreas por buscar se aproximar ao método original proposto por Ross (1994), uma vez que o objetivo é o de testar modelos. Dessa forma, os níveis de fragilidade mapeados neste trabalho não devem ser utilizados como parâmetros para o planejamento ou orientação acerca do uso e ocupação na BH referida.

6.4 VULNERABILIDADE NATURAL A EROSÃO (VNE), PROPOSTA POR CREPANI (1996, 2001)

Com intuito de diagnosticar a vulnerabilidade dos ambientes a erosão e potencial perda de solo, Crepani propôs análise semelhante à de Ross, com diferença nos parâmetros utilizados e escala de vulnerabilidade dos atributos.

Quanto a escala de pesos dos atributos, o autor se baseia nos princípios da Ecodinâmica (TRICART, 1977), e estabelece uma escala de 21 níveis de 1,0 a 3,0 de acordo com as condições de predominância de pedogênese (valores próximos a 1,0) e de morfogênese (valores próximos a 3,0), com valores intermediários em torno de 2,0. Para os parâmetros, são considerados os solos, declividade, litologia, precipitação, e o uso da terra e cobertura vegetal. As tabelas 6, 7, 8, 9 e 10 apresentam, respectivamente, os valores atribuídos a cada classe dos mapeamentos temáticos.

Tabela 6 – Valores de vulnerabilidade dos solos

Grau de vulnerabilidade	Pedologia
1,0	Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Vermelho-Amarelo
3,0	Neossolo Flúvico, Neossolo Quartzarênico

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

Tabela 7 – Valores de vulnerabilidade das classes de declividade

Grau de vulnerabilidade	Declividade (%)
1,0	< 2
1,5	2 - 6

2,0	6 - 20
2,5	20 - 50
3,0	> 50

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

Tabela 8 – Valores de vulnerabilidade das formações geológicas

Grau de vulnerabilidade	Geologia
1,5	Formação Serra Geral
2,4	Formação Botucatu, Depósitos de Cimeira

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

Tabela 9 – Valor de vulnerabilidade da intensidade pluviométrica

Grau de vulnerabilidade	Intensidade pluviométrica (mm/mês)
1,5	154,4

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

Tabela 10 – Valores de vulnerabilidade das classes de uso da terra e cobertura vegetal

Grau de vulnerabilidade	Uso da terra e cobertura vegetal
1,0	Mata nativa,
1,2	Silvicultura, Pasto sujo,
1,8	Pasto limpo, citricultura, Área urbana, Área construída,
2,4	Loteamento, Culturas

	temporárias
3,0	Solo exposto

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

Em seguida, deve-se realizar a álgebra de mapas em ambiente SIG, por meio da média aritmética demonstrada pela Eq. 3.

$$VNE = \frac{P+D+G+P+USO}{5} \quad (3)$$

Ressalta-se ainda que a proposta do autor utiliza mapeamentos temáticos em escalas inferiores a 1:100.000. Todavia, Crepani et al. (2001) afirma que havendo disponibilidade de dados em escalas maiores, eles devem ser considerados.

6.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)

Com o intuito de explorar a abordagem da ponderação de pesos no contexto das metodologias supracitas de análise ambiental, propõe-se a utilização do Analytical Hierarchy Process, proposto originalmente por Saaty (1997), com o objetivo de estabelecer diferente hierarquização das variáveis selecionadas.

Dessa forma, foi realizada consulta a dois especialistas da Geografia Física, com enfoque na área da análise ambiental e geomorfologia, via formulário do *Google Forms*. Por meio deste, os avaliadores executaram comparações par a par entre todas as variáveis da metodologia proposta por Ross (1994), e em seguida para a proposta de Crepani (2001), utilizando a escala fundamental de importância. Após essa etapa, foi construída a matriz de comparação.

A tabela 11 traz os dados das respostas do avaliador 1 para as variáveis da metodologia da Fragilidade Ambiental, como forma de exemplificar a matriz de entrada.

Tabela 11 – Matriz com dados de entrada para comparação par a par dos critérios da Fragilidade Ambiental

	Pedologia	Uso do Solo	Declividade	Precipitação	Formas de Relevo	Pesos de prioridade
Pedologia	1	1/7	1/5	3	1/7	0.060

Uso do Solo	7	1	3	7	3	0,443
Declividade	5	1/3	1	7	1/5	0,175
Precipitação	1/3	1/7	1/7	1	1/7	0,036
Formas de Relevo	7	1/3	3	7	1	0,285

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, considerando um critério na linha i e um critério na coluna j , A_{ij} representa a intensidade da importância do critério i sobre o critério j em relação a avaliação dos fornecedores.

Para a definição das prioridades, foi utilizado o cálculo pelo vetor próprio. De início, os valores dos julgamentos A_{ij} são somados em cada coluna, conforme Eq. (1)

$$A_{.j} = \sum_{i=1}^n A_{ij} \quad (1)$$

Em seguida, cria-se uma nova matriz B, onde cada elemento é definido pela Eq. (2)

$$B_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_{.j}} \quad (2)$$

O total de cada linha é somado, como na Eq. (3)

$$B_{i.} = \sum_{j=1}^n B_{ij} \quad (3)$$

Para obtenção dos pesos, os resultados devem ser normalizados, por meio da Eq. (4)

$$w_i = \frac{B_{i.}}{\sum_{i=1}^n B_{i.}} \quad (4)$$

Uma das principais virtudes do método é a determinação da consistência dos resultados (Razão de Consistência – RC), considerando a subjetividade dos julgamentos. Deve-se primeiro alcançar o índice de consistência, inicialmente calculando os autovalores dos critérios, por Eq. (5)

$$\vartheta_i = \frac{\sum_j^n w_j a_{ij}}{w_i} \quad (5)$$

Em seguida ocorre o cálculo do autovalor principal, pela Eq. (6)

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (6)$$

Na próxima etapa é calculado o índice de consistência, representado por Eq. (7), onde “IC” representa o índice de consistência

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (7)$$

Por fim, calcula-se a Razão de Consistência (RC) dividindo-se o índice de consistência (IC) da matriz em questão pelo índice randômico (IR), demonstrado pela Eq. (8)

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (8)$$

O IR corresponde ao índice randômico, calculado para as matrizes de ordem n. A Tabela 12 apresenta os índices calculados por Saaty (1990, 1991) a partir de 500 matrizes recíprocas positivas.

Tabela 12 – Índice Randômico

Número de Critérios	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IR	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Fonte: Saaty (1990).

Para garantia de um julgamento confiável, Saaty (1990) afirma que o valor de RC deve ser inferior a 0,1 (10%). Os valores de consistência das matrizes aplicadas estão expostos na tabela 13.

Tabela 13 – Razão de consistência (RC) das matrizes geradas pelas respostas dos avaliadores

Avaliador	RC da matriz com as variáveis sugeridas por Ross	RC da matriz com as variáveis sugeridas por Crepani
Av. 1	0,08	0,09

Av. 2

0,09

0,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pesos finais de importância dos critérios foram obtidos pela média aritmética da resposta dos dois avaliadores. A tabela 14 apresenta os valores para o método de Ross, e a tabela 15 para o método de Crepani.

Tabela 14 – Pesos de importância dos critérios para a metodologia de Ross (1994)

Fragilidade Ambiental	Especialista 1	Especialista 2	Pesos de importância
Pedologia	0,060	0,110	0,09
Declividade	0,175	0,260	0,22
Precipitação	0,036	0,051	0,04
Formas de relevo	0,285	0,144	0,21
Uso e cobertura da terra	0,443	0,435	0,44

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Pesos de importância dos critérios para a metodologia de Crepani et al. (2001)

Vulnerabilidade natural a erosão	Especialista 1	Especialista 2	Pesos de importância
Pedologia	0,110	0,098	0,10

Declividade	0,229	0,539	0,38
Precipitação	0,094	0,056	0,08
Geologia	0,043	0,038	0,04
Uso e cobertura da terra	0,524	0,268	0,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, foram gerados dois novos mapas no ambiente do Qgis, pela álgebra de mapas, por meio das Eq. 9 e Eq. 10:

Para Ross:

$$FAE_2 = (P \ 0.09) + (D \ 0.22) + (Pr \ 0.04) + (Fv \ 0.21) + (USO \ 0.44) \quad (9)$$

Para Crepani:

$$VNE_2 = (P \ 0.10) + (D \ 0.38) + (Pr \ 0.08) + (G \ 0.04) + (USO \ 0.40) \quad (10)$$

6.6 DENSIDADE DE FEIÇÕES EROSIVAS LINEARES

De maneira a tornar a análise mais acurada e proporcionar dados espaciais que permitissem a sobreposição com os mapeamentos, adotou-se um procedimento para a medida da densidade de feições erosivas, baseada na metodologia proposta por Hubp (1988) e adaptada por Andrade (2022). Todavia, diferentemente de Andrade, que realizou o mapeamento dos sulcos e ravinas com uso de linhas sobre as incisões e as voçorocas sobre os taludes (m), a presente pesquisa mapeou as voçorocas e ravinas considerando uma medida de área por metro quadrado (m²), e de forma a quantificar na mesma medida, considerou-se os sulcos com largura padrão de 1m², dessa forma multiplicando pela extensão para obtenção da área. Nesta pesquisa, portanto, adotou-se a medida de área (m²) como unidade de referência para o cálculo da densidade de feições erosivas, demonstrando de forma mais direta o impacto de cada feição (como a voçoroca, por exemplo) no ambiente.

A primeira etapa de desenvolvimento consistiu na criação de uma malha

quadriculada que abrangesse toda a área da bacia hidrográfica. Foram realizados testes com quadrículas de 500 m, 250 m e 125 m de lado, de modo a encontrar, por visualização e comparação com a escala da bacia analisa, qual resultaria em uma melhor referência para a análise. Optou-se pela malha de quadrículas de 125 m de lado, que apresentou melhor compatibilidade com a escala de análise e características da BH. A análise excluiu o uso da terra categorizado como "urbano", devido à inviabilidade de mapeamento de características erosivas em áreas urbanas consolidadas, sendo dessa forma omitidas no modelo comparativo final. Enfatiza-se que tal ação visa minimizar a interpretação errônea para a análise qualitativa e quantitativa, considerando a impermeabilização do solo decorrente das características urbanísticas (como o asfalto e edificações).

O próximo passo foi sobrepor a camada das feições erosivas mapeadas à camada das quadrículas de referência, calculando-se também suas novas medidas de área (recortadas pelas bordas e classes de exclusão). Tais dados de dimensão foram associados a cada quadrícula. Com base nessa nova camada vetorial resultante, procedeu-se ao cálculo da densidade das feições em cada quadrícula pela Eq (11), onde: DF = Densidade de feições; St = Total da área de sulcos na quadrícula; Rt = Total da área de ravinas na quadrícula; Vt = Total da área de voçorocas na quadrícula; e Qt = Área da quadrícula.

$$DF = \frac{S_T + R_T + V_T}{Q_T} \quad (11)$$

A próxima etapa consistiu na interpolação das medidas de densidade das feições, que foram associadas às unidades de área mencionadas anteriormente. Para essa finalidade, foram criados centroides das "quadrículas" e os valores de densidade atribuídos a esses pontos foram interpolados usando o modelo TIN (Triangular Irregular Network), resultando na criação de um modelo Raster com uma resolução espacial de 10 metros. Por fim, com o intuito de comparação com os mapeamentos de diagnóstico dos ambientes, foram definidas cinco classes de densidade de feições para reclassificação da camada, tendo por base o método das quebras naturais do algoritmo de Jenks, que tem por intuito minimizar a variância dentro de cada classe, e concomitantemente maximizar a variância entre classes (AUGUSTI et al., 2021). A tabela 16 permite visualizar tal classificação. Os valores foram transformados para m²/ha para

melhor visualização.

Tabela 16 – Classes para densidade de feições erosivas lineares

Classe de Densidade de Feições	Valores (m²/ha)	Descrição
Classe I	0 – 55	Pouca presença de feições erosivas, dispersas e de baixo impacto na paisagem
Classe II	55 – 188	Presença de feições erosivas, predominando sulcos e ravinas com potencial de evolução
Classe III	188 – 525	Áreas marcadas pela forte presença de sulcos, ravinas e voçorocamentos de pequeno porte, processos erosivos mais desenvolvidos e consolidados
Classe IV	525 – 1438	Forte presença de voçorocas, associados a ravinas e concentração de sulcos, feições bem desenvolvidas e que apresentam maior risco ao ambiente
Classe V	1438 – 2352	Áreas marcadas por voçorocamentos de grande porte, cercados por ravinas e sulcos, revelando processos altamente desenvolvidos e que pedem por medidas de contenção mais avançadas

Fonte: Adaptado de Andrade (2022).

6.7 ANÁLISE DAS RELAÇÕES ESPACIAIS

A última etapa metodológica da pesquisa consistiu na interseção das camadas de dados levantadas com o intuito de verificar se as sobreposições forneciam dados de correlação entre as metodologias de análise diagnóstica do ambiente com o levantamento dos geoindicadores. Nessa etapa, para a comparação com o mapa de densidade de feições erosivas, inicialmente foram extraídas as classes de área urbana consolidada dos mapas de Fragilidade Ambiental e Vulnerabilidade Natural à Erosão (e suas variações com a incorporação do método AHP).

Na sequência foi realizada a interseção entre os mapas de vulnerabilidade e fragilidade com a camada de densidade de feições erosivas, resultando em uma matriz de relação entre graus de densidade de feições e níveis de fragilidade/vulnerabilidade.

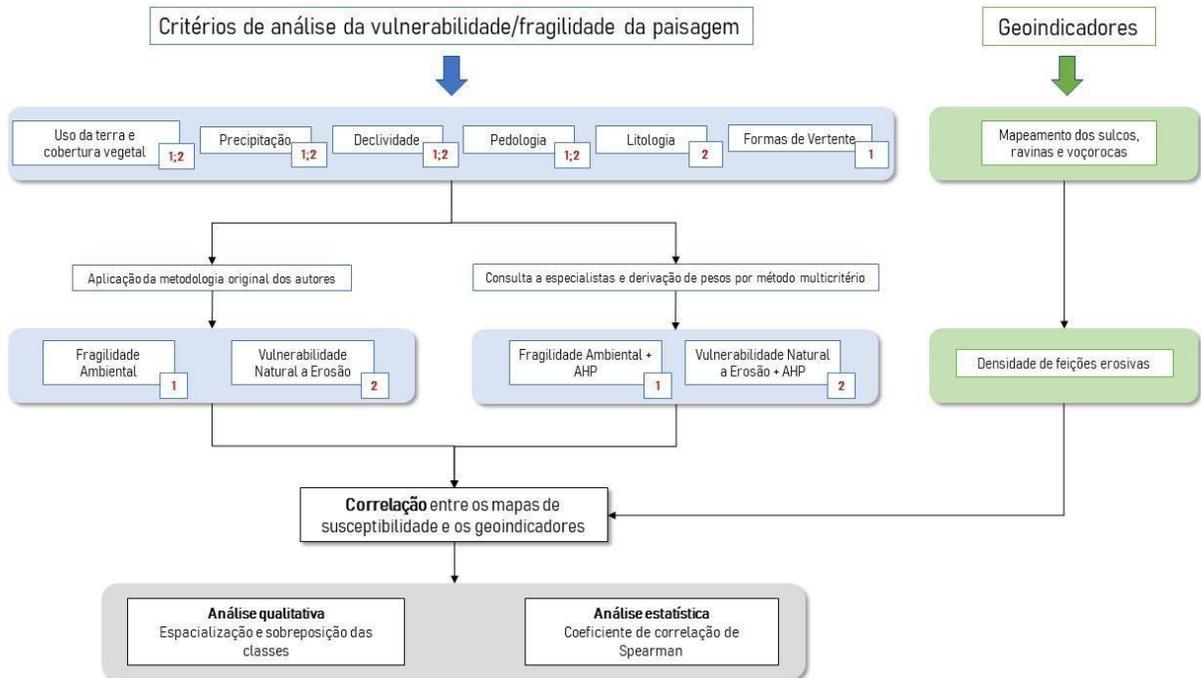
Por exemplo: Classe I de densidade de feições com Grau 1 de fragilidade ambiental; Classe I de densidade de feições com Grau 2 de fragilidade ambiental; assim por diante. Em seguida, as áreas foram calculadas, de forma a ser possível computar as porcentagens totais de cada área de sobreposição das variáveis, quando comparada com a extensão total. Esse procedimento foi repetido para todos os níveis de susceptibilidade dos quatro produtos cartográficos de diagnóstico gerados em comparação com a densidade de feições erosivas. As tabelas finais obtidas por meio desta metodologia permitiram uma análise qualitativa dos dados.

De forma a aprofundar ainda mais a análise e realizar uma avaliação estatística dos resultados, seguindo uma abordagem semelhante à empregada por Gouveia e Ross (2019), o coeficiente de correlação de Spearman foi aplicado, com uso do software Jamovi. O coeficiente tem o propósito de avaliar as correlações entre variáveis contínuas, avaliando se quando uma variável tem um aumento ou decréscimo, a outra acompanha. Esses valores variam de -1 a 1, sendo negativo quando há um crescimento inversamente proporcional, e positivo quando proporcional. Quanto mais próximos os valores de 0, menor a intensidade de correlação. Em suma, permite visualizar o quanto o modelo em questão foi capaz de explicar os fenômenos da realidade.

Para isso, foi utilizada a camada raster gerada pelo TIN com o intuito de obtenção de um valor unitário de densidade por pixel. Em seguida, os dados foram interseccionados com os mapas de fragilidade e vulnerabilidade, e assim exportados para o software supracitado, que gerou o coeficiente de correlação de *Spearman*, assim como o valor-P.

Para proporcionar uma melhor visualização das etapas metodológicas da pesquisa, a figura 5 apresenta um organograma de sistematização.

Figura 5 – Organograma de sistematização das etapas metodológicas da pesquisa. Os números em vermelho indicam as variáveis utilizadas por cada metodologia



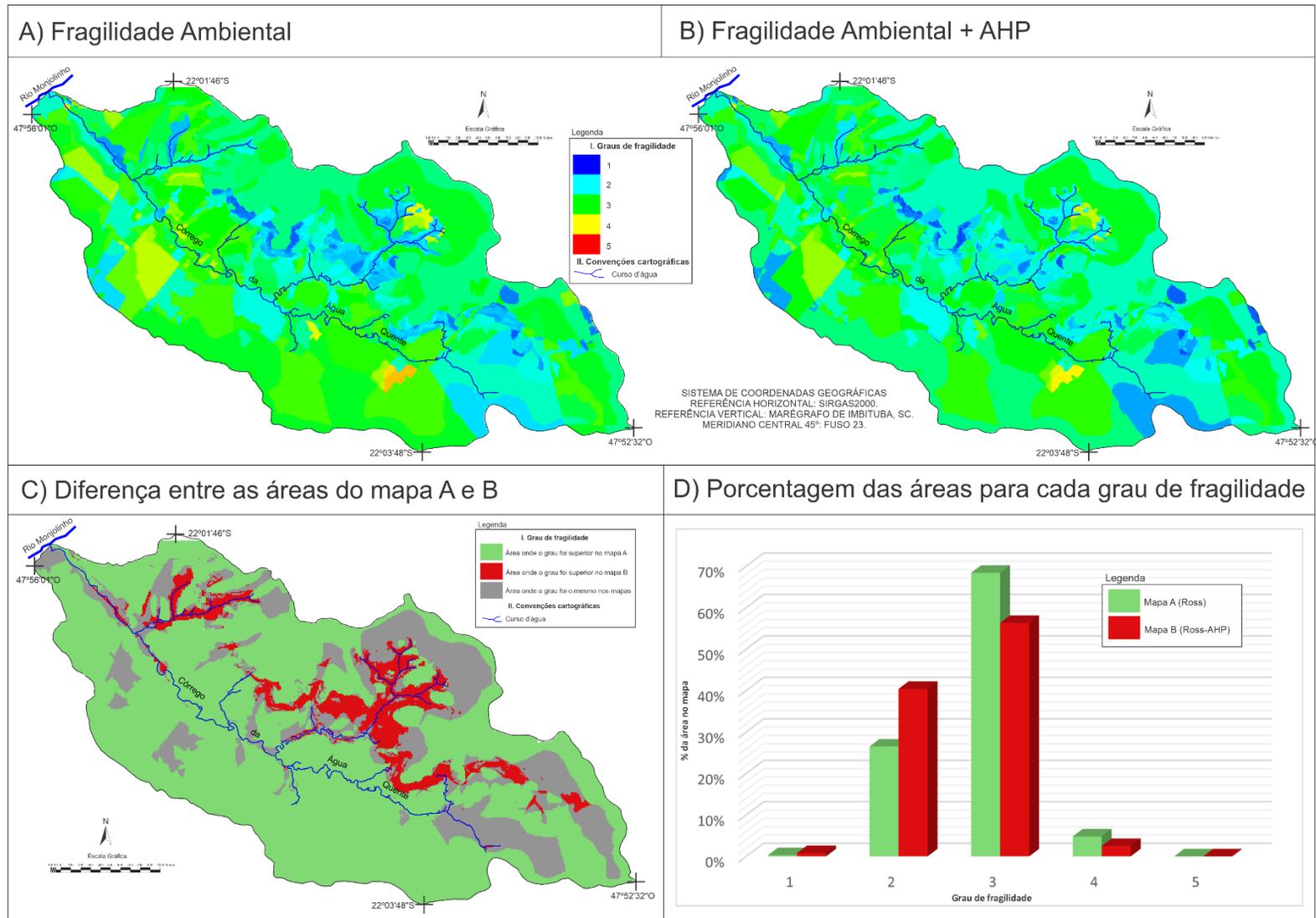
Fonte: Elaborado pelo autor.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 MODELOS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL E VULNERABILIDADE NATURAL A EROSÃO

O mapa da fragilidade ambiental, resultante da aplicação do método de Ross (1994) e a variação com a incorporação do método AHP estão apresentados na figura 6.

Figura 6 – Mapas da fragilidade ambiental da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos modelos apresentados pela figura 6, a visualização cartográfica não revela claramente as variações entre o modelo de Ross e o modelo ponderado pelo AHP. Contudo, observando a diferença algébrica entre os modelos, nota-se que o modelo ponderado pelo AHP aumenta o nível de fragilidade na porções de maior dissecação do relevo, onde também estão presentes as maiores declividades, aumentando os níveis de fragilidade, ainda que o gráfico da porcentagem de graus de fragilidade mostre que este modelo apresenta uma área total menos frágil.

Identificou-se que para ambos os métodos A e B, a classe de média fragilidade teve predominância, representando no método de Ross 68,4%, e no modelo ponderado pelo AHP 56,3% (Tabela 17). Verificou-se uma proximidade dos mapeamentos no que tange a localização das classes no mapa, ainda que haja diferença nos graus de fragilidade de modo geral. É possível observar que o modelo ponderado pelo AHP apresenta 40,4% de áreas de baixa fragilidade e 0,8% de muito baixa, enquanto o método Ross apresenta 26,5% de baixa fragilidade e 0,3% de muito baixa. Tal averiguação pode ser esclarecida pelo maior peso dado a variável formas de vertente no método AHP, ocasionando que nos setores de topos houvesse suavização do grau de fragilidade. Outro fator importante destacado é a importância dada a precipitação, que no mapa em conjunto ao método AHP tem um peso de apenas 4% de relevância na construção do mapa. Todavia, no setor de cabeceiras a nordeste da BH, a presença de segmentos retilíneos de alta vertente, associado ao peso de importância da variável, resultou em valor de fragilidade ascendesse, elevando os níveis de fragilidade nestes setores. Nota-se que tal constatação é uma tendência nos estudos que incorporam o método AHP a análise da fragilidade.

Tabela 17 – Porcentagens de cada grau de fragilidade para o mapa de fragilidade ambiental e fragilidade ambiental com o método AHP

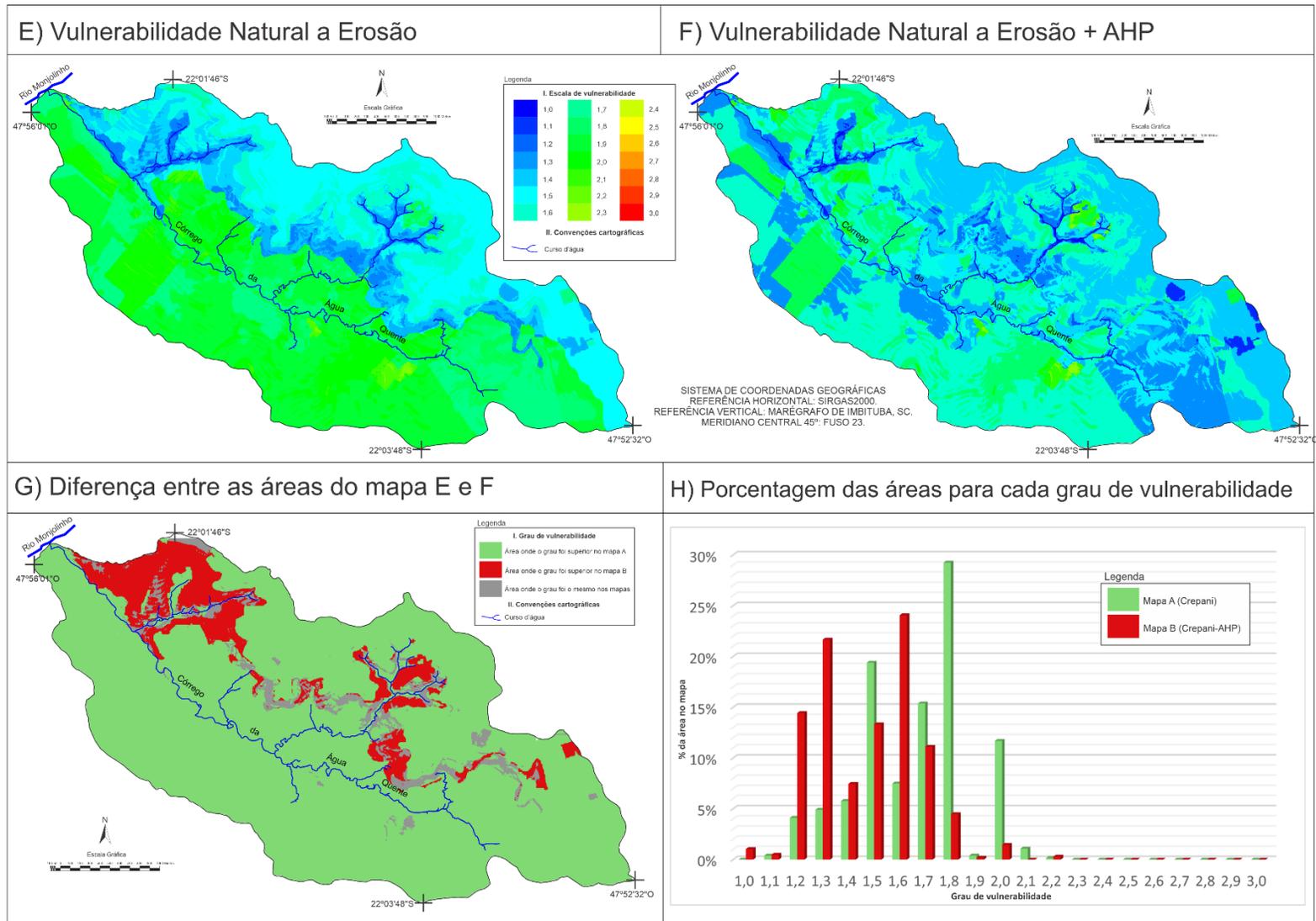
Graus de fragilidade	Área do mapa de fragilidade ambiental	Área do mapa de fragilidade ambiental com o método AHP
1	0,3%	0,8%

2	26,5%	40,4%
3	68,4%	56,3%
4	4,8%	2,5%
5	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo da vulnerabilidade natural a erosão, baseado no método de Crepani et al. (1994, 2001), e a variação com a incorporação do método AHP estão apresentados na figura 7.

Figura 7 - Mapas da vulnerabilidade natural a erosão da BH do Córrego da Água Quente, São Carlos (SP)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na execução do Método Crepani (VNE) e do Método AHP (VNEA) notou-se considerável diferença tanto na disposição das classes de vulnerabilidade, quanto nos valores, explicitada ainda mais pela diferença algébrica. Essa variação está relacionada ao elevado valor de importância que as variáveis pedologia e geologia tem no método Crepani, tendo em vista a forte influência que elas têm no delineamento das classes de vulnerabilidade no mapa. No modelo AHP nota-se que o peso maior foi atribuído ao mapa de Uso da Terra e da declividade, ressaltando mais uma vez os níveis de fragilidade descrito como unidades estáveis por Crepani.

Ainda é importante notar que na zona de contato entre as unidades morfoesculturais do Planalto Centro Ocidental e do Planalto Residual de São Carlos foi possível identificar a existência de escarpas erosivas, à margem esquerda do curso d'água principal. Nota-se que, mesmo a acentuada declividade sendo um potencializador dos processos erosivos lineares, em todos os modelos tais áreas estão relacionadas a baixos índices de fragilidade. Tal fato deve-se principalmente a dois fatores: 1) A pedologia local ser predominantemente composta pelo latossolo vermelho-escuro, atribuído a baixos níveis de fragilidade e vulnerabilidade; 2) A cobertura vegetal se tratar de mata nativa, considerando o setor abranger zonas de cabeceiras configuradas como área de proteção permanente (APP). Dessa forma, ainda que os valores de importância das variáveis sejam diferentes, o resultado se torna semelhante.

A tabela 18 apresenta as porcentagens de cada grau de VNE para o mapa de Crepani et al. (2001) e o mapa que integra o método AHP.

Tabela 18 - Porcentagens de cada grau de vulnerabilidade para o mapa VNE e VNEA

Graus de vulnerabilidade	Área do mapa de vulnerabilidade natural a erosão	Área do mapa de vulnerabilidade natural a erosão com o método AHP
1,0	0%	1,0%

1,1	0,4%	0,5%
1,2	4,1%	14,4%
1,3	4,9%	21,7%
1,4	5,8%	7,5%
1,5	19,4%	13,3%
1,6	7,5%	24,1%
1,7	15,4%	11,1%
1,8	29,2%	4,5%
1,9	0,4%	0,2%
2,0	11,7%	1,5%
2,1	1,1%	0%
2,2	0,2%	0,3%
2,3 / 2,4 / 2,5 / 2,6 / 2,7 / 2,8 / 2,9 / 3,0	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

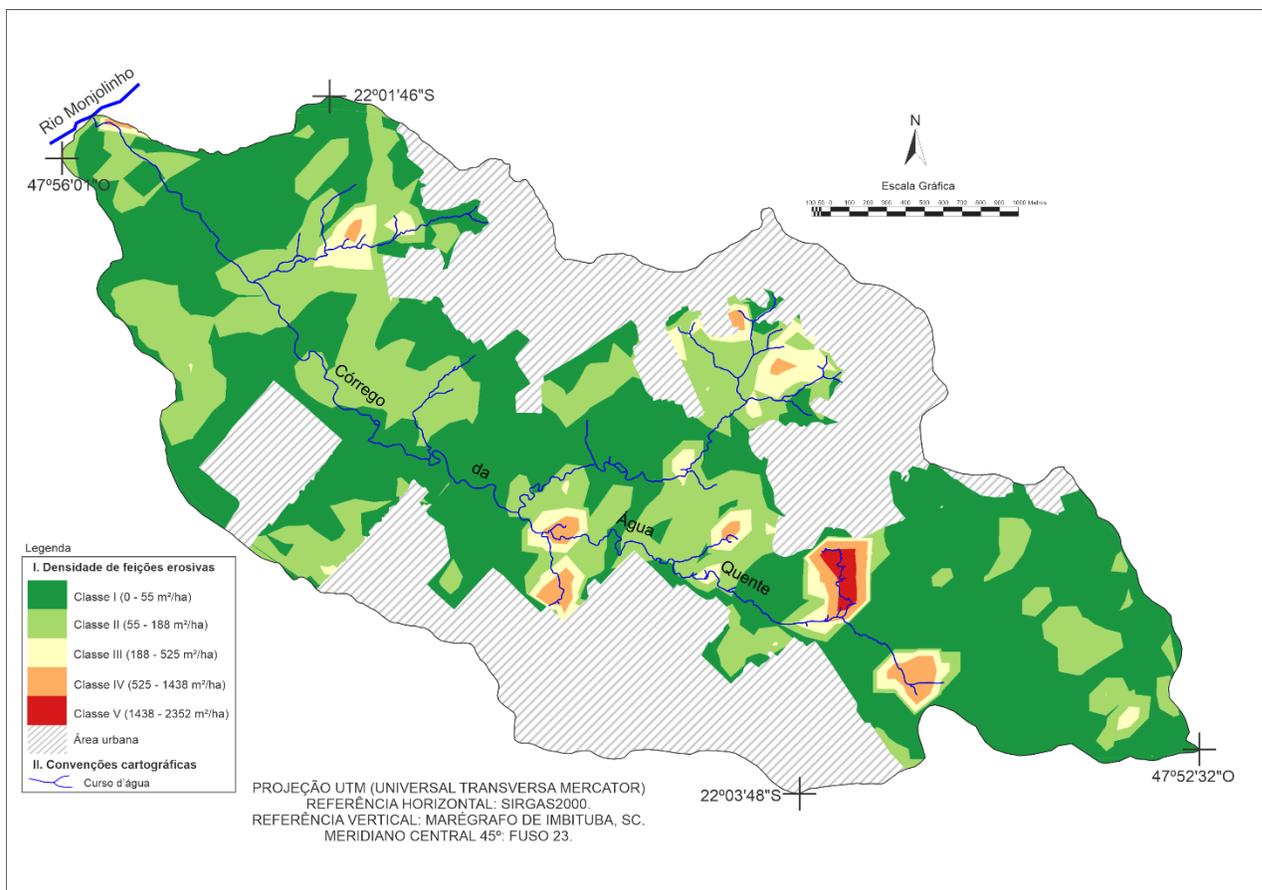
A aplicação do método AHP com base na consulta a especialistas resultou em uma ponderação mais condizente com as características ambientais da área de estudo, suavizando a generalização resultante da aplicação direta dos métodos originais de Ross e Crepani. Dias e Silva (2014) descrevem uma situação comparável à identificada neste estudo, ao afirmarem que a aplicação da modelagem, por meio da integração do AHP, demonstra ser eficaz na redução da subjetividade ao ponderar os atributos dos mapas

temáticos. As diferenças resultantes dos mapeamentos, ainda que à primeira vista sejam sutis, evidenciam a importância do olhar especializado sobre as especificidades da área de estudo para além de apenas identificar seus atributos e aplicar uma metodologia padronizada, entendendo que cada ambiente, antropizado ou não, tem características e interações que são particulares.

7.2 GEOINDICADORES: DENSIDADE DE FEIÇÕES EROSIVAS LINEARES

Diante do levantamento realizado na carta de feições erosivas lineares da BH do Córrego da Água Quente (figura 3), a figura 8 exhibe o mapeamento da densidade de geoindicadores.

Figura 8 – Mapa de densidade de feições erosivas lineares da BH do Córrego da Água Quente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ferreira e Pinton (2022) caracterizaram os cenários de morfologia pré-perturbação antrópica e morfologia antropogênica da BH do Córrego da Água Quente como forma de

analisar a deflagração de desequilíbrios na magnitude de processos hidrogeomorfológicos. Em suma, exemplifica-se que a ocorrência de feições erosivas no setor de cabeceiras da margem direita do córrego (local onde observa-se a presença das classes III e IV de densidade) é associada tanto ao solo exposto quanto ao estágio avançado de ocupação urbana nos arredores, considerando o estabelecimento de canais artificiais na paisagem que potencializaram a concentração do fluxo do escoamento superficial devido a impermeabilização do solo. Ainda se verifica em outros locais que os atributos litopedológicos mais frágeis, associados a manejos que não preveem técnicas conservacionistas, foram possíveis potencializadores para o desenvolvimento das feições erosivas, como no setor de maior presença da classe V de densidade.

7.3 VALIDAÇÃO DOS MAPEAMENTOS DE SUSCEPTIBILIDADE AMBIENTAL PELOS GEOINDICADORES

De forma a possibilitar a visualização dos resultados da sobreposição entre os mapas obtidos pela aplicação das metodologias da fragilidade ambiental (FA) de Ross (1994) e sua variação com o AHP, as tabelas 19 e 20 apresentam as porcentagens de cada grau de fragilidade em comparação com as classes de densidade de feições erosivas.

Tabela 19 – Relação entre os graus de fragilidade do mapa da “Fragilidade Ambiental” com as classes de densidade de feições erosivas

Grau de FA	Densidade de Feições Erosivas				
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
1	0,57%	0,30%	0,00%	0,23%	0,00%
2	50,39%	23,22%	40,88%	49,42%	63,49%

3	43,93%	71,19%	49,58%	49,42%	36,51%
4	5,10%	5,29%	9,54%	3,57%	0,00%
5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 - Relação entre os graus de fragilidade do mapa da “Fragilidade Ambiental + AHP” com as classes de densidade de feições erosivas

Grau de FA	Densidade de Feições Erosivas				
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
1	1,84%	0,51%	0,07%	0,35%	0,00%
2	55,17%	26,54%	41,39%	45,93%	63,49%
3	42,25%	69,94%	53,18%	53,42%	36,51%
4	0,74%	3,01%	5,36%	0,30%	0,00%
5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma concomitante, as tabelas 21 e 22 apresentam os resultados relativos à sobreposição com a densidade de feições de, respectivamente, o mapa de Vulnerabilidade Natural a Erosão (VNE) de Crepani et al. (2001), e sua variação com o AHP.

Tabela 21 - Relação entre os graus de vulnerabilidade do mapa da “Vulnerabilidade Natural a Erosão” com as classes de densidade de feições erosivas

Grau de VNE	Densidade de Feições Erosivas				
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,2	0,53%	1,66%	3,25%	0,27%	0,00%
1,3	8,60%	7,02%	8,94%	3,89%	12,53%
1,4	11,41%	14,11%	17,15%	12,35%	9,91%
1,5	14,53%	10,02%	11,84%	2,92%	0,06%
1,6	2,90%	3,02%	4,64%	4,01%	0,00%

1,7	24,72%	7,48%	9,92%	12,43%	7,03%
1,8	15,05%	7,49%	22,87%	41,91%	41,70%
1,9	14,18%	33,74%	15,97%	16,04%	14,18%
2	7,00%	11,76%	5,08%	6,18%	14,59%
2,1	1,02%	3,11%	0,25%	0,00%	0,00%
2,2	0,07%	0,60%	0,09%	0,00%	0,00%
2,3 / 2,4 / 2,5 / 2,6 / 2,7 / 2,8 / 2,9 / 3,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 - Relação entre os graus de vulnerabilidade do mapa da “Vulnerabilidade Natural a Erosão + AHP” com as classes de densidade de feições erosivas

Grau de VNE	Densidade de Feições Erosivas				
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
1	0,39%	1,04%	0,83%	0,00%	0,00%

1,1	1,73%	0,79%	2,50%	0,27%	0,00%
1,2	5,52%	3,46%	3,19%	2,72%	12,53%
1,3	25,93%	9,57%	13,56%	12,99%	7,03%
1,4	21,14%	12,85%	15,51%	30,10%	14,11%
1,5	10,51%	4,32%	11,44%	19,13%	35,47%
1,6	20,90%	44,97%	26,17%	20,64%	16,21%
1,7	1,34%	3,87%	5,42%	3,30%	0,06%
1,8	10,59%	14,59%	11,65%	7,27%	14,59%
1,9	0,41%	0,07%	1,88%	1,14%	0,00%
2	1,19%	1,99%	0,82%	0,12%	0,00%
2,1	0,24%	1,66%	4,52%	1,97%	0,00%
2,2	0,03%	0,13%	2,17%	0,01%	0,00%

2,3	0,08%	0,68%	0,31%	0,37%	0,00%
2,4 / 2,5 / 2,6 / 2,7 / 2,8 / 2,9 / 3	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A sobreposição da densidade de feições erosivas com os mapeamentos de diagnóstico da susceptibilidade dos ambientes permitiu visualizar um cenário em que a incorporação do método Analytical Hierarchy Process (AHP) conferiu as metodologias originais maior aproximação, ainda que sutil, no que tange as classes de densidade e graus de fragilidade/vulnerabilidade. Em relação as duas versões para o método da Fragilidade Ambiental, verifica-se que para a classe I de densidade de feições os graus de fragilidade 1 e 2 do método de Ross representaram 50,96% da área total da classe, enquanto na comparação com o método incorporado ao AHP, os mesmos graus 1 e 2 corresponderam a 57,01%, respondendo de forma relativamente mais adequada a lógica que o diagnóstico prevê de que para os dois graus de fragilidade menos susceptíveis espera-se a menor presença de feições geomórficas decorridas de processos de erosão.

Tal constatação também é observada, de forma ainda mais acentuada, para os dois modelos decorridos da metodologia da Vulnerabilidade Natural a Erosão, no qual dos níveis 1 a 1,5 da derivação original de pesos corresponderam a 35,07% a área da classe I de densidade de feições erosivas, à medida que no método incorporado ao AHP essa mesma faixa de vulnerabilidade corresponde a 65,22% da classe I. Em consonância com o que foi discutido no subcapítulo 7.1, atribui-se tal diferenciação mais notável a distribuição de pesos iguais as variáveis que o método original de Crepani manipula, que valoriza os atributos litopedológicos da área quando comparado aos pesos derivados da consulta aos especialistas.

De maneira a aprofundar a análise, a tabela 20 apresenta os valores de correlação entre os quatro mapas de análise diagnóstica com a densidade de feições erosivas.

Tabela 23 – Valores de correlação entre os mapas de Fragilidade/Vulnerabilidade com a densidade de feições erosivas

Método de diagnóstico	Coefficiente de correlação de Spearman
Fragilidade Ambiental	0.098
Fragilidade Ambiental + AHP	0.189
Vulnerabilidade Natural a Erosão	0.031
Vulnerabilidade Natural a Erosão + AHP	0.130

Valor de P <.001

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela apresenta um resultado que expressa que, para o cenário investigado da Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente, quando a densidade de feições erosivas aumenta por área, os níveis de fragilidade ou vulnerabilidade não tendem a aumentar. Os modelos de análise de susceptibilidade testados não foram capazes de mostrar uma força significativa de correlação em relação a densidade de feições erosivas por unidade de área na bacia, nos termos aqui adotados, ainda que o valor de P indique significância estatística. O ambiente da BH quando validados pelos geoindicadores, apresenta coeficiente de correlação < 0,2, que é um nível de correlação considerado de pouca significância, ainda que positivo.

Em análise da literatura, verificou-se cenário semelhante em Gouveia e Ross (2019), que ao testarem três diferentes modelos de fragilidade emergente, constataram em dois deles valores considerados de baixa correlação (0,35 e 0,11). Destaca-se, todavia, que a referida pesquisa utiliza dados secundários advindos do IPT (2012) para ocorrências de processos erosivos, que considera apenas as ravinas e voçorocas. O presente estudo realiza avanço ao integrar a análise os sulcos (estágio inicial de desenvolvimentos das feições erosivas lineares), ampliando ainda mais a confiança da correlação, que teve seu valor de “p” inferior a 0,001 para todas as operações realizadas.

Em contrapartida, a análise de outros trabalhos que buscaram validar os resultados do estudo de vulnerabilidade ambiental, verificou-se que Silva e Bacani (2023) validaram a fragilidade ambiental por meio de problemas ambientais negativos em pontos de amostra observados em campo, e concluíram que 42 de 52 dos pontos observados estavam associados aos graus de fragilidade alta e muito alta. Contudo os autores não explicam claramente o que se entende por impactos ambientais negativos, diferentemente do que foi feito na presente pesquisa que adotada explicitamente as feições erosivas lineares como parâmetro de validação.

Diante dessa conjuntura, admite-se que poderiam existir outras variáveis não contempladas nos modelos ambientais que influenciam a relação observada. Nesse sentido, compreende-se que a observação de um único ambiente não permite a generalização, havendo a necessidade de ainda outros estudos que incorporem diferentes variáveis e validem os resultados de forma semelhante a aplicada no presente estudo.

Todavia, o coeficiente de correlação possibilitou reforçar o contexto exposto pelas sobreposições entre as classes de densidade e graus de fragilidade/vulnerabilidade de que a incorporação do método AHP contribuiu para que o diagnóstico fosse mais adequado ao contexto exposto pelos geoindicadores. Tanto para a metodologia da Fragilidade Ambiental quanto para a da Vulnerabilidade Natural a Erosão, os valores de correlação aumentaram aproximadamente 0,1. Também se supõe que a razão da metodologia proposta por Ross ter valores superiores de correlação deve-se ao método de Crepani pelo presente estudo atuar em uma escala de detalhe, para a qual a análise da vulnerabilidade enfrenta limitações.

8 CONCLUSÕES

É notável que a aplicação de métodos difundidos e amplamente consolidados no território nacional para a análise da susceptibilidade ambiental reforça a validade de seus resultados como diagnóstico. Todavia, a validação quali-quantitativa na Bacia Hidrográfica do Córrego da Água Quente, por meio das sobreposições e correlação estatística, exteriorizou uma conjuntura em que os métodos aplicados não corresponderam a expectativa de prever a configuração do cenário da superfície, pelos geoindicadores. É necessário, contudo, que análises semelhantes a realizada sejam replicadas para outros contextos ambientais, para que seja possível afirmar a validade dos métodos, ou ainda buscar formas de refinamento, assim como Gouveia e Ross (2019) fizeram ao utilizar os Geomorphons para a variável de formas de relevo, alcançando assim maior valor de correlação..

Aferiu-se que a inserção de novas etapas metodológicas, no caso dos métodos multicritério, mostra-se vantajosa no sentido da busca de um refinamento desses produtos finais, alcançando um resultado que seja mais adequado as especificidades de cada ambiente, fato evidenciado tanto pela correlação quanto pela interpretação qualitativa dos dados. Apesar de ampla gama de trabalhos terem utilizado o processo de análise hierárquica em conjunto de análises de susceptibilidade, o presente trabalho tem singularidade ao realizar uma aplicação e comparação direta entre a aplicação dos métodos consolidados originais e as variações advindas da inserção de métodos multicritério.

Por fim, é importante ressaltar que a incorporação do método AHP desse estudo não estabelece um padrão de pesos que pode ser aplicado em qualquer caso, mas sim torna-se uma metodologia a ser adotada de acordo com as singularidades de cada sistema ambiental em análise. A vantagem está na possibilidade de consulta a especialistas, que permite a compreensão das particularidades do sistema ambiental, sobretudo, quando a análise se faz em uma escala de detalhe. Isso se apresenta como potencialidade a ser explorada na tentativa de se estabelecer parâmetros mais condizentes de trabalho, abrindo possibilidades para futuras pesquisas de análise diagnóstica dos ambientes.

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.
- ANDRADE, R. F. Processos erosivos no relevo de cuestras: a influência antrópica e a legislação ambiental no município de Botucatu (SP). **Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista**. Rio Claro, p. 136. 2022.
- ANJINHO, P. S.; BARBOSA, M. A. G. A.; COSTA, C. W.; MAUAD, F. F. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, 100: 1-11. 2021.
- AUGUSTI, R.; et al. Análise espacial das principais produções agropecuárias do estado do Maranhão. **Agronegócio: Técnicas, Inovação e Gestão**, v. 1, n. 1, p. 287-302, 2021.
- BACANI, V.M.; SAKAMOTO, A.Y.; LUCHIARI, A.; QUÉNOL, H. Sensoriamento remoto e SIG aplicados à avaliação da fragilidade ambiental de bacia hidrográfica. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**. 2015.
- BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física Global. Esboço metodológico. **Caderno de Ciências da Terra**, n. 13, p. 1-27, 1971.
- BONINI, J. E. Fragilidade ambiental a escorregamentos rasos: análise comparativa entre modelos de bases heurística e estatística. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo. 2020.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Geoprocessamento para Projetos Ambientais. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**, São José dos Campos, 1996.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979.
- COSTA, C. W.; PIGA, F. G.; MORAES, M. C. P.; DORICI, M.; SANGUINETO, E. C.; LOLLO, J. A.; MOSCHINI, L. E.; LORANDI, R.; OLIVEIRA, L. J. Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras, Araras, SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 20, 2015.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ- -FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V. Uso de sensoriamento remoto no zoneamento ecológico-econômico. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 8., 1996, Salvador, BA. Anais ... São José dos Campos: INPE, p. 129-135., 1996.

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.

CREPANI, E; GOMES, A. R; CARVALHO, V. C; MEDEIROS, J. S – Aplicação da metodologia ZEE para a análise da vulnerabilidade à perda de solo em ambiente semi árido. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia, 2005.

DIAS, V. S. B.; SILVA, A. B. AHP na modelagem da vulnerabilidade ambiental do mini corredor ecológico serra das onças (BA). **Revista Brasileira de Cartografia**. 66, p. 1363- 1377, 2014.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins**, n. 37, 2018.

FAGUNDES, M. G. Estudo comparativo da variação de escala na fragilidade ambiental e vulnerabilidade natural do solo na bacia hidrográfica do rio Jundiá. **Dissertação de Mestrado USP**, São Paulo, 2013.

FERREIRA, M. V. S.; PINTON, L. G. Antropogeomorfologia em setor de expansão urbana de cidade de médio porte. **Raega – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 53, p. 48-70, 2022.

FERREIRA, P. S.; SILVA C. A. O método AHP e a Álgebra de Mapas para determinar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Brilhante (Mato Grosso do Sul/Brasil), **Proposições para a gestão do território**, Confins [Enligne], 46, 2020.

GIMENES, F.B.Q.; FILHO, O.A. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). **Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto**, 16., Paraná. Anais [...]. Foz do Iguaçu: INPE, p. 6564-6571, 2013.

GONÇALVES, S.R.A.; ARAÚJO, R.R.; IMAI, N.N. Mapeamento do grau de fragilidade com processo analítico hierárquico e operadores Fuzzy Gama na detecção áreas de fragilidade ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia** 68, 327-337, 2016.

GOUDIE, A. S. (Ed.). **Encyclopedia of Geomorphology**. London: Routledge. 2 v. 2013.

GOUDIE, A. S.; VILES, H. A. Geomorphology in the Anthropocene. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2016.

GOUVEIA, I. C. M. C; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental: uma Proposta de

Aplicação de Geomorphons para a Variável Relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, 37 São Paulo, 123 – 136, 2019.

GUIRRA, A. P. M., SANTOS, C. A., NOGUEIRA, C. E. A evolução metodológica de fragilidade ambiental no Brasil e seu aspecto transdisciplinar. **IV Simpósio Nacional sobre Pequenas Cidades**. Cidades pequenas: dinâmicas, escalas e redes. Ituiutaba, Minas Gerais, Brasil, v.1, p. 1-17, 2016.

HUBP, J. I. L. Elementos de Geomorfologia Aplicada (Metodos Cartograficos). **México D.F.: Universidad Nacional Autonoma de México**, 128 p. 1988.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS – IAC. **Solos do estado de São Paulo**. [2015?]. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solossp>>. Acesso em: 15 set. 2020. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE; 316 p. Manuais Técnicos em Geociências n. 4, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**, 3ª ed., Rio de Janeiro: IBGE; 171 p, 2013.

JUNIOR, J.F.P., 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 – USP** 23, 4-26, 2012.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. S., 2005. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., Goiania**. Goiânia: INPE, p. 2203 – 2210, 2005.

KIKER, G.A.; BRIDGES, T.S.; VARGHESE, A.; SEAGER, T.P.; LINKOVJJ, I. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. **Integrated Environmental Assessment and Management** 1 (2), p. 95–108, 2005.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

LIRA, K.C.S.; FRANCISCO, H.R.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. **Sociedade e Natureza**. 34(1), 2022.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, 20(7), 703–726, 2006.

MESSIAS, C.G.; FERREIRA, M.F.M.; RIBEIRO, M.B.P.; MENEZES, M.D. Análise empírica de fragilidade ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento: O caso da

área de influência da hidrelétrica do Funil – MG. **Revista Geonorte**, v.2, n.4,p.112-125, 2012.

MONTEIRO, C. A. de F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo – estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1973.

NIR, D. Man, a geomorphological agent: an introduction to anthropic geomorphology. Jerusalem: **Keter Publishing House**, 1983.

PEREIRA, P. R. M.; COSTA, F. W. D.; GARCÊS JÚNIOR, A. R. G. Geoprocessamento aplicado na análise da fragilidade ambiental do município de Brejo, Maranhão. **Revista Equador**, 8, p. 521- 539, 2019.

PINTON, L. G.; CUNHA, C. M. L. O uso de geoindicadores em paisagem rural: subsídios à análise das mudanças morfológicas Antropogênicas da Bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia (SP). **Revista do Departamento de Geografia – USP**, São Paulo, v. 29, p. 1-19, 2015.

RODRIGUES, C. Avaliação do impacto humano da urbanização em sistemas hidro-geomorfológicos. Desenvolvimento e aplicação de metodologia na grande São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 20, p. 111-125, 2010.

RODRIGUES, C. Morfologia original e morfologia antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: exemplo na metrópole paulista. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, São Paulo, n. 17, p. 101 – 111, 2005.

ROSA, M. R., ROSS, J. L. Aplicação de SIG na geração de cartas de fragilidade. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, 13, 77-106, 1999.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. n.8, p.63-74. 1994.

ROSS, J. L. S. Ensaio e experimentos na análise da fragilidade dos ambientes naturais: o penetrômetro de percussão. **Revista do Departamento de Geografia**, 11: 57-66. 1997.

ROSS, J. L. S.; FIERZ, M. de S. M. Geomorfologia aplicada ao planejamento ambiental territorial: potencialidades e fragilidades in: MAGNONI JÚNIOR, L. et al. (orgs)

Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano, Centro Paula Souza, São Paulo, p.58-77, 2017.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**: escala 1:500.000. São Paulo: FFLCH-USP; IPT; FAPESP, 2 v, 1997.

ROSS, J.L.S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 6, 1992.

SAATY, T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T.L. Decision making – the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). **Journal of systems science and systems engineering**, 13(1), p. 1–35, 2004.

SAATY, T.L. How to make a decision: the analytic hierarchy process, **Interfaces**, Vol. 24, No. 6, pp.19–43, 1994.

SÃO CARLOS (Cidade). Serviço Autônomo de Água e Esgoto - SAAE. **Avaliação hidrogeológica dos aquíferos subterrâneos e superficiais do município de São Carlos (SP)**. São Carlos: SAAE, 2000. Escala 1:50.000.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE. **Mapa Geológico de São Paulo**: Campinas (Folha SF-23-Y-A). Coordenação de Paulo Milton Barbosa Landim. São Paulo: DAEE, 1982. Escala 1:250.000.

SERAFIM, J. Jô Soares entrevista Milton Santos. **Youtube**, 12 de abril de 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=jzUIHAAiISM>. Acesso em: 07 de agosto de 2023.

SILVA, E. M.; BACANI, V. M. Análise da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Ribeirão Jatobá-MS. **GEOFRONTER**, v. 9, 2023.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA. **Glossary of soil science terms**. c2020. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/soils-glossary>>. Acesso em 15 de set. de 2020.

SOUZA, T. de A. de; OLIVEIRA, R. C. de. Avaliação da potencialidade de imagens tridimensionais em meio digital para o mapeamento geomorfológico. **Revista Geonorte**, Manaus, ed. Especial, v. 2, n. 4, p. 1348-1355, 2012.

SPÖRL, C.; CASTRO, G. E.; LUCHIARI, A. Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Construção de Modelos de Fragilidade Ambiental, **Revista do Departamento de Geografia**, 21, São Paulo, p. 113-135, 2011.

TAKIKAWA, B. Y.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Proposta metodológica para elaboração de um indicador de fragilidade ambiental para fragmentos florestais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 41, 2021.

TERCINI, O. T.; DA ROCHA LIMA, C. G.; DE LOLLO, J. A. Analysis of environmental fragility on the city of Monte Alto-SP and proposals for environmental zoning. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 17, n. 5, 2021.

TRAFICANTE, D.P.; CAMPOS, S.; MANZIONE, R.L.; RODRIGUES, B.T. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Capivara, Botucatu-SP. **Energia na agricultura** 32, p. 88-95, 2017.

TRICART, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro. **IBGE/SUPREN**, 1977.

TRICART, J. Principes et méthodes de la géomorphologie. Paris: Masson, 1965.

UNITED NATIONS. **Report of the United Nations Conference of the Human Environment**. Stockholm: United Nations, 1972.

VALLE, C.; FRANCELINO, M.R.; PINHEIRO, H.S.K. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floram - Revista Floresta e Ambiente**, 23, pp. 295-308, 2016.

VERSTAPPEN, H. T.; ZUIDAM, R. A. Van. **ITC System of geomorphological survey: manual ITC textbook**. Enschede, Holanda: ITC, 1975.

XAVIER-DA-SILVA, J. Geomorfologia, Análise Ambiental e Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Campinas, v. 1, n. 1, p. 48-5. 2000.