

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DO QUILOMBO – SÃO CARLOS/SP**

Gustavo Augusto Mendonça Ascutti

São Carlos

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DO QUILOMBO – SÃO CARLOS/SP**

Gustavo Augusto Mendonça Ascitti

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Edson Augusto Melanda

Co-orientação: Dr. Fábio Noel Stanganini

São Carlos

2019

Mendonça Ascitti, Gustavo Augusto

MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DO QUILOMBO – SÃO CARLOS/SP / Gustavo
Augusto Mendonça Ascitti. -- 2019.
104 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São
Carlos, São Carlos

Orientador: Prof. Dr. Edson Augusto Melanda

Banca examinadora: Dr. Fábio Noel Stanganini, Prof. Dr. Roberto Wagner
Lourenço, Prof. Dr. Vitor Molina Junior

Bibliografia

1. Meio Ambiente. 2. Geoprocessamento. 3. Sustentabilidade. I.
Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meu pai, minha mãe e minha esposa Izadora pelo incentivo e apoio incondicional nesta etapa da minha vida, sem vocês não teria conseguido.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Edson Augusto Melanda e Dr. Fábio Noel Stangarini, pela amizade, compreensão e conhecimento, sua orientação foi essencial para elaboração deste estudo.

A todos os colegas do mestrado, em especial ao Cristian, Lucas e Vinícius, pela companhia durante as viagens de São José do Rio Preto a São Carlos, sem vocês, teria sido muito mais difícil.

Ao Departamento de Meio Ambiente da Usina Guarani por terem me liberado para as disciplinas e pelo apoio aos estudos.

Ao meu amigo Gildriano Soares por ter me incentivado a fazer o mestrado.

A UFSCAR, em especial ao PPGEU pela oportunidade e infraestrutura oferecida para elaboração desta pesquisa.

A todos que diretamente e indiretamente contribuíram para este mestrado.

A Deus, por ter me dado as oportunidades e aberto as portas para eu chegar onde estou.

RESUMO

Esta pesquisa consistiu na elaboração do mapa de Fragilidade Ambiental para a Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo, em sua parcela inserida no município de São Carlos/SP, adaptando as metodologias propostas por Calijuri (2007) e por Cereda Junior (2011), aplicando a lógica *fuzzy* não linear sigmoidal na padronização das características do meio físico da área de estudo. A padronização *fuzzy* não linear sigmoidal demonstrou maior concentração de resultados nos extremos dos menores e maiores valores, portanto, sua aplicação no mapeamento da fragilidade ambiental deve ser realizada com ressalvas, de preferência combinada com modelos de álgebra de mapas que possibilitem a atribuição de pesos aos parâmetros analisados, conforme sua importância na estabilidade do terreno. O mapa de Fragilidade Ambiental foi elaborado por meio da correlação dos parâmetros “uso e ocupação do solo”, “declividade”, “pedologia”, “distância de corpos hídricos” e “pedologia”. Os métodos de álgebra de mapas aplicados nesta pesquisa foram o AHP, Média Aritmética Ponderada e Média Aritmética Simples, esta última utilizada como valor de comparação. Os resultados para o modelo AHP foram 6% para “Muito Fraca”, 22% para “Fraca”, 37% para “Média”, 28% para “Forte” e 8% para “Muito Forte” respectivamente. A Média Aritmética Ponderada apresentou 4% para “Muito Fraca”, 18% para “Fraca”, 46 para “Média”, 29% para “Forte” e 3% para “Muito Forte”. A metodologia para o mapeamento da fragilidade ambiental proposta neste estudo priorizou o parâmetro uso e ocupação do solo, trazendo como resultado positivo a possibilidade da atualização dos valores da fragilidade ambiental conforme as alterações da cobertura do solo. Em relação ao Plano Diretor Municipal, as diretrizes para o uso e ocupação do solo estão condizentes com as características naturais da área de estudo, principalmente no condicionamento da expansão urbana com a adequação da infraestrutura viária e de drenagem urbana, além da preservação e recuperação da vegetação nativa e das áreas de preservação permanente.

Palavras-chave: geoprocessamento, *fuzzy*, fragilidade ambiental, ordenamento territorial, mapeamento.

ABSTRACT

This research consisted in the elaboration of the Environmental Fragility map for the Quilombo River Basin, in its parcel located in the municipality of São Carlos / SP, adapting the methodologies proposed by Calijuri (2007) and Cereda Junior (2011), applying the fuzzy nonlinear sigmoidal logic in the standardization of the characteristics of the physical environment of the study area. The non-linear fuzzy sigmoidal standardization showed a higher concentration of results at the extremes of the lowest and highest values, therefore, its application in the mapping of environmental fragility should be performed with caveats, preferably combined with maps algebra models that allow the attribution of weights to the parameters analyzed, according to their importance in the stability of the terrain. The Environmental Fragility map was elaborated through the correlation of the parameters "land use and occupation", "slope", "pedology", "distance of water bodies" and "pedology". The map algebra methods applied in this research were the AHP, Weighted Arithmetic Mean and Simple Arithmetic Mean, the latter used as the comparison value. The results for the AHP model were 6% for "Very Poor", 22% for "Weak", 37% for "Average", 28% for "Strong" and 8% for "Very Strong" respectively. The Weighted Arithmetic Average presented 4% for "Very Poor", 18% for "Weak", 46 for "Average", 29% for "Strong" and 3% for "Very Strong". The methodology for mapping the environmental fragility proposed in this study prioritized the parameter soil use and occupation, bringing as a positive result the possibility of updating the values of environmental fragility according to changes in soil cover. In relation to the Municipal Master Plan, the guidelines for land use and occupation are in line with the natural characteristics of the study area, mainly in the conditioning of urban expansion with the adequacy of road infrastructure and urban drainage, as well as the preservation and recovery of native vegetation and areas of permanent preservation.

Key-words: geoprocessing, fuzzy, environmental fragility, land use planning, mapping.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Venn, representando as fronteiras de um conjunto fuzzy (a) e Booleano (b).....	29
Figura 2 - Ilustração da representação de informação semântica para contatos.....	30
Figura 3 – Fluxograma das etapas para o mapeamento da fragilidade ambiental.....	41
Figura 4 – Localização do município de São Carlos e a delimitação da área de estudo	43
Figura 5 - Gráfico das médias históricas dos dados meteorológicos de São Carlos, registrados entre 1992 e 2010.	44
Figura 6 - Mapa da área de estudo sobreposta ao Macrozoneamento do Plano Diretor Municipal de São Carlos/SP – Lei Municipal 18.053/2016.....	46
Figura 7 – Gráfico da padronização <i>fuzzy</i> para Declividade.	49
Figura 8 – Gráfico da padronização <i>fuzzy</i> para distância de corpos d’água.	50
Figura 9 – Hidrografia da área de estudo.	58
Figura 10 – Altitude na área de estudo.	60
Figura 11 – Declividade em porcentagem.	61
Figura 12 - Mapa Pedológico.	64
Figura 13 - Mapa de uso e ocupação do solo.	66
Figura 14 - Mapa Pluviométrico.....	68
Figura 15 – Padronização <i>Fuzzy</i> para Declividade.....	70
Figura 16 – Padronização <i>Fuzzy</i> para Distância de Corpos Hídricos.....	72
Figura 17 – Padronização <i>Fuzzy</i> para Pedologia.	74
Figura 18 – Padronização <i>Fuzzy</i> para Uso do Solo.	76
Figura 22 – Mapa de Fragilidade Ambiental utilizando AHP.....	78
Figura 23 – Mapa de Fragilidade Ambiental utilizando Média Aritmética Ponderada.	80
Figura 24 – Mapa de Fragilidade Ambiental utilizando Média Aritmética Simples.	82
Figura 25 – Gráficos com os valores obtidos nos mapas de Fragilidade Ambiental gerados: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.....	85
Figura 26 – Localização das áreas destacadas na Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo. ..	87
Figura 27 – Área destacada “A” para: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.	88
Figura 28 – Área destacada “B” para: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.	89

Figura 29 – Área destacada “C” para: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Definição dos valores de fragilidade para as diferentes tipos de solo.	51
Tabela 2 - Definição do valor de fragilidade para a pluviometria.	52
Tabela 3 - Definição dos valores de fragilidade para os diferentes tipos de uso do solo.	53
Tabela 4 – Matriz de hierarquização AHP utilizada.	55
Tabela 5 – Intervalo das classes de fragilidade.....	56
Tabela 6 – Classificação dos solos encontrados na área de estudo.	62
Tabela 7 – Classificação simplificada da pedologia da área de estudo.	63
Tabela 8 – Identificação do uso e ocupação do solo.....	65
Tabela 9 - Dados pluviométricos usados na elaboração do mapa pluviométrico da área de estudo.....	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

APA – Área de Proteção Ambiental

APP – Área de Preservação Permanente

CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica

CLP – Combinação Linear Ponderada

CNES - *Centre National d'Études Spatiales*

CORHI – Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos

DLR - *German Aerospace Center*

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESA - *European Space Agency*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDEA – Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo

IDV – Inverso da Distância

IGC – Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo

MPO – Média Ponderada Ordenada

OSGEO - *Open Source Geospatial Foundation*

PIB – Produto Interno Bruto

SAGA - *System for Automated Geoscientific Analyses*

SCP – *Semi-automatic Classification Plugin*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIGRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SP – Estado de São Paulo

UTB – Unidade Territorial Básica

UTM – Universal Transversa de Mercator

USGS – *United States Geological Survey*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA.....	14
3. OBJETIVOS.....	15
4. PLANEJAMENTO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	16
4.1 Delimitação da área de estudo	17
5. GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS CARTOGRÁFICOS.....	23
5.1 Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas – SIG.....	24
5.2 A análise dos dados cartográficos no Geoprocessamento	26
6. O ESTUDO DA PAISAGEM.....	31
6.1 Princípios da Ecodinâmica	32
6.2 Fragilidade Ambiental	33
6.3 Modelos para o estudo da fragilidade ambiental	34
6.3.1 Modelos de Fragilidade Potencial Natural	35
6.3.2 Modelo da Fragilidade Potencial Natural.....	36
6.3.3 A Lógica <i>fuzzy</i> no mapeamento da Fragilidade Ambiental.....	38
7. METODOLOGIA EMPREGADA.....	40
7.1 Variáveis utilizadas	40
7.2 Elaboração do material cartográfico.....	42
7.3 Descrição da área de estudo.....	43
7.4 Clima e pluviometria	44
7.5 Caracterização da área de estudo frente ao Plano Diretor Municipal.....	45
7.5 Atribuição dos valores correspondente à fragilidade ambiental usando <i>fuzzy</i>	48
7.5.1 Declividade.....	49
7.5.2 Distância dos corpos d'água	49
7.5.3 Pedologia, Uso e ocupação do solo e pluviometria	50
7.6 Método de interpolação dos dados e elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental ...	53

7.6.1 Método Processo Analítico Hierárquico (AHP)	54
7.6.2 Método da Média Aritmética Ponderada	55
7.6.3 Método da Média Aritmética Simples	56
7.6.4 Classificação dos intervalos dos valores obtidos e a categoria de fragilidade ambiental	56
8. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO.....	57
8.1 Hidrografia.....	57
8.2 Áreas de Preservação Permanente - APPs.....	59
8.3 Modelo Digital de Elevação e Declividade	59
8.4 Mapa Pedológico	62
8.5 Uso e ocupação do solo	65
8.6 Pluviometria.....	67
8.7 Padronização <i>fuzzy</i> dos parâmetros utilizados.....	69
8.7.1 Declividade.....	69
8.7.2 Distância de corpos hídricos.....	71
8.7.3 Pedologia	73
8.7.4 Pluviometria.....	75
8.7.5 Uso e ocupação do solo	75
8.8 Mapa de Fragilidade Ambiental	77
8.8.1 Fragilidade Ambiental – Modelo AHP	77
8.8.2 Fragilidade Ambiental – Média Aritmética Ponderada	79
8.8.3 Fragilidade Ambiental – Média Aritmética Simples	81
8.8.4 A aplicação da lógica <i>fuzzy</i> não linear no mapeamento da fragilidade ambiental...	83
8.8.5 Resultado obtidos nos mapas de Fragilidade Ambiental gerados.....	84
8.9 As diretrizes do Plano Diretor Municipal e a Fragilidade Ambiental.....	92
9. CONCLUSÕES.....	94
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1. INTRODUÇÃO

Diferentes formas de ocupação do solo vêm sendo aplicadas pelas civilizações desde que o ser humano começou a viver em sociedade. Ao longo do tempo, foi verificada a necessidade da criação de regras e diretrizes para o melhor uso do território e dos recursos naturais.

Com a revolução industrial, iniciou-se a migração da população do campo para as cidades, aumentando a necessidade da criação de novas diretrizes para o planejamento da ocupação e expansão das cidades, visando atender as novas demandas da população humana, como moradia, saneamento, abastecimento de água e mobilidade.

O crescimento populacional ocorrido a partir do século XX vem aumentando cada vez mais a demanda pelos finitos recursos naturais disponíveis no planeta. A expansão desordenada da ocupação humana, o aumento do consumo dos recursos naturais e a alteração das características da superfície terrestre vem causando impactos ambientais negativos. A escassez de água, alterações no regime de chuvas, perda da fertilidade natural do solo, processos erosivos e desastres naturais são consequências regionais do uso equivocados do território e que causam prejuízos econômicos e humanos incalculáveis.

No descobrimento do Brasil, em 1500, a colonização de seu território foi iniciada na região litorânea e, posteriormente, de forma gradativa, a população foi migrando cada vez mais em direção ao interior, com o objetivo de expansão de fronteiras e em busca de novas áreas para a realização de atividades econômicas, como agricultura e a mineração, no caso de Minas Gerais (IBGE, 2000).

Durante o século XX, as mudanças econômicas decorrentes, principalmente, pela industrialização do Brasil foram alterando a forma com a qual a população tem se estabelecido. Entre as décadas de 1950 e 1970 ocorreu a migração das áreas rurais para as urbanas, onde em 2010, por exemplo, as cidades concentravam 84% da população brasileira (POLIDORO, 2011).

Desta maneira, o planejamento e as diretrizes para expansão da urbanização no Brasil devem levar em consideração as questões relacionadas ao meio ambiente e ao uso sustentável dos recursos nas novas metodologias propostas para ordenamento das atividades humana e na ocupação do território.

No Brasil, Tricart (1977), propôs os conceitos da Ecodinâmica que descrevem as formas de estudar e entender as diferentes relações entre as características de cada variável do meio físico permitindo estimar as consequências das atividades humanas em uma região ou área delimitada.

Os conceitos da Ecodinâmica permitiram o surgimento de metodologias destinadas ao planejamento do uso e ocupação do território, levando-se em consideração as potencialidades e limitações do meio físico natural. Ross (1994) e Crepani (1996) foram os precursores da aplicação de métodos para identificação e classificação da Fragilidade Ambiental, que levam em conta as características naturais do local e os diferentes tipos de uso e ocupação do solo.

O advento dos computadores, permitiu uma maior facilidade na aplicação de métodos e modelos matemáticos mais complexos na correlação de dados cartográficos, possibilitando a elaboração de estudos com resultados melhores e com custos cada vez mais baixos (SOBREIRA; SOUZA, 2012).

Visando aplicar os conceitos da Ecodinâmica e da Fragilidade Ambiental e analisá-los por meio de modelo matemático, foi escolhida como área de estudo, a porção da Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo inserida no município de São Carlos, no interior do Estado de São Paulo, pois sua urbanização em 2017 é insipiente, mas em expansão. Desta maneira, foi possível analisar sua fragilidade ambiental e identificar as áreas mais propícias ou restritivas para a ocupação urbana e às demais atividades humanas.

Desta maneira, será possível demonstrar que o mapeamento da Fragilidade Ambiental vem se tornando uma ferramenta cada vez mais utilizada no planejamento do uso e ocupação do solo.

2. JUSTIFICATIVA

A exploração dos recursos naturais gera diferentes tipos de perturbações no ambiente natural, quebrando o estado ecológico do equilíbrio. O estudo da fragilidade ambiental permite identificar os graus de resistência de cada componente ecológico, facilitando o processo de planejamento ambiental e orientando a tomada de decisões da ocupação territorial (CRUZ et al., 2017).

A bacia do Rio do Quilombo, em 2017, encontra-se em processo inicial de urbanização, processo este mais intensificado na porção sudoeste, próximo ao limite do perímetro urbano de São Carlos. No restante da área de estudo, o uso e ocupação predominante é a agricultura, com urbanização pouco significativa, concentrada nos distritos de Água Vermelha e Santa Eudóxia e ocorrência de condomínios de chácaras, sendo o localizado às margens do reservatório 29 o de maior extensão.

O Plano Diretor Municipal, define que o desenvolvimento urbano no local deverá respeitar as limitações de infraestrutura e ambientais, além de promover a recuperação e proteção do meio ambiente (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS, 2016).

Sendo assim, o mapeamento da Fragilidade Ambiental desta bacia hidrográfica permite a identificação das potencialidades e restrições do meio físico antes da expansão e adensamento da ocupação urbana. Outro ponto é a possibilidade de verificar se as diretrizes propostas no plano diretor municipal estão de acordo com as características naturais do local.

Portanto, como justificativa principal, é a análise das restrições e potencialidades da ocupação humana da área e se estas estão em consonância com as diretrizes e regulamentações definidas no Plano Diretor Municipal.

3. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental da parcela localizada no Município de São Carlos/SP da Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo, adaptando as metodologias propostas por Calijuri (2007) e Cereda Junior (2011).

Objetivos específicos:

- Análise da aplicação da padronização *fuzzy* não linear sigmoidal no mapeamento da fragilidade ambiental;
 - Comparação dos resultados do mapeamento da fragilidade ambiental obtido pelos métodos AHP, Média Aritmética Ponderada e Média Aritmética Simples;
 - Comparação dos resultados obtidos no mapa gerado e as diretrizes do Plano Diretor Municipal de São Carlos para a ocupação da área de estudo.
-

4. PLANEJAMENTO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O uso e ocupação do solo é um assunto recorrente desde o início das civilizações. O ser humano, em uma busca crescente por recursos naturais para sua subsistência ou para o desenvolvimento de suas atividades econômicas, vem ocupando áreas muitas vezes sem o devido planejamento, alterando suas características naturais, causando impactos ambientais.

Sendo assim, o planejamento ambiental se apresenta como uma ferramenta para encontrar o desenvolvimento das populações humanas com o mínimo de impacto ambiental, permitindo o uso dos recursos naturais de maneira sustentável.

Desde as culturas mais primitivas, o ser humano depende dos recursos naturais para sua subsistência. No início das civilizações, o desenvolvimento da agricultura e do pastoreio permitiu o aumento da produção de alimentos e o estabelecimento da população em territórios, transformando o relacionamento entre a produção de bens e as necessidades dos usuários. A revolução industrial trouxe o desenvolvimento tecnológico e alterações na civilização, causando a migração populacional do campo para as cidades e o aumento da demanda por produtos agrícolas e recursos naturais, trazendo com isso, impactos ambientais (TRICART, 1977).

A elaboração de estratégias para a convivência harmoniosa entre o homem e a natureza através dos conceitos de sustentabilidade, é hoje o grande desafio dos profissionais que atuam na área do desenvolvimento. Para Shiavetti; Camargo (2002), os modelos empregados têm se mostrado inadequados para satisfazer às demandas de uma população que cresce exponencialmente. Portanto, deve-se procurar conceber estratégias de utilização dos recursos naturais que se mostrem mais racionais e menos impactantes, sendo por meio da recuperação destes recursos e desenvolvimento de novas estratégias para otimizar seu aproveitamento sem comprometer seu potencial futuro.

A exploração dos recursos naturais causa diferentes perturbações ao meio ambiente, variando em proporção e tipo de impacto ambiental conforme as diferentes características do meio natural e à atividade aplicada ao mesmo. Quando o meio ambiente é explorado acima de sua capacidade, há o desequilíbrio de suas condições naturais e conseqüentemente aparecem diversas formas de danos, como escorregamentos e movimentos de massa, inundações, erosão, entre outros (DALLA CORTE et al., 2015).

De acordo com Erdoğan, Esbah e Berberoglu (2016), as atividades humanas têm permitido o aumento da ocorrência de processos erosivos, causando a perda de fertilidade dos

solos e o lixiviamento de sedimentos, nutrientes, pesticidas e outras substâncias químicas para os rios, córregos e água subterrânea.

A expansão urbana, nem sempre acompanhada do desenvolvimento da infraestrutura adequada, somada com a não observância das características naturais dos ambientes e da antropização da área sem a devida racionalização do espaço em aumentado os problemas que atingem diretamente a sociedade, como as enchentes e inundações urbanas (REIS, 2015).

Com o intuito de criar ferramentas e políticas para o planejamento e ordenamento do uso e ocupação do solo no Brasil, a Constituição da República Federativa do Brasil, publicada em 05 de outubro de 1988, em seus artigos 182º e 183º, institui que a ordenação e o pleno desenvolvimento das funções da cidade para garantir o bem-estar da população cabe aos municípios. Dentro das ferramentas previstas na constituição, destaca-se o Plano Diretor Municipal para cidades com mais de vinte mil habitantes, sendo este o instrumento básico de desenvolvimento e de expansão urbana (BRASIL, 1988).

A regulamentação dos artigos 182º e 183º da Constituição foi instituída em 10 de julho de 2011, pela Lei Federal 10.257. Esta legislação consolidou o município como o principal agente para regular e direcionar o processo de ocupação do território em consonância com a política de desenvolvimento urbano, visando a melhoria da qualidade de vida da população, o atendimento a sua função social e a conservação e manutenção do meio ambiente e recursos naturais (HONDA et al., 2015).

Considerar os municípios como unidades de gerenciamento territorial permitem a elaboração de diretrizes e ações de forma descentralizada, voltadas às características locais. Porém, a extensão territorial e as características heterogêneas do meio físico encontradas nos municípios brasileiros, podem prejudicar a elaboração de estudos ambientais.

Portanto, o ideal é que as áreas de estudo sejam delimitadas conforme as semelhanças e interações de suas características naturais e que os dados a serem utilizados estejam disponíveis na melhor escala de detalhamento possível, para que as análises dos impactos da ocupação humana sejam estudadas de forma mais precisa, permitindo a criação de políticas e instrumentos direcionados às características do local.

4.1 Delimitação da área de estudo

A escolha da delimitação da área de estudo deve ser realizada criteriosamente, levando-se em consideração a interação e a homogeneidade das características naturais da região e a disponibilidade de informações cartográficas de qualidade e no maior grau de detalhamento possível.

Geralmente municípios ocupam vastos territórios, portanto é necessário encontrar em seu interior, áreas que apresentem características naturais homogêneas que interajam entre si e que estejam mapeadas em escala de detalhamento mais alto possível. Dentro das características necessárias para a delimitação da área de estudo, a bacia hidrográfica é uma possibilidade de unidade territorial adequada para o mapeamento da fragilidade ambiental.

Bacias Hidrográficas podem ser definidas como uma área drenada por um rio ou sistema fluvial que deságua em um ponto em comum, dos pontos de maior para menor altitude do relevo, delimitadas por divisores de água, onde as águas das chuvas escoam superficialmente ou se infiltram no solo, formando nascentes, cursos hídricos e recarga de lençóis freáticos (FAILACHE, 2015).

A bacia hidrográfica são uma unidade geoambiental de estudo, pois se trata de um território que apresenta uma rede de drenagem comum e delimitada por divisores de água subterrânea e superficial, constituindo um importante indicador dos impactos ocorridos na composição da paisagem, como alterações nos cursos d'água devido a processos erosivos (HIRATA; BASTOS; ROCHA, 1997).

O conceito de bacia hidrográfica não é algo recente e vem sendo cada vez mais utilizado nos estudos de planejamento ambiental. Na perspectiva de estudo hidrológico, o conceito de bacia hidrográfica envolve o conjunto de terras drenada por um corpo hídrico principal e seus afluentes. Já no ponto de vista da conservação dos recursos naturais, este conceito foi ampliado, onde foram incorporadas informações da estrutura biofísica, mudanças nos padrões de uso da terra e suas implicações ambientais (SHIAVETTI; CAMARGO, 2002).

De acordo com Pollo (2017) o conceito e a identificação de bacias hidrográficas, como processo de escoamento hídrico e sedimentar foram iniciados por Horton em 1945 e reformulado por Strahler em 1957, onde identificaram a composição dos canais de drenagem como um sistema individualizado e organizado por meio de uma hierarquia em número de ordens.

A exploração sem limites e a falta de planejamento trazem implicações ecológicas como graves problemas a serem enfrentados pela sociedade atual. A retirada da cobertura vegetal em regiões de grande importância para o equilíbrio ambiental, como exemplo uma bacia hidrográfica, provoca sérias consequências em curto ou a longo prazo, interferindo na qualidade e na disponibilidade de água e na conservação do solo e de nascentes (BEPPLER; JUSTINO, 2017).

O uso de bacia hidrográfica como unidade de gestão natural teve sua consolidação durante a década de 1970, ganhando força a partir da década de 1990, devido à necessidade de

promover a recuperação ambiental e a manutenção de recursos naturais como a água (DE CARVALHO, 2013).

Sporl 2011 *apud* Dalla Corte et al. (2015), cita que integrar diversas variáveis com potencial de interferência nos recursos naturais e o conhecimento dos níveis de fragilidade em bacias hidrográficas permitem compreender a realidade e visualizar os locais de melhor viabilidade para os tipos de uso do solo.

As bacias hidrográficas são unidades biogeofísicas com alta integridade funcional e são relativamente homogêneas, mesmo quando possuem diferentes condições e atividades humanas em diferentes seções. Cada bacia é única e apresenta dados hidrológicos, geomorfológicos e ecológicos suficientes para diversas aplicações em planejamento e gestão e na elaboração de propostas voltados ao desenvolvimento sustentável (BARROW, 1998).

A Constituição Federal, publicada em 1988 institui que compete à União a criação do sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, definindo critérios de outorga de direitos de seu uso (BRASIL, 1988) Nove anos após a publicação da Constituição Feral, foi criada a Política Nacional de Recursos Hídricos, por meio da lei federal nº. 9.433 de 08 de janeiro de 1997, onde instituiu-se a o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos que, tem por princípio geral, a gestão descentralizada e participativa, sendo esta por meio de bacias hidrográficas. Nesta política, a água foi reconhecida como um bem finito e vulnerável com valor econômico (BRASIL, 1997).

A preservação e a gestão dos recursos hídricos necessitam de ações regionais conjuntas, pois ultrapassa as fronteiras político-administrativas. Sendo assim, a Política Nacional de Recursos Hídricos introduziu um novo método de gestão territorial: os Comitês de Bacia Hidrográfica, que possuem como característica a participação do poder público e da sociedade civil na gestão dos recursos hídricos (PERES; SILVA, 2013).

O Estado de São Paulo tem sido precursor no planejamento territorial por meio de bacias hidrográficas, onde os primeiros indícios deste tipo de organização se deu na década de 1940, consolidando-se na década de 1980. No ano de 1989, a Constituição Paulista previu a elaboração de um sistema de recursos hídricos, orientado pela gestão integrada, descentralizada e participativa, culminando na Política Estadual e no Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGHR, instituído pela Lei Estadual 7.663/1991 (PERES; CHIQUITO, 2012).

O SIGRH é representado por membros do governo estadual, municipal e por representantes da sociedade civil. Integram e coordenam o SIGRH o Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CRH, os 21 Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs) e o Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos (CORHI). Seu intuito é realizar a

administração descentralizada, participativa e integrada dos recursos hídricos do Estado de São Paulo, com intuito em assegurar padrões de qualidade e quantidade satisfatório aos cidadãos (SIGRH, 2017).

Este meio de gestão tem por base, além da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e a gestão descentralizada e participativa, o reconhecimento da água como um bem finito e vulnerável e de seus usos múltiplos, além de atribuir valor econômico à água (OLIVEIRA, 2010).

A gestão integrada dos recursos hídricos vem sendo o método mais utilizado nos últimos 20 anos pela academia, pela gestão pública e pelos especialistas. Sua aplicação permite uma abordagem mais compreensiva dos processos e riscos naturais, assim como os impactos causados pelas atividades humanas por meio de uma gestão holística e de proximidade, mais flexível e adaptável (BUDRYTE; HELDT; DENECKE, 2018).

A bacia hidrográfica é adotada por Ross (1994) como unidade geográfica de análise, pois é onde as intervenções humanas devem ser planejadas com o objetivo de um correto ordenamento territorial. Arcuri (1997) considera que as bacias hidrográficas como unidade geográfica natural, sendo um sistema geralmente complexo que requer ser tratado em conjunto, do ponto de vista de sua operação e gestão.

Para Gashaw et al. (2018), entender as reações das alterações no uso e ocupação do solo é essencial para o planejamento e gestão. Em seu estudo, os autores observaram que a retirada da cobertura da vegetação nativa, resultou na direta alteração dos componentes hidrológicos ao longo da bacia hidrográfica do rio Nilo, na Etiópia.

Silva; Santos; Leal (2016), em seu estudo relacionado ao planejamento ambiental da bacia Hidrográfica do córrego da Olga, em Presidente Prudente, concluíram que a retirada da cobertura vegetal nativa e a ausência de mata ciliar é o principal problema ambiental, seguido da ocupação inadequada do solo. Dentro das medidas propostas, os autores sugerem a não ocupação das áreas ciliares, conservação adequada dos solos agrícolas e não ocupar áreas de alta fragilidade ambiental.

Barrow (1998) propôs a elaboração de planos de desenvolvimento e gerenciamento de bacias hidrográficas que visem muito mais do que apenas a proteção da água, mas que os mesmos busquem integrar propostas de desenvolvimento múltiplo, um papel interativo nas unidades de drenagem da bacia e a aprovação de intervenções que visem promover a desenvolvimento social e regional. Além disso, o autor propõe a divisão de bacias hidrográficas de grande extensão em bacias menores, como as de seus afluentes, porém sem perder o foco do estudo regional.

No Estado de São Paulo, pela Política Estadual de Recursos Hídricos, no período de 4 em 4 anos, os Comitês de Bacia Hidrográfica publicam seu respectivo Plano de Bacia Hidrográfica (SIGRH, 2017). Este plano de bacia, em conjunto com os planos diretores municipais apresentam condições de contribuir na proteção dos recursos hídricos ao reconhecer que o desenvolvimento e o crescimento das cidades devem preservar os recursos naturais e criar mecanismos que possam controlar o uso e ocupação do solo. Porém, a proteção de recursos hídricos é pouco abordada nos planos diretores e em ambos os documentos, não são definidas como será garantida a proteção dos recursos hídricos (PERES; SILVA, 2013).

Na análise da paisagem e as relações entre os fatores encontrados no local, sugere-se que a delimitação de um local ou uma área definida onde serão realizados os estudos. Não há regra clara em qual a extensão das áreas a serem estudadas, podendo ser países, estados, municípios ou locais menores, mas sempre se atentando à escala de trabalho, onde a mesma deve ser condizente com o grau de detalhamento necessário ao estudo proposto (SOBREIRA; SOUZA, 2012).

Um conceito importante nas análises espaciais e temporais é o de escala. Escala pode ser utilizada no contexto espacial, temporal ou qualquer outra dimensão de pesquisa, podendo ser sobre a extensão geográfica de uma área de estudo ou ao grau de detalhamento ou resolução geográfica de dados da superfície terrestre (SHIAVETTI; CAMARGO, 2002).

Câmara (1996) define o termo escala como a relação entre as dimensões dos elementos representados em um mapa e a grandeza correspondente, medida sobre a superfície terrestre. Esta informação é obrigatória e indica o grau de detalhamento das informações descritas em um mapa ou carta.

Para Miranda (2005), a escala e a finalidade pretendida regem a divisão da área de estudo em parcelas menores e mais detalhadas. De acordo com o a metodologia do detalhamento progressivo, a escala dos dados utilizados são o fator principal para a aplicação dos materiais cartográficos gerados, sendo os de menor escala utilizados para estudos regionais e de planejamento territorial e os mais detalhados para estudos mais direcionados, como implementação de obras de engenharia ou identificação de áreas de risco (ZAINÉ, 2000).

As escalas dos dados utilizados necessitam atender ao grau de detalhamento necessário para as aplicações do material gerado (NORA, 2010). Nos estudos elaborados por Reis (2015), voltado à identificação de áreas de inundação em áreas urbanas e por Jorge (2004), no mapeamento da fragilidade ambiental em Ubatuba/SP, os dados geográficos utilizados foram escolhidos conforme a necessidade das metodologias propostas e à sua escala, visando o maior detalhamento das características naturais da área analisada. Já para o Zoneamento Ecológico e

Econômico da Amazônia Legal, Becker (1996) sugere que a utilização da escala regional é possível e desejável pois permitem identificar áreas que necessitem estudos posteriores mais detalhados.

A escala a ser utilizada depende do objetivo do trabalho em questão. Nem sempre uma escala mais detalhada seja a mais adequada para um determinado estudo, porém é possível gerar um mapa de menor resolução a partir de dados de maior resolução, sendo o inverso impossível (SHIAVETTI; CAMARGO, 2002).

Nos estudos de planejamento territorial e ambiental há a necessidade da correlação de diversas informações do meio físico, biótico e antrópico. Desta maneira, a delimitação da área de estudo deve ser realizada de forma que estas características se apresentem de forma homogênea e que relacionem entre si. As bacias hidrográficas são as unidades territoriais que mais se encaixam nestas características, sendo amplamente utilizadas.

Além da delimitação territorial, outro fator a ser levado em consideração é a escala dos materiais cartográficos disponíveis na área de estudo. A escala de detalhamento do trabalho é um dos fatores principais para a aplicação dos materiais gerados em um estudo, ou seja, quanto maior o grau de detalhamento, mais refinada é sua aplicação.

Portanto, para a escolha da área de estudo, deve-se levar em consideração as características do meio físico e o maior grau de detalhamento das informações disponíveis no local.

Nos estudos voltados ao planejamento territorial e ambiental, a organização, correlação e análise de dados geográficos e cartográficos é imprescindível, tornando o geoprocessamento e os Sistemas de Informações Geográficas – SIG em ferramentas indispensáveis.

5. GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS CARTOGRÁFICOS

As populações humanas há séculos o utilizam os mapas como ferramentas para identificar a localização de rotas, recursos naturais, cidades e demais informações que necessitassem da indicação de sua localização espacial. Estas informações eram compiladas em materiais impressos em papel ou outras superfícies, muito utilizados na navegação, em guerras ou no comércio.

O desenvolvimento da tecnologia da informática iniciada na segunda metade do século XX, permitiu a substituição dos documentos e mapas em papel para o ambiente digital, permitindo o armazenamento e a representação destes materiais em ambiente computacional, abrindo espaço para o Geoprocessamento (CÂMARA et al., 2004). Desta maneira, Câmara (2004) descreve o Geoprocessamento como a disciplina que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica.

O geoprocessamento representa qualquer tipo de processamento de dados georreferenciados, ou seja, refere-se a todas as técnicas de correlação entre informações espaciais e cartografia digital (LEITE; ROSA, 2006 apud GARCIA, 2017).

Neris (2011) entende o Geoprocessamento como a área do conhecimento que se utiliza de técnicas computacionais e matemáticas, obtidas em Sistemas de Informações Geográficas – SIG, para tratar os processos que ocorrem no espaço geográfico.

Para Câmara e Monteiro (2001), trabalhar com geoinformação é utilizar computadores como instrumentos de representação de dados espacialmente referenciados, onde o Geoprocessamento é uma tecnologia multidisciplinar, permitindo o uso e combinação de diversas disciplinas no estudo de fenômenos urbanos e ambientais.

Portanto, pode-se entender como Geoprocessamento uma ferramenta de análise e correlação de dados e informações cartográficas georreferenciadas em ambiente computacional, gerando materiais para diversas áreas de estudos.

O avanço da tecnologia espacial tem colocado à disposição cada vez mais satélites em órbita da Terra, permitindo a obtenção de imagens em diferentes faixas espectrais e com características espaciais e temporais apropriadas, gerando bancos de dados que contribuem para a gestão do espaço geográfico. A aplicação de *softwares* de análise e processamento digital permite manipular os dados gerando novas informações (BEPPLER; JUSTINO, 2017).

Para Cereda Junior (2017), os conceitos e ferramentas de geoprocessamento antes vistos como caros e complexos, estão cada vez mais intuitivas e disponíveis para qualquer cidadão e governos.

Estudos ambientais que utilizam ferramentas de geoprocessamento necessitam de dados cartográficos referentes a diversos temas e períodos de tempo. Portanto, a obtenção de dados cartográficos.

5.1 Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas – SIG

A obtenção das informações da superfície da Terra talvez seja a etapa mais importante na elaboração de materiais cartográficos. A qualidade e precisão das informações determinam a escala, a confiabilidade e a aplicação dos dados gerados.

Desde o século IX, com a invenção e o aprimoramento das câmeras fotográficas, o ser humano vem acoplando as mesmas a diversos aparatos voadores, como balões e posteriormente a aviões e satélites com intuito de registrar a superfície do planeta, originando assim, o sensoriamento remoto (NOVO, 2010).

Para Fonseca (2012), o sensoriamento remoto tem como principal objetivo a obtenção de dados à distância por meio de plataformas orbitais e aéreas com a finalidade de adquirir informações da superfície da Terra.

O sensoriamento remoto pode ser definido como o conjunto de processos e técnicas usados para medir propriedades eletromagnéticas de uma superfície ou objetos, sem que ocorra o contato entre o sensor e o objeto (CÂMARA et al., 1996).

Novo (2010) define o sensoriamento remoto como a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, instalados em aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta, a partir do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e os diferentes objetos e substâncias a compõe.

O sensoriamento remoto representa uma fonte única para obtenção de informações para construção e atualização de um SIG. A união da tecnologia e dos conceitos e teorias de geoprocessamento possibilitam a criação de sistemas de informações mais ricos e sofisticados (D'ALGE, 1991).

O SIG pode ser definido como um conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e analisar mapas em um ambiente computacional, gerando informações sobre a superfície terrestre que embasam as tomadas de decisão de planejamento (BURROUGHT 1986 *apud* CÂMARA et al., 1996)

Andrés et. al. (2014) define o SIG como o conjunto de instrumentos e metodologias que permitem capturar, armazenar, analisar, transformar, relacionar e apresentar informações territoriais georreferenciadas do mundo real.

SIG corresponde a sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações com base alfanumérica e pela sua localização espacial, permitindo uma visão de todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto (CÂMARA; QUEIROZ, 2001).

Um SIG permite a análise de dados geográficos em uma variedade de formatos, onde reúnem-se imagens de satélite com dados cartográficos, ideais para realização de análises voltadas ao planejamento ambiental territorial (MENDONÇA, 2011 apud POLLO, 2017).

Câmara e Queiroz (2001) entendem que um SIG deve armazenar a geometria dos objetos geográficos e de seus atributos e, devido à sua ampla gama de aplicações em diversas áreas do conhecimento, há pelo menos três maneiras de utilizar um SIG: como ferramenta para produção de mapas, como suporte para análise espacial e como um banco de dados geográficos.

Neto (2013), afirma que a análise espacial em SIG mostra-se como uma ferramenta eficaz na produção de informações como a vulnerabilidade da paisagem e o zoneamento ambiental e cita que os SIGs têm diversas aplicações em estudos ambientais e em ecologia, como nos casos de caracterização ecológica de territórios ou o estudo de organismos.

O SIG tem como raiz o planejamento de paisagens e do meio ambiente, e seu desenvolvimento em 40 anos de utilização trouxeram uma vasta gama de metodologias e aplicações, com potencial bem maior do que o utilizado atualmente (LANG; BLASCHKE, 2009).

Para Tornero (2000), a característica principal dos SIGs é a localização geográfica do fenômeno. Câmara et al. (1996) afirmam que um SIG armazena a geometria e os atributos dos dados que estão georreferenciados e efetuam o tratamento computacional desses dados.

A coleta de informações geográficas realizada nos SIGs, representa um enorme avanço, pois a atualização e a geração constante de novas informações (POLLO, 2017). Nos últimos anos, tornou-se mais rápida a geração de mapas e cartas devido ao surgimento da cartografia digital e dos SIGs, que facilita os processos de interação de dados e a atualização dos produtos cartográficos, à medida que novas informações são geradas e adquiridas em diversas escalas e a custos mais baixos (SOBREIRA; SOUZA, 2012).

Os SIGs apresentam grande potencial de utilização nas questões ambientais e urbanas em um país de dimensões continentais como o Brasil, que carece de informações adequadas (ASSAD, 1995).

Santos, Junior e Ferreira (2015), citam que a sobreposição de mapas é uma ferramenta importante e eficiente na geração de dados secundários com o objetivo de análises de dados espacializados.

Com a aplicação do SIG, consegue-se explicar e visualizar relações espaciais, podendo representá-las e apresentá-las no formato de mapas, além disso, permite o desenvolvimento de cenários e avaliar intervenções (LANG; BLASCHKE, 2009).

Embora os termos geoprocessamento e SIG sejam utilizados como sinônimos, há uma característica a ser considerada: o geoprocessamento corresponde a qualquer processamento de dados com referência espacial, já os SIGs, são conjuntos computacionais de organização de dados geográficos e toda a estrutura para seu armazenamento e processamento (SALAZAR JUNIOR, 2007).

O SIG e o sensoriamento remoto se tornaram ferramentas indispensáveis ao geoprocessamento. O sensoriamento remoto obtém informações da superfície terrestre a custos relativamente baixos e possibilidade de atualizações periódicas e o SIG, tem a função de arquivar e organizar estas informações para seu processamento e análise, usando as ferramentas de geoprocessamento.

5.2 A análise dos dados cartográficos no Geoprocessamento

O ambiente computacional permite a correlação de diversas informações conforme a necessidade do estudo realizado e a criação de diversas metodologias de análise, podendo ser considerada uma grande evolução em relação aos trabalhos com mapas impressos.

Para a classificação das unidades de mapas em ambiente computacional, considera-se o polígono como delimitador de unidade gerados a partir da Álgebra Booleana. Esta unidade é utilizada em análises espaciais qualitativas, utilizadas na geração de mapas temáticos por meio de regras que especificam o conjunto de condições aplicadas a partir de mapas básicos (CEREDA JUNIOR, 2011).

Os métodos multicritérios de apoio à decisão têm sido utilizados em vários casos voltados ao planejamento territorial e ambiental. Sua extensa aplicação deve-se às vantagens em estruturar os problemas envolvendo diversas áreas com características distintas e a criação de múltiplos critérios de avaliação, permitindo desenvolver diversos tipos de análise e alternativas para tomada de decisão (MATEUS; PADILHA, 2017).

Para Roy (1996), a análise multicritérios é uma ferramenta que tem por objetivo direcionar escolhas mais ponderadas por meio de uma ferramenta matemática que possibilita a comparação de diferentes alternativas e cenários fundamentada em vários critérios.

A análise multicritério pode ser definida como um método de análise voltada à solução de um problema que utiliza a correlação de dados diversos em uma determinada área de estudo. Para uma análise ambiental, são necessários utilizar simultaneamente uma grande diversidade

de critérios, prós e contras, riscos ou estabilidade do território, frente aos objetivos propostos (GARCÍA; ROGEL; PÉREZ, 2004)

Para Lorandi, Cançado e Lollo (2014), um dos maiores desafios na estruturação de um processo de tomada de decisão utilizando multicritérios é a quantificação da importância de cada critério, necessitando de um consenso sobre cada peso relativo, pois cada critério pode ter uma importância relativa diferente.

Desta maneira, a integração entre métodos de análise multicritério e os SIGs tem sido um avanço metodológico na sobreposição de mapas destinado à avaliação da adequação de uso da terra, sendo este entendido como um processo que combina e transforma dados espaciais em resposta para a tomada de decisão (CORSEUIL; CAMPOS, 2007).

Gomes, Marques e Franco (2017) citam que em muitos casos, a utilização de SIG é acompanhada com técnicas de avaliação multicritério e aplicação de lógica *fuzzy* ou a técnica AHP para a seleção de áreas para implantação de empreendimentos, como aterros sanitários.

Cereda Junior (2011) define que a implementação computacional do Modelo Booleano está inserida no conceito de unidade-área, onde o local estudado é decomposto em unidade de paisagem de características únicas, classificadas por meio de critérios definidos pelo pesquisador, levando em consideração suas características naturais. Esta abordagem é chamada de Cartografia Ideográfica.

Sendo assim, cada localização pode ser avaliada de acordo com critérios ponderados, resultando na graduação dos resultados em uma escala de potencialidade. Esta técnica é definida como ocorrência ponderada e possui como vantagem, a avaliação de graus de potencialidade ao invés de analisar sua presença ou ausência (MOREIRA; BARBOSA; CÂMARA, 2001).

Em SIG, o Método Booleano pode ser considerado análogo à sobreposição de mapas em formato analógico em uma mesa de luz. Essa semelhança com o método tradicional e a simplicidade operacional, fizeram com que este modelo seja amplamente utilizado em diferentes estudos ambientais que utilizem SIG (MOREIRA; CÂMARA; FILHO, 2001).

O Modelo Booleano baseia-se na combinação de vários mapas binários, onde os locais que apresentarem a classe 1 indica áreas que satisfazem as condições pré-estabelecidas e 0 as áreas não satisfatórias (FREITAS; MENDES, 1998). Para a interação dos dados, são utilizados ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU (XOR)” e “NÃO”, que determinam se uma hipótese satisfaz ou não a uma particular condição. Porém, apenas de sua praticidade, este modelo não é o mais adequado, pois o ideal é que as evidências que apresentem importâncias relativas desiguais recebam pesos diferentes, ao contrário do que ocorre nos modelos booleanos, onde são tratadas como iguais (MOREIRA; CÂMARA; FILHO, 2001).

Zadeh (1965) propôs a utilização dos conjuntos *fuzzy* para trabalhar com conceitos inexatos, pois os resultados obtidos por modelos matemáticos tradicionais aplicados não estavam atendendo à crescente complexidade das informações. A teoria do conjunto *fuzzy* é apropriada para utilização em sistemas caracterizados pela generalidade, ambiguidade e imprecisão (FUKS, 1998), onde é admitida a possibilidade de uma associação parcial entre as classes utilizadas (GARÓFALO; FERREIRA, 2015).

A lógica *fuzzy* tem por objetivo, trazer a complexidade das decisões humanas ao ambiente computacional, permitindo aproximar os modelos à linguagem humana, onde são considerados todas as nuances do ambiente sem ignorar transições e/ou particularidades (OPENSHAW; OPENSHAW, 1997).

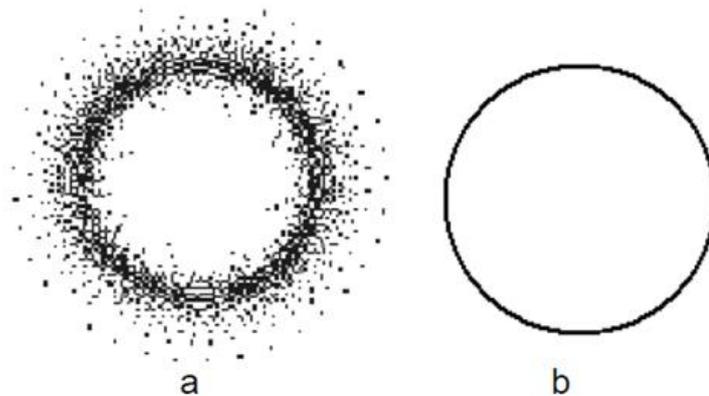
Para diversos pesquisadores, a lógica *fuzzy* permite a codificação de conhecimentos que são inexatos, aproximando-se ao processo de tomada de decisão. Estes modelos possibilitam a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo”, amplamente utilizado em análises de problemas (RUHOFF et al., 2005).

Burrough (1992) demonstrou em seus estudos que as incertezas no valores dos atributos dos mapas acarretam em erros nos resultados das inferências espaciais segundo os modelos booleano e *fuzzy*. Sendo assim, o autor sugere que os métodos booleanos estão muito mais sujeitos à propagação de erros do que os equivalentes *fuzzy*. Já Santos, Junior e Pereira (2015), em estudo de zoneamento da fragilidade ambiental, concluíram que o uso da lógica *fuzzy* e do AHP foram imprescindíveis para o tratamento das incertezas inerentes ao conhecimento empírico.

Para Ruhoff et al. (2005), os principais problemas relacionados às operações booleanas são os limiares nítidos e rígidos, nem sempre representando os fenômenos naturais corretamente. Donha, Souza, Sugamoto (2006) concluíram que os métodos de combinação ponderada e da lógica *fuzzy*, ao manipularem dados mais precisos trazem melhores resultados que o método Booleano.

A Figura 1 abaixo demonstra a diferença entre as fronteiras em um conjunto fuzzy e um booleano.

Figura 1 - Diagrama de Venn, representando as fronteiras de um conjunto fuzzy (a) e Booleano (b).



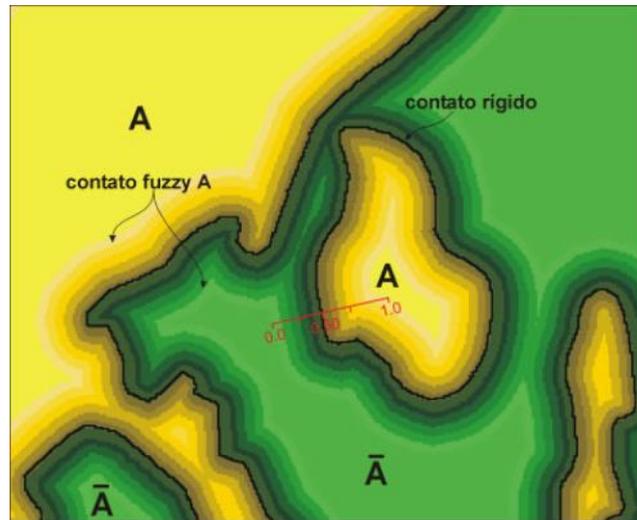
Fonte: BURROUGH; MCDONNELL (1998).

No modelamento de sistemas complexos, os mecanismos subentendidos são representados em variáveis linguísticas, ao invés de matematicamente, possibilitando a correlação melhor de dados imprecisos, incompletos, ambíguos e vagos. Desta maneira, o conjunto *fuzzy* é um meio de caracterização de classes que não tem ou não podem definir limites rígidos entre si. Os conjuntos *fuzzy* são combinados a partir de análises multicritérios, definidas por meio de uma sequência lógica realizadas pelos seus operadores (MOREIRA; CÂMARA; FILHO, 2001).

Em mapas temáticos, são utilizadas feições observáveis como mudanças de cores, padrões de textura, quebra de encosta, entre outros, para inferir contatos. Conforme definições cartográficas, os limites são representados por linhas. Este tipo de representação suprime a informação sobre a natureza, demonstrando que as alterações das informações sejam abruptas e homogêneas, quando que o observado na natureza é gradual e heterogêneo. Deste modo, a utilização da lógica *fuzzy* na representação de contatos dos polígonos permite uma melhor representação da natureza (MOREIRA; CÂMARA; FILHO, 2001).

A Figura 2 mostra uma ilustração de como se dão os contatos entre diferentes feições em um sistema de lógica *fuzzy*.

Figura 2 - Ilustração da representação de informação semântica para contatos.



Fonte: MOREIRA; CÂMARA; FILHO (2001).

A ponderação e escolha dos critérios a serem correlacionados é de suma importância para a qualidade final do trabalho e a utilização de lógica *fuzzy* possibilita a correlação dos dados com menos erros do que o método booleano.

Portanto, a utilização da metodologia de análise multicritérios em conjunto com modelos matemáticos, como a lógica *fuzzy*, permitem o cruzamento das informações encontradas na área de estudo, gerando mapas temáticos, como o de fragilidade ambiental com qualidade e precisão.

6. O ESTUDO DA PAISAGEM

Os diferentes fatores ambientais e como estes reagem pela influência das ações humanas sobre uma área tornam o estudo da paisagem complexo, exigindo embasamento técnico e teórico em diversas áreas do conhecimento para que se obtenha resultados de qualidade.

O próprio significado da palavra “paisagem” é mais complexo do que comumente o imaginado. As definições encontradas para o termo “paisagem” nos dicionários sofrem forte influência do sentido visual, entendido como “*o que se vê num lance de vista*” e seu significado por variar de acordo com a pessoa que utiliza este termo (ZACHARIAS, 2006). Esta subjetividade envolvida no conceito tem sido criticada por diversos cientistas (CEREDA JUNIOR, 2011).

Para os seres humanos, a estruturação da paisagem é um procedimento essencial para sua caracterização, sendo estas detectadas na forma de arranjos espaciais, com determinadas feições e classificadas em diversos tipos de nomenclatura (LANG; BLASCHKE, 2009).

O estudo da paisagem foi introduzido no âmbito científico, na Geografia, no início do século XIX, sob a perspectiva dos naturalistas. Humbolt, um naturalista, destacava que a paisagem deveria ser observada, numa primeira escala, os dados de vegetação como o dado mais significativo para caracterizar a sua tipologia espacial e, numa segunda escala, observar até que ponto o clima influenciava nas condições naturais do solo e, conseqüentemente na cobertura vegetal. Sauer em 1925, discutia que o conteúdo da paisagem é o reflexo da combinação dos elementos materiais com os recursos naturais de um local, mais as obras humanas e os grupos culturais que se utilizaram ou que viveram nesse lugar, deixando claro assim, que a paisagem se mantém devido às relações de interdependência estabelecidas entre eles (ZACHARIAS, 2006).

A análise da paisagem requer conhecimento e domínio da concepção dialética e da essência dos fenômenos ambientais e geográficos, pois a manutenção da sua inter-relação, seus traços e configurações são resultado da combinação de três fatores complexos e independentes entre si: a paisagem natural (natureza), a paisagem social (sociedade) e a paisagem cultural (transformações tempo-espaciais) (RODRIGUEZ, 2003).

A paisagem não apenas se limita ao que os olhos veem, ela compreende as interações entre o meio físico, a ocupação humana e as interações, necessidades e transformações causadas pela sociedade e sua cultura.

O diagnóstico ambiental não consiste apenas em um inventário dos elementos que compõem a paisagem natural, mas a compreensão das interações dos seus elementos, processos,

interações e inter-relações e como estes se comportam frente aos diferentes usos estabelecidos pelo homem (ALMEIDA, 2007 apud GARCIA, 2017).

CREPANI et al. (2001), propuseram a classificação da paisagem em Unidades Homogêneas de Paisagem ou Unidades Territoriais Básicas – UTB utilizando-se de interpretação e análise de imagens de satélite seguindo os preceitos da Ecodinâmica. Esta classificação é utilizada como base para seu modelo de mapeamento da fragilidade ambiental, já que as UTBs são analisadas integrando-se com os dados do meio físico, biótico e climático da região.

Pela concepção ecológica das Unidades Ecodinâmicas proposto por TRICART (1977), a análise do ambiente realizado pelo método da Teoria de Sistemas parte do princípio que na natureza as trocas de energia e matéria ocorrem conforme o equilíbrio dinâmico entre os componentes da paisagem, porém este equilíbrio pode ser alterado pelas intervenções humanas, causando desequilíbrios e impactos temporários ou irreversíveis. Portanto, é de grande importância que os sistemas sejam analisados de maneira integrada, baseada na funcionalidade intrínseca entre os componentes físicos, bióticos e as atividades humanas para avaliação da fragilidade ambiental (VALLE; FRANCELINO; PINHEIRO, 2016).

Portanto, o estudo da paisagem é uma ferramenta de grande utilidade no planejamento da ocupação e das atividades humanas no território, permitindo a identificação das potencialidades de uso e também áreas com potencial de risco aos fenômenos naturais.

6.1 Princípios da Ecodinâmica

Os princípios de unidades ecodinâmicas foram propostos por TRICART (1977), consistindo na integração do conceito de ecossistemas, baseado no instrumento lógico do sistema, enfocando relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica e do fluxo de energia e matéria no meio ambiente. Por meio do entendimento e de seus preceitos, é possível, com o levantamento dos recursos e características naturais de um terreno, a avaliação do impacto ambiental a ser causado pelas intervenções humanas, permitindo o planejamento e direcionamento das ações humanas para o devido uso e ocupação de uma área.

O estudo da Ecodinâmica, divide-se em quatro etapas: definição do quadro regional; análise morfodinâmica; recursos ecológicos e problemas da gestão do território.

A primeira etapa, consiste no levantamento das características naturais do local a ser estudado, iniciando-se pelas características climáticas da região, para então identificar as estruturas unidades morfoestruturais e a litologia, descrevendo os materiais geológicos e suas propriedades.

Por meio das características levantadas na primeira etapa, realiza-se a segunda etapa, que consiste na análise entre as interações entre os fatores climáticos e as características morfológicas e geológicas da região, procurando entender seu comportamento e a intensidade e causas dos processos dinâmicos, identificando os locais mais ou menos estáveis. Nesta etapa também é abordada sobre as ações humanas sobre o local, levando-se em conta as alterações não só no meio físico, mas também no meio biótico, como a alteração da cobertura vegetal.

Na terceira etapa, estuda-se sobre as possibilidades e os meios de se utilizar o terreno estudado. São analisados o regime hídrico da região, as características climáticas, os tipos de solo, do ponto de vista agrológico, visando adequar e planejar as atividades humanas mais racionalmente e com menor impacto.

A quarta e última etapa consiste em criar ferramentas, como mapas, relatórios, diagnósticos, que permitam a tomada de decisão para a ocupação e o uso do solo na região estudada. Estes materiais deverão apresentar as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo, a classificação das regiões em função dos problemas da gestão do território e por fim, as recomendações sugeridas. O trabalho final pode ser enviado às gestões públicas para direcionar e ordenar a ocupação de uma determinada área, mostrando as desvantagens e as vantagens das diferentes atividades humanas e como mitigar os impactos causados.

Os preceitos da Ecodinâmica e a metodologia proposta mostraram-se uma ferramenta de grande utilidade nos estudos ambientais, permitindo o desenvolvimento de diversos trabalhos relacionados ao planejamento territorial e do uso e ocupação do solo que levam em consideração as características naturais do ambiente e quais os impactos que as atividades humanas poderiam causar.

6.2 Fragilidade Ambiental

Os sistemas ambientais apresentam diferentes graus de fragilidade ambiental natural frente às intervenções humanas. Alterações no meio físico e biótico podem ocasionar impactos e alterações em suas funcionalidades, alterando o seu estado de equilíbrio. Sendo assim, o estudo da fragilidade ambiental vem sendo utilizada como uma ferramenta indispensável no planejamento territorial.

Ratcliff (1971) *apud* VALLE; FRANCELINO; PINHEIRO (2016) caracteriza a fragilidade ambiental como uma medida da sensibilidade intrínseca dos ecossistemas às pressões ambientais em conjunto com quaisquer ameaças que sejam capazes de desequilibrar um sistema ambiental.

Maganhotto; Santos; de Oliveira Filho (2011) entendem que a fragilidade de uma área é como a vulnerabilidade natural que um ambiente apresenta em função de suas características físicas intrínsecas e que a fragilidade ambiental complementa esta definição levando em consideração os graus de proteção que os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal exercem sobre o ambiente.

O mapeamento da fragilidade ambiental constitui uma das principais ferramentas utilizadas no planejamento territorial, pois permite avaliar as potencialidades do meio físico de uma área ou região de maneira integrada, compatibilizando suas características naturais com suas restrições (KAWAKUBO et al., 2005).

Failache (2015) vê o estudo das fragilidades, das susceptibilidades e das aptidões do meio ambiente como a ferramenta básica para a elaboração do zoneamento ambiental, possibilitando a visualização e distribuição de áreas potenciais para a implantação de atividades, usos restritos e de conservação natural.

Por meio de inter-relação entre as diversas variáveis de meio ambiente, como relevo, pedologia, precipitação e uso da terra, utilizando modelos computacionais aplicados aos métodos de determinação da fragilidade ambiental, resultam-se em mapas temáticos, onde a área de estudo é classificada quanto aos diferentes graus de fragilidade (VALLE; FRANCELINO; PINHEIRO, 2016).

O estudo da fragilidade ambiental e as inter-relações entre as características naturais de uma dada área de estudo são muito complexas, sendo assim, com o decorrer dos anos foram propostas diferentes metodologias para o seu mapeamento, que serão discutidas nos próximos itens.

6.3 Modelos para o estudo da fragilidade ambiental

O mapeamento da fragilidade ambiental vem sendo utilizado por diversos pesquisadores em estudos acadêmicos, sendo utilizadas metodologias consagradas ou suas variações que estejam mais adequadas à área a ser estudada.

Calijuri *et al.* (2007) cita que na literatura são encontradas consagradas metodologias para a geração das cartas de fragilidade ambiental, como as propostas por Crepani *et al.* (1996), pelo INPE (1996) e por Ross (1994), todas baseadas no princípio das Unidades Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977).

Na literatura brasileira, são encontrados três modelos para elaboração de mapas de fragilidade ambiental amplamente utilizados por pesquisadores e gestores: 2 propostos por Ross (1994), denominados “Fragilidade Potencial Natural baseada em Índices de Dissecação do

Relevo” e “Fragilidade Potencial Natural baseada nas Classes de Declividade” e o de Crepani (1996), denominado “Fragilidade Potencial Natural Baseado em Unidades Territoriais Básicas. Os modelos de ROSS baseiam-se a partir de elementos geomorfológicos, solos, cobertura vegetal, uso do solo e clima, onde as variáveis são agrupadas em 5 classes, sendo a de menor fragilidade 1 a maior, 5. O modelo de Crepani é construído a partir do mapa de Unidades Territoriais Básicas, por meio da análise conjunta das variáveis rocha, solo, relevo, vegetação e clima, de modo que cada variável receba um grau de fragilidade que varia de 1 a 3. O resultado da fragilidade para cada UBT é determinado pela média aritmética dos parâmetros analisados (GARÓFALO; FERREIRA, 2015).

6.3.1 Modelos de Fragilidade Potencial Natural

A metodologia da fragilidade empírica ambiental, proposta por Ross (1994), foi fundamentada na funcionalidade intrínseca dos componentes bióticos e físicos da natureza. Sua construção exige a análise das características naturais da área de estudo, como relevo, solo, geologia, clima, uso da terra, cobertura vegetal que são processadas e analisadas, gerando um produto que as sintetiza e expressa os diferentes graus de fragilidade ambiental.

Ross (1994) propôs dois modelos de mapeamento da fragilidade ambiental, sendo o “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com Apoio nos Índices de Dissecação do Relevo” que se baseia no grau de dissecação do terreno e o “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade”, baseado em classes de declividade.

Propõe-se que as unidades de fragilidade dos ambientes naturais devem ser resultantes dos levantamentos básicos de geomorfologia, solos, cobertura vegetal/uso do solo e clima. Cada uma dessas variáveis é hierarquizada em cinco classes de acordo com sua vulnerabilidade, variando de 1 (menor fragilidade) a 5 (maior fragilidade). Da combinação dos valores obtidos, é determinado o grau de fragilidade ambiental do local.

No “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade”, a primeira variável utilizada neste modelo é o relevo, onde a declividade do terreno, dividida em 5 classes, sendo as mais baixas, até 6%, como a de fragilidade “muito fraca” e acima de 30% como “muito forte”. Já para o “Modelo de Fragilidade Potencial Natural com Apoio nos Índices de Dissecação do Relevo”, os graus de dissecação do terreno são classificados conforme sua fragilidade, sendo 1 como “muito fraca” e 5 “muito forte”. A diferença básica nestes dois modelos são os itens analisados descritos acima, o restante da metodologia para classificação da fragilidade ambiental é idêntico.

Os tipos de solo correspondem à segunda variável, sendo os mesmos classificados em 5 graus de fragilidade, conforme suas características naturais, como drenagem, profundidade e agregação de suas partículas. Latossolos roxos, vermelhos escuros e vermelho amarelo, com texturas argilosas apresentam fragilidade muito baixa. As areias quartzosas e solos podzolizados com cascalho e litólicos são classificados como de fragilidade “muito forte”.

O uso e ocupação do solo corresponde à terceira variável, devido à sua função no grau de proteção que proporciona ao relevo e ao solo. Locais recobertos por florestas e matas ou áreas urbanas são consideradas de proteção muito alta, ou seja, de baixa fragilidade, já as áreas desmatadas, queimadas e de solo exposto, apresentam fragilidade muito alta.

Por fim, os dados pluviométricos são classificados igualmente às variáveis anteriores, variando de 1 “muito fraca” a 5 “muito forte”.

A fragilidade ambiental é determinada pela combinação dos valores de proteção, sendo que as áreas que atingirem a combinação mais próxima de 5555 serão classificadas como de Fragilidade Muito Alta e as próximas de 1111 serão as de Fragilidade Muito Baixa.

Como observado, neste modelo, a fragilidade ambiental está altamente relacionada à estabilidade do terreno e à predisposição natural ou induzida pelo uso e ocupação do solo, da ocorrência de processos erosivos.

6.3.2 Modelo da Fragilidade Potencial Natural

O Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio em Unidades Territoriais Básicas – UTB, proposto por Crepani et al. (1996), consiste inicialmente na elaboração do mapa de Unidades Homogêneas de Paisagem ou Unidades Territoriais Básicas – UBT's, utilizando interpretação de imagem de satélite. A estabilidade ou vulnerabilidade é definida pela análise integrada do conjunto rocha, solo, relevo, vegetação e clima, onde cada uma dessas variáveis recebe uma pontuação entre 1 (menor vulnerabilidade) e 3 (maior vulnerabilidade).

Becker e Egler (1996) *apud* Crepani *et al.* (1996) definem as unidades territoriais básicas – UTBs como sendo as células elementares de informação e análise para o zoneamento ecológico-econômico, onde cada célula possui um conjunto de informações fundamentais à manutenção e à reprodução da vida. Cada UTB é uma unidade territorial básica que contém atributos ambientais que permitem diferenciá-la de suas vizinhas, ao mesmo tempo em que possui vínculos dinâmicos que articulam a uma complexa rede integrada por outras unidades.

As unidades de paisagem natural devem ser analisadas conforme suas características e a interação com o meio ambiente, permitindo classificar sua capacidade de sustentação humana (CREPANI et al., 1996).

Sendo assim, é realizada a análise morfodinâmica das unidades de paisagem natural utilizando-se os princípios da Ecodinâmica (TRICART, 1977), onde são estabelecidas as relações de morfogênese, que prevalecem os processos erosivos modificadores das formas de relevo e a pedogênese, onde são prevalecidos os processos formadores de solo.

Dessa maneira, são levantadas e analisadas diferentes características do meio natural, sendo a Geologia como uma das mais importantes, pois compreende as informações referentes ao grau de coesão das rochas formadoras e à evolução de seu ambiente geológico. Outra variável de alto grau de relevância a ser analisada é a geomorfologia, pois influenciam diretamente nos processos ecodinâmicos, sendo levantados os dados de relevo, declividade e grau de dissecação. A pedologia é estudada para verificação da maturidade dos solos, pois estes são produtos diretos do balanço morfogênese/pedogênese. As informações referentes à fitogeografia, pois a cobertura vegetal representa uma defesa contra os efeitos da erosão, atuando como uma barreira que diminui a velocidade de impacto das águas das chuvas e proporciona terrenos mais permeáveis, diminuindo a incidência e intensidade de enxurradas. Por fim, os dados climatológicos permitem a quantificação do grau de risco a que uma unidade de paisagem está submetida (CREPANI *et al.*, 1996).

Os dados disponíveis são integrados em um modelo que estabelece 21 classes de vulnerabilidade à erosão, distribuídas entre as de predomínio dos processos de pedogênese, com valores próximos a 1,0, situações intermediárias próximo de 2,0 e em situações de predomínio da morfogênese, onde são atribuídas notas próximas a 3,0.

Este modelo é aplicado a cada tema individualmente para cada uma das unidades de paisagem natural onde é feita uma média aritmética entre os valores individuais dos temas (geologia, pedologia, geomorfologia, vegetação), onde poderão ser apresentadas em uma escala de estabilidade/vulnerabilidade, onde os números menores, próximos a 1,0 são os mais estáveis e os próximos a 3,0 são os menos estáveis (CREPANI *et al.*, 1996).

As metodologias propostas por Crepani (1996) e por Ross (1994), visam identificar as áreas mais ou menos estáveis quanto ao risco da ocorrência natural de erosão, levando-se em consideração principalmente a geologia e a geomorfologia como itens principais da análise e o uso e cobertura do solo como um fator potencial de restrição a estes fenômenos.

Sporn e Ross (2004) verificaram que o modelo de Fragilidade Ambiental proposto por Ross (1994) e o proposto por Crepani (1996), utilizam basicamente as mesmas variáveis e, quanto ao cálculo da fragilidade ambiental, o modelo proposto por Crepani trabalha com valores médios e Ross, com agrupamento dos índices das variáveis, adotando o relevo como principal variável. Sendo assim, não puderam apontar qual foi o melhor modelo de fragilidade ambiental

devido à falta da análise entre os dados obtidos e a realidade em campo. Mesmo assim, identificaram como a principal deficiência em comum, a atribuição de pesos às variáveis analisadas, pois são realizadas geralmente arbitrariamente e subjetivamente, devido à dificuldade de se avaliar a contribuição de cada uma para o grau de fragilidade.

6.3.3 A Lógica *fuzzy* no mapeamento da Fragilidade Ambiental

Devido à complexidade dos fenômenos naturais, sua representação nem sempre é correta, causando erros e incertezas na definição de limites rígidos para os fatores observados. Sendo assim, deve-se usar e desenvolver métodos que representem de maneira mais complexa os fenômenos naturais (CALIJURI et al., 2007).

Burroughs em (1992), entende que a análise da informação geográfica deve atender requisitos de qualidade, que está diretamente ligada à coleta dos dados, ao nível de resolução e qualidade da informação e à sensibilidade do modelo quanto aos dados inseridos e a propagação de erros. Em seu estudo, Burroughs verificou incertezas e erros relacionados aos atributos dos mapas e então sugeriu a utilização de modelos que utilizam a lógica *fuzzy*, devido à redução e à propagação de erros relacionados à interpolação dos dados, informações mais confiáveis.

Calijuri (2007) propôs a utilização de lógica *fuzzy* na elaboração de mapas de fragilidade ambiental, correlacionando as informações de uso do solo, distância dos cursos hídricos, classes de declividade, unidade pedológicas, morfometria das vertentes. Esta metodologia mostrou-se promissora, principalmente pela estrutura matemática do cálculo relacional *fuzzy*, que permite tratar as incertezas na representação de ambientes naturais.

Em seu modelo, Calijuri (2007) utilizou valores de menor a maior fragilidade, variando de 0 a 255. Foram usados os parâmetros uso e ocupação do solo, distâncias de córregos, rios e nascentes, classes de declividade, unidades pedológicas e morfometria de vertentes. Neste modelo, observou-se que os valores de declividade e pedologia tem maior influência na fragilidade potencial, já o uso e ocupação do solo é o parâmetro mais representativo na fragilidade emergente.

Calijuri *et al.* (2007) concluiu comparando seu modelo com o de Crepani *et al.* (1996) que considerar as diferentes variáveis sob o mesmo peso pode apresentar erros, pois atenuaria os resultados da fragilidade, outra conclusão foi que a aplicação da lógica *fuzzy* tem se mostrado promissora pela utilização limiares de classificação de fragilidade não tão rígidos.

Cereda Junior (2011) propôs o mapeamento da Fragilidade Ambiental para parte da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Monjolinho, localizado no município de São Carlos/SP.

Na proposta metodológica foram utilizados os mapas de declividade, pedologia, uso e ocupação do solo e seus respectivos graus de proteção e o comportamento pluviométrico. Os dados foram classificados conforme padronização *fuzzy* em 5 intervalos iguais de 0,25, iniciado em 0 (muito fraca) e terminando em 1 (muito forte).

Foram utilizados dois métodos multicritérios, sendo a Combinação Linear Ponderada (CLP) e a Média Ordenada Ponderada (MPO), pois, de acordo com o autor, ambos permitem a aproximação do embasamento teórico com a aplicação cartográfica, ou seja, apresentam maior transparência e controle das variáveis para a efetiva concretização dos pressupostos da Cartografia de Síntese.

Em suas conclusões, o modelo MPO mostrou-se bastante adequado na aplicação em modelos de fragilidade ambiental como o controle sobre o processo de decisão, permitindo a inclusão de novos critérios.

No mapeamento da fragilidade ambiental aplicado na alta bacia dos rios Piracicaba e Sapucaí-mirim na APA Fernão Dias/MG, Garófalo e Ferreira (2015) utilizaram as variáveis: índices de vegetação nativa, declividade, densidade de lineamentos estruturais de relevo, densidade de vias de circulação de pessoas, pluviometria e probabilidade de ocorrências de chuvas intensas. Estas variáveis foram classificadas de 0 (menos frágil) para 1 (mais frágil). Neste estudo os autores geraram três mapas de fragilidade ambiental, sendo para a ocorrência de ravinas, escorregamentos e movimentos de massa. Em sua conclusão, os autores citam que a utilização da lógica *fuzzy* na álgebra dos mapas tornou os resultados mais coerentes com a realidade, devido à não restrição da transição de cada variável em limites rígidos.

Para o mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia do Arroio Grande, proposta por Ruhoff *et al.* (2005), foram utilizadas as variáveis geologia, pedologia, uso e cobertura da terra e mapa clinográfico, onde as classes de fragilidade foram determinadas entre o intervalo de 0 (muito fraco) a 1 (muito forte). Neste estudo os autores concluíram que o modelo *fuzzy* supera tecnicamente o processo de intersecção de conjuntos espaciais, como operações *booleanas* de mesma ordem de grandeza, onde a grande vantagem é a possibilidade de avaliar o espaço geográfico continuamente e não por meio de limites rígidos e de conjuntos de dados estáticos, criando uma superfície de decisão oferecendo uma flexibilidade muito maior sobre problemas espaciais.

Como observado, o modelo *fuzzy* vem sendo utilizado em estudos voltados à determinação da fragilidade ambiental com bons resultados, principalmente em comparação com modelos *booleanos*, devido, principalmente, a não utilização de limites rígidos ou de conjuntos estáticos.

7. METODOLOGIA EMPREGADA

Esta pesquisa propõe a adaptação das metodologias propostas por Calijuri (2007) e Cereda Junior (2011) para o mapeamento da fragilidade ambiental utilizando a lógica *fuzzy* não linear por meio da correlação dos dados de uso e ocupação do solo, declividade, pedologia, distância de corpos hídricos e pluviometria.

A escolha da lógica *fuzzy* não linear se deu pela possibilidade de testar uma nova forma de correlação de dados, com intuito de verificar sua aplicabilidade no mapeamento da fragilidade ambiental.

Para a realização deste mapeamento, foi utilizado o *software* QGis, por se tratar de um programa de código aberto, desenvolvido pela “*Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)*” como um projeto voluntário. A versão utilizada foi a 3.2.3– Bonn (OSGEO, 2017).

A imagem de satélite utilizada foi escolhida pela melhor resolução espacial disponível, menor cobertura de nuvens, atualizadas e que a mesma abrangesse toda a extensão da área de estudo. Portanto, a imagem do satélite Sentinel 2, disponibilizada pelo site da USGS, foi a que melhor atendeu aos requisitos.

O sensor MSI instalado nos satélites do programa Sentinel apresenta 13 bandas que captam diferentes intervalos de comprimento de ondas eletromagnéticas, sendo que as utilizadas neste estudo foram as bandas 2 (*blue*), 3 (*green*) e 4 (*red*), com resolução espacial de 10 metros, utilizadas para a elaboração de composições coloridas (USGS, 2015).

O programa Sentinel foi desenvolvido pelo programa *Copernicus*, sendo esta uma parceria entre a Agência Espacial Europeia (ESA) e um consórcio de aproximadamente 60 companhias, apoiados pela agência espacial francesa (CNES French) para otimizar a qualidade da imagem e pela agência aeroespacial alemã (DLR German) para desenvolver e melhorar a transmissão e recuperação das imagens usando comunicação óptica (USGS, 2015).

7.1 Variáveis utilizadas

A escolha das variáveis e dos dados a serem utilizados na elaboração do mapeamento da fragilidade ambiental é uma das etapas mais importantes neste tipo de estudo. Na elaboração deste estudo as variáveis foram escolhidas baseando-se nas metodologias propostas por Calijuri (2007) e Cereda Junior (2011).

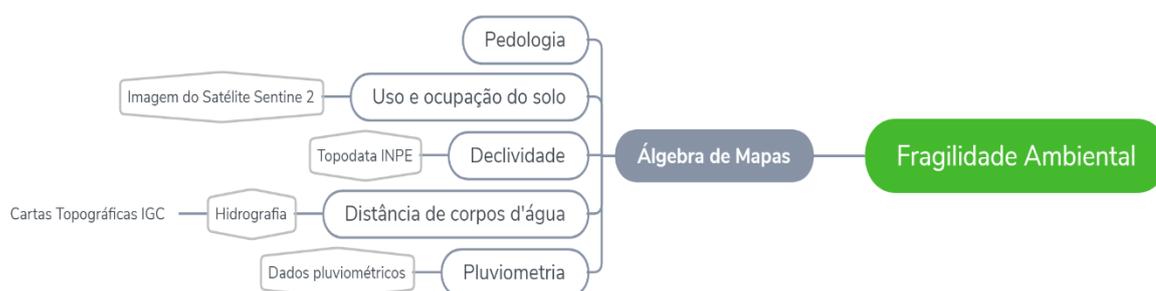
Além das características naturais, levou-se em consideração a cobertura do solo e as atividades humanas ali realizadas, pois as mesmas podem aumentar ou diminuir o grau de fragilidade ambiental do local.

Neste estudo foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Declividade: dentro das metodologias empregadas para a fragilidade ambiental, este parâmetro pode ser considerado um consenso por estar presente nos estudos já consagrados. A declividade está diretamente relacionada à manutenção da estabilidade geológica de um terreno, portanto, tem grande importância neste estudo;
- Pedologia: os diferentes tipos de solo, sua constituição e profundidade podem aumentar ou diminuir o grau de fragilidade ambiental de uma área e muito utilizado nas metodologias consagradas do mapeamento da fragilidade ambiental;
- Distância dos corpos d'água: tem relação com as Áreas de Preservação Permanente – APP, instituídas pela Lei Federal 12.651/2012 foram escolhidas por serem áreas de uso restrito protegidas por lei e por terem como função, a estabilidade geológica e a proteção dos recursos hídricos;
- Pluviometria: seu uso foi proposto na metodologia de Cereda Junior (2011) em seu estudo realizado em São Carlos/SP. A quantidade de chuvas que atinge uma determinada região pode saturar o solo, causar enxurradas e inundações, aumentando a fragilidade ambiental;
- Uso e ocupação do solo: esta variável tem como objetivo verificar o grau de proteção da superfície do solo e o impacto das atividades humanas na área de estudo. Dependendo da atividade ali exercida, a mesma pode potencializar a ocorrência de processos erosivos, assoreamento de recursos hídricos, entre outros.

Após a escolha das variáveis, deve-se obter os dados de fontes confiáveis e de maior qualidade disponível. A Figura 3 apresenta o fluxograma com os dados utilizados neste estudo.

Figura 3 – Fluxograma das etapas para o mapeamento da fragilidade ambiental.



Fonte: elaborado pelo autor.

7.2 Elaboração do material cartográfico

Para a elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental da bacia hidrográfica do Rio do Quilombo, foram utilizadas fontes cartográficas primárias, que geraram os dados utilizados neste estudo.

Os dados cartográficos primários utilizados foram: Mapa Pedológico do Município de São Carlos/SP, elaborado por Fagundes (2010), Imagem do Satélite Sentinel 2, com resolução espacial de 10m, Imagem do Projeto Topodata (Inpe), Cartas Topográficas do IGC em escala 1:10.000.

A partir destes dados, foram gerados os materiais cartográficos secundários, descritos abaixo, necessários para o estudo:

a) Uso e ocupação do solo

O mapa do uso e ocupação do solo para a bacia hidrográfica do rio do Quilombo foi elaborada a partir da imagem do satélite Sentinel 2, datada de 02 de setembro de 2017. O método utilizado foi a classificação supervisionada, que consiste em gerar amostras de valores de refletância dos pixels da imagem do satélite referentes aos tipos de solo encontrados no local.

Após esta amostragem, o mapa dos diferentes usos da superfície terrestre é elaborado automaticamente pelo *Semi-automatic Classification Plugin – SCP*.

b) Declividade

A elaboração do mapa de Declividade se deu em duas etapas. A primeira foi a elaboração do Modelo Digital de Elevação – MDE da área de estudo e a partir deste, gerou-se a Declividade do Terreno, representada em porcentagem.

c) Hidrografia

Para elaboração do mapa de hidrografia foram utilizadas como base as cartas topográficas do IGC, em escala 1:10.000. Os dados hidrográficos, digitalizados em formato vetorial, foram sobrepostos à imagem do satélite Sentinel 2 para serem ajustados em seu traçado atual.

d) Pluviometria

O mapa de isoietas de chuvas foi gerado por meio de interpolação dos valores da média anual das chuvas registradas em estações meteorológicas localizadas em São Carlos e Descalvado/SP, disponibilizadas pelo SIGRH.

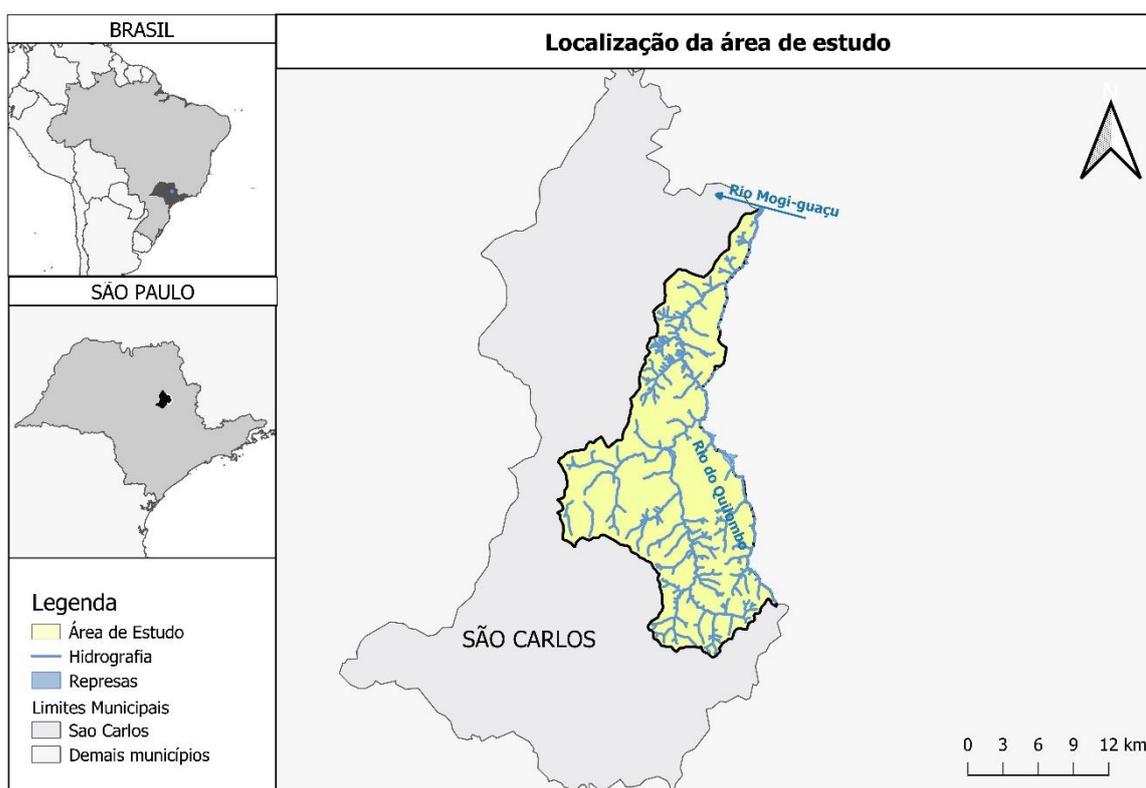
7.3 Descrição da área de estudo

O Rio Quilombo está localizado na divisa entre os Municípios de São Carlos e Descalvado, no interior do estado de São Paulo. Este rio é afluente do Rio Mogi-Guaçu e sua bacia hidrográfica recobre 42.110,96 hectares.

A área de estudo compreende a parcela do Município de São Carlos inserida na Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo, correspondendo à área de 30.471,51 hectares. Sua escolha ocorreu devido à presença de áreas com potencial para expansão urbana e disponibilidade de material cartográfico em melhor nível de detalhamento em São Carlos.

A Figura 4 apresenta a localização do município de São Carlos e a área de estudo.

Figura 4 – Localização do município de São Carlos e a delimitação da área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor.

São Carlos está localizado no interior de São Paulo, distante aproximadamente 240km da capital. Faz divisa a oeste com Ibaté, Araraquara, Ribeirão Bonito, Américo Brasiliense, Santa Lúcia, ao norte com Rincão e Luis Antônio, a leste com Descalvado e Analândia e ao sul, Itirapina e Brotas, ocupando uma área de 1.136,907 km² (IBGE, 2019).

Sua população estimada para 2018 é de 249.415 habitantes, apresentando um crescimento populacional de 12,4% em comparação com o ano de 2010. Em 2014 economia

baseou-se principalmente no comércio e prestação de serviços, correspondendo a aproximadamente 43% do Produto Interno Bruto – PIB municipal, acompanhado pela indústria com 33,22%, já a agricultura correspondia apenas 1,42% (IBGE, 2017).

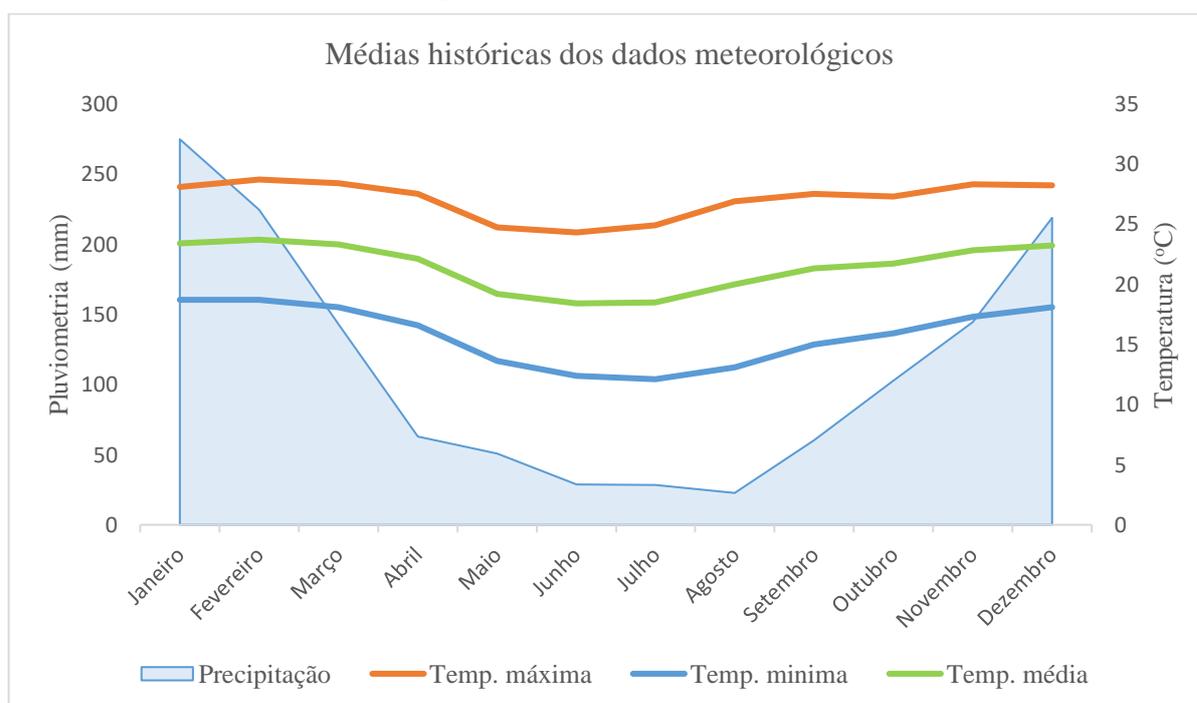
7.4 Clima e pluviometria

A EMBRAPA mantém uma estação meteorológica no município de São Carlos, sob as coordenadas 21°57'42"S, 47°50'28"W, e 860 metros de altitude. De acordo com sua caracterização climática, elaborada pela compilação dos dados meteorológicos registrados dentro do período de 1992 a 2010, o clima local é classificado segundo a classificação de Köppen, como Cwa, ou seja, clima quente com inverno seco (EMBRAPA, 2017).

Dentro deste período, média anual de chuvas registradas é de 1.361,6mm, sendo os meses de janeiro como o mais chuvoso e agosto como o mais seco. A temperatura média anual registrada foi de 21,5°C sendo a média das máximas de 27,1°C e das mínimas de 18,4°C, sendo fevereiro o mês mais quente e junho o mais frio.

A Figura 5 apresenta o gráfico da distribuição das médias pluviométricas e de temperatura adaptado dos dados registrados pela EMBRAPA.

Figura 5 - Gráfico das médias históricas dos dados meteorológicos de São Carlos, registrados entre 1992 e 2010.



Fonte: EMBRAPA (2017).

7.5 Caracterização da área de estudo frente ao Plano Diretor Municipal

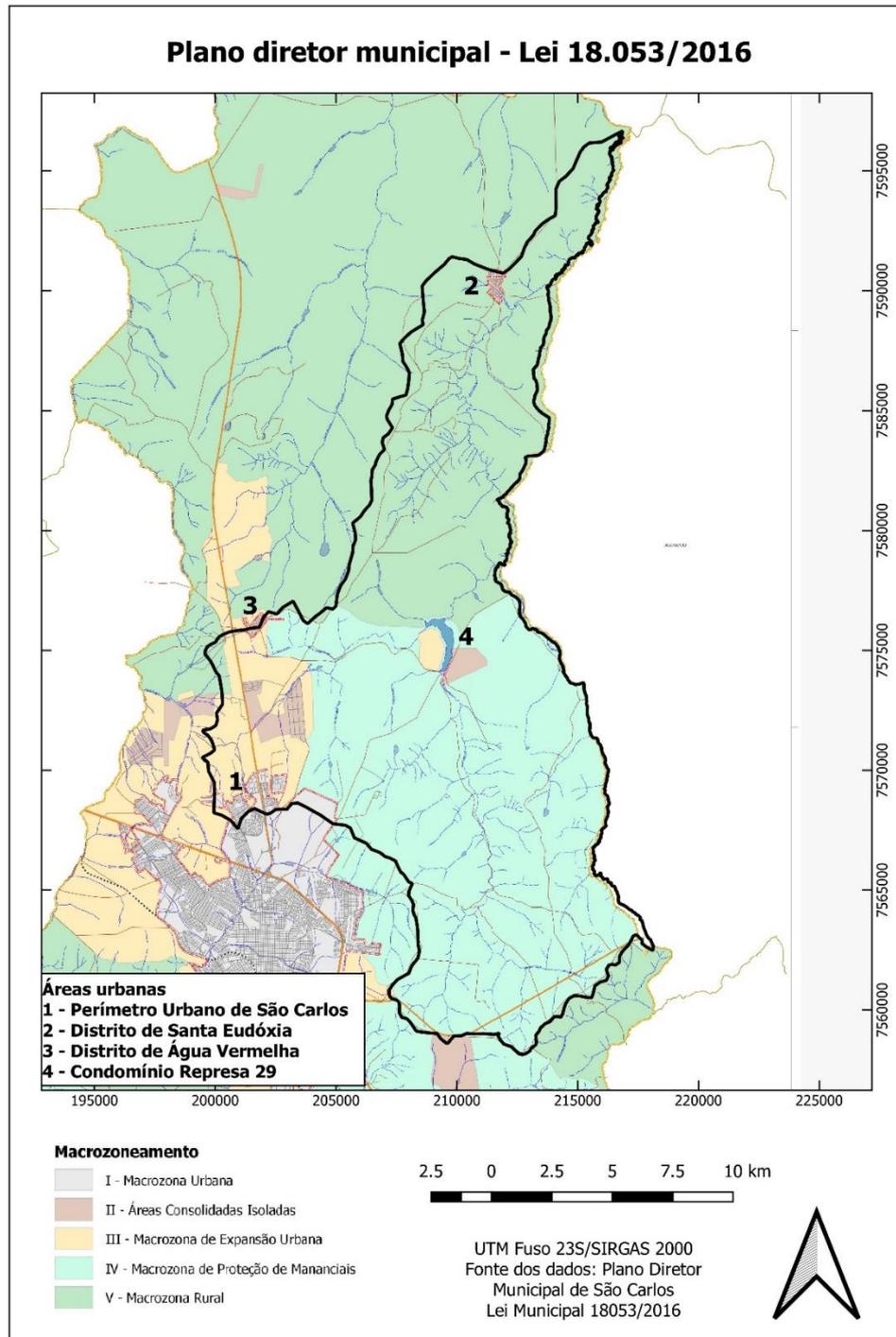
A Prefeitura Municipal de São Carlos, na data de 25 de novembro de 2005, publicou a Lei Municipal nº 13.691 que instituiu o Plano Diretor do Municipal em conformidade com o instituído pelo Estatuto das Cidades (SÃO CARLOS, 2005). Devido ao intenso processo de desenvolvimento, crescimento e pressão à urbanização, o Plano Diretor Municipal foi revisado, sendo publicada a Lei Municipal nº de 18.053 de 19 de dezembro de 2016, onde foi possível analisar e avaliar o uso e ocupação do solo, as tendências à expansão urbana e definir as zonas de restrição de ocupação, levando-se em consideração principalmente a proteção ambiental e na adequação do sistema viário (SÃO CARLOS, 2016).

O macrozoneamento dividiu o território municipal levando em conta os padrões gerais de uso e ocupação do solo e os aspectos e condicionantes físico-ambientais do território, englobando áreas com características semelhantes.

As áreas já urbanizadas, localizadas na porção norte do perímetro urbano de São Carlos são classificados como pertencentes à I - Macrozona urbana e III – Macrozona de expansão urbana, os bairros afastados de Santa Eudóxia, Água Vermelha e o condomínio às margens da Represa 29 são classificados como II – Macrozona urbana – Áreas consolidadas isoladas. O restante está classificado como pertencente à V – Macrozona rural, correspondendo à parcela jusante e IV – Macrozona de proteção de mananciais. A figura 6 apresenta a classificação da área de estudo frente ao Macrozoneamento estabelecido pelo Plano Diretor.

A Figura 6 mostra a sobreposição da área de estudo com o mapa de Macrozoneamento, anexo I, do Plano Diretor Municipal de São Carlos.

Figura 6 - Mapa da área de estudo sobreposta ao Macrozoneamento do Plano Diretor Municipal de São Carlos/SP – Lei Municipal 18.053/2016.



Fonte: Plano Diretor Municipal de São Carlos, adaptado pelo autor.

Devido às características do meio físico e a infraestrutura urbana encontradas nas ocupações inseridas na área de estudo, o Plano Diretor delimitou as seguintes classificações das zonas passíveis de urbanização encontradas:

3 Ampliação condicionada: áreas caracterizadas por sistema viário fragmentados e carência de infraestrutura de drenagem em algumas regiões. Tem como diretrizes promover a melhoria da infraestrutura viária e de drenagem e fixar a população no bairro incentivando seu desenvolvimento do comércio e serviços ligados ao turismo ecológico. Nesta zona encontram-se os bairros de Santa Eudóxia e Água Vermelha;

6B Regulação e ocupação controlada de média densidade: localizadas próximas à malha urbana consolidada, apresentando características aptas à urbanização, porém exigem controle na ocupação e adensamento, devido às suas características físico-ambientais. Tem como diretrizes principais a conservação do meio ambiente e da drenagem urbana, além da recuperação de áreas ambientais frágeis e de APPs. Corresponde à área ao redor do perímetro urbano do bairro de Água Vermelha;

6C Regulação e ocupação controlada de menor densidade: localizada nas regiões periféricas à área urbana consolidada, são áreas que suportam baixos índices de densidade, devido suas características de infraestrutura e físico-ambientais. Dentro das diretrizes principais, estão listadas a proteção e recuperação de APPs e áreas ambientais frágeis e prever e implantar a infraestrutura de mobilidade urbana e de drenagem urbana.

7 Proteção, Regulação e Ocupação Específica: são áreas que envolvem ou estão próximas a loteamentos de chácaras de recreio já existentes, pela presença de importantes áreas verdes nativas remanescentes e APPs ou ocupando locais de solos arenosos ou próximos às áreas alagadiças. Dentro das diretrizes de ocupação, está a realizada por chácaras de recreio ou loteamento de características de transição rural-urbano, proteger e recuperar as áreas ambientalmente frágeis, fragmentos de vegetação nativa e APPs e promover o uso ambientalmente sustentável das margens da represa do 29. Estão englobados nessa classificação os bairros Quinta dos Buritis, Chácara Leila, Tibaia de São Fernando e o Vale da Santa Felicidade e o prolongamento da Estância Balneária Concórdia, localizado às margens da represa do 29.

Já as áreas inseridas na Macrozona rural, estão classificadas como:

9A – Zona Multifuncional Rural: áreas destinadas às atividades agrícolas, não podendo ser destinada à ocupação urbana. Suas diretrizes são o estímulo à produção agrícola e compatibilizar o uso turístico e de lazer, além da preservação ambiental.

9B – Zona Multifuncional Rural e de Proteção Hídrica: localizadas dentro das zonas de proteção de mananciais, apresenta vocação agrícola e restrição à expansão urbana. Tem como diretrizes a proteção dos mananciais, garantir o cumprimento do código florestal, proteger, recuperar e revitalizar os ecossistemas naturais e as APPs e fragmentos florestais desta zona, implementando a criação de área verde complementar de 50 metros em paralelo às APPs.

Conforme descrito, em todas as modalidades previstas para a expansão urbana no interior da área de estudo estão claramente condicionadas à infraestrutura de mobilidade e drenagem urbana e principalmente às limitações do meio físico-ambiental e a proteção e recuperação do meio ambiente.

7.5 Atribuição dos valores correspondente à fragilidade ambiental usando *fuzzy*

Os dados utilizados neste estudo apresentam natureza distinta, ou seja, enquanto que a declividade, pluviometria e a distâncias dos cursos d'água são representados de maneira quantitativa, as informações de pedologia e uso e ocupação do solo são expressas de forma qualitativa. Portanto, é necessário ajustar todos os parâmetros a uma mesma escala de trabalho, sendo assim, foi realizada a padronização dos dados.

O software QGis 3.2 possui o algoritmo SAGA “fuzificação”, que permite a padronização dos dados em escala de números reais, variando de 0 a 1. Esta padronização ou reescalonamento dos dados é fundamentada nas metodologias propostas por Ross (1994) e Sporn (2011) e amplamente utilizada em diversas metodologias.

Portanto, os valores da Fragilidade Ambiental serão expressados quantitativamente em cinco classes variando de 0 a 1 de maneira não linear, aplicando-se a função *fuzzy* sigmoide, onde os valores próximos a 0 serão de fragilidade “muito fraca” a 1, “muito forte”.

A função *fuzzy* sigmoide, dada pela equação (1) expressa abaixo, tem como característica não ser linear, formando um gráfico similar à letra “S”. Sua escolha se deu principalmente ao formato de seu gráfico de representação, que apresenta acentuação gradativa de sua curva nos extremos superior e inferior, permitindo uma maior representatividade dos dados localizados nestes pontos.

$$(1) \quad S(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} = \frac{e^x}{e^x+1}$$

7.5.1 Declividade

Os dados de declividade foram padronizados utilizando a função sigmoidal crescente, tendo como ponto de controle $A=0\%$ e $B=30\%$, conforme proposta de Cereda Junior (2011). O ponto A corresponde onde a função começa a crescer e o B onde a mesma atinge seu máximo. A Figura 7 apresenta o gráfico da padronização *fuzzy* deste parâmetro.

Figura 7 – Gráfico da padronização *fuzzy* para Declividade.



Fonte: elaborado pelo autor.

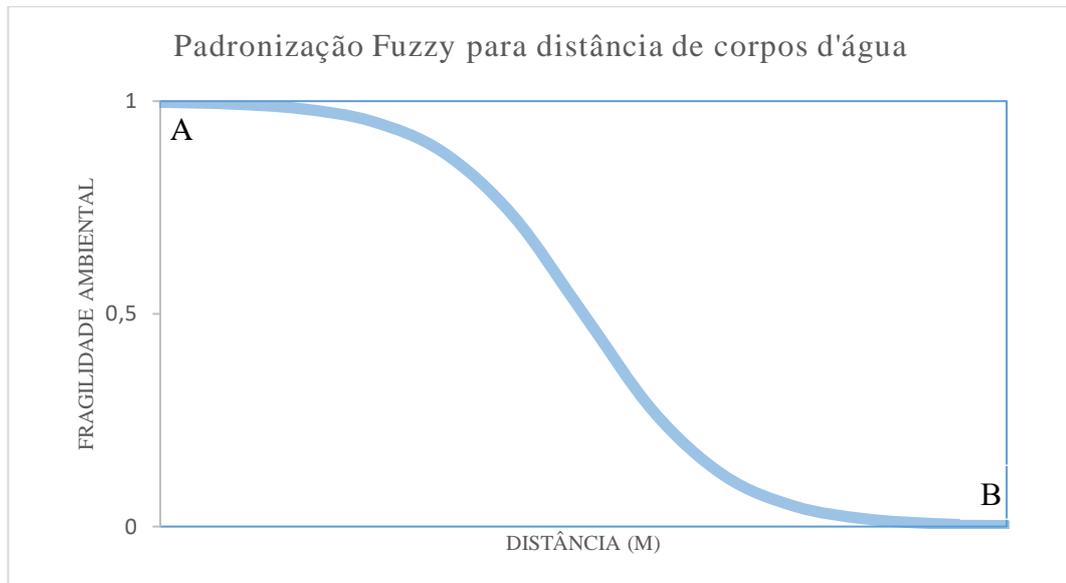
7.5.2 Distância dos corpos d'água

Para os dados de distância dos corpos hídricos, foi utilizada a função sigmoidal decrescente, onde foi atribuído o ponto de controle $A=30$ metros e $B=150$ metros. Na proposta de Calijuri (2007), o valor aplicado para B foi de 200 metros, porém, na bacia do Rio do Quilombo, observou-se que a maior distância de curso d'água não ultrapassou 175 metros, portanto, preferiu-se utilizar o valor de 150 metros. A escolha da distância de 30 metros foi devido a esta ser o valor dado pela legislação vigente em relação à delimitação das áreas de preservação permanente de ocorrência predominante na área de estudo, correspondendo aos cursos d'água de até 10 metros de largura. As áreas de preservação permanente, por terem sua função principal manter a estabilidade geológica e a proteção dos recursos hídricos, apresentam valores de fragilidade ambiental mais altos próximos aos cursos hídricos.

Portanto, para este parâmetro, quanto mais distante do curso d'água, menor sua fragilidade.

A Figura 8 apresenta o gráfico referente à padronização deste parâmetro.

Figura 8 – Gráfico da padronização *fuzzy* para distância de corpos d'água.



Fonte: elaborado pelo autor.

7.5.3 Pedologia, Uso e ocupação do solo e pluviometria

As variáveis pedologia, uso e ocupação do solo e pluviometria são dados qualitativos, portanto nestes casos foram atribuídos valores conforme suas características em relação à fragilidade ambiental, seguindo a função *fuzzy* sigmoideal. Esta atribuição de valores foi baseada nas metodologias utilizadas por Cereda Junior (2011), Calijuri (2007) e Valle (2016).

Quanto aos solos, foi-se considerada sua classificação e sua profundidade. Solos mais profundos são mais estáveis em relação à ocorrência de erosão do que solos mais rasos, portanto, dentro de uma mesma classificação, quanto maior sua profundidade, menor sua fragilidade ambiental. Os valores atribuídos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Definição dos valores de fragilidade para as diferentes tipos de solo.

Classificação pedológica	Profundidade do solo	Atribuição <i>Fuzzy</i>	Categoria de Fragilidade
Gleissolo	-	0,9990	Muito Forte
Latossolo Vermelho distroférico	-	0,0010	Muito Fraca
	muito profundo	0,0005	Muito Fraca
	profundo	0,0007	Muito Fraca
Latossolo Vermelho distrófico	profundo	0,0005	Muito Fraca
Latossolo Vermelho-amarelo	muito profundo	0,1462	Muito Fraca
	raso	0,2022	Fraca
	muito raso	0,4511	Média
Neossolo Litólico	moderadamente profundo	0,9899	Muito Forte
Neossolo Quartzenico	muito profundo	0,9840	Muito Forte
Nitossolo	muito profundo	0,1462	Fraca

Fonte: adaptado pelo autor.

Conforme proposto nas pesquisas de Cereda Junior (2011) e Macedo (2018), foi decidido incluir o parâmetro pluviometria. Na classificação da fragilidade ambiental proposta por Ross (2012), referente a distribuição das chuvas anuais, São Carlos, devido ao seu regime pluviométrico, pode ser considerada “Forte”, ou seja, apresenta: “Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses e alta concentração de chuvas no verão, entre novembro e abril, quando ocorrem 70% a 80% do total de chuvas”.

De acordo com os dados registrados nos pontos pluviométricos localizados na área de estudo, a distribuição das chuvas não é uniforme em toda a bacia hidrográfica, ocorrendo uma variação de 193,66mm entre o ponto de menor (C4-108) e maior (D4-106) valor. Desta maneira, com o objetivo de considerar esta variação na elaboração do mapa de fragilidade ambiental, os dados pluviométricos foram classificados e a estes atribuíram-se valores *fuzzy* conforme a quantidade de chuvas registradas, todos dentro da categoria de fragilidade ambiental “Forte”, conforme proposto por Ross (2012). A Tabela 2 apresenta os valores de fragilidade referente à pluviometria.

Tabela 2 - Definição do valor de fragilidade para a pluviometria.

Classe por quantidade de chuvas anuais (em mm)	Atribuição <i>Fuzzy</i>	Categoria de Fragilidade
<1430	0,6062	Forte
1430 – 1467	0,6430	
1467 – 1504	0,6781	
1504 – 1540	0,7114	
>1540	0,7425	

Fonte: adaptado pelo autor.

O uso e ocupação do solo foi classificado conforme os graus de proteção de cada um. Áreas de cobertura vegetal nativa, apresentam valores mais altos, pois tem maior poder de proteção do solo em relação à erosão, já áreas de vegetação rasteira ou que apresentam terra nua, possuem menor grau de proteção.

Neste estudo propôs-se a divisão das áreas com ocupação urbana em três categorias distintas quanto ao seu estágio de desenvolvimento: urbano-consolidado, em urbanização e chácaras. As áreas urbanas consolidadas foram caracterizadas como as que já apresentam infraestrutura urbana instalada, as áreas em urbanização correspondem a locais de expansão urbana, como novos bairros e loteamentos, em fase inicial de ocupação ou com infraestrutura urbana ainda parcial, as chácaras são representadas por loteamentos com residências esparsas, afastadas dos centros urbanos, de baixa densidade populacional, com ruas não pavimentadas, solo pouco impermeabilizado e geralmente com sistema de drenagem de águas pluviais inexistente ou incipiente. Portanto, quanto menos intensa for a urbanização, maior sua atribuição à fragilidade ambiental.

Mapas de Fragilidade Ambiental em bacias hidrográficas são elaborados para analisar processos erosivos e carreamento de sedimentos para os corpos hídricos sem ser considerada a interferência humana (CRUZ et al., 2017), tanto que a proposta metodológica de Ross (1994) considera áreas urbanas como de fragilidade muito fraca ou de restrição. Neste estudo não se entende que as áreas urbanas sejam estáveis ou de restrição, pois causam alterações no regime do escoamento da água superficial por meio da impermeabilização dos solos e das medidas instaladas para direcionamento e drenagem das águas pluviais. Portanto, nesta pesquisa sugere-se para este caso considerar as áreas urbanas com atribuição de fragilidade média.

A cana-de-açúcar, apesar de apresentar alta densidade vegetal no estágio próximo à sua colheita, foi considerada como de fragilidade alta devido ao período pós colheita e durante a

reforma do canavial, quando o solo fica exposto ou recoberto por palha. Já para as áreas de silvicultura, apesar de serem recobertas por espécimes arbóreos, o espaçamento utilizado nestas culturas pode propiciar a ocorrência de processos erosivos.

Nesta pesquisa manteve-se as áreas ocupadas por represas como áreas de restrição, conforme proposto por Dalla Corte (2015) e Calijuri (2007)

A Tabela 3 abaixo apresenta os valores para uso e ocupação do solo.

Tabela 3 - Definição dos valores de fragilidade para os diferentes tipos de uso do solo.

Classe de uso e ocupação do solo	Atribuição <i>Fuzzy</i>	Categoria de Fragilidade
Água/represas	Restrição	Restrição
Área queimada	0,9840	Muito Forte
Área úmida	0,2728	Fraca
Cana-de-açúcar/palhada	0,7272	Forte
Capim/ pastagens	0,5489	Média
Chácaras	0,8963	Muito Forte
Em urbanização	0,7713	Forte
Silvicultura	0,4902	Média
Terra nua	0,9999	Muito Forte
Urbano – consolidado	0,4315	Média
Vegetação Nativa	0,0001	Muito Fraca

Fonte: adaptado pelo autor.

7.6 Método de interpolação dos dados e elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental

Após a padronização *fuzzy* dos parâmetros utilizados neste estudo, a etapa seguinte é correlacionar os dados geográficos através de álgebra de mapas. Os diferentes modelos de interpolação interferem diretamente no resultado final do mapeamento da fragilidade ambiental, pois são eles que definem a maneira de como os dados analisados serão correlacionados.

A escolha dos modelos a serem aplicados na interpolação dos dados foi baseada na possibilidade de analisar e comparar os resultados para fragilidade ambiental obtida. Portanto, foram escolhidos quatro métodos de interpolação, o AHP, a Média Aritmética Ponderada, Operador *Fuzzy* Intercessão (AND) e Operador *Fuzzy* União (OR).

O AHP e a Média Aritmética Ponderada dão a possibilidade de se atribuir “pesos” conforme a relevância dos parâmetros analisados, o que permite uma maior flexibilidade e adaptação das características da área de estudo na elaboração do mapa de fragilidade ambiental.

Os métodos de Operador *Fuzzy* Interação (AND) e União (OR) foram aplicados por terem como característica a correlação dos parâmetros analisados sem a interferência de pesos e ponderações, ou seja, geram os resultados para a fragilidade ambiental correlacionando de forma direta os valores sem a possibilidade de se adaptar o modelo às características da área de estudo.

7.6.1 Método Processo Analítico Hierárquico (AHP)

Para este estudo foi proposta a aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP), modelo este desenvolvido por Thomas Saaty (1977). Sua escolha se deu pelas considerações de Burroughs em seu estudo realizado em 1992, que combinou método *fuzzy* e o AHP, obtendo resultados satisfatórios.

O modelo AHP possibilita que sejam aplicados pesos para os diferentes parâmetros analisados conforme sua pertinência (MACEDO et al., 2018). Esta ponderação permite determinar a relevância e as prioridades do atributo geoambiental escolhido a partir da atribuição de valores numéricos, formando um arranjo hierárquico evidenciando seu grau de pertinência para a análise final (DORICI et al., 2016).

Este método fundamenta-se na comparação par a par utilizando fatores que influenciam na tomada de decisão. Estes fatores estão organizados hierarquicamente e comparados entre si em uma escala previamente determinada, variando de 1-9 conforme proposto por Saaty (1990). Na matriz de comparação, o valor 1 equivale à mesma importância entre os parâmetros e o 9, importância absoluta. Saaty (1994) ressalta que a atribuição dos pesos para o julgamento das comparações é baseado em intuição, experiência e dados quantitativos e qualitativos.

Um aspecto importante neste método é o cálculo da razão de inconsistência de comparação na ponderação dos critérios e subcritérios utilizados, sendo que quanto mais próximo de 0, mais consistente é o processo de julgamento (OZTURK; BATUK, 2011).

A hierarquização dos parâmetros utilizados neste estudo foram adaptados da proposta apresentada por Calijuri (2007), com ajustes na relevância para atingir o fator CS mais próximo de 0. A Figura 10 apresenta a Matriz de Hierarquização utilizada na elaboração do mapa.

Tabela 4 – Matriz de hierarquização AHP utilizada.

Matriz de hierarquização AHP					
Parâmetro	Uso do solo	Declividade	Pedologia	Distância de corpos hídricos	Pluviometria
Uso do solo	1	3.0	5.0	7.0	9.0
Declividade	0.333	1	3.0	5.0	7.0
Pedologia	0.2	0.333	1	3.0	5.0
Distância de corpos d'água	0.143	0.2	0.333	1	3.0
Pluviometria	0.111	0.143	0.2	0.333	1

Indicadores AHP: $\lambda = 5.248$; CI = 0,062; CR = 0,055

Fonte: elaborado pelo autor.

Com os valores de correlação desta matriz, o parâmetro “Uso do Solo” apresentou peso de 50,30%, a “declividade”, 26%, “pedologia” 13,4%, “distância de corpos hídricos”, 6,8% e “pluviometria” 3,5%.

7.6.2 Método da Média Aritmética Ponderada

A Média Aritmética Ponderada é utilizada quando se há importância relativa entre os diferentes parâmetros analisados. A escolha deste método se deu pela possibilidade de atribuir pesos e pela simplicidade de aplicação.

Este método foi aplicado utilizando a ferramenta “Calculadora Raster”, presente no QGis. Foram atribuídos os seguintes pesos: uso e ocupação do solo: 0,45; declividade: 0,25; pedologia: 0,15; distância dos cursos d'água: 0,10; e pluviometria 0,05, totalizando 1. A equação abaixo apresenta como foi calculada a fragilidade ambiental utilizando este método.

$$\text{Fragilidade} = \frac{[(\text{uso do solo} * 0,45) + (\text{declividade} * 0,25) + (\text{pedologia} * 0,15) + (\text{distância dos cursos d'água} * 0,10)]}{1}$$

Desta maneira, foram dados pesos de 0 a 1 baseado na hierarquização proposta por Calijuri (2007) e pelos valores calculados pelo modelo AHP descrito no item acima.

7.6.3 Método da Média Aritmética Simples

O método da Média Aritmética Simples é um modelo que faz a correlação de parâmetros sem a atribuição de pesos diferentes. Ou seja, é realizado o somatório dos valores de cada parâmetro para então realizar a divisão do total de parâmetros utilizados.

Devido ao fato de não haver a atribuição de diferentes pesos, este método permite uma correlação mais direta, gerando resultados sem a predominância de um ou outro parâmetro da análise. Isto permite verificar qual o parâmetro é predominante em uma certa localidade, permitindo verificar a validade dos resultados obtidos pelos modelos com ponderação.

O cálculo da fragilidade foi realizado por meio da ferramenta “Calculadora Raster” do QGis, conforme equação abaixo.

$$\text{Fragilidade} = (\text{uso do solo} + \text{declividade} + \text{pedologia} + \text{distância dos cursos d'água}) / 5$$

7.6.4 Classificação dos intervalos dos valores obtidos e a categoria de fragilidade ambiental

Os dados temáticos foram agregados por meio da combinação matemática baseada na lógica fuzzy, considerando seus respectivos pesos, resultando em um mapa com cinco níveis de fragilidade. Este mapa foi reclassificado em cinco classes de fragilidade ambiental: Muito Fraca, Fraca, Média, Forte e Muito Forte, e suas respectivas áreas especializadas e calculadas. A Tabela 5 apresenta os critérios utilizados para esta reclassificação.

Tabela 5 – Intervalo das classes de fragilidade.

Intervalo das classes	Categoria de Fragilidade
0,0 a 0,20	Muito Fraca
0,20 a 0,40	Fraca
0,40 a 0,60	Média
0,60 a 0,80	Forte
0,80 a 1,0	Muito Forte

Fonte: elaborado pelo autor.

8. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Na elaboração do mapeamento da fragilidade da bacia hidrográfica do Rio do Quilombo, foram geradas informações geográficas a partir de bases cartográficas e imagens de satélite. Estes dados foram padronizados conforme a lógica *fuzzy* e então interpolados por modelos matemáticos para a elaboração dos Mapas de Fragilidade Ambiental.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos e sua análise e discussão.

8.1 Hidrografia

Foram levantadas as informações referentes à hidrografia da área de estudo por meio das cartas topográficas do IGC, descritas no item anterior e pela imagem do satélite Sentinel 2, datada de 02 de setembro de 2017. A escolha desta data se deu pela pequena cobertura de nuvens devido à época de estiagem da região.

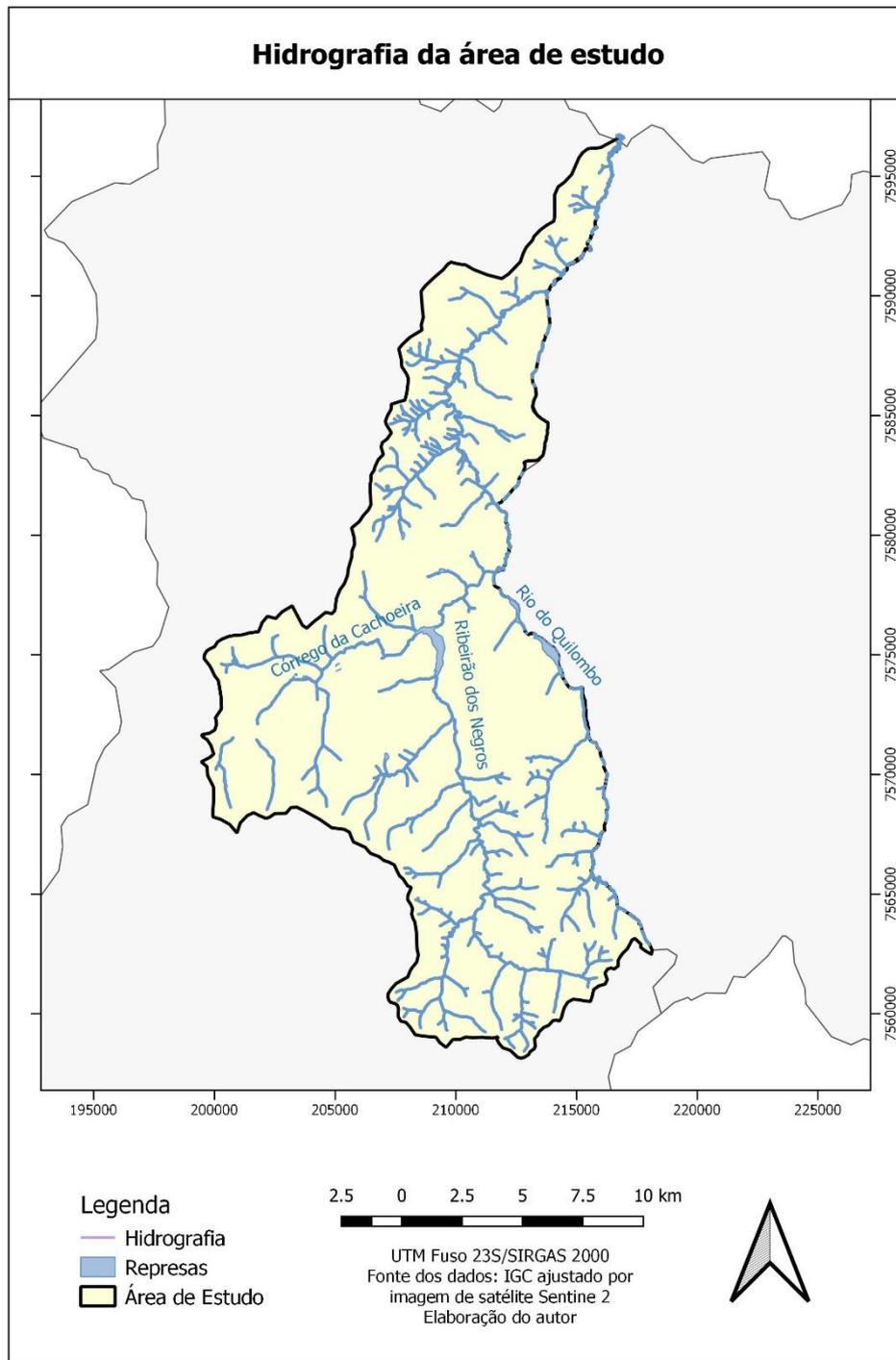
Inicialmente foram utilizadas as cartas topográficas na identificação e localização dos recursos hídricos, sendo estes as nascentes, cursos d'água, lagos, represas e reservatórios de água. Devido às informações das cartas do IGC terem sido obtidas entre os anos de 1974 e 2006 (IDEA - SMA/SP, 2014), viu-se a necessidade de atualizar estas informações com dados recentes, portanto, foi realizada sua sobreposição com a imagem de satélite recente e ajustados os traçados e localização dos recursos hídricos da área de estudo.

Os dados hidrográficos foram elaborados em formato vetorial, representados conforme sua característica, sendo: nascentes como pontos, cursos d'água de até 10 metros de largura como linhas e represas, reservatórios e rios com mais de 10 metros de largura, como polígonos.

Conforme os dados levantados, pode-se verificar que a bacia do Rio do Quilombo possui 225 nascentes e a predominância de cursos d'água de largura menor que 10 metros, sendo o seu principal afluente, o Ribeirão dos Negros. O local apresenta diversas represas e reservatórios, destacando-se os três maiores: Reservatório do Bom Retiro, Represa do 29 e Represa da Barra.

A Figura 9 apresenta dos dados da hidrografia da área de estudo.

Figura 9 – Hidrografia da área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.2 Áreas de Preservação Permanente - APPs

Utilizando os dados de hidrografia gerados no item anterior, foi gerado o mapa de áreas de preservação permanente conforme o instituído pela Lei Federal 12.651/2012.

São consideradas APPs as seguintes faixas:

- Raio de 50 metros ao redor das nascentes;
- Faixa de no mínimo 30 metros para cada lado das margens de cursos d'água de até 10 metros de largura;
- Faixa de no mínimo 50 metros para cada lado das margens de cursos d'água de largura entre 10 a 50 metros;
- Faixa de 15 metros das margens de reservatórios de água com mais de 1,0 hectare de espelho d'água, gerado por meio de represamento de curso hídrico.

Conforme mapeamento realizado, a área de estudo apresenta 1.848,17 hectares ocupadas por APPs. De acordo com a legislação federal, é vedada a ocupação destas áreas para fins econômicos ou que não atendam às atividades excepcionais de baixo impacto ambiental, interesse social e utilidade pública (BRASIL, 2012).

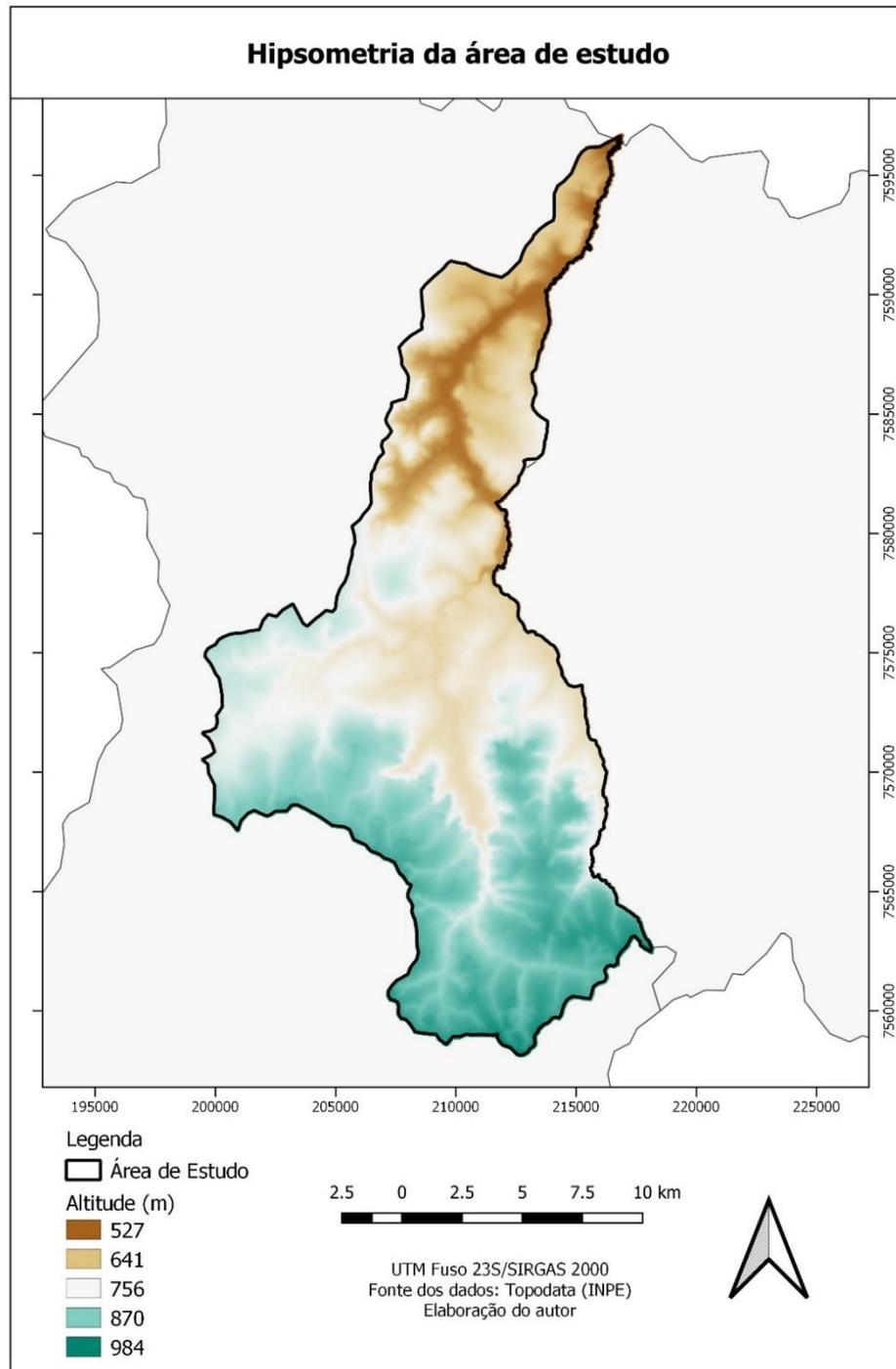
8.3 Modelo Digital de Elevação e Declividade

O Modelo Digital de Elevação – MDE foi obtido do Projeto Topodata, desenvolvido pelo INPE. Este MDE foi elaborado a partir dos dados de altitude obtidos pelo programa SRTM, como espaçamento de 3", de aproximadamente 90m, e então refinado por interpolação de dados e pós-processamento, onde obtém-se o material final com espaçamento de 1" ou aproximadamente 30 metros (INPE, 2008).

A partir do MDE, foi gerado no *software* QGIS, o mapa de declividade, expresso em porcentagem, e o mapa de morfometria de encostas. De acordo com o MDE gerado, a área de estudo apresentou altitude máxima de 990 metros e a mínima de 737 metros. A declividade média foi calculada em 8,84% e os locais de maior declividade foram encontrados às margens do Ribeirão dos Negros, no trecho próximo ao bairro Babilônia e às margens do Rio do Quilombo, próximo às fazendas Palmeirinha e Jacutinga.

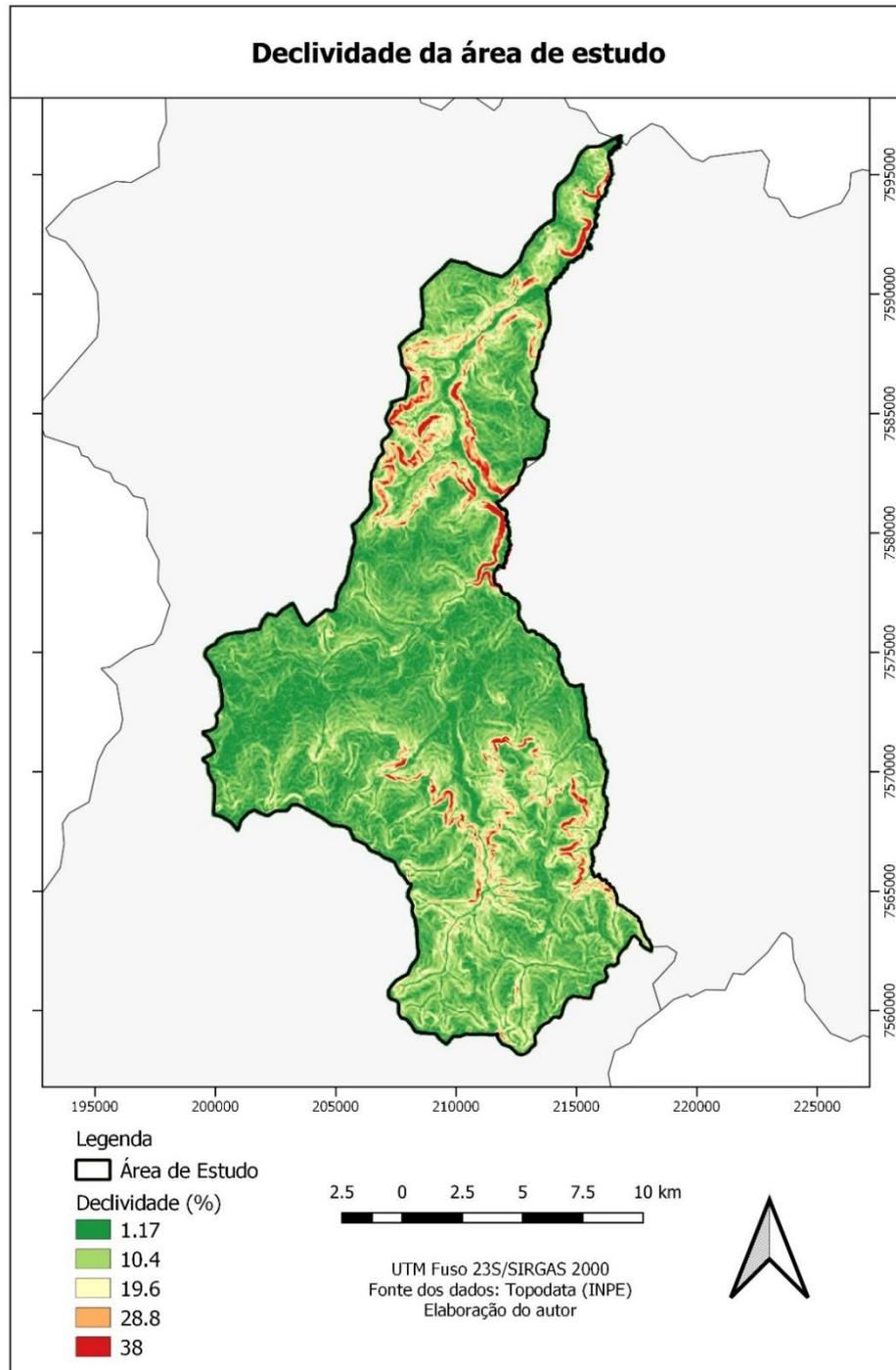
A Figura 10 apresenta o MDE e as curvas de nível com espaçamento de 20 metros da área de estudo. A Figura 11 apresenta o mapa de declividade da área de estudo, com os dados encontrados classificados em 5 faixas diferentes, conforme será utilizado neste trabalho.

Figura 10 – Altitude na área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11 – Declividade em porcentagem.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.4 Mapa Pedológico

O mapa pedológico elaborado por FAGUNDES (2010) apresentou o predomínio dos Latossolos, sendo as subclasses Vermelho distroférico, Vermelho-amarelo e Vermelho distrófico ocupando respectivamente 30,26%, 26,77% e 23,33% da área de estudo. A Tabela 6 apresenta os tipos de solo encontrados na área de estudo.

Tabela 6 – Classificação dos solos encontrados na área de estudo.

Quadro de áreas da classificação do tipo de solo da área de estudo		
Classificação do tipo de solo	Área ocupada em hectares	% do total da área de estudo
Latossolo Vermelho distroférico	9.489,97	30,26
Latossolo Vermelho-amarelo	8.396,24	26,77
Latossolo Vermelho distrófico	7.317,40	23,33
Nitossolo	1.798,94	5,74
Gleissolos	1.585,84	5,06
Neossolos Litólicos	1.402,34	4,47
Neossolos Quartzenicos	1.369,76	4,37

Fonte FAGUNDES (2010), adaptado para nomenclatura da EMBRAPA (2006).

A Tabela 7 apresenta a classificação simplificada dos tipos de solo encontrados na área de estudo conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

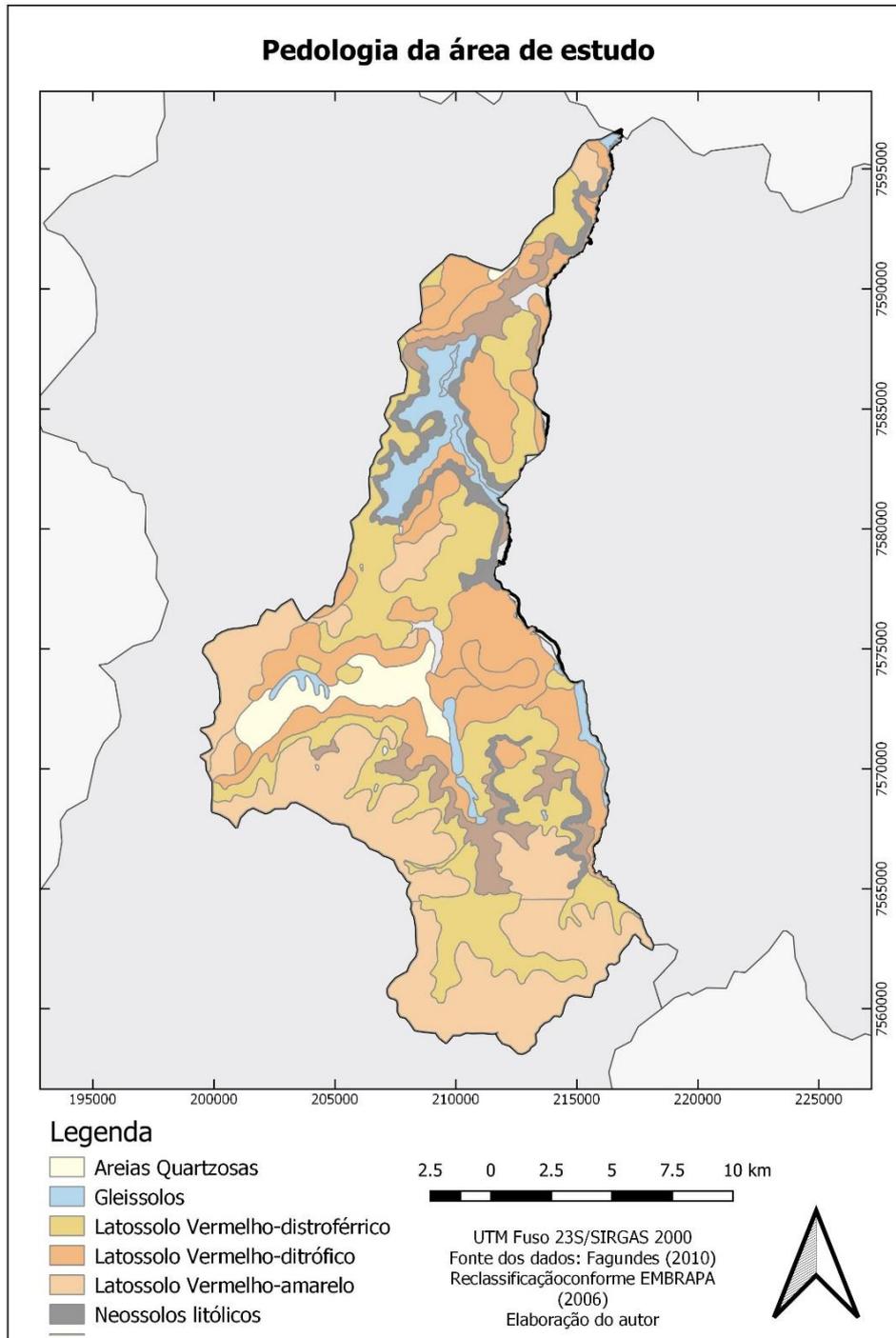
Tabela 7 – Classificação simplificada da pedologia da área de estudo.

Identificação mapa Pedológico	Classificação pelo Sistema Brasileiro	Características
Latossolo Roxo	Latossolo Vermelho distroférico	Solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, com transição pouco abrupta entre os horizontes, normalmente muito profundos. É o solo mais comum encontrado no Brasil, variando de fortemente a bem drenados a imperfeitamente drenada. São classificados por subdivisões conforme suas características e teores de minerais, como o ferro.
Latossolo Vermelho-escuro	Latossolo Vermelho distrófico	
Latossolo Vermelho-amarelo	Latossolo Vermelho-amarelo	
Terra Roxa	Nitossolo	Solos constituídos por material mineral com horizonte B nítico, textura argilosa, com cerosidade expressiva nas superfícies dos agregados.
Solos Litólicos	Neossolos Litólicos	Solos constituídos por material mineral ou orgânico poucos espessos, com baixa intensidade de atuação dos processos pedogênicos.
Areias quartzosas	Neossolos Quartzenicos	
Solos Hidromórficos	Gleissolos	Solos hidromórficos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei dentro de 150cm da superfície do solo.

Fonte: EMBRAPA (2006); KER, (1998).

A Figura 12 apresenta a localização das diferentes classificações pedológicas encontradas na área de estudo.

Figura 12 - Mapa Pedológico.



Fonte: FAGUNDES (2010) adaptado pelo autor.

8.5 Uso e ocupação do solo

O mapeamento e a identificação dos diferentes uso e ocupação do solo foram realizados utilizando *Semi-automatic Classification Plugin – SCP*, disponível no QGIS. Esta ferramenta realiza a classificação supervisionada das características dos pixels das imagens de satélite.

A Tabela 8 apresenta o tipo de uso e ocupação do solo e a área referente.

Tabela 8 – Identificação do uso e ocupação do solo.

Identificação uso e ocupação do solo da área de estudo		
Classe de uso e ocupação do solo	Área ocupada em hectares	% do total da área de estudo
Água/represas	198,99	0,65
Área queimada	90,14	0,30
Área úmida	1.554,51	5,10
Cana-de-açúcar	7.813,35	25,64
Capim/pastagem	8.487,36	27,85
Chácaras	575,88	1,89
Em urbanização	108,37	0,36
Palhada	1.695,96	5,57
Silvicultura	1.783,89	5,85
Terra nua	2.494,36	8,19
Urbano - consolidado	197,23	0,65
Vegetação Nativa	5.471,46	17,96

Fonte: elaborado pelo autor.

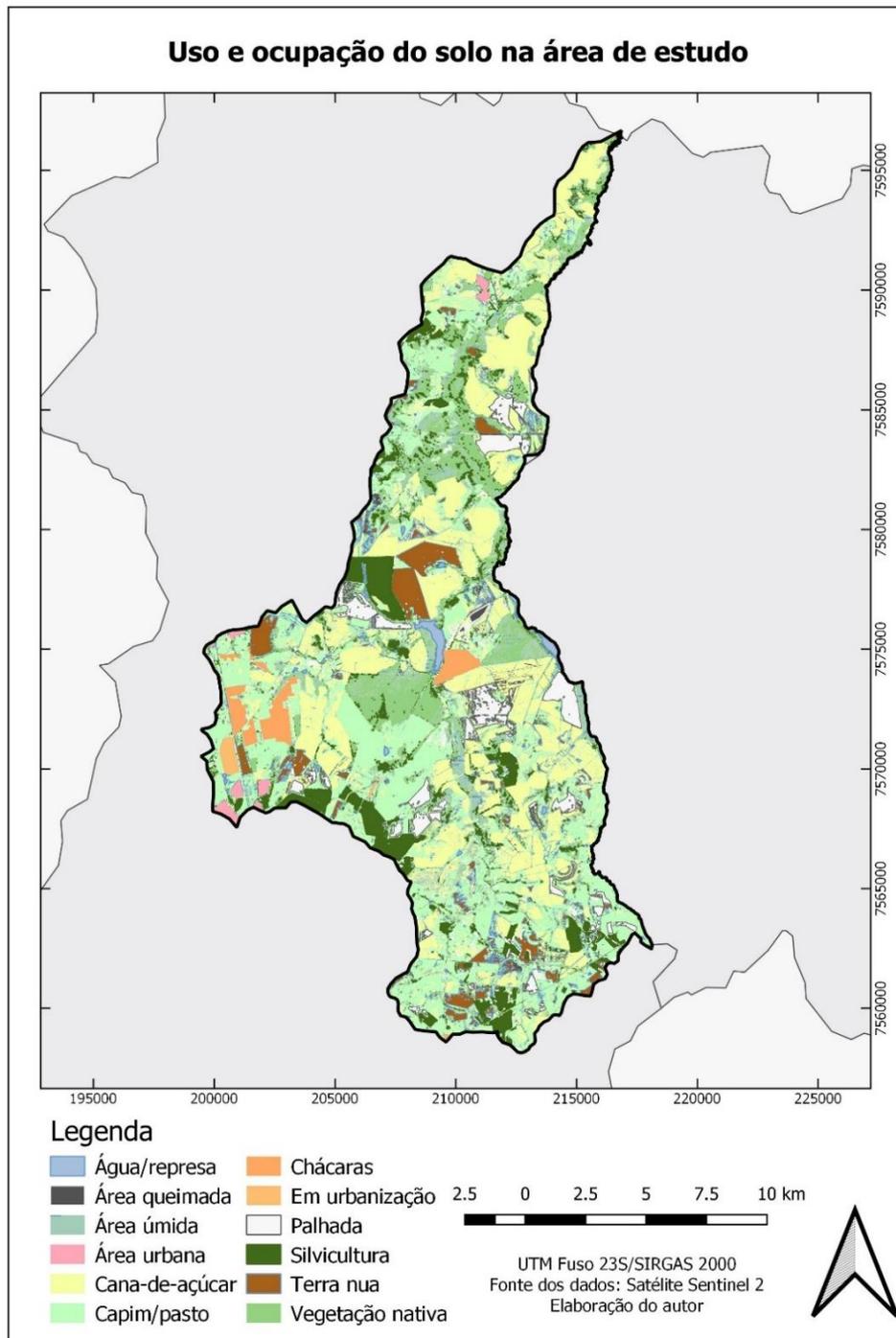
Conforme observado na Tabela 8, predomina-se o uso agrícola do solo, correspondendo à 73,4% do total da área de estudo, sendo o cultivo de cana-de-açúcar e as pastagens os mais representativos, com 31,21% e 27,87% respectivamente. A vegetação nativa e áreas úmidas representam uma parcela significativa, correspondendo a 17,96% e 5,10% respectivamente.

Conforme observado, as áreas urbanas consolidadas representam uma ínfima parte da área de estudo, correspondendo a 0,65%, sendo os distritos de Santa Eudóxia e Água Vermelha os locais de maior aglomeração urbana. As chácaras, ocupando 1,89%, ocorrem principalmente na porção Oeste da bacia hidrográfica e próximo ao Reservatório 29.

Portanto, pode-se verificar que a área de estudo possui predominância de atividades agropecuárias e cobertura vegetal nativa, com pouca urbanização.

O mapa da figura 13, apresenta os diferentes tipos de uso e ocupação do solo encontrados na área de estudo.

Figura 13 - Mapa de uso e ocupação do solo.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.6 Pluviometria

O mapa pluviométrico foi elaborado pela interpolação dos dados históricos de chuvas anuais registradas em 6 pontos localizados em São Carlos e 1 em Descalvado, conforme descrito na Tabela 9.

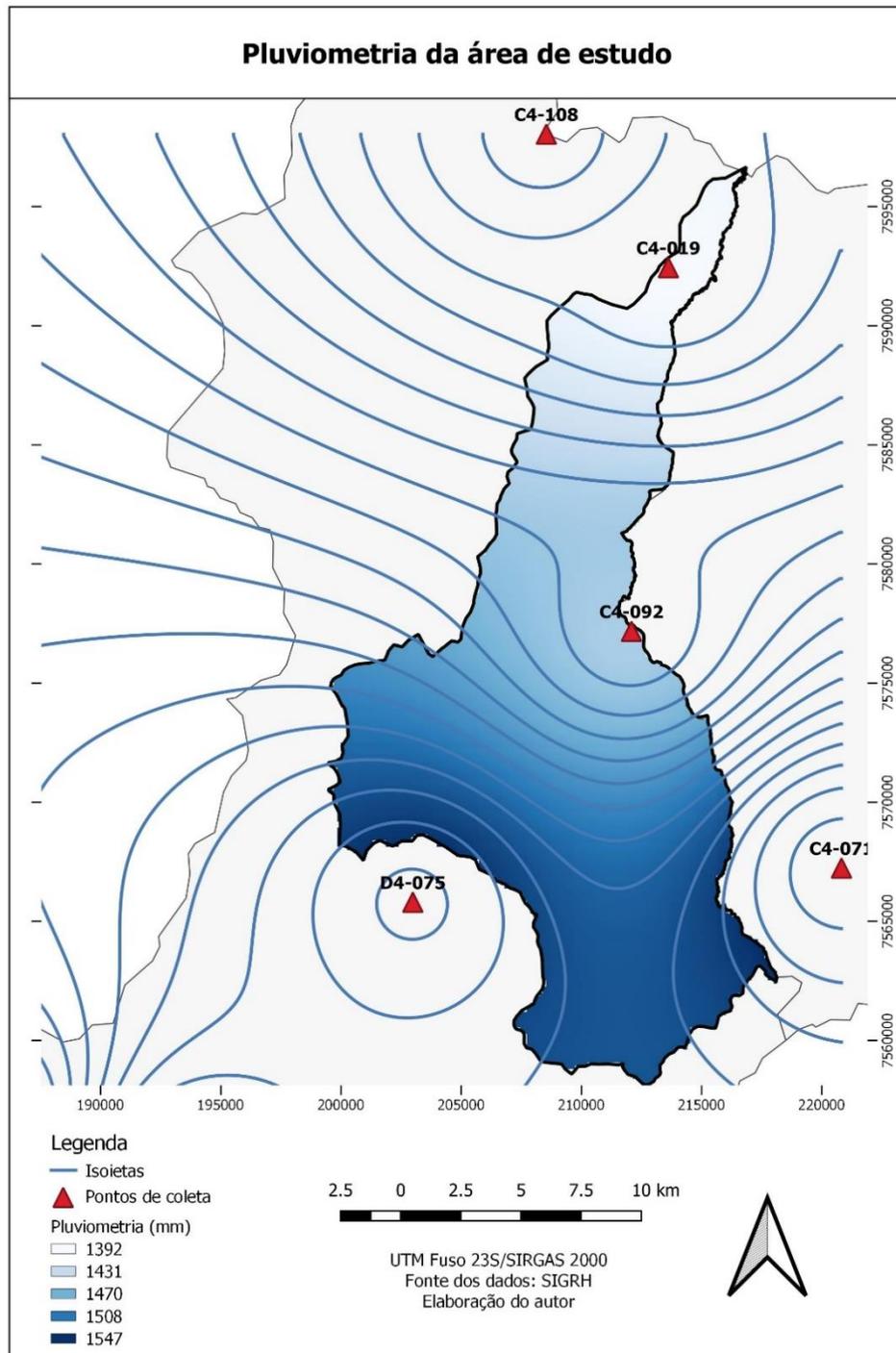
Tabela 9 - Dados pluviométricos usados na elaboração do mapa pluviométrico da área de estudo.

Pontos de coleta dos dados utilizados na elaboração do mapa pluviométrico.			
Nome Ponto	Prefixo	Município	Pluviometria anual (mm)
Santa Eudóxia	C4-019	São Carlos	1.391,86
Fazenda da Barra	C4-092	São Carlos	1.443,18
Porto Cunha Bueno	C4-108	São Carlos	1.374,98
SAAE	D4-075	São Carlos	1.552,08
Fazenda Santa Bárbara	D4-106	São Carlos	1.568,64
Fazenda Água Branca	D5-076	São Carlos	1.461,34
Fazenda Santa Rita	C4-071	Descalvado	1.566,08

Fonte: SIGRH (2017).

Os dados apresentados na tabela 1 foram plotados em um mapa e seus valores foram interpolados pelo método “Peso pelo inverso da distância (IDV)”, disponível no *software* QGIS. Este método de interpolação, entre os disponíveis pelo software foi o que apresentou os resultados mais coerentes. A Figura 14 apresenta o mapa pluviométrico da bacia alvo deste estudo, demonstrando os maiores índices de chuvas nas áreas de maior altitude, localizadas na cabeceira da bacia hidrográfica.

Figura 14 - Mapa Pluviométrico.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.7 Padronização *fuzzy* dos parâmetros utilizados

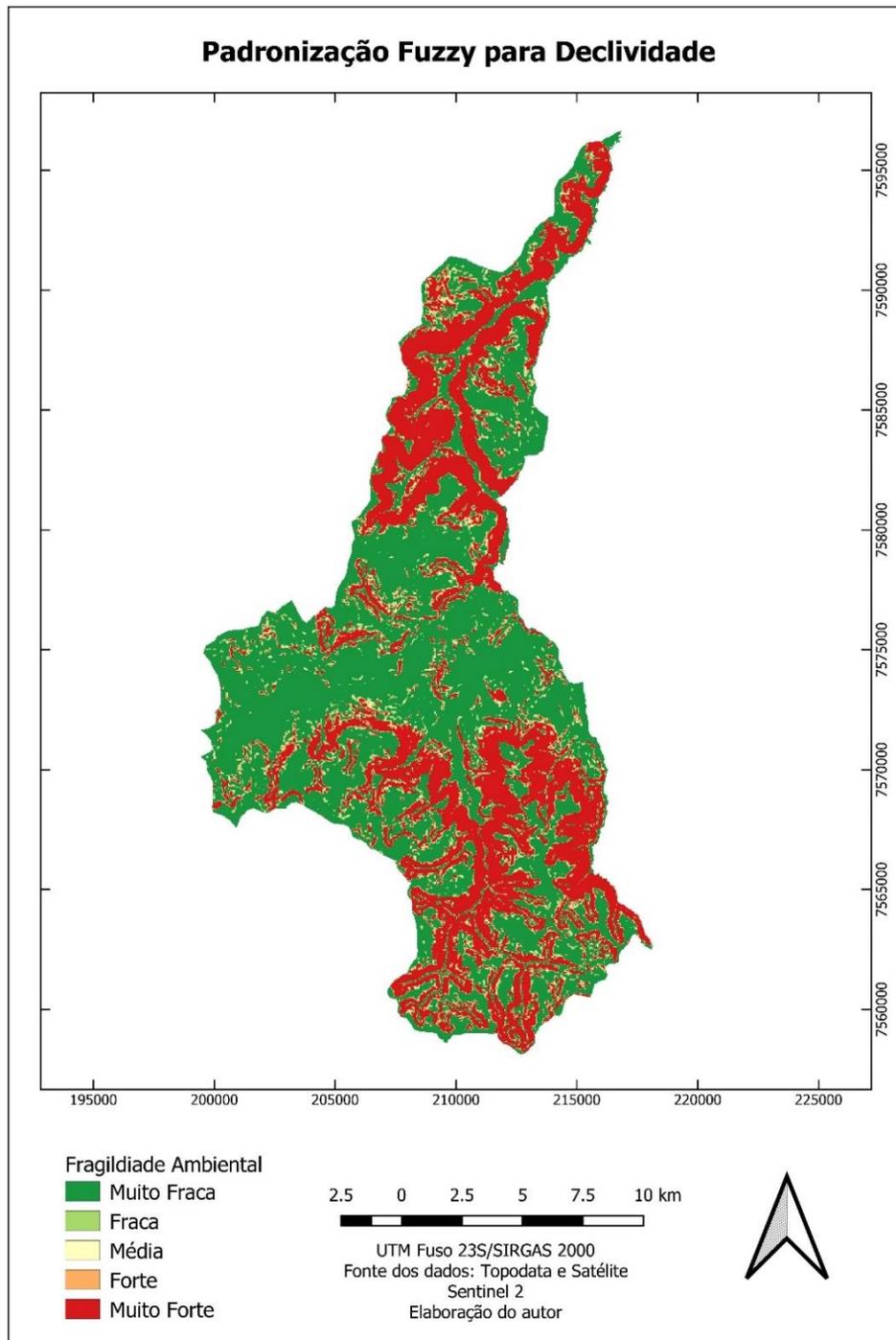
Após a geração do material cartográfico, os dados obtidos foram convertidos para o formato RASTER e foram padronizados por meio da função *fuzzy* Sigmoidal, disponível no software QGis, onde foram obtidos valores de 0 a 1, conforme sua fragilidade ambiental. A padronização *fuzzy* no Software QGis foi realizada por meio da ferramenta “Fuzzificação”, disponibilizada pelo SAGA 2.3.2, onde são atribuídos os valores mínimos e máximos dos parâmetros, gerando o mapa “fuzzificado”.

8.7.1 Declividade

Para o parâmetro Declividade, foi gerado o mapa dos dados com a padronização *fuzzy* onde foi possível observar que os valores para a fragilidade ambiental estiveram concentrados nos extremos mínimos e máximos da função sigmoidal.

Desta maneira, os valores de declividade que estão na parte intermediária da classificação da fragilidade ambiental acabam exercendo pouca representatividade, pois os dados gerados consideram que ou a declividade é muito ou pouco favorável à fragilidade ambiental, o que pode estar em dissonância com as características naturais do local.

No Mapa de Declividade - Figura 13, a declividade encontrada é baixa, predominando valores de 0 a 1,17%, porém, com a padronização *fuzzy*, a fragilidade ambiental considerada muito forte recobre grande parte da área de estudo, como em locais com declividade acima de 10%, sendo que para este parâmetro, o valor máximo da fragilidade ambiental na padronização *fuzzy* é 30%. A Figura 15 apresenta o mapa de declividade com a padronização *fuzzy* Sigmoidal.

Figura 15 – Padronização *Fuzzy* para Declividade.

Fonte: elaborado pelo autor.

8.7.2 Distância de corpos hídricos

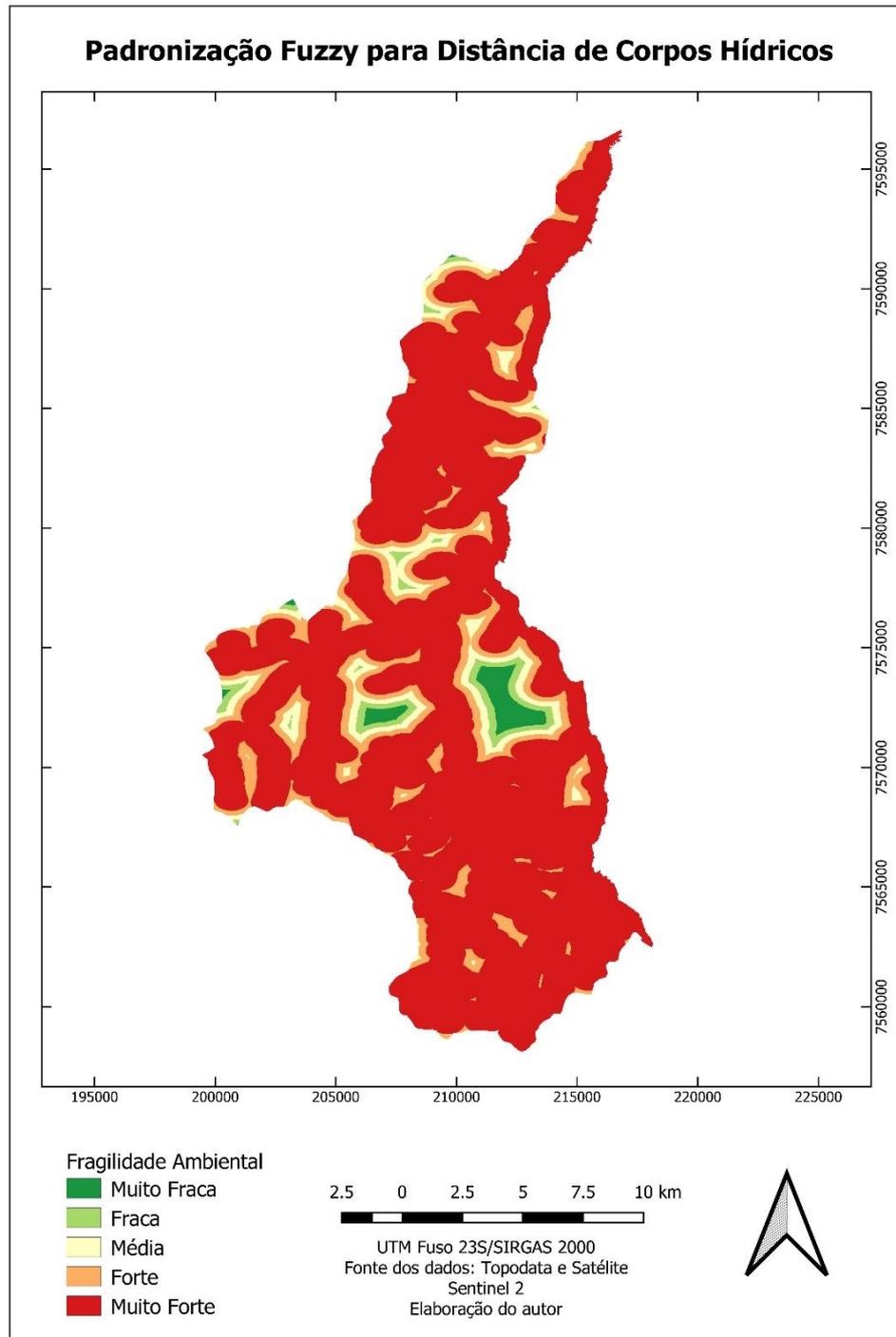
O mapa de padronização *fuzzy* para a distância de corpos hídricos foi elaborado de forma que quanto menor a distância, maior a fragilidade. Neste caso, observou-se o predomínio das áreas de fragilidade ambiental muito forte predominam na área de estudo.

Esta predominância pode estar relacionada à função *fuzzy* Sigmoidal, que concentrou os resultados obtidos próximos aos extremos da mínimo e máximo da função, característica esta possível de ser visualizada na baixa ocorrência de dados intermediários.

Outro fator que contribuiu para a predominância da fragilidade ambiental muito forte foi a densidade de ocorrência de corpos d'água, concentrada principalmente na porção montante da bacia.

Porém, as áreas de fragilidade ambiental muito alta, em alguns pontos, extrapolaram os limites delimitados para as áreas de preservação permanente – APPs, e acabaram se sobrepondo a locais que não teriam restrições legais instituídas pela Lei Federal 12.651/2012. A Figura 16 apresenta o mapa da padronização *fuzzy* para a Distância de Corpos Hídricos.

Figura 16 – Padronização *Fuzzy* para Distância de Corpos Hídricos.



Fonte: elaborado pelo autor.

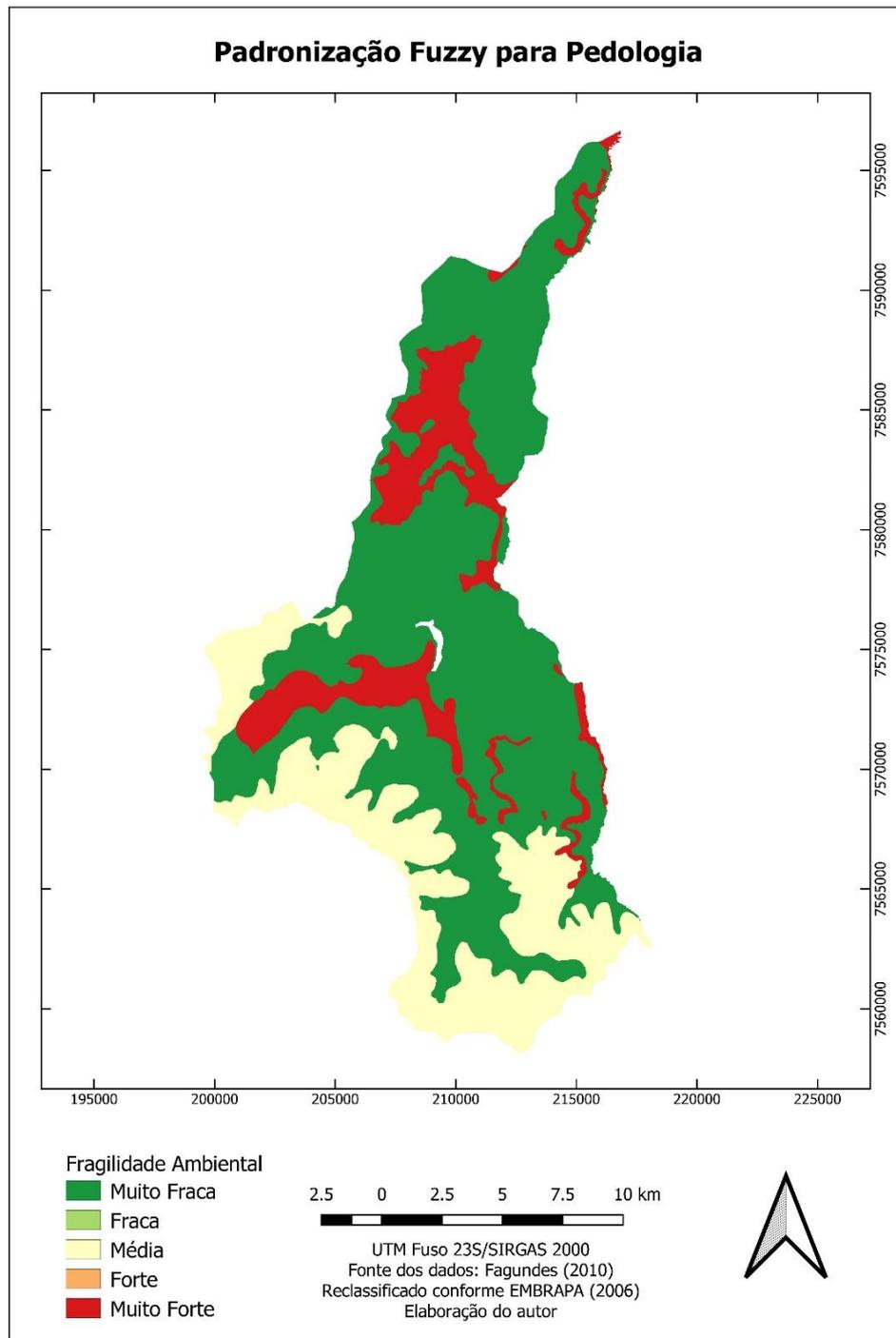
8.7.3 Pedologia

A padronização *fuzzy* para a Pedologia foi elaborada atribuindo-se os valores *fuzzy* para cada classe de solo. Neste caso, os valores para a fragilidade ambiental apresentaram resultados mais heterogêneos e próximos ao observado no Mapa Pedológico da área de estudo – Figura 15.

No mapa da padronização *fuzzy* para o parâmetro pedologia, foi observada a predominância da classificação de fragilidade muito fraca e, em sua na porção montante, média. Esta característica está relacionada diretamente ao tipo de solo, nestes locais predomina-se a ocorrência de Latossolos.

As áreas de fragilidade muito forte foram encontradas no decorrer dos leitos do rio, devido principalmente à ocorrência de solos hidromórficos e, em manchas espalhadas pela bacia, e nos locais onde se predominam as Areias Quartzosas e os Neossolos.

A Figura 17 apresenta o mapa com a padronização *fuzzy* para os tipos de solo encontrados na bacia hidrográfica.

Figura 17 – Padronização *Fuzzy* para Pedologia.

Fonte: elaborado pelo autor.

8.7.4 Pluviometria

O mapa de padronização *fuzzy* para o parâmetro pluviometria apresentou-se todo classificado como de fragilidade ambiental “Forte”, conforme a atribuição descrita por Ross (2012).

Como observado nos dados pluviométricos históricos registrados em São Carlos e Descalvado, na área de estudo ocorre a variação de até 194mm entre os valores de maior pluviometria e o de menor, ou seja, a quantidade de chuvas não é homogênea em toda bacia e não pode ser considerado um valor único.

A atribuição de diferentes valores para as classes de pluviometria permite considerar a heterogeneidade da distribuição das chuvas pela área de estudo, mesmo que sua influência no cálculo do mapa final não seja tão significativa.

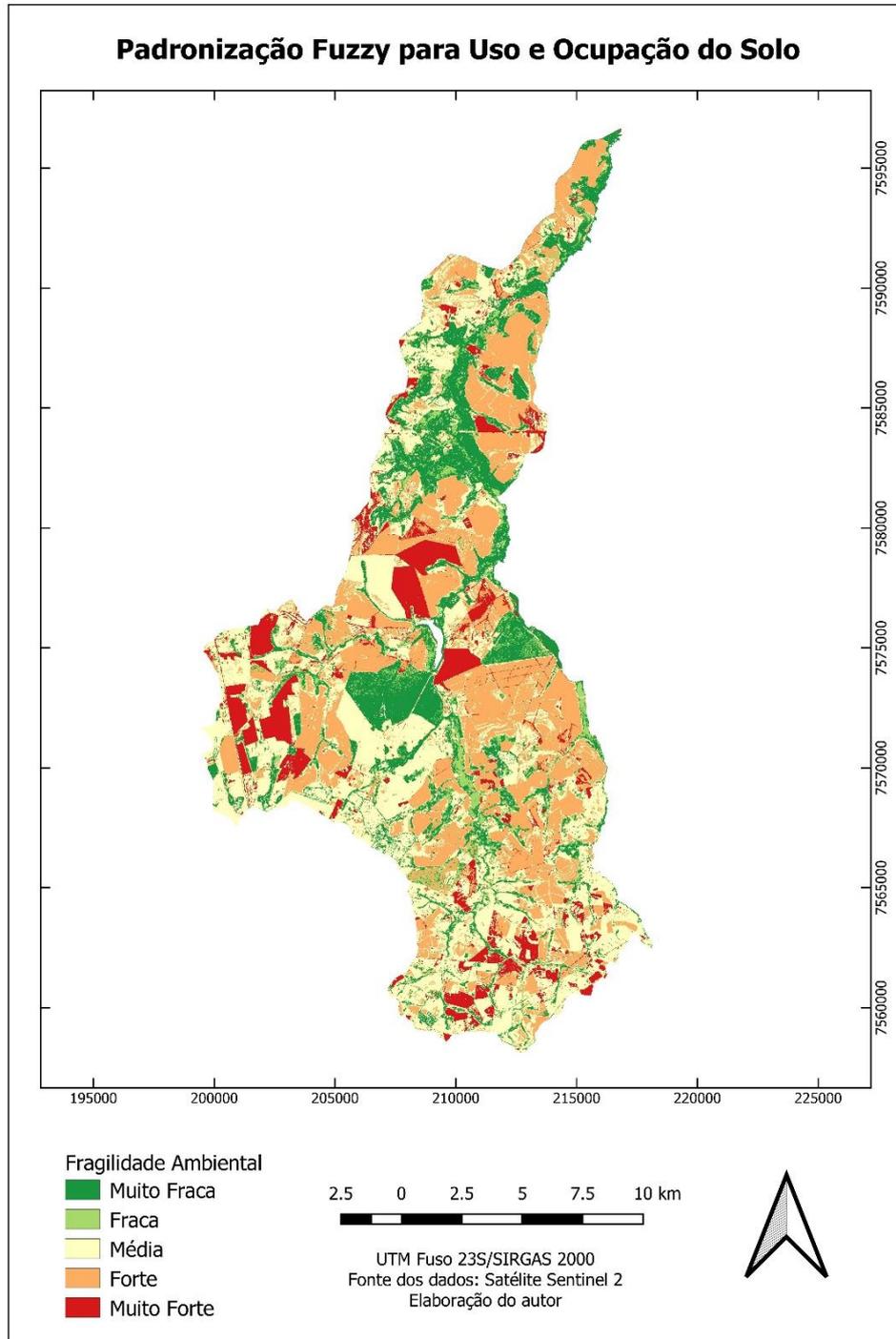
8.7.5 Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo foi considerado neste estudo como o parâmetro de maior relevância para elaboração do mapa de fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio do Quilombo. Isto se dá devido à característica das diferentes coberturas do solo em influenciar diretamente na forma como a água das chuvas escoar pelo terreno e infiltra no solo,

A padronização *fuzzy* para este parâmetro apresentou o predomínio de áreas de fragilidade ambiental “Forte”, devido principalmente à predominância da ocupação da superfície pelo cultivo de cana-de-açúcar. As áreas classificadas como “Muito Fraca”, localizadas principalmente no decorrer dos cursos d’água, correspondem à parcela da bacia recoberta por vegetação nativa, que tem por característica interceptar e diminuir o escoamento superficial da água das chuvas e propiciar sua infiltração, contribuindo positivamente ao regime hídrico da área de estudo e a estabilidade do solo.

As áreas de fragilidade ambiental “Muito Forte” correspondem às áreas onde o solo está sem cobertura vegetal, como as áreas agrícolas em terra nua e os condomínios de chácaras. Nestes locais, o principal fator que contribui para a alta fragilidade é a falta de barreiras de interceptação da água das chuvas e o maior potencial em carreamento de sedimentos de solo pelo escoamento da água superficial, o que pode causar processos erosivos e o assoreamento dos corpos d’água.

A Figura 18 apresenta o mapa com a padronização *fuzzy* para o uso do solo.

Figura 18 – Padronização *Fuzzy* para Uso do Solo.

Fonte: elaborado pelo autor.

8.8 Mapa de Fragilidade Ambiental

Conforme descrito anteriormente, foi elaborado o Mapa de Fragilidade Ambiental utilizando o modelo AHP, Média Ponderada e os modelos de interseção *fuzzy* (AND) e união (OR).

8.8.1 Fragilidade Ambiental – Modelo AHP

Na elaboração do mapa de Fragilidade Ambiental utilizando o modelo AHP, o parâmetro uso e ocupação do solo foi o de maior peso atribuído na modelagem, correspondendo a 50,30%, seguido pela declividade (26%), pedologia (13,4%), distância dos corpos d'água (6,8%) e pluviometria (3,5%).

Com esta distribuição de pesos, os fatores que influenciam na estabilidade geológica e na capacidade de infiltração e retenção do escoamento da água superficial foram priorizados no mapa gerado.

A classe de fragilidade predominante encontrada foi a “Média”, com 37% da área total da bacia, seguida por “Forte”, com 28%, “Fraca”, com 22%, “Muito Forte”, 8% e “Muito Fraca”, com 6% respectivamente.

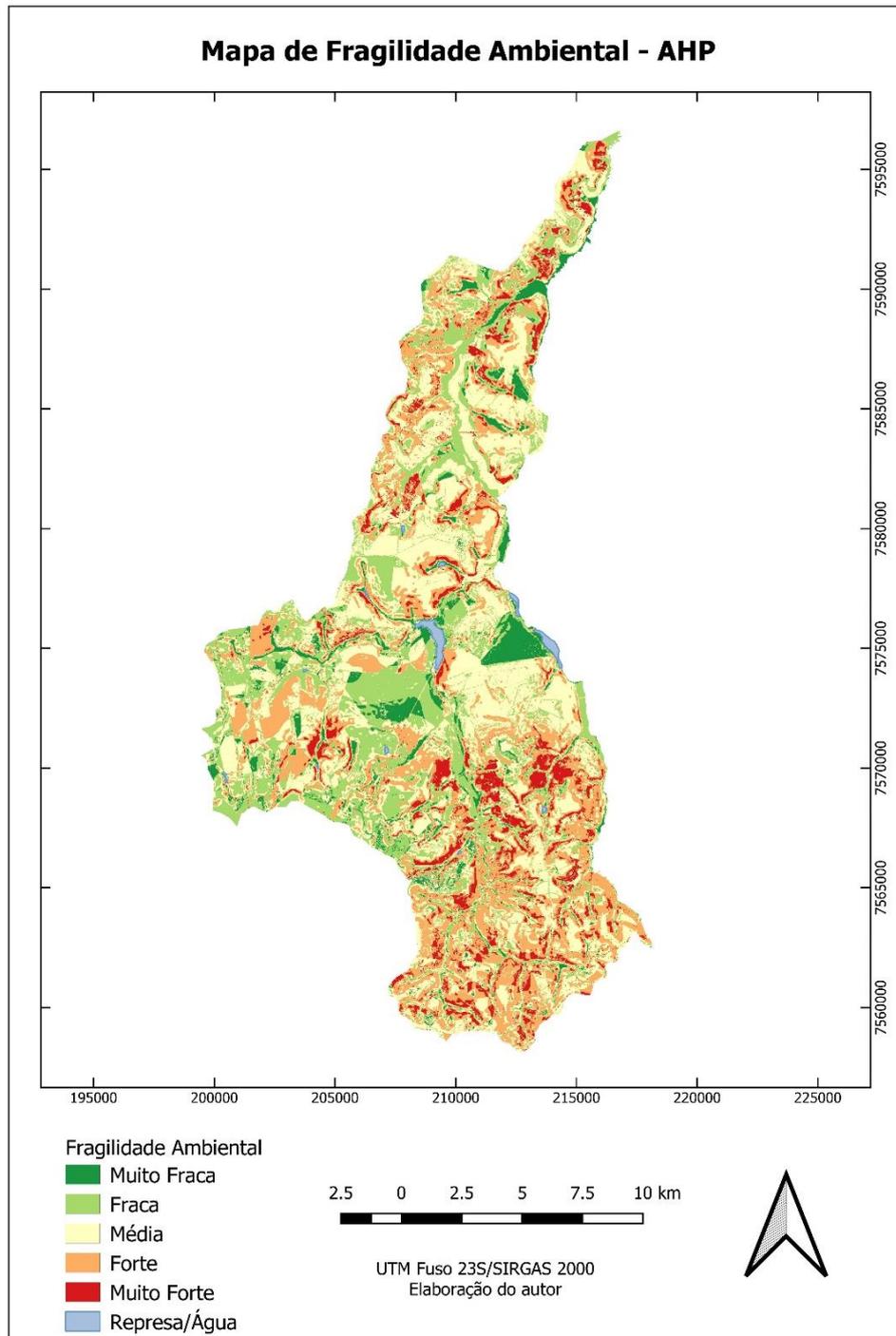
A porção montante da bacia hidrográfica, ao sul, apresentou a maior concentração de valores mais fortes da fragilidade ambiental, resultados este relacionado principalmente à densidade de corpos d'água no local e à predominância de pastagens e canaviais.

Outro ponto de atenção quanto à fragilidade forte encontra-se no decorrer do leito do Rio do Quilombo próximo ao seu encontro com o Rio Mogi-Guaçu. Este resultado foi devido à combinação dos fatores declividade, tipo de solo e à proximidade com o rio, que neste trecho, devido à largura de seu leito, a faixa de APP corresponde a 50 metros.

Na parcela mais urbanizada da bacia, localizada à oeste, os valores de fragilidade ambiental foram mais baixos, predominando as áreas classificadas como “Fraca” e “Muito Fraca”, mesmo com a ocorrência de condomínios de chácaras, consideradas de fragilidade “Muito Forte”. Este resultado deve-se à baixa declividade do relevo e a predominância de Latossolos que tem como característica a alta estabilidade.

Foi observado que o mapa de fragilidade ambiental está condizente com a classificação das Macrozonas descritas no Plano Diretor Municipal. A montante, classificada como área de proteção de mananciais está sobreposta à porção de maior incidência da Fragilidade Ambiental “Forte” e “Muito Forte”. Na porção oeste, designada à expansão urbana, corresponde à porção da bacia que apresentou a maior ocorrência de valores de fragilidade mais fracas. A Figura 22 apresenta o Mapa de Fragilidade Ambiental gerado utilizando o modelo AHP.

Figura 19 – Mapa de Fragilidade Ambiental utilizando AHP.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.8.2 Fragilidade Ambiental – Média Aritmética Ponderada

Para a elaboração do mapa de fragilidade ambiental utilizando a média aritmética ponderada foram aplicados pesos para os parâmetros, conforme sua relevância, sendo o uso e ocupação do solo como o mais relevante, com peso correspondente a 0,45, seguido pela declividade (0,25), pedologia (0,15), distância dos cursos d'água (0,10) e pluviometria (0,05).

Esta atribuição de pesos favoreceu a influência dos fatores relacionados diretamente à estabilidade geológica e na capacidade de infiltração e retenção do escoamento da água superficial foram priorizados no mapa gerado.

A classe de fragilidade predominante encontrada foi a “Média”, com 46% da área total da bacia, seguida por “Forte”, com 29%, “Fraca”, com 18%, “Muito Forte”, 3% e “Muito Fraca”, com 4%.

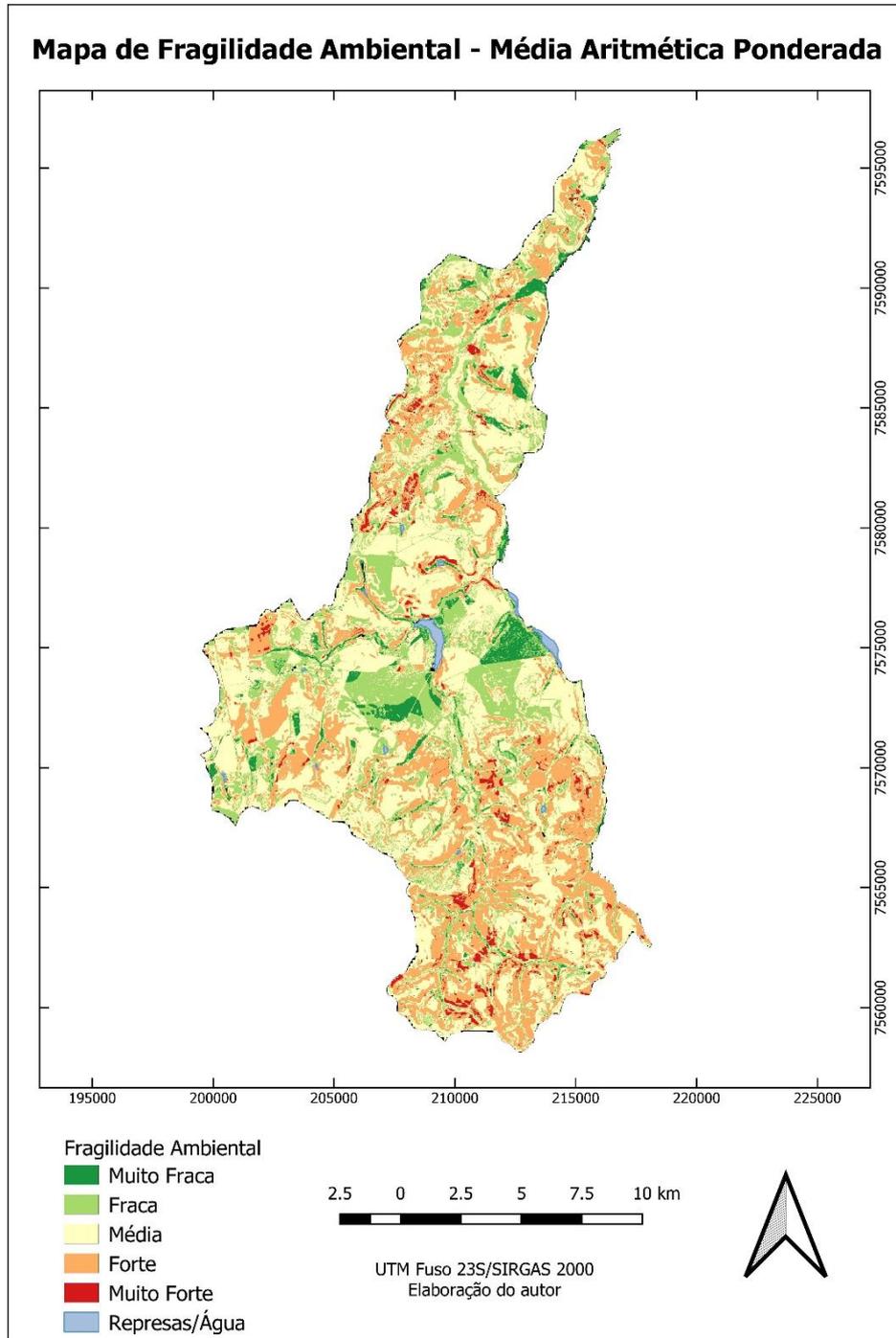
Na porção norte, à montante da bacia hidrográfica foram encontrados os valores de fragilidade ambiental mais altos, com o predomínio da classificação “Forte”, localizado principalmente nas áreas de maior densidade de corpos d'água, porém nas faixas marginais próximas ao leito dos cursos hídricos, principalmente os recobertos por vegetação nativa, a fragilidade ambiental obtida calculada foi “Fraca”.

À oeste, na área destinada à expansão urbana, predominou-se a classe “Média” de fragilidade ambiental. Esta parte da bacia apresenta características do meio físico que favorecem valores de fragilidade mais fracas, como baixa declividade do terreno, menor densidade de corpos hídricos e classes de solo mais estáveis, porém, o uso e ocupação do solo, que neste local predominou valores entre “Forte” e “Muito Forte” acabaram influenciando diretamente no resultado obtido.

Próximo ao reservatório 29, na parcela intermediária da bacia, foi o local onde apresentou os valores mais fracos de fragilidade ambiental, relacionado diretamente à presença de áreas recobertas por vegetação nativa e baixa declividade.

Comparando os resultados obtidos no mapa de Fragilidade Ambiental gerado pela Média Aritmética Ponderada e o Plano Diretor Municipal, pode-se observar que as áreas de maior fragilidade, localizadas à montante da bacia, estão sobrepostas às destinadas à proteção de mananciais e, nas áreas destinadas à expansão urbana, as características do meio físico são favoráveis à urbanização, porém esta ocupação deve ser realizada de forma a prover toda a infraestrutura urbana, a fim de evitar impactos negativos nos corpos d'água.

Figura 20 – Mapa de Fragilidade Ambiental utilizando Média Aritmética Ponderada.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.8.3 Fragilidade Ambiental – Média Aritmética Simples

Para elaboração do mapeamento da fragilidade ambiental utilizando a Média Aritmética Simples, foi realizada o somatório das padronizações *fuzzy* dos parâmetros: declividade, pedologia, uso e ocupação do solo, distância de rios e pluviometria. O resultado do somatório foi dividido por cinco. Neste modelo, não houve atribuição de pesos diferentes, portanto, todos os parâmetros foram considerados como de mesmo grau de relevância na geração do resultado final.

A classe de fragilidade de maior ocorrência foi a “Média”, com 51% da área total da bacia, seguida por “Forte”, com 35%, “Fraca”, com 10%, “Muito Forte”, 3% e “Muito Fraca”, com 0%.

Na porção noroeste da bacia hidrográfica foi onde encontrou-se a maior ocorrência de áreas de fragilidade ambiental classificadas como “Muito Forte” e “Forte”. Estes resultados estão relacionados à alta declividade do local, associada à tipos de solo menos estáveis e à proximidade de corpos d’água.

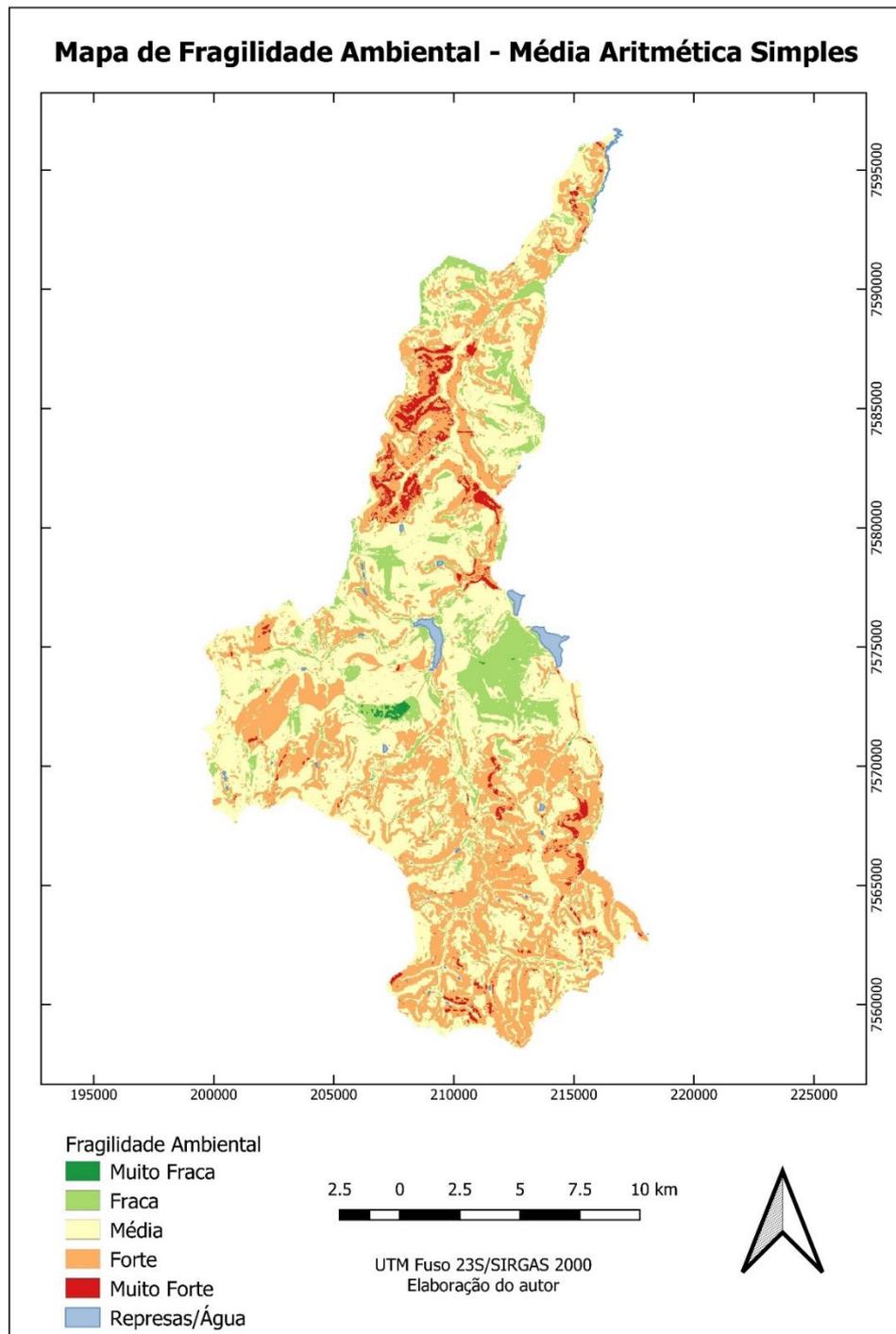
Na parcela montante da área de estudo, predominou-se as classes de fragilidade “Média” e “Forte”, devido principalmente à proximidade com os corpos d’água e o uso e ocupação do solo, onde predomina-se o cultivo de cana-de-açúcar e pastagens.

À oeste, na parcela destinada à expansão urbana, houve o predomínio das áreas de fragilidade “Média” com manchas classificadas como “Forte”, influenciadas principalmente pela ocorrência de condomínios de chácaras.

As áreas de vegetação nativa foram responsáveis pela ocorrência da fragilidade ambiental “Fraca”, que ocorreu principalmente na porção intermediária da bacia.

Sobrepondo os resultados obtidos com o mapa de Macrozonas do Plano Diretor Municipal, foi observado que as áreas de maior fragilidade ambiental estão inseridas nas áreas destinadas à atividade agrícola. Na parcela montante, classificada como área de proteção de mananciais, a fragilidade predominou entre os valores “Média” e “Forte”. Para as áreas propostas para expansão urbana, ocorreu o predomínio da fragilidade “Média”, resultado do predomínio de condições naturais que propiciam a estabilidade do terreno, ficando as áreas de maior fragilidade relacionadas ao uso e ocupação do solo.

Figura 21 – Mapa de Fragilidade Ambiental utilizando Média Aritmética Simples.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.8.4 A aplicação da lógica *fuzzy* não linear no mapeamento da fragilidade ambiental

A lógica *fuzzy* tem por característica a variação gradual entre as diferentes características dos parâmetros analisados, se assemelhando ao encontrado nas condições naturais da área de estudo, onde esta característica foi observada principalmente nas padronizações *fuzzy* geradas para a Declividade e Distância de Corpos Hídricos, Figuras 17 e 18, respectivamente.

A função Sigmoidal na padronização *fuzzy* resultou na predominância dos valores de fragilidade nos extremos da função, ou seja, nos valores “Muito Fraca” e “Muito Forte”, com pouca ocorrência de valores intermediários.

Como exemplo, na padronização *fuzzy* para declividade, os valores “Muito Fraca” e “Muito Forte” representaram respectivamente 51% e 34% da área total da bacia hidrográfica, enquanto que o relevo da área de estudo é pouco acidentado, com média calculada de 8,84%, ou seja, classificado como “Suave Ondulado e “Ondulado” pelo padrão da Embrapa (1979).

A concentração de valores nos extremos máximo e mínimo da padronização *fuzzy* Sigmoidal permite aumentar a relevância de um parâmetro no cálculo final da fragilidade ambiental, pois atribui valores muito baixos ou muito altos mesmo em locais de atributos intermediários.

Esta característica, na correlação direta de parâmetros com valores extremos opostos, pode ocasionar resultados intermediários, ou seja, os parâmetros de Fragilidade Muito Alta e Muito Baixa acabam se anulando, ocasionando no predomínio de valores de Fragilidade “Média”, conforme observado no mapa gerado pelo Modelo da Média Aritmética, onde 51% dos valores gerados apresentaram resultados intermediários de fragilidade.

Observou-se que os modelos que utilizaram a atribuição de pesos diferentes aos parâmetros geraram resultados mais distribuídos pelas cinco classes de fragilidade ambiental. Esta ponderação permite aumentar ou diminuir a relevância de um parâmetro para no cálculo do modelo, diminuindo assim o predomínio de resultados intermediários no mapa gerado.

A aplicação de modelos de álgebra de mapas que permite a atribuição de pesos aos parâmetros, conforme seu grau de influência na fragilidade ambiental permite um maior controle dos resultados gerados, além de diminuir ou aumentar a interferência dos valores mínimo e máximo obtidos na padronização *fuzzy* Sigmoidal.

O modelo AHP dentre os três modelos utilizados nesta pesquisa, foi o que gerou os resultados mais distribuídos entre as cinco classes de fragilidade, foi o que menos apresentou valores intermediários e o que identificou a maior quantidade de áreas de fragilidade ambiental Muito Fraca e Muito Forte.

Como exemplo, o parâmetro declividade tem uma influência na fragilidade ambiental muito maior do que a distância dos cursos d'água, pois está diretamente relacionada à estabilidade do terreno, assim como uma classe pedológica mais instável. Portanto, a atribuição de pesos referentes aos diferentes parâmetros, conforme sua influência na fragilidade ambiental, permite a elaboração de mapas com resultados mais equilibrados, mesmo com a ocorrência de valores concentrados nos extremos mínimo e máximo obtidos na padronização *fuzzy* Sigmoidal.

Neste estudo, observou-se que a padronização *fuzzy* Sigmoidal trouxe resultados interessantes na elaboração dos mapas de fragilidade ambiental gerados. Os parâmetros declividade e distância de corpos d'água influenciaram na identificação das áreas de fragilidade ambiental mais forte localizadas na Macrozona de Proteção de Mananciais. Na porção oeste da bacia hidrográfica, no local destinado à expansão urbana, a padronização *fuzzy* para declividade resultou na predominância de valores de fragilidade intermediários, mesmo quando o uso e ocupação do solo foi classificado como “Forte” ou “Muito Forte”.

Sendo assim, a padronização *fuzzy* Sigmoidal é aplicável para o mapeamento da fragilidade ambiental, mas, sugere-se que sua utilização seja combinada com modelos de álgebra de mapas que permitam a atribuição de pesos diferentes aos parâmetros analisados, de acordo com sua influência e importância na área de estudo.

8.8.5 Resultado obtidos nos mapas de Fragilidade Ambiental gerados

Nesta pesquisa foram gerados mapas de fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Quilombo utilizando três modelos diferentes, o AHP, a Média Aritmética Ponderada e a Média Aritmética Simples.

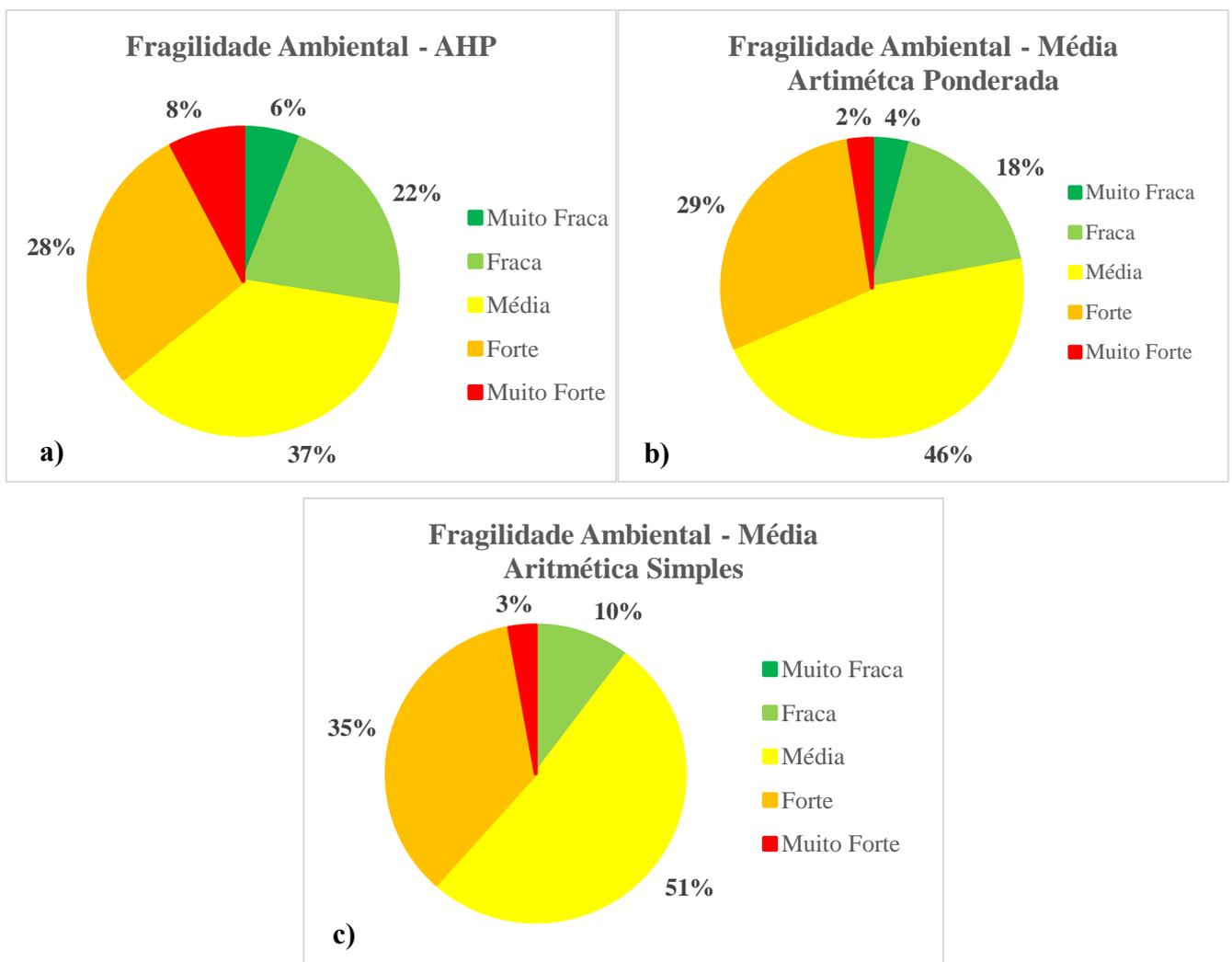
Os parâmetros utilizados na elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental se mostraram adequados. A declividade, o uso do solo e a pedologia são parâmetros amplamente utilizados no mapeamento da fragilidade ambiental, como nas metodologias propostas por Ross (1994), Crepani (1996), Calijuri (2007) e Cereda Junior (2011).

De acordo com a Lei Federal 12.651/2012, as faixas marginais de cursos d'água, nascentes e reservatórios com mais de 1 hectare de espelho d'água são classificadas como APP (BRASIL, 2012), ou seja, são áreas de interesse ambiental e de uso restrito. Com a inclusão do parâmetro de distância de corpos d'água no mapeamento da fragilidade ambiental, proposto por Calijuri (2007), as áreas de APP foram classificadas como de fragilidade “Muito Forte”, o que permitiu inserir análise da proteção dos recursos hídricos nos resultados gerados por esta pesquisa.

O parâmetro pluviometria, proposto por Cereda Junior (2011), inseriu o contexto climático ao mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica da Bacia do Rio do Quilombo. A pluviometria está relacionada diretamente com a infiltração e o escoamento da água superficial, ocasionando no carreamento de sedimentos e na ocorrência de processos erosivos quando combinada com altas declividades, solos pouco estáveis e solo desprotegido de cobertura vegetal. Portanto, a pluviometria é um parâmetro importante no mapeamento da fragilidade ambiental.

A Figura 25 apresenta os gráficos com a distribuição das áreas calculadas para cada classe de fragilidade ambiental nas três metodologias aplicadas.

Figura 22 – Gráficos com os valores obtidos nos mapas de Fragilidade Ambiental gerados: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme observado na Figura 25, a classe de fragilidade ambiental predominante nos três mapeamentos gerados foi a “Média”, seguido pela fragilidade “Forte” e “Fraca”. A classificação “Muito Fraca” ocorreu nos modelos gerados por AHP e Média Aritmética Ponderada, porém não foi observada para a Média Aritmética Simples.

Dos três modelos gerados, o que classificou a maior quantidade de áreas como “Muito Forte” foi o AHP, enquanto que nos mapas elaborados pela Média Aritmética Ponderada e Simples, a fragilidade “Média” ocorreu em praticamente metade da área de estudo.

De modo geral, podemos concluir que a Bacia do Rio do Quilombo encontra-se e sua maior parte em áreas de fragilidade ambiental “Média” e “Forte”, fato este associado ao uso do solo, onde predomina-se a cultura da cana-de-açúcar e pastagens, e à densidade de corpos d’água presentes.

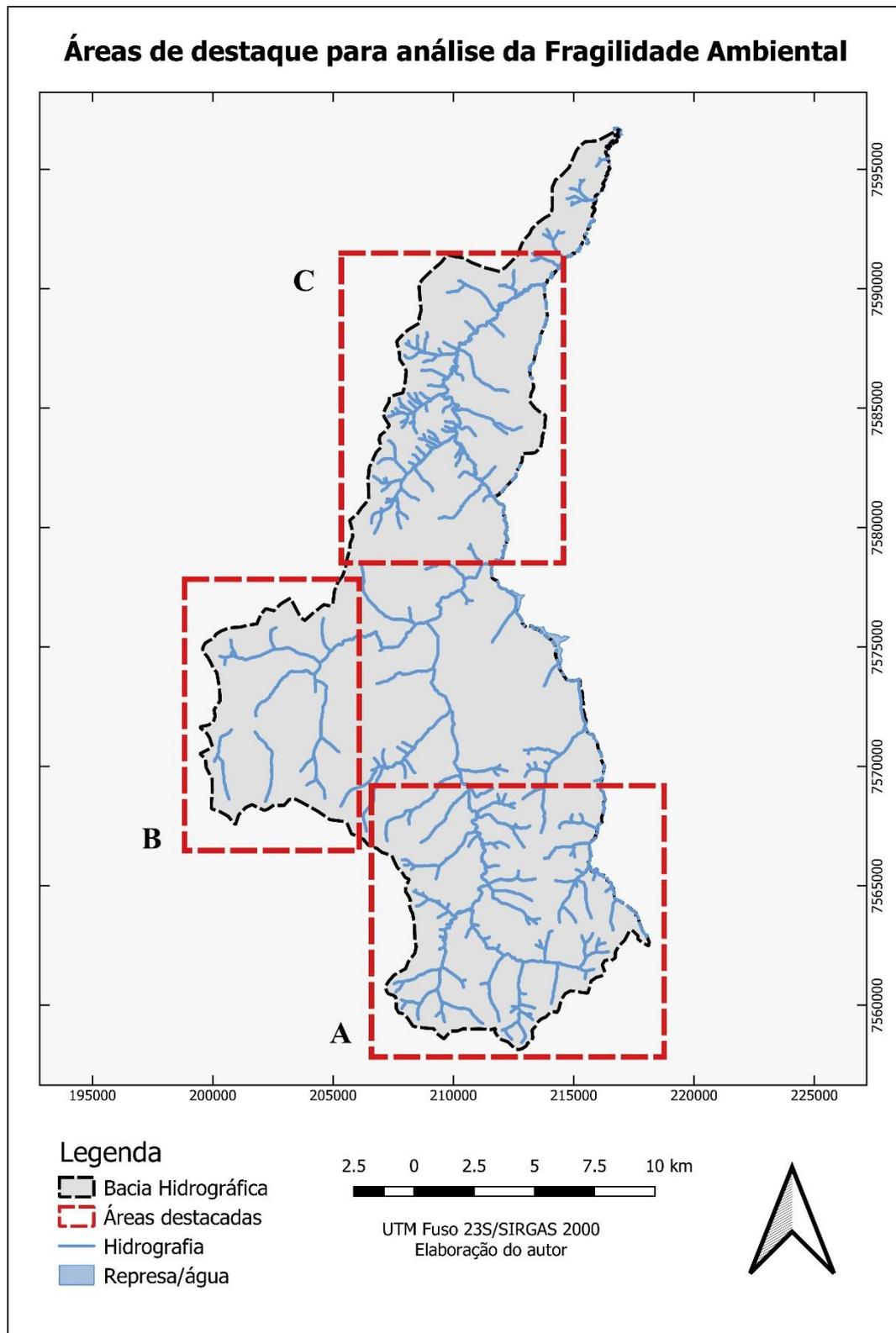
Dentro da Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo, foram destacadas três áreas para fins de comparação entre os resultados obtidos nos três mapas gerados. A escolha destas áreas deu-se pela sua relevância ambiental e para a análise do processo de urbanização na bacia.

A área de destaque “A” refere-se à parcela da bacia hidrográfica classificada pelo Plano Diretor Municipal como “Macrozona de Proteção de Mananciais”, portanto, é uma área de grande interesse ambiental devido à sua importância na preservação dos recursos hídricos do município.

O local destinado à expansão urbana na bacia hidrográfica, delimitada pelo Plano Diretor Municipal, corresponde à área de destaque “B”. Por fim, a área de destaque “C” corresponde ao local onde foi encontrada a combinação dos maiores valores de declividade com solos hidromórficos, ou seja, dois fatores de fragilidade ambiental classificadas como “Muito Forte”.

A Figura 26 apresenta o mapa da bacia hidrográfica com a delimitação das três áreas destacadas.

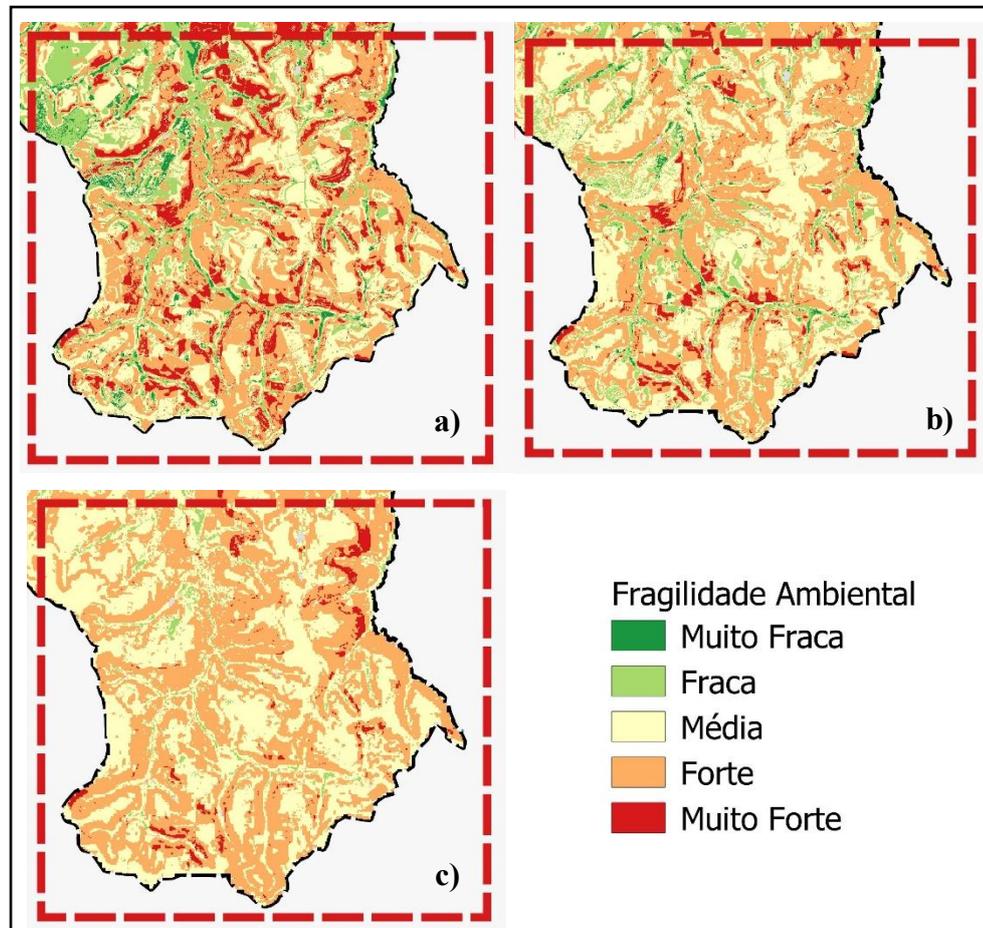
Figura 23 – Localização das áreas destacadas na Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 27 apresenta a área destacada “A” para os três mapas de fragilidade ambiental gerados neste estudo.

Figura 24 – Área destacada “A” para: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 27, é possível verificar que para a área destacada “A”, os mapeamentos elaborados utilizando AHP e a Média Aritmética Ponderada apresentaram resultados mais abrangentes de fragilidade ambiental em relação à Média Aritmética Simples.

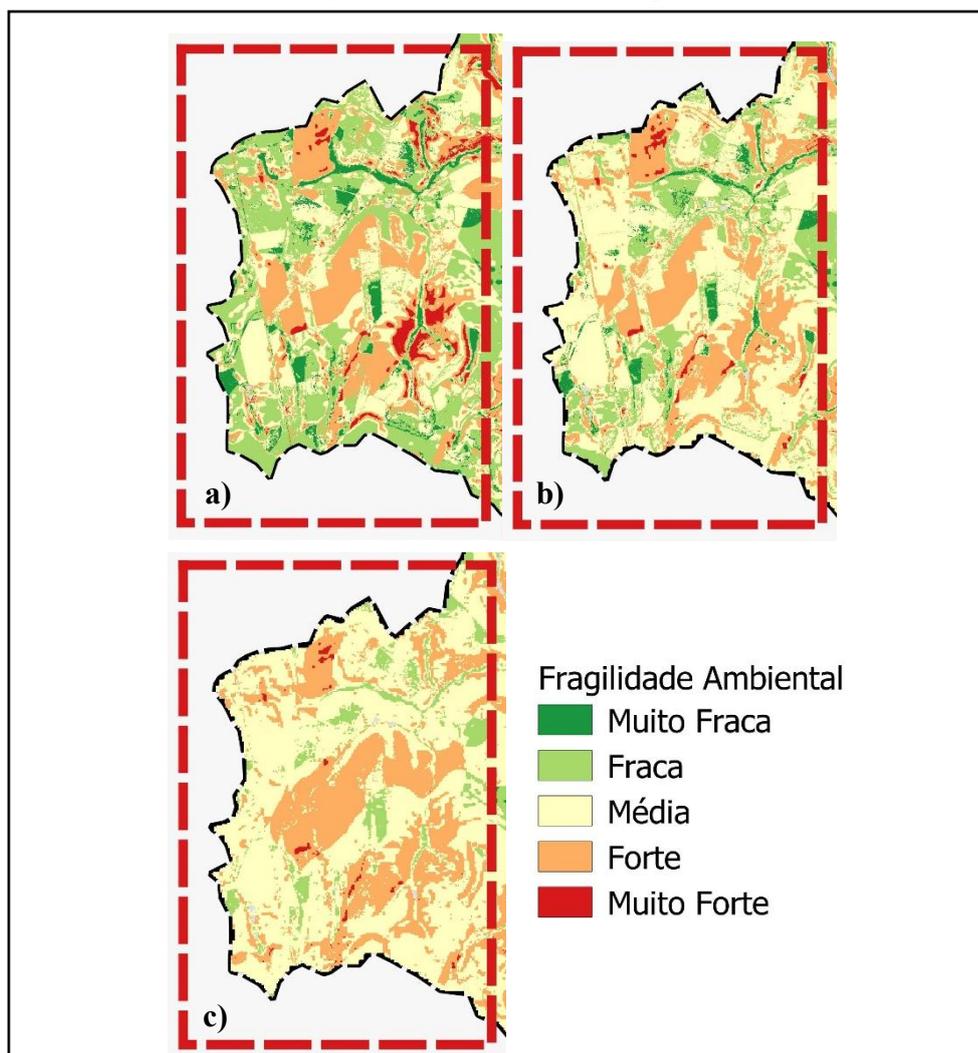
Nos métodos AHP e Média Aritmética Ponderada foi atribuído o maior peso para o parâmetro uso e ocupação do solo, como resultado, é possível verificar a ocorrência de áreas de fragilidade “Fraca” e “Muito Fraca” nos locais recobertos por vegetação nativa e ao longo dos cursos d’água, o que não foi observado no mapa gerado pela Média Aritmética Simples.

Os resultados de fragilidade “Muito Alta” ocorreram em maior quantidade no mapa gerado pelo método AHP em comparação aos outros métodos aplicados. Resultado este relacionado à combinação de altos valores de fragilidade para declividade, distância dos cursos hídricos e para os usos do solo.

O mapeamento elaborado pelos métodos AHP e Média Aritmética Ponderada apresentaram os maiores valores de fragilidade ambiental entre as metodologias analisadas, com os resultados em consonância com as restrições de uso e ocupação devido à sua classificação de Área de Proteção de Mananciais dada pelo Plano Diretor Municipal.

A Figura 28 apresenta a área destacada “B” para os três mapeamentos da fragilidade ambiental elaborados neste estudo.

Figura 25 – Área destacada “B” para: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme observado na Figura 28, o mapeamento elaborado pelo método AHP apresentou a predominância de áreas de menor fragilidade ambiental, enquanto que no resultado obtido pela Média Aritmética Simples se predominou as áreas de média a forte fragilidade.

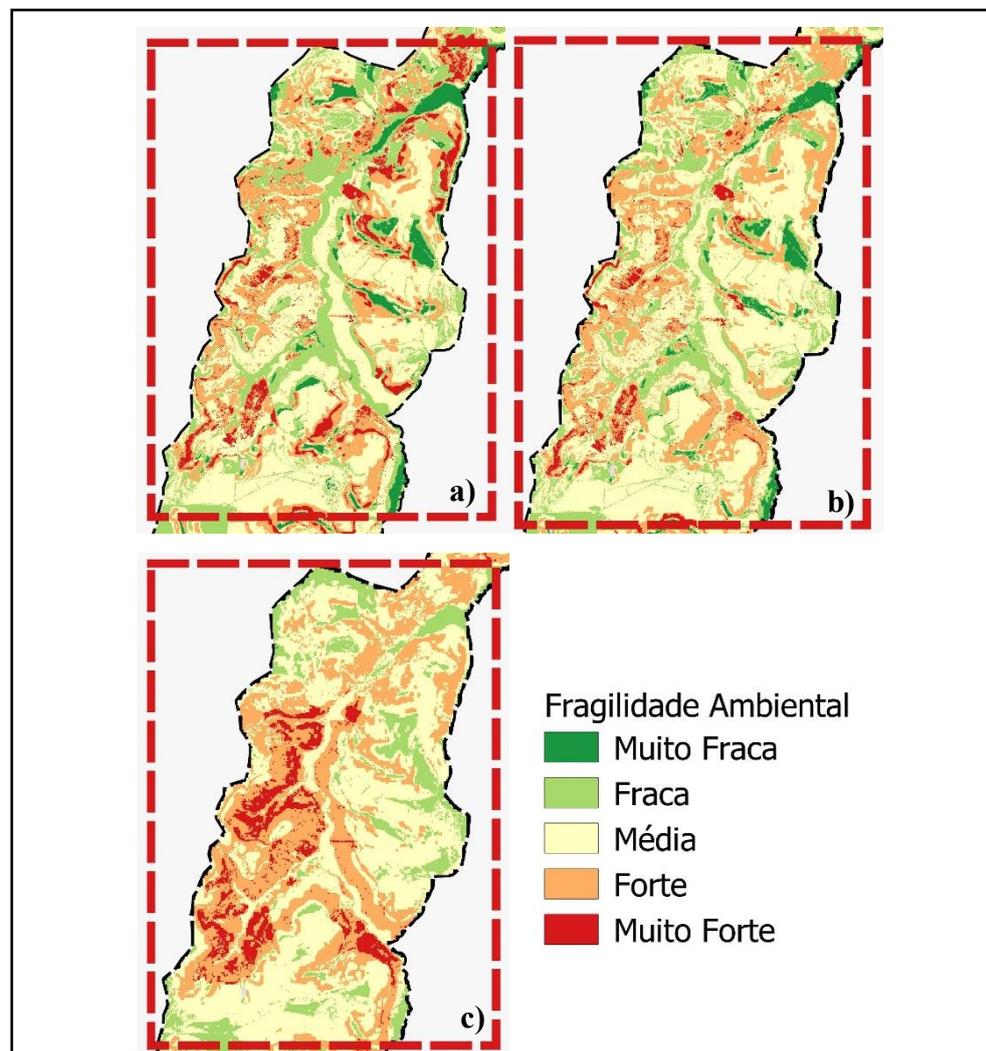
Nesta área destacada, comparando os resultados apresentados em a) e c), mostra a influência da aplicação de pesos entre os diferentes parâmetros analisados. O uso e ocupação

do solo nesta área é predominado por classes de fragilidade “forte” e “muito forte”, porém, os atributos do meio físico são de fraca fragilidade, como a declividade e a distância de corpos d’água. Para a Média Aritmética Simples, onde não há aplicação de pesos, a alta fragilidade para o uso do solo resultou no predomínio do valor “Média”, e para o AHP, mesmo com a atribuição do maior peso para o uso e ocupação do solo, a combinação de características naturais favoráveis do local se sobressaíram, gerando resultados de menores de fragilidade.

Dentro dos três mapas gerados neste estudo, o que está mais próximo das diretrizes do uso e ocupação da bacia hidrográfica, dado pelo Plano Diretor Municipal foi o elaborado pelo método AHP.

A Figura 29 apresenta a área destacada “C” para os três mapeamentos da fragilidade ambiental elaborados neste estudo.

Figura 26 – Área destacada “C” para: a) Modelo AHP; b) Média Aritmética Ponderada e c) Média Aritmética Simples.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 29, os valores obtidos por AHP e Média Aritmética Ponderada apresentaram fragilidade ambiental mais fracas comparado à Média Aritmética Simples. Neste caso, fica-se evidente a influência da atribuição de pesos no resultado dos mapas gerados. Na correlação simples, sem ponderação, a fragilidade ambiental muito forte predominou, isto se deve à combinação das características naturais do terreno, como a alta declividade, solos mais frágeis e proximidade de cursos d'água. Nos modelos com ponderação dos parâmetros, esta fragilidade ambiental foi atenuada devido à influência do uso e ocupação do solo encontrado no local, predominante de vegetação nativa.

Com a comparação dos resultados obtidos nos três modelos aplicados, pode-se observar que os locais de fragilidade ambiental mais baixa estão relacionados principalmente à cobertura vegetal nativa presente nestes locais.

O mapa gerado pela Média Aritmética Simples gerou resultados de fragilidade ambiental obtidos pela correlação direta das características do local. Este tipo de correlação de dados permitiu analisar de forma igual os parâmetros do meio físico: declividade, distância de rios, pedologia e pluviometria com o uso e ocupação do solo, influenciado diretamente pelas atividades antrópicas. Portanto, é possível concluir que os resultados obtidos por este método representam a fragilidade ambiental potencial, ou seja, demonstram as áreas de maior ou menor potencial de atividades humanas conforme as características naturais do local.

Os modelos AHP e Média Aritmética Ponderada permitiram a atribuição de pesos diferentes para os parâmetros analisados que, neste estudo, o uso e ocupação do solo e a declividade foram os mais representativos. Nestes métodos, foi observado que as locais de fragilidade ambiental mais fracas estavam relacionadas predominantemente aos pontos recobertos por vegetação nativa. Devido à maior influência do uso e ocupação do solo, os resultados obtidos por estes métodos podem variar conforme as atividades humanas realizadas no local, sendo assim, em um ponto que apresentou fragilidade ambiental muito baixa devido à cobertura vegetal nativa no local, poderá ter seu resultado alterado se esta vegetação for substituída por outra atividade mais impactante.

Mesmo apresentando resultados melhor distribuídos nas diferentes classes de fragilidade, os modelos AHP e Média Aritmética Ponderada devem ser utilizados com ressalva, pois a fragilidade ambiental está diretamente relacionada ao uso e ocupação do solo, portanto, um local de fragilidade fraca ou muito fraca não necessariamente representa características naturais mais aptas às atividades humana. Portanto, sugere-se que os resultados obtidos por estes modelos sejam analisados em conjunto com a Fragilidade Ambiental Potencial, gerado neste estudo pela Média Aritmética Simples.

8.9 As diretrizes do Plano Diretor Municipal e a Fragilidade Ambiental

O Plano Diretor Municipal instituiu as diretrizes para a ocupação e expansão do perímetro urbano e o ordenamento e restrição do uso do solo no município de São Carlos, sendo consideradas prioritariamente a proteção ambiental e a demarcação das diretrizes viárias (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS, 2016).

Conforme o Mapa de Fragilidade Ambiental Potencial, gerado pela Média Aritmética Simples, a área de estudo apresentou fragilidade “Média” e “Alta” em 86% de sua extensão, ou seja, o local apresenta características naturais que exigem diretrizes mais restritivas para a urbanização e para implementação de atividades humanas de alto impacto ambiental.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Quilombo, as diretrizes de urbanização, estão condicionadas às necessidades de se aprimorar a infraestrutura viária e de drenagem urbana existente, o controle do adensamento urbano e a proteção e recuperação das APPs e de áreas ambientais frágeis. Estas condições são justificadas pelas restrições à ocupação humana das características do meio físico-ambiental encontradas na área de estudo (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS, 2016).

O condicionamento da expansão urbana com a adequação da drenagem urbana é uma diretriz de grande importância, pois o processo de urbanização, observado em 2017, na Bacia Hidrográfica foi predominado por condomínios de chácaras, que geralmente apresentam sistemas de drenagem de água pluvial insipiente que, combinado com vias de acesso sem pavimentação, propiciam o carreamento de sedimentos de solo para os cursos d’água mais próximos.

A Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo é classificada como apta para a captação de água destinada ao abastecimento público de São Carlos. A porção montante desta bacia é classificada pelo Plano Diretor como área de proteção de mananciais e, de acordo com os mapas de fragilidade gerados neste estudo, os resultados predominantes para o local foram “Média” e “Alta”. Portanto, devido à importância e à fragilidade ambiental do local, as diretrizes e o zoneamento para uso e ocupação do solo proposto pelo Plano Diretor Municipal devem ser seguidos, para evitar e mitigar os impactos negativos das atividades humanas sobre a disponibilidade e a qualidade da água dos recursos hídricos.

A proteção e recomposição da vegetação nativa, principalmente nas áreas de preservação permanente são diretrizes indispensáveis para a proteção dos recursos hídricos encontrados na bacia hidrográfica. Nos mapas de Fragilidade Ambiental gerados pelos modelos

AHP e Média Aritmética Ponderada, os locais de menor fragilidade ambiental estão diretamente relacionados à cobertura vegetal nativa, demonstrando sua importância.

Apesar da cobertura vegetal nativa representar 25,06% do total da área de estudo em 2017, o uso predominante do solo foi o cultivo de cana-de-açúcar e pastagens, que são classificados como de fragilidade ambiental “Alta”, principalmente a cana-de-açúcar, que após a colheita ou na época de seu plantio, deixa o solo desprotegido em plena época de chuvas, favorecendo a ocorrência de processos erosivos e o carreamento de sedimentos, causando o assoreamento dos corpos d’água.

Na porção oeste da área de estudo, onde pelo Plano Diretor Municipal são áreas destinadas à expansão urbana, verificou-se o predomínio da Fragilidade Ambiental Potencial “média”, devido principalmente ao tipo de solo e à baixa declividade registrada no local.

As metodologias AHP e Média Aritmética Ponderada, aplicadas nesta pesquisa, se basearam no uso e ocupação do solo como parâmetro de maior peso no mapeamento da fragilidade ambiental, ou seja, qualquer alteração na cobertura do solo tem influência direta nos resultados. Sendo assim, a elaboração de diretrizes e regramentos para o uso e ocupação do solo, em conjunto com a proteção dos recursos naturais e a recuperação da vegetação nativa nas APPs e em áreas ambientais frágeis são fatores de grande importância para a proteção dos recursos hídricos e ao desenvolvimento sustentável.

Portanto, comparando os resultados para fragilidade ambiental obtidos pelas três metodologias aplicadas neste estudo com as diretrizes do Plano Diretor Municipal, foi possível verificar que as mesmas estão condizentes. Devido as características naturais e à sua importância para o abastecimento de água para o município de São Carlos, o local deve ter sua urbanização restrita aos locais destinados a este fim pela legislação, além da promoção da proteção e recomposição da vegetação nativa do local.

9. CONCLUSÕES

A função Sigmoidal na padronização *fuzzy* resultou na predominância dos valores de fragilidade nos extremos da função, ou seja, nos valores “Muito Fraca” e “Muito Forte”, com pouca ocorrência de valores intermediários.

Como exemplo, na padronização *fuzzy* para declividade, os valores “Muito Fraca” e “Muito Forte” representaram respectivamente 51% e 34% da área total da bacia hidrográfica, enquanto que o relevo da área de estudo é pouco acidentado, com média calculada de 8,84%, ou seja, classificado como “Suave Ondulado e “Ondulado”.

A concentração de valores nos extremos máximo e mínimo da padronização *fuzzy* Sigmoidal aumenta a relevância de um parâmetro no cálculo final da fragilidade ambiental, pois atribui valores muito baixos ou muito altos mesmo em locais de características naturais intermediários.

Para fatores de grande relevância para a fragilidade ambiental, como a declividade, a predominância de valores extremos pode ressaltar as características do relevo na elaboração do mapa final, porém se utilizado para todos os parâmetros, pode ocorrer a predominância de valores intermediários no mapa de fragilidade ambiental final, pois na correlação entre parâmetros de valores muito altos e baixos tendem à valores médios, o que pode induzir a resultados não condizentes com as características naturais do local. Outra possibilidade é a correlação entre dois ou mais dados de valores extremos que acabam diminuindo a relevância de outros parâmetros, gerando resultados dissonantes das características do local.

Portanto, a utilização da padronização *fuzzy* Sigmoidal para o mapeamento da fragilidade ambiental deve ser utilizada com cautela, e de preferência, associada a métodos de álgebra de mapas que permitam a atribuição de pesos diferentes conforme a relevância dos parâmetros analisados.

A aplicação de modelos de álgebra de mapas que permitem a atribuição de pesos aos parâmetros, conforme seu grau de influência na fragilidade ambiental permite um maior controle dos resultados gerados, além de diminuir ou aumentar a interferência dos valores mínimo e máximo obtidos na padronização *fuzzy* Sigmoidal.

O parâmetro distância dos corpos d’água, utilizado neste estudo permitiu a inclusão da proteção dos recursos hídricos no mapeamento da fragilidade ambiental, pois a Lei Federal 12.651/2012 classifica as faixas marginais de rios, nascentes e represas como áreas de preservação permanente, ou seja, locais em que as atividades humanas são restritas, com a função principal de proteção dos recursos hídricos e a estabilidade geológica.

A inclusão do atributo pluviometria inseriu no cálculo o fator climático encontrado na área de estudo. Chuvas intensas e em grande quantidade é um dos fatores preponderantes para a ocorrência de processos erosivos e o carreamento de sedimentos para os corpos hídricos, portanto, este é um parâmetro de grande importância a ser considerado na fragilidade ambiental.

A cobertura do solo, no ano de 2017, na bacia hidrográfica do Rio do Quilombo foi ocupada por pastagens seguido por canaviais, correspondendo a 27,85% e 25,64% do total da área de estudo respectivamente. A fragilidade ambiental atribuída à pastagem é “Média”, enquanto que para os canaviais é de “Alta”, ou seja, 53% da área estudada está ocupada por usos do solo de fragilidade entre média e forte. A vegetação nativa, classificada como de fragilidade “Muito Fraca” recobre 25,06% da bacia hidrográfica.

Em 2017, as áreas urbanas representaram 2,9% do total da bacia hidrográfica analisada e sua expansão está prevista, pelo Plano Diretor, próxima aos limites do perímetro urbano de São Carlos e dos distritos de Água Vermelha e Santa Eudóxia. Conforme as diretrizes instituídas, o processo de urbanização e sua expansão estão condicionadas à adequação da infraestrutura de mobilidade urbana e de drenagem urbana, assim como a baixa densidade populacional.

Neste estudo foi elaborado o mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo utilizando três métodos: AHP, Média Aritmética Ponderada e Média Aritmética Simples.

Os métodos AHP e Média Aritmética permitiram a atribuição de pesos conforme a relevância do parâmetro na fragilidade ambiental, sendo o de maior importância o uso e ocupação do solo, seguido pela declividade, pedologia, distância de corpos d'água e pluviometria. A Média Aritmética Simples foi utilizada como um parâmetro de comparação, pois a correlação dos parâmetros neste modelo é realizada de forma direta, sem hierarquização.

O mapeamento da fragilidade ambiental, elaborado pelo método AHP, ocorreu o predomínio das áreas classificadas como “Média”, em 37% da área total da bacia hidrográfica, sendo seguido pelos resultados “Forte”, com 28%, “Fraca”, em 22%, “Muito Forte” ocorrendo em 8% e “Muito Fraca”, com 6%, respectivamente.

Os resultados obtidos de fragilidade obtidos por meio de Média Aritmética Ponderada, foram predominadas pela classificação “Média” em 46%, “Forte” para 29%, “Fraca” em 18%, “Muito Fraca” com 4% e “Muito Forte” em 2% respectivamente.

Para a Média Aritmética Simples, 51% da área total da bacia hidrográfica se encontra classificada como de fragilidade ambiental “Média”, seguida por “Forte”, com 35%, “Fraca”,

em 10% e 3% para “Muito Forte”. Como observado, não ocorreu a classificação “Muito Fraca” neste modelo.

Comparando a distribuição das classes de fragilidade para cada um dos três modelos propostos mostram coerência nos resultados obtidos, pois nos três resultados predominaram os valores intermediários. Nos modelos AHP e Média Aritmética Ponderada, os resultados obtidos foram mais distribuídos pelas cinco classes de fragilidade em comparação com a Média Aritmética Simples.

Por correlacionar os parâmetros se a atribuição de pesos diferentes, a Média Aritmética Simples trouxe resultados com menor influência de atividades humanas comparado aos outros modelos aplicados neste estudo, portanto, pode-se concluir que este método gerou o mapa da Fragilidade Ambiental Potencial da área de estudo, isto é, os dados obtidos referem-se prioritariamente às características do meio físico encontradas.

A preponderância do uso do solo no mapeamento da fragilidade ambiental proposta nos modelos AHP e Média Aritmética Ponderada dá maior relevância à cobertura do solo, onde as alterações nas atividades empregadas irá afetar na classificação de fragilidade. Os resultados obtidos por estes métodos devem ser analisados com cautela, pois locais que apresentam valores de baixa fragilidade podem estar relacionados à usos do solo de maior grau de proteção, como vegetação nativa e não às características do meio físico.

Portanto, devido às características dos três modelos aplicados nesta pesquisa, sugere-se para a análise da fragilidade ambiental a utilização dos modelos da Média Aritmética Simples, que representa a fragilidade ambiental potencial com um dos métodos de correlação ponderada. A fragilidade ambiental potencial permite avaliar as restrições e potencialidades do local conforme as características do meio físico da área de estudo. Já os métodos AHP e Média Aritmética Ponderada possibilitam verificar a influência da cobertura dos solo e atividades exercidas na proteção do local.

Comparando os dados da fragilidade ambiental com a classificação das Macrozonas e as diretrizes instituídas pelo Plano Diretor Municipal de São Carlos, mostrou coerência entre si. A Fragilidade Ambiental Potencial encontrada apresentou 86% da extensão da área de estudo nas classes “Média” e “Alta”, ou seja, as características naturais do local são passíveis de ocupação, mas com restrições.

As diretrizes de ocupação dadas pelo Plano Diretor Municipal na Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo foram baseadas nas limitações da infraestrutura viária e de drenagem da água pluvial e das características do meio físico-natural.

O condicionamento da expansão urbana com a adequação da drenagem urbana é uma diretriz de grande importância, pois o processo de urbanização, observado em 2017, na Bacia Hidrográfica foi predominado por condomínios de chácaras, que geralmente apresentam sistemas de drenagem de água pluvial insipiente que, combinado com vias de acesso sem pavimentação, propiciam o carreamento de sedimentos de solo para os cursos d'água mais próximos.

A Macrozona de Proteção de Áreas de Mananciais está sobreposta à porção montante da bacia hidrográfica, onde foram encontrados valores de alta fragilidade ambiental devido principalmente à densidade de corpos d'água. As diretrizes de ocupação desta área instituem a ocupação predominante por atividades agrícolas e a promoção da proteção e recuperação das APP e da vegetação nativa.

Na parcela oeste da área de estudo, está localizada a Macrozona de Expansão Urbana, sobrepostas a áreas de fragilidade ambiental predominante média, devido à baixa declividade, à menor densidade hídrica e às características pedológicas mais estáveis. Neste caso, a urbanização está condicionada, além da adequação da infraestrutura urbana e a proteção do meio ambiente, à modelos de baixa a média densidade populacional, ou seja, levando em consideração às restrições naturais encontradas.

Pode-se concluir que o Plano Diretor Municipal e as diretrizes para a expansão urbana e para o uso e ocupação dos solos estão em concordância com as características naturais da Bacia Hidrográfica do Rio do Quilombo e com o mapeamento da Fragilidade Ambiental elaborado neste estudo.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉS, E. G. DE et al. **Aplicaciones de SIG y Teledetección en Ecología. Guión de prácticas de la asignatura**. 1. ed. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, 2014.

ARCURI, M. E. P. **Planejamento ambiental através de análise de informações em bases cartográficas: o caso de estudo da microbacia Santa Eliza, Rio Claro - SP**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

ASSAD, M. L. L. Uso de um Sistema de Informações Geográficas na determinação da aptidão agrícola das terras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, n. 1, p. 133–139, 1995.

BARROW, C. J. River basin development planning and management: A critical review. **World Development**, v. 26, n. 1, p. 171–186, 1 jan. 1998.

BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. Detalhamento da metodologia para execução do Zoneamento Ecológico-Econômico pelos Estados da Amazônia Legal. **SAE e MMA**, p. 40, 1996.

BEPPLER, M.; JUSTINO, G. Avaliação espaço-temporal da cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do Rio Miriri (PB). In: SOUSA, R. F. DE; FALCÃO, E. C. (Eds.). **Geoprocessamento Aplicado - Contexto Multidisciplinar**. E-book ed. João Pessoa: IFPB, 2017. p. 292.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. . 1988.

BRASIL. Lei Federal 9.433 de 08 de janeiro de 1997. . 1997.

BRASIL. Lei Federal 12.651 de 25 de maio de 2012. . 2012.

BUDRYTE, P.; HELDT, S.; DENECKE, M. Foundations of the participatory approach in the Mekong River basin management. **Science of The Total Environment**, v. 622–623, p. 349–361, maio 2018.

BURROUGHT, P. A. Development of intelligent geographical information system. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 1, p. 1–11, 1992.

CALIJURI, M. L. et al. Proposta metodológica para geração da carta de fragilidade ambiental, utilizando lógica fuzzy e combinação linear ponderada. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 1977, p. 3311–3318, 2007.

CÂMARA, G. et al. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 1996.

CÂMARA, G. et al. 1.1 Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. [s.l.] INPE, 2004.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. **Introdução à Ciência da Geoinformação**, p. 1–35, 2001.

CÂMARA, G.; QUEIROZ, G. R. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. **Introdução à Ciência da Geoinformação**, p. 1–12, 2001.

CEREDA JUNIOR, A. **Análise de fragilidade ambiental com métodos multicritérios - Críticas e proposta metodológica**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, 2011.

CEREDA JUNIOR, A. Inteligência Geográfica e a transformação digital : competências básicas na Gestão do Território alavancando oportunidades profissionais. **Revista Digital de Engenharia da APEAESP**, n. 1, p. 1–10, 2017.

CORSEUIL, C.; CAMPOS, S. Análise de adequação do uso das terras por meio de técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios. **Anais XIII Simpósio ...**, n. 2003, p. 2471–2478, 2007.

CREPANI, E. et al. Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico. **INPE, São José dos Campos**, 1996.

CREPANI, E. et al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. **Inpe (Inpe-8454-Rpq/722)**, p. 103, 2001.

CRUZ, B. B. et al. Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the Paulista Macro Metropolis area (SE Brazil). **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 12, 2017.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia Para Geoprocessamento. **Introdução à Ciência da Geoinformação**, p. 1–32, 1991.

DALLA CORTE, A. P. et al. Environmental fragility of Iguazu river watershed, Paraná, Brazil. **Bosque (Valdivia)**, v. 36, n. 2, p. 287–297, 2015.

DE CARVALHO, G. B. **Análise em bacias hidrográficas: Contribuição metodologica para o diagnóstico ambiental**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2013.

DONHA, A. G. .; SOUZA, L. C. DE P. .; SUGAMOSTO, M. L. . Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG Environmental fragility determination using decision support techniques and GIS. **Revista Bras. Eng. Agríc. Ambiental Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 175–181, 2006.

DORICI, M. et al. Accelerated erosion in a watershed in the southeastern region of Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 19, 2016.

EMBRAPA. **Serviço Nacioanal de Levantamento de Solos**. Reunião Técnica de

Levantamento de Solos. **Anais...1979**

EMBRAPA. **Condições Meteorológicas**. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=caracterizacao>>. Acesso em: 29 out. 2017.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l: s.n.].

ERDOĞAN, M. A.; ESBAH, H.; BERBEROGLU, S. Erosion risk mapping using rusle with GIS: Case study of Büyük Menderes river basin of Turkey. **International Journal of Safety and Security Engineering**, v. 6, n. 2, p. 132–140, 2016.

FAGUNDES, J. R. T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 6 dez. 2010.

FAILACHE, M. F. **Estudo Comparativo de duas metodologias na definição de Unidades Geoambientais: Ribeirão do Feijão (São Carlos-SP)**. [s.l.] UFSCAR, 2015.

FONSECA, D. DE S. R. **Avaliação temporar por NDVI em ambiente naturais na área de preservação ambiental do Rio Pandeiros/MG**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

FREITAS, M. A. DE; MENDES, C. A. B. Definição de áreas de proteção em aquíferos fraturados através de modelagem de mapas com sistema de informações geográficas. **Águas Subterrâneas**, v. 01, n. 051, p. 1–8, 1998.

FUKS, S. D. Novos modelos para mapas derivados de informações de solo. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Eds.). . **Sistemas de Informações Geográficas na Agricultura**. 2a. ed. Brasília: Embrapa, 1998. p. 373–410.

GARCIA, Y. M. **DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO PEDERNEIRAS – PEDERNEIRAS/SP**. [s.l.] UNESP, 2017.

GARÓFALO, D. T.; FERREIRA, M. C. Mapeamento de fragilidade ambiental por meio de análise geoespacial: uma aplicação na alta bacia dos Rios Piracicaba e Sapucaí-Mirim, APA Fernão Dias, MG. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 29, n. 2015, p. 212 a 245, mar. 2015.

GASHAW, T. et al. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. **Science of The Total Environment**, v. 619–620, p. 1394–1408, abr. 2018.

GOMES, R. L.; MARQUES, E. A. G.; FRANCO, G. B. Aptidão da Bacia Hidrográfica do Rio Almada diante da implantação de áreas para disposição ambiental de rejeitos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, n. 0, p. 731–747, 2017.

HIRATA, R. C. A.; BASTOS, C. R. A.; ROCHA, G. A. **Mapeamento da vulnerabilidade e risco de ooluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. 2 v. ed. São Paulo: Instituto Geológico - IG/SMA, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB/ Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE/SERJ, 1997.

HONDA, S. C. DE A. L. et al. Planejamento ambiental e ocupação do solo urbano em Presidente Prudente (SP). **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 7, n. 1, p. 62–73, 2015.

IBGE. **Brasil 500 anos**. Disponível em: <<https://brasil500anos.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

IBGE. **Atlas do Censo Demográfico de 2010**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=354890&search=%7C%7Cinfor%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>>. Acesso em: 31 out. 2017.

IDEA - SMA/SP. **DATAGEO**. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

INPE. **Topodata - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

JORGE, M. DO C. O. **Zoneamento Ambiental do Município de Ubatuba - SP**. [s.l.] UNESP, 2004.

KAWAKUBO, F. S. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 1994, p. 2203–2210, 2005.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1998.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2009.

LORANDI, R.; CANÇADO, C. J.; LOLLO, J. A. DE. **Apostila. Projeto Cartográfico Geoambiental**. CAM-007 ed. São Carlos: UFSCAR, 2014.

MACEDO, D. R. et al. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 1267–1279, 2018.

MAGANHOTTO, R. F.; SANTOS, L. J. C.; DE OLIVEIRA FILHO, P. C. Análise da fragilidade ambiental como suporte ao planejamento do ecoturismo em unidades de conservação: estudo de caso flona de Irati-Pr. **Revista Científica do Centro Universitário de Araras**, v. 5, n. 1, p. 38–50, 2011.

MATEUS, R.; PADILHA, D. Avaliação multicritério da fragilidade do território no

Brasil . A silvicultura no Estado do Rio Grande do Sul. **Finisterra**, v. 52, n. 104, 2017.

MIRANDA, J. G. DE. **Mapeamento geotécnico e estudo da susceptibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala : 1 : 100 . 000.** [s.l.] USP, 2005.

MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C.; CÂMARA, G. Inferência Geográfica e Suporte à Decisão. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). . **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos/SP: INPE, 2001. p. 345.

MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G.; FILHO, R. A. **Técnicas de suporte a decisão para modelagem geográfica por álgebra de mapas.** São José dos Campo: [s.n.].

NERIS, F. L. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais.** 1. ed. Crisciúma: UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC, 2011. v. 1

NETO, J. C. A. DA S. **Zoneamento ambiental como subsídio para ordenamento do território da bacia hidrográfica do Rio Salobra, serra da Bodoquena - MS.** [s.l.] Universidade Estadual Paulistam Presidente Prudente, 2013.

NORA, E. L. D. **Caracterização e diagnóstico ambiental das zonas de amortecimento de áreas naturais legalmente protegidas. Estudo de caso: Estação Ecológica de São Carlos e Estação Ecológica de Itirapina.** [s.l.] Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, 2010.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** 4a Edição ed. São Paulo: Bucher, 2010.

OLIVEIRA, K. A. DE. Ordenamento Territorial e Bacias Hidrográficas: um Estudo sobre os Projetos do Comitê PCJ. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. IV, p. 114–123, 2010.

OPENSHAW, S.; OPENSHAW, C. **Artificial Intelligence in Geography.** Chichester: John Wiley, 1997.

OSGEO. **Welcome to the QGIS project.** Disponível em: <<https://qgis.org/en/site/>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

OZTURK, D.; BATUK, F. Implementation of GIS-based multicriteria decision analysis with VB in ArcGIS. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v. 10, n. 06, p. 1023–1042, 2011.

PERES, R. B.; CHIQUITO, E. DE A. Ordenamento Territorial, Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 14, n. 2, 2012.

PERES, R. B.; SILVA, R. S. DA. Análise das relações entre o Plano de Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré e os Planos Diretores Municipais de Araraquara, Bauru e São Carlos, SP: Avanços e desafios visando a integração de instrumentos de gestão. **Soc. & Nat**, v. 25, n. 2,

p. 349–362, 2013.

POLIDORO, M. **Conurbação e dispersão em aglomerações urbanas: Desafios ao planejamento**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

POLLO, R. A. **Mapeamento do Zoneamento da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paraíso, São Manuel - SP, visando o planejamento e gestão ambiental**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. Lei Nº 13.691 de 25 de novembro de 2005. . 2005.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. Lei nº 18.053, de 19 de dezembro de 2016. . 2016, p. 1–90.

REIS, P. A. DOS. **Identificação de áreas vulneráveis às enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

RODRIGUEZ, J. M. Geografia das paisagens, geoecologia e planejamento Ambiental. **Formação**, v. 1, n. Programa de Pós Graduação em Geografia, p. 7–27, 2003.

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

ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 38–51, 2012.

ROY, B. **Multicriteria methodology for decision aiding**. [s.l.] Dordrecht. Kluwer Academic, 1996.

RUHOFF, A. L. et al. Lógica Fuzzy e Zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 9, p. 2355–2362, 2005.

SAATY, L. T. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19–43, 1994.

SAATY, T. L. Multicriteria Decision Making. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority, Setting, Resource Allocation. **Pittsburgh: RWS Publications**, v. 2, 1990.

SALAZAR JR, O. O uso dos sistemas de informações geográficas na cartografia geotécnica. **Terceiro Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica**, p. 5–6, 2007.

SANTOS, J. R. N.; JUNIOR, C. H. L. S.; PEREIRA, D. C. A. Zoneamento da fragilidade ambiental utilizando Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico - AHP: o caso da bacia hidrográfica do Rio Anil, em São Luís - MA. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE**, p. 6381–6388, 2015.

SHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações**. E-book ed. Ilhéus: Editora da UESC, 2002.

SIGRH. **Portal SIGRH**. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

SILVA, M. P.; SANTOS, F. M. DOS; LEAL, A. C. Planejamento Ambiental da bacia hidrográfica do Córrego da Olga, UGHRI Pontal Do Paranapanema – São Paulo. **Sociedade & Natureza**, v. 28, n. 3, p. 409–428, 2016.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. DE. Cartografia Geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 79 a 98, 2012.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, v. 15, p. 39–49, 2004.

TORNERO, M. T. **Análise ambiental através de sistema de informações geográficas (SIG), como subsídio ao planejamento no município de Maringá -PR**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 1977.

USGS. **Sentinel-2**. Disponível em: <https://lta.cr.usgs.gov/sentinel_2>. Acesso em: 25 fev. 2018.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 295–308, 2016.

ZACHARIAS, A. A. **A representação gráfica das unidades de paisagem no zoneamento ambiental: um estudo de caso no Município de Ourinhos-SP**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2006.

ZADEH, L. V. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP)**. [s.l.] UNESP, 2000.
