

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial

Ana Clara Silva Lemes

VULNERABILIDADE AMBIENTAL: Estudo de caso do município de Sabará/MG

Belo Horizonte

2024

Ana Clara Silva Lemes

VULNERABILIDADE AMBIENTAL: Estudo de caso do município de Sabará/MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e Tratamento da Informação Espacial da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Batista de Souza

Belo Horizonte

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

L552v	Lemes, Ana Clara Silva Vulnerabilidade ambiental: estudo de caso do município de Sabará/MG / Ana Clara Silva Lemes. Belo Horizonte, 2024. 106 f. : il. Orientador: Jorge Batista de Souza Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial 1. Urbanização - Aspectos ambientais - Sabará (MG). 2. Avaliação de riscos ambientais – Sabará (MG). 3. Vulnerabilidade a desastres. 4. Método de estudo de casos. 5. Sistemas de Informação Geográfica. 6 Sensoriamento remoto. 7. Lógica difusa. I. Souza, Jorge Batista de. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial. III. Título.
-------	---

SIB PUC MINAS

CDU: 577.4

Ana Clara Silva Lemes

VULNERABILIDADE AMBIENTAL: Estudo de caso do município de Sabará/MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e Tratamento da Informação Espacial da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Prof. Dr. Jorge Batista de Souza – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Bruno Durão Rodrigues – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr Alan Nunes Araújo - Universidade Federal do Pará - UFPA (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 02 de Maio de 2024

*A minha avó, Nilza, que acreditou e se
esforçou para que meus estudos se tornassem realidade.*

*A minha mãe, Viviane (in memoriam), que
já se foi, pelo amor incondicional e por ser minha admiradora número 1.*

*Ao meu orientador, Prof. Jorge: gratidão
por acreditar em mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus e à espiritualidade que me guiaram e sustentaram ao longo desta jornada de mestrado. Foi a minha fé que me deu forças nos momentos mais difíceis e iluminou o caminho até a conclusão deste ciclo. Sinto uma profunda gratidão por ter sido abençoado com essa fé, que se revelou como uma fonte inesgotável de inspiração e determinação.

À minha querida avó, que durante tantos anos sonhou com a educação e independência de seus filhos, um sonho que os obstáculos da vida não permitiram realizar. No entanto, quando nasci, ela depositou em mim a esperança de que as coisas fossem diferentes, e com sua perseverança, alcançou esse feito. Sua crença em mim foi um motor poderoso que me impulsionou a persistir e acreditar nos meus próprios sonhos.

À minha mãe, dotada de uma inteligência incrível, cujo potencial foi muitas vezes limitado pelos desafios da vida. Mesmo assim, ela sempre acreditou em mim, orgulhando-se do meu percurso, mesmo sem compreender completamente as nuances da minha área de estudo. Ela espalhava meu nome com admiração para todos, sendo minha maior incentivadora e fã. Sua partida prematura deixou uma lacuna imensurável, mas seu amor e apoio continuarão a me guiar para sempre.

Agradeço também à minha tia, que sempre esteve presente em minha vida, oferecendo seu apoio incondicional e amor ao longo de todos esses anos. Sua presença significou muito para mim e seu suporte foi uma fonte constante de conforto e encorajamento. Ao Philipe, pelo seu constante apoio, sua palavra de encorajamento me fortaleceu em cada passo do caminho. Obrigado por estar ao meu lado e por ser uma fonte de inspiração e amor incondicional.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada, compartilhando das minhas alegrias e dificuldades. Em especial, agradeço à Anna, que sempre esteve presente para me encorajar nos momentos de dúvida e desânimo, jamais me permitindo desistir.

Expresso meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Prof.Dr. Jorge Batista, cujo apoio e ensinamentos foram fundamentais para os resultados finais desta pesquisa. Sua orientação cuidadosa e expertise na área foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Gratidão a todos os professores do Departamento de Geografia pelo ensinamentos e apoio desde a graduação. Suas contribuições foram valiosas para a minha formação acadêmica e para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Geografia e Tratamento da Informação Espacial, expresso minha profunda gratidão pela oportunidade concedida. Foi por meio deste programa que pude expandir meus horizontes acadêmicos e realizar esta pesquisa.

A todos os que de alguma forma contribuíram para este percurso, o meu mais profundo agradecimento. Este momento não seria possível sem o apoio, amor e incentivo de cada um de vocês. Que essa conquista seja celebrada em conjunto, pois é também fruto do carinho e dedicação de todos aqueles que estiveram ao meu lado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Essa contribuição foi fundamental para viabilizar a realização deste estudo, e por isso, sou imensamente grata.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”. (Albert Einstein)

RESUMO

Este estudo investiga a vulnerabilidade ambiental do município de Sabará, utilizando-o como um caso de estudo devido ao seu padrão de urbanização distinto em relação aos demais municípios do estado. A pesquisa adota uma abordagem metodológica baseada em estudo de caso, aplicando métodos e técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensoriamento remoto. A metodologia segue a proposta de Souza (2021), que, por sua vez, baseia-se nas metodologias anteriormente desenvolvidas por Ross (1994) e Crepani et al. (2001). Souza (2021) adapta essa metodologia, incluindo variáveis como forma de terreno, curvatura vertical e horizontal da vertente, dissecação fluvial e fator topográfico, como o comprimento da vertente e declividade. A análise espacial é realizada para transformar essas variáveis em variáveis probabilísticas fuzzy, utilizando a lógica booleana. As variáveis fuzzy normalizadas são então combinadas usando o operador fuzzy gama, permitindo a geração de cenários para a vulnerabilidade ambiental do município. O estudo contribui para uma melhor compreensão dos desafios ambientais enfrentados pelo município e oferecendo dados relevantes para o planejamento e gestão ambiental local.

Palavras Chaves: Vulnerabilidade Ambiental, Inferência Fuzzy, Sistema de Informação Geográfica, Sabará.

ABSTRACT

This study investigates the environmental vulnerability of the municipality of Sabará, using it as a case study due to its distinct urbanization pattern compared to other municipalities in the state. The research adopts a methodological approach based on a case study, applying methods and techniques of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing. The methodology follows the proposal by Souza (2021), which, in turn, is based on methodologies previously developed by Ross (1994) and Crepani et al. (2001). Souza (2021) adapts this methodology, including terrain shape, vertical and horizontal slope curvature, river dissection, and topographic factors, such as slope length and gradient. Spatial analysis is conducted to transform these variables into fuzzy probabilistic variables using boolean logic. The normalized fuzzy variables are then combined using the gamma fuzzy operator, enabling the generation of scenarios for the municipality's environmental vulnerability. The study contributes to a better understanding of the municipality's environmental challenges and provides relevant data for local environmental planning and management.

Keywords: Environmental Vulnerability, Fuzzy Inference, Geographic Information System, Sabará.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Graus de Vulnerabilidade segundo metodologia de Ross.....	37
Quadro 2 - Avaliação da Estabilidade das categorias Morfodinâmicas.....	39
Quadro 3 - Escala de Vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas.....	39
Quadro 4 - Principais indicadores utilizados nas metodologias de modelagem de vulnerabilidade ambiental.....	41
Quadro 5 - Coluna estratigráfica simplificada para o Quadrilátero Ferrífero	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do gráfico da distribuição da função Fuzzy Gamma.	45
Figura 2 - Fluxograma metodológico	46
Figura 3 - Localização do Município de Sabará/ MG	48
Figura 4 - Mapa da comarca do Sabará pertencente a capitania de Minas Gerais- 1778	50
Figura 5 - Vista parcial da Usina Siderúrgica Belgo Mineira (1921)	52
Figura 6 - Mapa de litológico do município de Sabará.....	55
Figura 7 -Mapa hipsométrico do município de Sabará/MG	58
Figura 8 -Mapa de Geomorfologia do município e pontos de ocorrências na Defesa Civil emSabará/MG	61
Figura 9 - Mapa de Pedologia do Município de Sabará/MG	64
Figura 10 - Mapa de Classificação climática do Estado de Minas Gerais Koppen- Geiger (1998 a 2012)	67
Figura 11 - Precipitação acumulada entre os anos de 1991-2010	70
Figura 12 - Cobertura Vegetal uso e ocupação do solo	73
Figura 13 - Mapa de população por setor censitário em Sabará/MG e Total do rendimento nominal mensal - 2010	80
Figura 14 - Vista da Av. Pref. Vítor Fantini, N° 1251	83
Figura 15 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável declividade	84
Figura 16 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável pluviosidade	86
Figura 17 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável Uso e ocupação do Solo.....	88
Figura 18 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável Solo	90
Figura 19 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável geologia ...	91
Figura 20 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável formas de relevo	93
Figura 21 - Cenários da modelagem da vulnerabilidade ambiental do município de Sabará, obtidos pelo operador gama, com diferentes graus de pertinência.	96
Figura 22 - Vulnerabilidade ambiental do município de Sabará, com base no método de inferência Fuzzy Gama (Gama 0,75)	99

Figura 23 - Vulnerabilidade ambiental Variável normalizada - Uso e Ocupação do solo e Pontos de ocorrências da Defesa Civil.....	101
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Situação de domicílio.....	79
---------------------------------------	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura Média Mensal Estação meteorológica da Pampulha (2023)	
.....	69
Gráfico 2 - Taxa de crescimento populacional simples	77
Gráfico 3 - Índice de Desenvolvimento Humano de Sabará.....	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Vulnerabilidade ambiental: conceitos e abordagens teóricas	21
2.2	Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto: Aplicações na análise de vulnerabilidade ambiental	25
2.2.1	Inferência Geográfica por lógica Fuzzy	30
3	METODOLOGIA	34
4	CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO	47
4.1	Contexto local e Localização.....	47
4.2	Caracterização Física do município de Sabará.....	53
4.2.1	Geologia	53
4.2.2	Geomorfologia	57
4.2.3	Pedologia	63
4.2.4	Clima.....	65
4.3	Uso e Ocupação do solo do Município de Sabará	71
4.4	Características demográfica e socioeconômicas do município de Sabará	76
5	ESTUDO DE CASO: Vulnerabilidade Ambiental no município de Sabará...	81

5. 1 Mapeamento da Vulnerabilidade ambiental com o Operador de Inferência Fuzzy Gama	94
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

1 INTRODUÇÃO

Os desastres ambientais, como inundações e deslizamentos de terra, são muito comuns no Brasil, especialmente entre os meses de outubro a março, período chuvoso na região sudeste do país. Esses eventos específicos são pontos de partida para uma análise de vulnerabilidade ambiental em áreas de alta ocorrência. Ao investigar o que leva ou intensifica essa situação, veremos que a exposição ao risco ocorre, na maioria das vezes, devido ao padrão de urbanização adotado em larga escala no Brasil, que se replica independentemente do tamanho do município. Em geral, esse modelo de urbanização adotado inclui impermeabilização dos solos, implantação de avenidas sanitárias através do tamponamento dos rios, construções em áreas de mananciais, construções em áreas de preservação ambiental e construções em áreas geologicamente instáveis. Essas ações podem influenciar predisposições do terreno a diversas atividades que causam danos ao ser humano, além, é claro, do impacto negativo já gerado ao meio ambiente.

O município de Sabará, localizado no estado de Minas Gerais, apresenta-se como um interessante modelo de análise devido ao seu padrão de urbanização relativamente distinto em comparação aos demais municípios do estado. Seu processo de desenvolvimento urbano pode ser dividido em três fases distintas. A primeira ocorreu por volta do século XIII, na confluência dos rios Sabará e Velhas, região atualmente conhecida como centro histórico. A segunda está relacionada à chegada da siderúrgica Belgo Mineira no final do século XIX, que não apenas modificou aspectos econômicos, mas também a forma de ocupação da população, por fim a ocupação ocorrida no século XX, caracterizada pela rápida urbanização descoberta que ocupou as margens rio das Velhas e as encostas declivosas.

A sede do município está localizada em um vale com alta densidade populacional, caracterizado por um relevo suave que facilita a ocupação da área. Contudo, o relevo do município varia significativamente, e a concentração populacional leva a vários problemas típicos de cidades grandes e médias, como deslizamentos de terra e enchentes urbanas. Estes problemas são frequentes, ocorrendo principalmente

devido à combinação de uma vulnerabilidade ambiental do território e ao padrão histórico de uso e ocupação do solo no município.

Há mais de uma década o município vem sofrendo com casos recorrentes de desastres naturais, como as ocorridas nos anos de 2016, 2019, 2020 e mais recente, em janeiro de 2022, no bairro Borba Gato, onde 8 famílias foram desalojadas e 18 casas inundadas pelas águas do córrego Soledade (G1 - Globo, 2022). A responsabilidade da situação pode ser atribuída a diversos fatores, entretanto é necessário estudo da vulnerabilidade ambiental do município de Sabará, associado ao seu tipo de uso e ocupação do solo, para a minimização da situação atual.

Diante desse contexto, a pesquisa visa responder à pergunta: **Quais são as áreas de maior vulnerabilidade ambiental no município de Sabará/MG e como elas estão associadas aos padrões de uso e ocupação do solo?**

Nesse contexto, entende-se a vulnerabilidade ambiental como a expressão da tendência do espaço aos fatores naturais que podem ser intensificados devido ao tipo de uso e ocupação adotado por um município.

O objetivo geral deste trabalho é identificar vulnerabilidade ambiental no município de Sabará, MG, utilizando técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e inferência geográfica.

São objetivos específicos:

- a) Utilizar dados de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto para mapear e analisar os padrões espaciais de uso da terra, recursos hídricos e cobertura vegetal em Sabará/MG;
- b) Identificar as áreas de maior vulnerabilidade ambiental;
- c) Caracterizar os padrões de uso e ocupação do solo;

É importante destacar que o município de Sabará apresenta um modelo de uso e ocupação específico que, combinado com a vulnerabilidade ambiental do território, pode resultar em desastres ambientais frequentes. Diante dessa realidade, torna-se

crucial realizar uma análise integrada dos fatores que influenciam tal vulnerabilidade, com o objetivo de mapear adequadamente as áreas de maior importância ambiental e identificar aquelas mais suscetíveis a riscos.

Essa análise integrada desempenha um papel fundamental na redução dos desastres ambientais e seus impactos devastadores. Ao identificar as regiões mais vulneráveis, torna-se possível adotar medidas preventivas e implementar ações de mitigação de riscos. Essa abordagem contribui diretamente para aumentar a resiliência da região, protegendo não apenas vidas humanas, mas também a biodiversidade e os recursos naturais.

Além disso, destaca-se que esse estudo fornece subsídios para a criação de políticas públicas eficazes e diretrizes no âmbito do planejamento urbano e ambiental. Ao considerar as informações obtidas sobre o modelo de ocupação e a vulnerabilidade ambiental, é possível promover um desenvolvimento urbano mais equilibrado, priorizando a preservação dos ecossistemas e a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

A Geografia exerce um papel fundamental na compreensão da complexidade das interações entre o meio ambiente e as sociedades humanas. O conhecimento geográfico deste estudo permite a identificação dos pontos críticos de suscetibilidade a eventos adversos, proporcionando uma análise detalhada da distribuição espacial de fatores que são específicos para a vulnerabilidade ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico, serão abordados os conceitos relevantes para a construção deste estudo, começando pela vulnerabilidade ambiental, citada por diversos autores como Tricart (1977), Ramos *et al.* (1987), Guerra e Cunha (1995), Marandola Jr. (2005), entre outros. Este termo será exemplificado e discutidas situações de sua aplicabilidade em diferentes contextos. Além disso, serão apresentadas as definições de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, exemplificados por autores como Oliveira (2011), Chagas (2005), Câmara *et al.* (2001), entre outros, abrangendo métodos de inferência geográfica.

2.1 Vulnerabilidade ambiental: conceitos e abordagens teóricas

De modo geral a vulnerabilidade é uma noção relativa, estando sempre associada à exposição do risco, definido a suscetibilidade de um determinado agente, seja ele pessoa, lugar ou até mesmo um ecossistema inteiro sofrer algum impacto, em suma negativo. Observa-se que não há um consenso entre os estudiosos sobre o tema, logo nota-se certa dificuldade em realizar comparações assertivas sobre a vulnerabilidade ambiental. A maior parte dos estudos apresenta o termo Vulnerabilidade Ambiental como sinônimo de fragilidade ambiental, risco ambiental e sensibilidade ambiental.

Ramos *et al.* (1987), exemplifica a vulnerabilidade ambiental como o nível de suscetibilidade ao dano, anterior ao acontecimento da ação. Esse tipo se difere da vulnerabilidade natural, visto que essa é a predisposição desse ambiente em relação aos fatores naturais, não havendo ligação direta com a ação antrópica.

Guerra e Cunha (1996) discutem que o conhecimento das potencialidades dos recursos naturais é obtido por meio de estudos de solos, relevo, rochas e minerais, águas, clima, flora e fauna, ou seja, dos componentes que sustentam a vida no planeta. No entanto, ao estudar a fragilidade de um ambiente, é necessário integrar análises que anteriormente eram feitas de forma separada, considerando sempre que a funcionalidade da natureza está intrinsecamente ligada a seus componentes. Eles ressaltam que a avaliação de fragilidade deve ser realizada no contexto do planejamento ambiental e baseada nos conceitos de ecodinâmica definidos por Tricart (1977).

Segundo Tagliani (2003), a vulnerabilidade ambiental é a suscetibilidade de qualquer ambiente a um possível impacto gerado pelo uso antrópico da região, variando de acordo com as características naturais e humanas, afetando a qualidade ambiental da região. A partir dos estudos de Grigio (2003) a vulnerabilidade ambiental, é possível a elaboração de propostas alternativas, para o melhor aproveitamento das potencialidades do sistema ambiental.

Dessa forma, conforme Klaiss, *et al.* (2012) entende-se que toda ação antrópica que modifique o estado natural do meio ambiente, em especial as relacionadas ao uso e ocupação do solo, pode resultar em efeitos adversos, chamados de vulnerabilidade ambiental, sempre de acordo com as características locais e a intensidade da atividade realizada. Spörl (2007) em seus estudos define o termo como fragilidade ou risco ambiental, como a possibilidade de perda ou perda ligados a percepção do ser humano, ainda cita que o indutor desse processo está relacionado à ação antrópica ou ao meio natural.

Vittae e Mello (2009), afirmam que a vulnerabilidade ambiental sempre está ligada a fatores geradores de desequilíbrios, podem ser eles naturais (variações climáticas, declividade, etc.) quanto sociais (uso e ocupação do solo inadequado).

Portanto, a identificação das regiões com vulnerabilidade ambiental e a determinação de seu grau de vulnerabilidade permitem a identificação de áreas propensas a impactos ambientais negativos. Essa abordagem destaca-se como uma ferramenta valiosa para o planejamento ambiental nos municípios.

Diante deste contexto, é evidente o interesse que o termo desperta em diversas áreas, especialmente na área ambiental, onde se encontra um grande problema, uma ausência de consenso e certa confusão entre os termos “Risco”, “fragilidade ambiental” e “Vulnerabilidade”. Neste sentido, esta pesquisa adota a classificação de risco conforme definido por Marandola Jr. (2005), ou seja, a medida da probabilidade de um acontecimento. Na abordagem demográfica tradicional, o risco é uma fração matemática de um evento, expressa por um índice que varia de 0,0 (impossibilidade de ocorrência) a 1,0 (certeza absoluta de ocorrência). Esta diferença ou gradação refere-se ao grau de certeza que se consegue inferir de que determinada pessoa (ou grupo populacional), em determinadas circunstâncias, irá contrair certa doença ou ter certo comportamento de natalidade/mortalidade.

Os geológicos são parte integrante de um conceito mais vasto - Riscos Naturais - que envolve a probabilidade de ocorrência de danos e perdas provocadas por desastres num determinado local ou região devido à ação de processos naturais, acelerados ou não por processos antrópicos.

De forma geral, os riscos geológicos estão associados aos processos geológicos relacionados com a geodinâmica interna e externa. Eles são estimados a partir do produto entre a perigosidade, vulnerabilidade e custos. São calculados através da avaliação integrada da probabilidade de ocorrência de um evento perigoso numa determinada área num determinado momento, associadas às características geológicas (perigosidade geológica), e às suas consequências (danos humanos e/ou materiais).

Apesar de existirem diversas perspectivas de trabalho com risco, o risco ambiental é o menos abordado, conforme destacado por Castro, Peixoto e Rio (2005), encontrando-se na literatura abordagens externas para o perigo ambiental como elemento para a definição de risco natural/ ambientais.

Elgler (2006) identifica três categorias de risco: Risco Natural, Risco Social e Risco Tecnológico. Para o autor, o Risco Tecnológico é definido como o potencial que um evento tem de ser prejudicial à vida em um determinado prazo, em consequência de decisões de investimento na estrutura produtiva. Ou seja, baseia-se na avaliação da densidade da estrutura produtiva e na sua capacidade de expansão, resumidamente, como a estrutura oferece danos ao meio ambiente onde se insere. O Risco Natural, segundo Elgler, é diretamente associado às atividades dos sistemas naturais, ou seja, são eventos influenciados pela dinâmica interna e externa da terra. Já o Risco Social, neste caso, são carências sociais que são importantes para a manipulação da vida de uma sociedade, sendo uma categoria mais ampla que as demais. Entretanto, Castro, Castro et.al (2005) afirmam que algumas classificações caíram em desuso devido à complexidade existente, dificultando assim a distinção entre elas.

O conceito de fragilidade ambiental nesta pesquisa é entendido como a suscetibilidade natural do ambiente a sofrer impactos, podendo também ser denominado como "fragilidade" ou instabilidade. Ele se refere à propensão do ambiente a ser afetado por eventos adversos. Essa propensão está intrinsecamente relacionada à vulnerabilidade natural do ambiente físico, que varia de acordo com os diferentes níveis de fragilidade dos elementos constituintes do ecossistema, bem como da interferência humana (Aquino *et al.* 2017, p. 15).

Considerando esses aspectos, o termo de vulnerabilidade ambiental para este trabalho é interpretado como o grau de suscetibilidade ou incapacidade de um ecossistema em lidar com os efeitos das interações externas. Essa vulnerabilidade pode surgir devido a características naturais do ambiente, à pressão resultante da atividade humana ou à presença de sistemas frágeis com baixa capacidade de recuperação. Nesse contexto, a resiliência refere-se à habilidade efetiva do meio ambiente em buscar um novo estado de equilíbrio mesmo após enfrentar uma

situação crítica. Em resumo, a vulnerabilidade ambiental reflete a fragilidade de um ecossistema frente às influências externas, elas são naturais ou causadas pelo ser humano. (Aquino *et al.* 2017, p. 15).

2.2 Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto: Aplicações na análise de vulnerabilidade ambiental

O geoprocessamento emprega técnicas matemáticas e computacionais para o processamento de informações geográficas (Câmara; Davis, 2001), abrangendo o tratamento de dados georreferenciados. Essencialmente, sua principal característica é a localização, implicando que as informações estão sempre vinculadas a um ponto específico identificado por coordenadas. No contexto norte-americano, o termo "geoprocessamento" não é comum; em vez disso, utiliza-se "Geographic Information System" (GIS). Contudo, os significados de geoprocessamento e GIS não são sempre idênticos, o que ocasionalmente leva a confusões e a uma variedade de interpretações conceituais de ambos os termos. Nesta pesquisa, o termo 'geoprocessamento' refere-se a um conjunto de técnicas com o objetivo de coletar e processar informações espaciais. Essas técnicas são implementadas por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O geoprocessamento envolve a aplicação prática de métodos para manipular dados geoespaciais, possibilitando análises detalhadas, visualização eficaz e suporte à tomada de decisões em diversas áreas.

Segundo Oliveira (2011), nos últimos anos o geoprocessamento avançou consideravelmente, entretanto ainda há uma grande dificuldade no estabelecimento de sua definição como uma ciência fundamentada em conceitos científicos e não apenas em técnicas computacionais ou no empirismo. O geoprocessamento é ponto de convergência de diversas áreas, como a informática, Geografia, Planejamento Urbano, Engenharia, Estatística e Ciências do Ambiente, o que pode contribuir para o problema citado. Para que a geociência da informação seja estabelecida como uma disciplina científica independente, será necessário estabelecer conjunto de conceitos teóricos, de aplicação genérica e independentes de aspectos de implementação.

Com o avanço tecnológico, a quantidade de dados disponíveis em diversas áreas do conhecimento tem se tornado cada vez maior. No entanto, nem todos esses dados foram tratados e manipulados. Chagas (2005) traz à discussão o fato de que a mera quantidade de dados não é necessariamente simbólica de ganho em termos de informação. É fundamental contar com metodologias adaptadas para a manipulação desses dados, bem como técnicas para o gerenciamento das informações, a fim de que elas possam subsidiar intervenções reais e positivas na realidade espacial.

Com base nisso, pode-se afirmar que o Geoprocessamento é uma ferramenta poderosa para enfrentar o desafio de lidar com grandes dimensões de variáveis. Além disso, ele possibilita análises mais complexas de um contexto como um todo, permitindo não apenas a descrição dos elementos, mas também a simulação e avaliação de possíveis intervenções. Isso possibilita a seleção da melhor alternativa para determinada situação.

Na área ambiental Câmara e Medeiros (1998), enfatizam que o uso do Geoprocessamento em projetos ambientais requer o uso intensivo das técnicas de integração de dados, para a realização adequada desses estudos é necessário a combinação de ferramentas de análise espacial, processamento de imagens, geoestatística e modelagem numérica de terreno.

Já o Sensoriamento remoto surgiu junto com a criação da câmera fotográfica e são utilizadas até os dias atuais para a obtenção das fotos aéreas. Os primeiros registros da aplicação da nova tecnologia, foi para uso militar. As primeiras fotos aéreas foram feitas através de pombos correios, substituídos posteriormente por balões não tripulados e com a criação dos aviões de espionagem o balão também foi substituído. Um marco na história do sensoriamento remoto é o lançamento de satélites na década de 1970, apesar da necessidade um grande investimento, durante sua operação o gasto de energia é mínimo, permitindo a coleta de imagens por 24 horas por dia (Figueiredo, 2005)

O sensoriamento remoto, atualmente, para sua execução conta com alguns elementos tecnológicos essenciais que compõem o satélite e permite a obtenção da informação espacial, são eles; os **Sensores** - responsáveis pela captação das

imagens; **Sistema de telemetria** - é o sistema responsável pela transmissão dos dados e das imagens obtidas para as estações terrestres; **Sistemas processamento**- são as ferramentas destinadas ao armazenamento e processamento dos dados; A evolução de todo esse sistema permitiu que pesquisadores obtivessem dados com maior qualidade e rapidez, pois nos dias atuais o SR é alimentado quase, exclusivamente, pelas imagens de satélite. (Figueiredo, 2005)

O sensoriamento remoto depende de alguns princípios físicos que são elucidados por Figueiredo (2005), são eles:

Ondas eletromagnéticas: As ondas eletromagnéticas, que aqui chamaremos de radiação eletromagnética (REM), podem ser consideradas como “termômetros-mensageiros” do SR. Elas não apenas captam as informações pertinentes às principais características das feições terrestres, como também as levam até os satélites. A radiação eletromagnética pode ser definida como sendo uma propagação de energia, por meio de variação temporal dos campos elétrico e magnético, da onda portadora. **Interação REM X matéria:** O comportamento espectral, (também chamado de assinatura espectral), dos alvos está relacionado ao processo de interação entre os objetos e feições terrestres com a REM incidente. Este processo depende da estrutura atômica e molecular de cada alvo. Os elétrons dos materiais estão distribuídos em diferentes níveis energéticos, em torno dos núcleos de seus átomos. Estes níveis eletrônicos podem absorver maior ou menor quantidade da energia da REM. Esta absorção implica na diminuição da quantidade de energia da REM refletida pela matéria, em certas faixas do espectro eletromagnético, faixas estas denominadas bandas de absorção. (Figueiredo, 2005)

As ferramentas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto são ambas valiosas para análises ambientais, facilitando a coleta e o tratamento de dados. O geoprocessamento possibilita comparações da paisagem em diferentes períodos e seu suporte simplifica o planejamento paisagístico. Já o sensoriamento remoto permite a análise e classificação do padrão da paisagem por meio de imagens de satélite, o que pode resultar em um monitoramento eficaz, levando em conta as características temporais de cada imagem (Grigio, 2003). A combinação dessas técnicas, especialmente os sensoriamentos remotos, é capaz de fornecer informações detalhadas sobre as características de uma região, detectar mudanças ambientais ocorridas ao longo dos anos e auxiliar na identificação de áreas de vulnerabilidade ambiental e natural na área de estudo.

Este último conceito diz respeito ao processo de combinação de dados provenientes de diversas fontes com o objetivo de produzir novas informações. Esse processo abrange a análise de padrões espaciais, a identificação de relações entre variáveis geográficas e a elaboração de conclusões sobre fenômenos em áreas específicas. Essa abordagem possibilita a captura de informações relevantes, ao mesmo tempo em que facilita a identificação de padrões espaciais e relações geográficas.

O termo de inferência significa realizar uma dedução feita baseado através de informações, sempre através de dados disponíveis. O ato de inferir faz referência deduzir um resultado baseado na interpretação de outras informações. Já a Inferência Geográfica, também chamada de Inferência espacial, possui como objetivo a produção de novas informações através da combinação de diferentes fontes.

As técnicas de Inferência geográfica possuem grande importância para avaliação de áreas de vulnerabilidade ambiental e analisar e descrever os fenômenos ambientais, pois permitem a integração de diferentes dados, auxiliando na elaboração de relatórios completos e precisos. Há diferentes métodos que podem ser utilizados na análise ambiental, são eles a booleana, o fuzzy e o bayesiano.

Segundo Câmara *et al.* (2001), o método booleano refere-se à combinação de mapas binários, de forma lógica. Cada um dos mapas utilizados pode ser entendido como uma evidência, que são combinados para dar suporte a uma hipótese. Por fim, a localização é testada para saber se a hipótese satisfaz ou não as regras da hipótese. Sendo 0(zero) hipótese não satisfeita e 1 (um) hipótese satisfeita.). Eles afirmam ainda que esse método é eficaz e prático, mas nem sempre o mais adequado, pois as evidências devem receber pesos e valores diferentes e não serem analisadas de formas iguais.

Os ponderadores lógicos desse método são:

A álgebra booleana utiliza os ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU (XOR)” e “NÃO” para determinar se uma hipótese satisfaz ou não uma particular condição. O operador “E” retorna à interseção entre dois ou mais conjuntos, ou seja, as entidades que pertencem tanto ao conjunto A e B. O operador “OU” retorna a união dos conjuntos, que são entidades que pertencem tanto ao conjunto A como ao B. O “XOR” recupera as entidades que pertencem a um conjunto e ao outro, mas não aos dois conjuntamente. E o “NÃO” é o operador da diferença

identificando as entidades que pertencem a um conjunto A, mas não ao B. (Câmera *et al.*, 2001).

A álgebra de conjuntos Fuzzy é uma generalização das operações básicas da lógica binária. Essas operações são utilizadas para obter um mapa resultante da sobreposição de diversos dados fuzzy. Os operadores desse método incluem AND, OR, Soma Algébrica, Produto Algébrico, Operador Gama e Soma Convexa.

Os métodos citados possuem como base o conhecimento, onde os pesos dos atributos são definidos através da experiência de especialistas. Além desse tipo, há aqueles que baseados em modelos empíricos de dados como o bayesiano, também conhecida como evidência de pesos. Conforme Câmara *et al.* (2001), essa abordagem tem como os principais conceitos probabilidade a priori e a probabilidade a posteriori. A primeira é a probabilidade do dado bruto, a segunda refere-se ao refinamento do conhecimento, obtido anteriormente. Ou seja, ao sobrepor uma evidência sobre o dado pesquisado aumenta as chances de um resultado satisfatório. No Geoprocessamento, é muito utilizada para a elaboração de mapas para prospecção mineral. Para Agterberg (1989) o cálculo da probabilidade a priori é realizado através de modelos básicos de distribuição espacial aleatórias ou por análises estáticas multivariadas.

Câmara *et al.* (2001), enfatiza que para a análise cruzada dos dados desse método é importante que os mapas binários sejam elaborados subdivididos em classe (favorável e não favorável). Essa análise é realizada da seguinte forma:

Com os mapas binários gerados, faz-se a tabulação cruzada das evidências com os depósitos (verdades de campo) obtendo-se assim uma matriz onde cada célula "mij" corresponde a interseção das classes das evidências com as ocorrências minerais. Esses valores são utilizados nas formulações para a obtenção das probabilidades à posteriori. (Câmara *et al.*, 2001).

A utilização combinada dos métodos booleano, fuzzy e bayesiano, aliada ao Analytical Hierarchy Process (AHP), emerge como uma estratégia eficaz para mitigar ambiguidades durante a análise ambiental. Dentro do escopo desta pesquisa, a lógica fuzzy se destaca como a escolha mais apropriada devido à sua capacidade intrínseca de lidar com a imprecisão inerente aos dados ambientais.

Entretanto, reconhece-se que a inclusão do Analytical Hierarchy Process (AHP) durante as análises ambientais é crucial. Apesar de serem distintos, esses métodos desempenham papéis fundamentais em contextos de tomada de decisão e análise de incertezas. O AHP, em particular, revela-se valioso na estruturação e análise de problemas complexos, proporcionando uma abordagem sistemática para a comparação e priorização de alternativas, essenciais em cenários ambientais que envolvem múltiplos critérios.

2.2.1 Inferência Geográfica por lógica Fuzzy

A compreensão das relações entre o meio antrópico e físico é crucial para uma gestão territorial eficaz e sustentável de qualquer região (Ross, 2001). Dentro desse contexto, a identificação da vulnerabilidade ambiental do território, com o auxílio de técnicas modernas como o sensoriamento remoto e o geoprocessamento, torna-se indispensável (Lima *et al*, 2011). Essas técnicas permitem avaliar os fatores físicos de forma integrada e combiná-los com a análise do uso e ocupação do solo, resultando em informações mais precisas e úteis para o planejamento territorial.

Os estudos que abordam a vulnerabilidade ambiental de territórios nos ajudam a compreender o funcionamento do ambiente natural, seja com ou sem interferência humana. Assim, a identificação da vulnerabilidade ambiental pode proporcionar um entendimento da situação atual do meio ambiente, servindo como ponto de partida para um desenvolvimento racional que preserve áreas de grande relevância ambiental (Lima *et al*, 2011).

A inferência geográfica, uma abordagem fundamental em geociências e estudos de geoprocessamento, é utilizada para extrair ou deduzir novas informações de conjuntos de dados geoespaciais. Essa técnica facilita a análise e interpretação de padrões espaciais e as relações entre diferentes conjuntos de dados. No âmbito do geoprocessamento da vulnerabilidade ambiental, a inferência geográfica é especialmente útil para integrar diversas camadas de dados, incluindo tipo de solo, uso da terra, vegetação, clima e topografia. Essa integração permite aos

pesquisadores deduzir informações mais aprofundadas e detalhadas sobre a vulnerabilidade ambiental de uma área específica.

Neste cenário, a utilização de inferências geográficas se mostra de extrema importância, visto a necessidade de reduzir possíveis ambiguidades obtidas através de análises individuais de dados. Conforme Martines (2005), de maneira geral, esta técnica consiste nos métodos variados que são utilizados para a integração de dados em um sistema de informações geográficas, permitindo a geração de novos mapas. É apresentado que essa técnica possibilita a elaboração de novos planos de informação elaborados de diversas formas, como o método Booleano ponderativo, processo analítico hierárquico (AHP), entre outros.

A análise espacial de dados geográficos é uma metodologia que possibilita a mensuração de aspectos, levando em consideração a localização espacial do fenômeno em estudo. Existem diversas abordagens nesse campo, e uma delas é a inferência por lógica Fuzzy. Essa abordagem resulta em um dado matricial de superfície contínua, que serve como base para a tomada de decisões.

Silva *et al.* (2013) destaca a importância da utilização da lógica Fuzzy em estudos ambientais, em substituição à lógica clássica. Isso ocorre porque a lógica clássica considera que um elemento pertence ou não a um conjunto, havendo apenas uma resposta binária de sim ou não, sem a possibilidade de um meio-termo. No entanto, na área ambiental, é desejável utilizar técnicas flexíveis como a lógica Fuzzy devido às diversas incertezas presentes nas ciências ambientais. Dessa forma, ela se mostra mais adequada para lidar com a complexidade e as nuances dos problemas ambientais, permitindo uma análise mais abrangente e realista.

Diante disso, os operadores fuzzy permitem a combinação de vários mapas gerando diversos cenários a serem analisados. O operador Fuzzy Gamma é uma técnica que permite relacionar uma combinação entre a soma algébrica fuzzy e o produto algébrico fuzzy, ajustado por um coeficiente gamma. Esse coeficiente representa o valor de pertinência fuzzy para cada mapa que será combinado. (Penha *et al.*, 2017). O operador Fuzzy Gamma é utilizado para realizar a fusão de informações provenientes de diferentes fontes. Através desse operador, é possível obter um

resultado combinado que incorpora os diferentes aspectos dos mapas originais, considerando seu culto e contribuição para o resultado final.

Ou seja, o grau de pertinência refere-se à medida da intensidade com que um elemento pertence a um determinado conjunto fuzzy. Essa medida possibilita a atribuição de um valor contínuo entre 0 e 1, indicando, de maneira gradual, o nível de pertinência desse elemento ao conjunto. Essa abordagem permite uma representação mais refinada e flexível das relações de pertencimento.

Por outro lado, o operador fuzzy é uma função que combina os graus de pertinência de diferentes conjuntos fuzzy. Esses operadores lógicos, como AND ou OR, resultam na geração de um novo grau de pertinência. Os operadores fuzzy empregam métodos específicos, como mínimo (AND) ou máximo (OR), para realizar essas combinações, adaptando-se ao contexto particular da análise

A lógica fuzzy, em sua essência, oferece uma flexibilidade considerável para a modelagem de cenários e tendências, considerando graus de pertinência variáveis a uma classe específica. Esta característica singular permite a modelagem de cenários que vão desde os menos restritivos, focados na maximização da soma algébrica fuzzy, até os cenários mais rigorosos, onde se dá prioridade à maximização do produto algébrico fuzzy.

Para entender essa variação, precisa-se examinar a importância do valor de gama. Quando gama é igual a zero, os valores de saída são calculados com base no produto algébrico fuzzy. Em contraste, quando o gama é igual a 1, os valores de saída são determinados pela soma algébrica fuzzy. Este valor de gama, portanto, desempenha um papel significativo na determinação da abordagem de análise fuzzy adotada.

Ajustar o valor de gama fornece a flexibilidade para explorar diferentes graus de combinação na análise fuzzy. Isso é especialmente útil quando se deseja adaptar a análise para atender a requisitos específicos ou quando se precisa ajustar a análise de acordo com a complexidade do problema em estudo.

A lógica fuzzy, com sua flexibilidade e adaptabilidade, provou ser uma ferramenta valiosa em uma variedade de campos de estudo. Especialmente na geografia e no mapeamento de vulnerabilidades, a lógica fuzzy pode auxiliar na modelagem de cenários complexos e multifacetados, considerando uma variedade de fatores e condições que podem afetar a vulnerabilidade em diferentes graus e formas (Penha *et al*, 2017) Cunha *et al.* (2011) ressalta que a aplicação da lógica fuzzy resulta em mapas fundidos, que não são cumulativos como na álgebra de mapas. Esses mapas são inter-relacionados por meio de uma função específica.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa foi norteado pela revisão bibliográfica que abrangeu publicações e estudos relacionados à vulnerabilidade ambiental. A análise dos conceitos, abordagens metodológicas e resultados destas publicações foram realizados de forma crítica, com atenção especial para os estudos que aplicaram geoprocessamento, sensoriamento remoto, inferência geográfica fuzzy.

Para atingir o objetivo delineado nesta pesquisa, procedeu-se com a coleta de dados, selecionando imagens de satélite com resolução espacial de 10m, provenientes do Sentinel-2, que abrangem o território de Sabará. Adicionalmente, efetuou-se o levantamento de variáveis ambientais, incluindo geologia, geomorfologia, declividade e uso do solo, entre outras. Simultaneamente, efetuou-se o pré-processamento dos dados coletados, o que incluiu a correção atmosférica e geométrica das imagens, a reprojeção para um sistema de coordenadas apropriado e o tratamento dos dados para análise subsequente.

Procedeu-se à extração de dados morfométricos baseados no Modelo Digital de Elevação (MDE) com 30 metros de resolução espacial. Estes dados englobam características topográficas essenciais para a análise da vulnerabilidade ambiental, tais como declividade e orientação das encostas.

O sensoriamento remoto viabiliza a interpretação de imagens de satélite, razão pela qual foi empregado neste estudo para identificar o uso e a ocupação do solo. A metodologia selecionada para esta finalidade foi a classificação semiautomática, utilizando o "Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)", desenvolvido por Luca Congedo (2021). Este plugin, integrado ao *software* QGIS, facilita a classificação de cada pixel das imagens. Amostras de treinamento, representativas de diversos tipos de uso do solo (por exemplo, áreas urbanas, áreas agrícolas, zonas de vegetação), são extraídas para permitir que o algoritmo reconheça esses padrões nas imagens de satélite.

Além disso, foram calculados os índices métricos para a análise da vulnerabilidade ambiental, utilizando ferramentas de inferência geográfica fuzzy. Após o pré-processamento dos dados, foi realizado um conjunto de análises que integram o uso de técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e inferência geográfica fuzzy.

A inferência geográfica fuzzy é uma abordagem que foi utilizada para lidar com as incertezas e imprecisões presentes nos dados coletados. A natureza dos dados espaciais e as variáveis ambientais muitas vezes apresentam um grau de incerteza, seja pela variação espacial e temporal, seja pela qualidade dos dados. A lógica fuzzy, portanto, permite modelar e quantificar essa incerteza.

Foram adaptadas metodologias para analisar a vulnerabilidade ambiental, com destaque para as propostas de Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001). Ross (1994) propõe uma metodologia fundamentada no conceito de geodiversidade, que compreende a diversidade de elementos e processos presentes no meio físico, como geologia, relevo, solo, clima e vegetação, bem como suas características sustentáveis. A ideia central é que a análise da geodiversidade de uma determinada área pode fornecer um entendimento mais aprofundado de sua vulnerabilidade ambiental. A abordagem de Ross (1994) envolve a criação de mapas de vulnerabilidade ambiental por meio do geoprocessamento, integrando conjuntos de dados geográficos diversos.

Esses mapas são criados considerando três elementos principais: A fragilidade intrínseca, que considera as características naturais do ambiente, como a geologia e o relevo. A fragilidade potencial, que leva em conta os fatores humanos, como a urbanização e a agricultura, que podem afetar a vulnerabilidade do ambiente. A fragilidade emergente, que é a combinação da fragilidade intrínseca e da fragilidade potencial, fornece uma visão geral da vulnerabilidade ambiental de uma área. Além disso, ainda é enfatizado a importância do estudo integrado desses fatores para a compreensão adequada da vulnerabilidade ambiental

As regiões naturais do planeta, mostravam-se em equilíbrio até certas intervenções intensivas da sociedade humana, para a extração de recursos naturais. A condição de equilíbrio do sistema ambiental é o resultado da troca de energia e matéria. A interferência antrópica, sem considerar as características e limitações nesse sistema, resulta no que chamamos de vulnerabilidade ambiental. Ross (1994), argumenta então que o ambiente deve ser analisado conforme a Teoria dos Sistemas, que é fundamentada na troca de energia e matéria, processado em equilíbrio dinâmico, que pode vir a ser interrompido, permanente ou não, por ações humanas.

Ross (1994) é amplamente reconhecido pela criação de um método de análise da vulnerabilidade ambiental profundamente enraizado no princípio de Ecodinâmicas, uma ideia conceitual introduzida por Tricart (1997). Este conceito se preocupa com a dinâmica dos sistemas ambientais, particularmente com a relação entre seus componentes e os processos naturais ou antropogênicos que os afetam.

A abordagem de Ross (1994) propõe uma divisão da paisagem em duas categorias distintas, a fim de compreender melhor as diferenças na dinâmica dos sistemas ambientais e, conseqüentemente, sua vulnerabilidade.

A primeira categoria compreende as Unidades Ecodinâmicas Instáveis ou de Instabilidade Emergentes. Estas são zonas que exibem um equilíbrio dinâmico relativamente baixo e que sofreram alterações significativas devido à intervenção humana. Tais alterações podem incluir, mas não estão limitadas a desmatamento, urbanização intensa e práticas agrícolas insustentáveis.

A segunda categoria, por outro lado, abrange as Unidades Ecodinâmicas Estáveis ou de Instabilidade Potencial. Essas áreas são caracterizadas por um equilíbrio dinâmico mais robusto. No entanto, mesmo sendo estáveis, possuem um potencial de instabilidade inerente, especialmente quando confrontadas com mudanças ambientais significativas, seja natural ou induzida pelo homem.

Em seu método, Ross (1994) propõe base de informações diferentes conforme a escala utilizada, para as escalas média e pequenas — 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000 — utiliza-se os padrões de formas (Rugosidade topográfica ou Índices de

Dissecação do Relevo). Já para escalas de maiores detalhes como 1:25.000 e 1:10.000, devem ser utilizadas classes de declividade e formas de vertentes.

A metodologia desenvolvida por Ross (1994) estabelece uma classificação hierárquica das variáveis de estudo, essencial para a análise da vulnerabilidade ambiental, seja ela potencial ou emergente. Esta hierarquização se destaca pela sua capacidade de identificar e quantificar áreas de maior criticidade de vulnerabilidade.

Ross propõe cinco níveis de vulnerabilidade, rotulados de "muito baixa" a "muito alta", com valores correspondentes de 1 a 5. Esta classificação numérica, além de permitir uma comparação objetiva entre as áreas, também serve como uma forma eficiente de representar e comunicar os resultados da análise de vulnerabilidade.

Ross (1994) enfatiza que essa metodologia não serve apenas como uma abordagem teórica para a análise da vulnerabilidade ambiental. Ao contrário, a categorização das unidades ecodinâmicas torna-se uma ferramenta valiosa para o planejamento ambiental e territorial. A capacidade de definir diretrizes e ações estratégicas para cada categoria de vulnerabilidade potencializa o uso eficiente de recursos e a implementação de medidas preventivas e corretivas.

A metodologia desenvolvida por Ross (1994) estabelece uma classificação hierárquica das variáveis de estudo, essencial para a análise da vulnerabilidade ambiental, seja ela potencial ou emergente. Esta hierarquização se destaca pela sua capacidade de identificar e quantificar áreas de maior criticidade de vulnerabilidade.

Ross propõe cinco níveis de vulnerabilidade, rotulados de "muito baixa" a "muito alta", com valores correspondentes de 1 a 5 (Quadro 1). Esta classificação numérica, além de permitir uma comparação objetiva entre as áreas, também serve como uma forma eficiente de representar e comunicar os resultados da análise de vulnerabilidade.

Quadro 1 - Graus de Vulnerabilidade segundo metodologia de Ross

Intervalo de classe	Grau de Vulnerabilidade
1	Muito fraca
2	Fraca
3	Média
4	Forte

5	Muito Forte
---	-------------

Fonte: Adaptado Ross (1994)

Além disso, a aplicação desta metodologia fornece subsídios para um planejamento ambiental mais sustentável. Ao destacar áreas de vulnerabilidade alta e muito alta, incentiva a adoção de políticas e práticas que visam não apenas a mitigação imediata, mas também a promoção da resiliência de longo prazo nos ecossistemas. Em resumo, o sistema de classificação de Ross é um instrumento valioso para orientar decisões que podem levar a uma gestão mais responsável e sustentável do ambiente natural.

Crepani *et al.* (2001) desenvolveram uma metodologia inovadora para a criação de mapas de vulnerabilidade natural à erosão do solo, com o intuito de subsidiar o zoneamento da Amazônia. Tal como Ross, esses autores também basearam seu trabalho no conceito de Ecodinâmica proposto por Tricart (1977). No entanto, incorporaram as vantagens das imagens de satélite para realização de estudos integrados, expandindo assim as possibilidades de análise.

Na metodologia proposta por Crepani *et al.*, a análise é realizada empiricamente sobre uma unidade morfodinâmica da paisagem denominada Unidade Territorial Básica (UTB). Esta unidade serve como elemento fundamental na avaliação da vulnerabilidade, proporcionando uma escala adequada para a interpretação e comparação das características ambientais.

Alicerçadas na teoria da Ecodinâmica de Tricart (1977), as categorias de análise propostas por Crepani *et al.* se dividem em: meio estável, meio intergrade e meio fortemente instável. Cada categoria representa um nível diferente de equilíbrio do sistema:

1. O meio estável refere-se a áreas onde os processos naturais de erosão e deposição estão em equilíbrio. Estas áreas apresentam baixo risco de perda de solo e são, geralmente, caracterizadas por terrenos planos ou de baixa inclinação, e com boa cobertura vegetal.
2. Os meios intergrades são zonas de transição, onde a estabilidade do sistema não é clara e pode variar ao longo do tempo. Estas áreas podem apresentar

tantas características de sistemas estáveis como de sistemas instáveis, dependendo das condições ambientais e das mudanças que possam ocorrer.

3. Os meios fortemente instáveis são caracterizados por uma alta vulnerabilidade à perda de solo, devido a um equilíbrio dinâmico frágil entre os processos de erosão e deposição. Estas áreas geralmente apresentam terrenos íngremes, solos expostos e pouca vegetação.

Essa categorização permite uma compreensão mais aprofundada da vulnerabilidade natural do solo à erosão, contribuindo para a formulação de políticas de uso da terra mais eficientes e sustentáveis.

Assim como na metodologia apresentada anteriormente, valores de estabilidades foram atribuídos a cada categoria, entretanto foi acrescentado a sua relação com a Pedogênese/ Morfogênese, como observado na quadro 2 a seguir.

Quadro 2 - Avaliação da Estabilidade das categorias Morfodinâmicas

Categoria Morfodinâmica	Relação Pedogênese/Morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1
Intergrade	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2
Instável	Prevalece a morfogênese	3

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

Fundamentada nessa categorização, uma escala de 21 classes foi desenvolvida, onde os valores próximos a 1 estão relacionados ao predomínio da pedogênese, já os próximos a 2 são referentes às situações consideradas intermediárias, e por fim, os valores próximos a 3 são referentes ao predomínio da morfogênese. O quadro 3 a seguir exemplifica a classificação.

Quadro 3 - Escala de Vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas

UNIDADE DE PAISAGEM	MÉDIA	GRAU DE VULNERAB	GRAU DE SATURAÇÃO		
			VERMELHO	VERDE	AZUL
U1	3	VULNERÁVEL	255	0	0
U2	2,9		255	51	0
U3	2,8		255	102	0
U4	2,7		255	153	0

U5	2,6	MODERADAMENTE VULNERÁVEL	255	204	0
U6	2,5		255	255	0
U7	2,4		204	255	0
U8	2,3		153	255	0
U9	2,2	MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÉVEL	102	255	0
U10	2,1		51	255	0
U11	2		0	255	0
U12	1,9		0	255	51
U13	1,8	MODERADAMENTE ESTÁVEL	0	255	102
U14	1,7		0	255	153
U15	1,6		0	255	204
U16	1,5		0	255	255
U17	1,4	ESTAVÉL	0	204	255
U18	1,3		0	153	255
U19	1,2		0	102	255
U20	1,1		0	51	255
U21	1		0	0	255

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

Nos estudos ainda ressaltam a importância de conhecer a gênese de uma paisagem natural, assim como sua constituição física, forma e estágio de evolução, para que seja possível sua análise. Essas informações são fornecidas a partir da integração Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Fitogeografia, e permitem o retrato fiel do comportamento da unidade em estudo.

As principais diferenças entre os autores Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001), e a forma de calcular a vulnerabilidade dos ambientes, visto que usam pesos diferentes, além de Crepani adicionar ao seu método a variável geologia.

Metodologicamente, essa pesquisa estrutura-se como estudo de caso a partir da aplicação de métodos e técnicas de SIG e sensoriamento remoto, seguindo a metodologia proposta por Souza (2021) elaborada a partir das metodologias propostas anteriormente por Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001). Souza (2021) apresenta a uma adaptação metodológica acrescentando variáveis como forma de terreno, que se refere a curvatura vertical da vertente, curvatura horizontal da vertente, e a dissecação fluvial fator topográfico, ou seja, o comprimento da vertente e

declividade. O quadro 4 indica os principais indicadores utilizados para modelagem da fragilidade ambiental em ambas metodologias.

Quadro 4 - Principais indicadores utilizados nas metodologias de modelagem de vulnerabilidade ambiental

Variáveis	METODOLOGIAS			
	Índice de dissecação do relevo (Ross 1994)	Classes de declividade (Ross 1994)	Crepani <i>et al.</i> (2001)	(Souza, 2021)
Dissecação do Relevo	X		X	X
Dissecação fluvial				X
Forma do Relevo				X
Fator Topográfico - LS				X
Declividade		X	X	X
Rocha			X	X
Solo	X	X	X	X
Cobertura vegetal e uso da terra	X	X	X	X
Pluviosidade	X	X	X	X

Fonte: Adaptado de Souza, 2021.

Fator Topográfico (LS) - De acordo com Ross (1994) e Souza (2021), a variável dissecação do relevo é melhor empregada em escalas inferiores a 1:50.000. Para mapeamentos em escalas maiores que 1:50.000, Ross sugere utilizar a variável declividade. Neste trabalho, optou-se por utilizar o fator topográfico - LS da Equação Universal de Perda de Solo (Universal Soil Loss Equation - USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978). Este fator incorpora duas variáveis importantes: o comprimento da vertente (L) e a declividade da vertente (S). A contribuição do fator LS na identificação de áreas vulneráveis à erosão pode ser compreendida através de seus componentes:

Comprimento da Vertente (L): Refere-se à distância horizontal desde o início da vertente até o ponto de acumulação de água ou deposição. Vertentes mais longas permitem que a água adquira maior volume e velocidade à medida que desce, aumentando a capacidade erosiva da enxurrada. Assim, áreas com vertentes mais extensas tendem a ser mais suscetíveis à erosão.

Declividade da Vertente (S): Este parâmetro considera o grau de inclinação da vertente. Vertentes com maior inclinação propiciam um escoamento superficial mais rápido, o que intensifica o potencial erosivo da água. A energia cinética da enxurrada aumenta com a inclinação, exacerbando o desprendimento e transporte de partículas do solo.

Segundo Beskow *et al.* (2009), a intensidade da erosão hídrica pode ser fortemente afetada pelo comprimento da vertente ou rampa (fator L) e sua declividade (fator S). O fator L representa a relação de perdas de solos entre o comprimento do declive e o comprimento de uma vertente para os mesmos fatores de solo, chuva, grau de declive, cobertura e manejo.

A justificativa da utilização do fator LS, ao invés de somente a declividade, é que a combinação desses dois aspectos no fator LS amplifica o entendimento de como características topográficas específicas influenciam a vulnerabilidade do solo à erosão. Regiões com valores mais altos de LS são identificadas como tendo maior potencial erosivo, ou seja, são áreas mais propensas à erosão. Este entendimento é crucial para o planejamento de medidas de manejo do solo e conservação, visando reduzir a perda de solo e mitigar os impactos negativos da erosão.

Forma da Vertente: A forma da vertente é uma variável morfométrica que descreve o formato da superfície inclinada de uma colina ou montanha. Ela é determinada pela relação entre a curvatura do perfil (ao longo da direção da inclinação) e a curvatura do plano (perpendicular à direção da inclinação). Esta variável pode ter influência sobre o movimento de água e sedimentos, e por isso é relevante para a avaliação da vulnerabilidade a eventos como erosão e deslizamentos de terra. A concavidade ou convexidade da vertente se refere ao grau em que a encosta é côncava (curvada para

dentro) ou convexa (curvada para fora). Vertentes côncavas podem acumular mais água e sedimentos, aumentando a vulnerabilidade à erosão e deslizamentos, enquanto vertentes convexas podem ser mais propensas à erosão devido à aceleração do escoamento. Cunha e Guerra (1996), entendem que os estudos relacionados a curvaturas das vertentes são importantes para a relação dos resultados as dinâmicas geomorfológicas

Pluviosidade: refere-se à quantidade de chuva que cai em uma determinada área durante um período específico de tempo, como um dia, mês ou ano. Se apresenta como uma característica crucial, especialmente em áreas propensas a inundações, deslizamentos de terra e outros eventos climáticos extremos. O volume e a intensidade das chuvas podem aumentar o risco de danos ambientais e sociais, especialmente em regiões onde o solo está exposto ou onde a urbanização inadequada aumenta a impermeabilização do solo. Além disso, variações na pluviosidade ao longo do tempo podem afetar a disponibilidade de recursos hídricos e a biodiversidade local, impactando diretamente a sustentabilidade dos ecossistemas.

Solo (pedologia): A constituição do solo surge da interação entre diversos elementos, conhecidos como fatores de formação do solo, que incluem o clima, os organismos, o relevo, o material de origem e o tempo. Esses fatores estão profundamente conectados em um sistema em constante mudança (Jenny, 1941) A degradação do solo também pode aumentar a susceptibilidade a desastres naturais, como enchentes e deslizamentos de terra, além de contribuir para a contaminação de recursos hídricos subterrâneos.

Geologia: Faz referência ao formato dos corpos rochosos, sua distribuição espacial e os processos de deformação que levam à formação das estruturas geológicas responsáveis. Possui relação direta com eventos de vulnerabilidade ambiental, pois pode aumentar a susceptibilidade do terreno a fenômenos como deslizamentos, dependendo do seu grau de coesão. Que, por sua vez, está relacionada à força das ligações entre seus minerais constituintes. Conforme mencionado por Souza (2021),

rochas com pouca coesão tendem a ser mais suscetíveis a processos erosivos, resultando na modificação das formas de relevo. Por outro lado, rochas altamente coesas tendem a favorecer a formação e preservação dos solos, influenciando assim a dinâmica ambiental da região.

Uso e ocupação do solo: Conforme o IBGE, a cobertura vegetal e o uso da terra podem ser definidos, como um conjunto de informações relacionadas à classificação dos tipos de cobertura e uso da terra visa a representação e análise da dinâmica do território em termos dos processos de ocupação, da utilização da terra e de suas transformações (IBGE, [s.d.]).

Essas variáveis ambientais foram combinadas para construir um modelo de vulnerabilidade ambiental. Esse modelo foi desenvolvido por meio da aplicação da inferência geográfica, utilizando a técnica fuzzy em conjunto com o operador gamma.

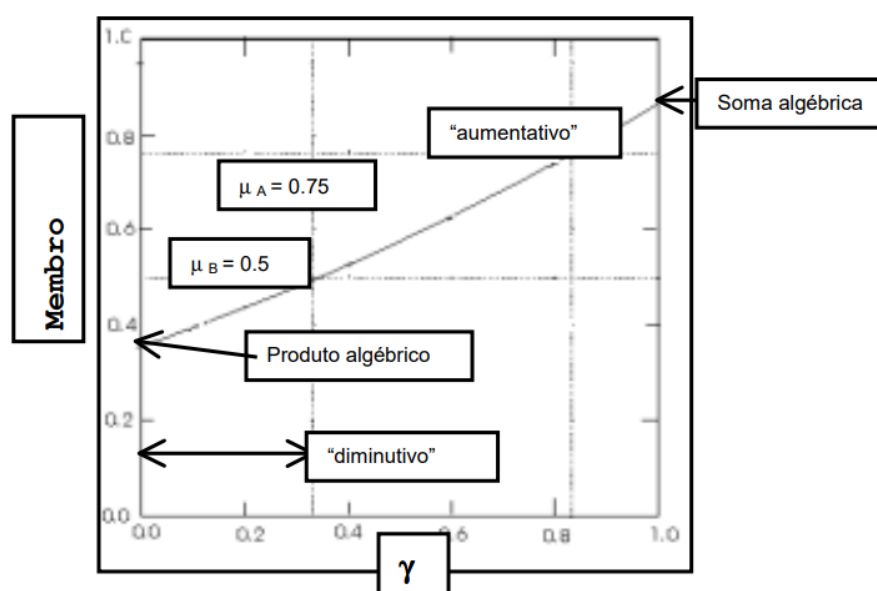
Marjanović e Caha (2011) e Meirelles *et al.* (2007b) discutem diversos operadores fuzzy para a combinação de funções de pertinência. Entre os mais conhecidos estão o Produto Algébrico, Soma Algébrica, Operador Gamma e Média Ponderada AHP. A técnica de inferência geográfica fuzzy gama, foi utilizada neste estudo onde o operador gama inclui o produto entre a soma algébrica Fuzzy e produto Fuzzy.

O Produto Algébrico é um operador que realiza a multiplicação dos valores de pertinência correspondentes de diferentes conjuntos fuzzy. Em outras palavras, o valor de saída em um determinado ponto é sempre igual ou menor que o menor valor de pertinência entre os conjuntos fuzzy envolvidos. Esse comportamento ocorre porque a multiplicação de valores iguais ou menores que 1 resulta em um valor igual ou menor (Câmara *et al.*, 2004).

Quando o valor de gamma é igual a 0, o resultado obtido é equivalente ao produto algébrico. Por outro lado, quando gamma é igual a 1, o resultado corresponde à soma algébrica. Valores de gamma situados entre 0 e 0,35 indicam um comportamento "diminutivo", ou seja, o valor de saída é sempre igual ou menor que o menor valor de

pertinência de entrada. Já valores de gamma entre 0,8 e 1,0 sugerem um comportamento "aumentativo", onde o valor de saída é igual ou maior que o maior valor de pertinência de entrada. Por fim, valores de gamma entre 0,35 e 0,8 não apresentam um comportamento distintamente "aumentativo" ou "diminutivo"; em vez disso, os valores de saída estarão sempre dentro do intervalo formado pelo menor e o maior valor de pertinência de entrada (Bonham-Carter, 1994 citado por Câmara *et al.*, 2004). O processo é exemplificado na figura a seguir:

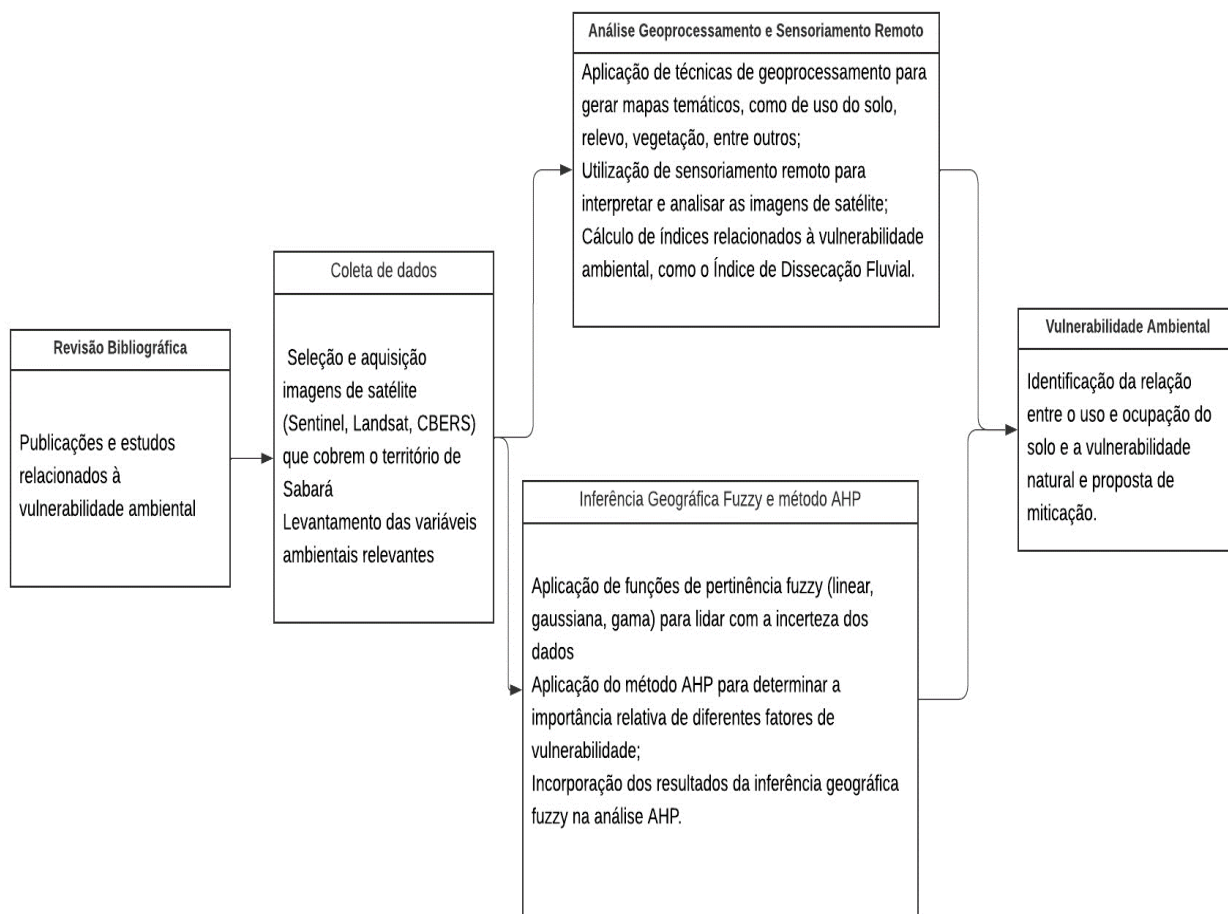
Figura 1 - Representação do gráfico da distribuição da função Fuzzy Gamma.



Fonte: Câmara *et al.* (2004, pág. 13)

Para a construção do mapa de vulnerabilidade ambiental foram utilizados 4 critérios, onde seus fatores ponderantes foram avaliados e classificados com o peso Arbitrário do executor, sendo processados e resultando no operador fuzzy gama de cada fator ponderante. A figura 2 apresenta o fluxograma que apresenta o caminho metodológico que essa pesquisa percorreu.

Figura 2 - Fluxograma metodológico



Elaboração: Autora, 2023

4 CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO

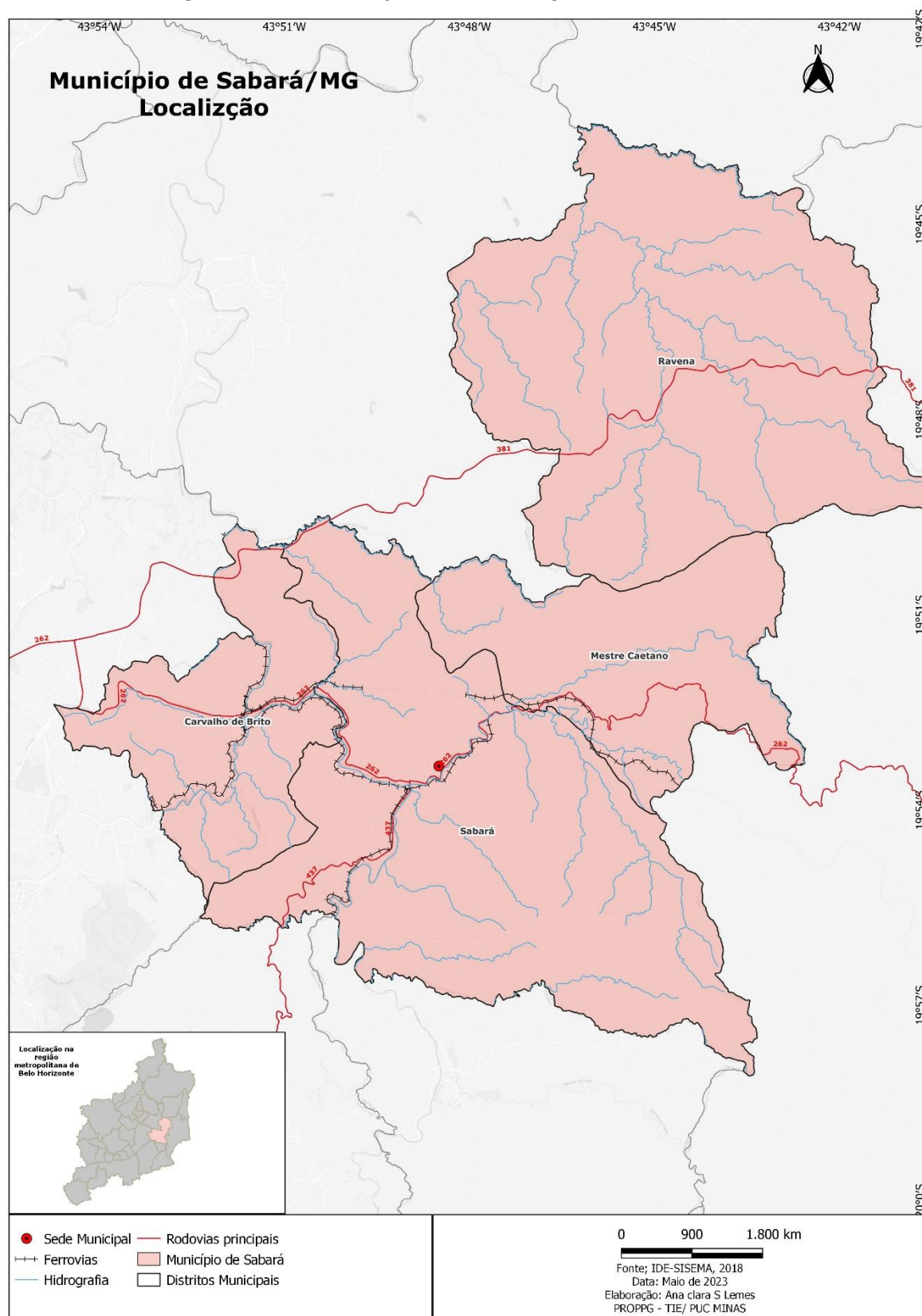
Neste item, são apresentadas as características do município de Sabará, fundamentais para a análise no estudo de caso e para compreender sua vulnerabilidade. A história e localização do município são essenciais para entender o contexto temporal dos problemas encontrados atualmente. As características físicas, como geologia e relevo, podem contribuir para o cenário de vulnerabilidade, influenciando na suscetibilidade a desastres naturais. O uso e ocupação do solo também desempenham um papel crucial, podendo criar ou agravar a vulnerabilidade de uma área. Além disso, as características demográficas, como densidade populacional e distribuição espacial, são essenciais na correlação dos fatos e na compreensão dos impactos socioeconômicos e ambientais.

4.1 Contexto local e Localização

O município de Sabará está localizado na porção sudeste no estado de Minas Gerais, compondo a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) em relação à capital mineira, está localizada a leste, fazendo fronteira com os municípios de Caeté, Taquaraçu de Minas, Raposos e Nova Lima. A hidrografia da região possui o Rio das Velhas como um importante curso d'água que atravessa o município em direção a Santa Luzia, já o Ribeirão Sabará, um dos principais afluentes, tem sua nascente em Caeté e deságua no Rio das Velhas.

Sua localização geográfica é estratégica, pois possui conexões diretas à capital e ao município de Caeté através da MG-262, que segue às margens do rio das Velhas e do Ribeirão Sabará. Em relação à malha mantida da região, uma parte ainda está em funcionamento, conectando-se ao município de Santa Luzia e Caeté. O mapa a seguir (Figura 3) apresenta a configuração atual do município e sua posição em relação a Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Figura 3 - Localização do Município de Sabará/ MG



Fonte: Elaborado pela autora, 2023

O município de Sabará foi o primeiro povoado do estado de Minas Gerais, sua origem está relacionada à expedição liderada por Fernão Dias acompanhado de seu genro Borba Gato, que buscavam pela Serra do Sabarabuçu, atualmente conhecida como Serra da Piedade. O capitão Matias Cardoso de Albuquerque, foi líder da Bandeira das Esmeraldas, ao longo da expedição, foi necessário abrir caminhos e estabelecer locais de pouso, durante o processo um local foi escolhido devido às suas características favoráveis, ao chegarem foi encontrado uma área propícia para as roças, disponibilidade de água, baixo risco de enchentes e acesso para atravessar o rio a pé. (IPHAN,2014)

Depois de algum tempo, no ano de 1674, a bandeira de Fernão Dias chega oficialmente à região, a partir desse momento é iniciado o processo de organização urbana dos núcleos de mineiros. Posteriormente o local recebeu o nome de Arraial da Barra do Sabará, devido a sua localização, estando diretamente ligado a Estrada Real, foi considerado um ponto estratégico. (IPHAN,2014)

Já no ano de 1711, o então arraial foi elevado à condição de Vila Real Nossa Senhora da Conceição do Sabará, e três anos depois tornou-se sede da Comarca do Rio das Velhas, apresentada na figura 4. (IPHAN, 2014). Em 06 de abril de 1714 foram instituídas três Comarcas do território de Minas Gerais, que correspondiam às três grandes bacias hidrográficas do estado, sendo elas: Villa Rica (sede em Villa Rica, atual Ouro Preto) Rio das Mortes (sede na Villa São João Del Rei), e a do Rio das Velhas (com sede em Villa Real Nossa Senhora da Conceição do Sabarabussu), essa última estava ligada ao Rio São Francisco, era a mais povoada e mais extensa entre as três, passando por todo o comprimento do Rio e chegando se a região da Bahia. (Val; Freitas, 2021)

Figura 4 - Mapa da comarca do Sabará pertencente a capitania de Minas Gerais- 1778



Fonte: Biblioteca Digital da Fundação Biblioteca Nacional

Já no século seguinte, no ano 1838, a Vila Real foi elevada à categoria de cidade, e a partir desse momento passou a se dividir em duas regiões distintas: a Cidade Velha e a Cidade Nova. A Cidade Velha englobava a região das igrejas Senhora do Ó e Nossa Senhora da Conceição, enquanto a Cidade Nova correspondia à área central histórica e à parte baixa próxima ao rio Sabará.

No ano de 1918 ocorreu um marco importante na história de Sabará com a instalação da Companhia Siderúrgica, destinada a transformar minério em ferro-gusa. Alguns anos depois, em 1921 essa usina passa a fazer parte Companhia Siderúrgica Belgo Mineira. Esse empreendimento impulsionou o processo de modernização e expansão do município, transformando em um centro industrial.

A chegada e crescimento da indústria no território modificou a paisagem urbana, porém, mesmo com esse desenvolvimento, houve a preservação de certos pontos, especialmente as edificações de cunho religioso que remontam ao período colonial. A companhia estava localizada nas proximidades da linha férrea e próximo ao rio Sabará (Figura 5). Nos arredores, foram construídas residências para os funcionários vindos de outros municípios. Essas construções formavam conjuntos habitacionais com padrões diferentes, sempre de acordo com a hierarquia da empresa. Os bairros receberam os nomes de Siderúrgica, Esplanada e Nossa Senhora do Ó. (Carvalho, 2010)

Figura 5 - Vista parcial da Usina Siderúrgica Belgo Mineira (1921)



Fonte: Acervo Centro de Memoria Arcelor Mittal, S.D

Durante toda a história do município, houveram muitos marcos importantes, relacionados tanto a sua geopolítica, pois teve seus limites alterados, como administrativos.

Sabará, diante de toda sua história, apresenta um contraste interessante entre sua herança histórica e sua evolução industrial. Enquanto o centro histórico preserva a arquitetura colonial e as igrejas seculares, a presença da indústria trouxe consigo a modernização e o desenvolvimento do município. Seu centro histórico é um grande exemplar de uma cidade mineira construída na época do Ciclo do Ouro.

4.2 Caracterização Física do município de Sabará

4.2.1 Geologia

O município de Sabará está localizado no Quadrilátero Ferrífero, região mineral mais importante do sudeste brasileiro. O Quadrilátero é uma estrutura geológica, com uma área de cerca de 7.000 km² que corresponde ao extremo do Cráton do São Francisco, possui idade arqueana, sua consolidação ocorreu no final do ciclo transamazônico, seus limites são marcados pelos cinturões orogênicos formados no ciclo brasileiro. (Almeida,1977). Possui uma geologia complexa caracterizada por quatro unidades litoestratigráficas Embasamento Cristalino, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi, como apresentado no quadro a seguir, é importante destacar que cada estágio apresentado, demonstra a evolução que se inicia na bacia sedimentar.

Quadro 5 - Coluna estratigráfica simplificada para o Quadrilátero Ferrífero

COBERTURAS SEDIMENTARES RECENTES			
PROTEROZÓICO	SUPER GRUPO ESPINHAÇO	GrupoConselheiro Mata	Formação Cambotas
	Grupo Itacolomi		
	SUPER GRUPO MINAS	Grupo Piracicaba	Grupo Sabará
			Formação Barreiro
			Formação tabões
			Formação Fecho do Funil
			FormaçãoCercadinho
		Grupo Itabira	Formação Gandarela
			Formação Caué
		Grupo Caraça	Formação Batatal
			Formação Moeda
ARQUEANO	SUPER GRUPO RIO DAS VELHAS	Grupo Maquiné	Formação Casa Forte
			Formação palmital
		Grupo Nova Lima	Xisto metassedimentar e metavulcânico
		Grupo Quebra-Osso	Associação metavulcânica máfica-ultramáfica
TERRENOS GRANITO-GNÁISSICO-ARQUEANOS			

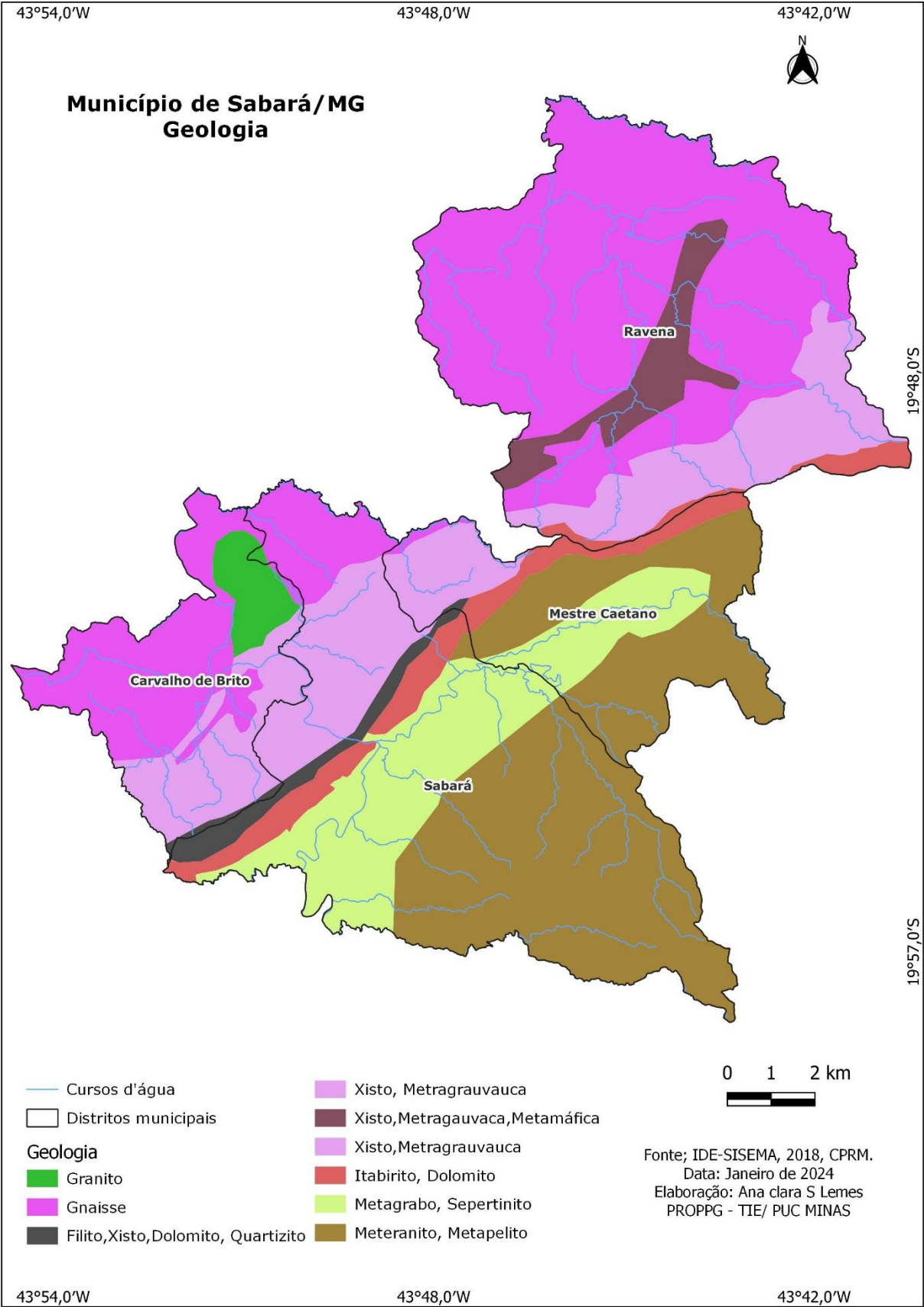
Fonte: CPRM (2005)

A geometria do quadrilátero é definida por megadobras sinformes e antiformes, truncadas por cinturões de falhas de empurrão norte-sul, na sua parte oriental. Os limites norte, sul, leste e oeste são marcados pela homoclinal da serra do Curral e as sinclinais Dom Bosco e Santa Rita, respectivamente. (Souza, 2021)

Nas estruturas descritas no quadro 5 é encontrado várias camadas estratigráficas compostas por diversos tipos de rochas, como granitos, itabiritos, xistos, filitos, hematitas, quartzitos e dolomitos, o mapa a seguir apresenta os tipos de rochas na área de estudo.

Como observado no mapa abaixo (figura 6) há presença de filitos presente na porção norte do município, em direção sudeste/noroeste, a situação chama atenção por serem rochas frágeis e com bastantes alterações, resultando em solos frágeis. Por isso são favoráveis aos deslizamentos, muito em decorrência da infiltração da água. Esse tipo de solo, em regiões com grande adensamento populacional, aumenta os riscos de deslizamentos de massa, devido à pressão exercida pelas construções no solo.

Figura 6 - Mapa de litológico do município de Sabará



Elaboração: Autora, 2023

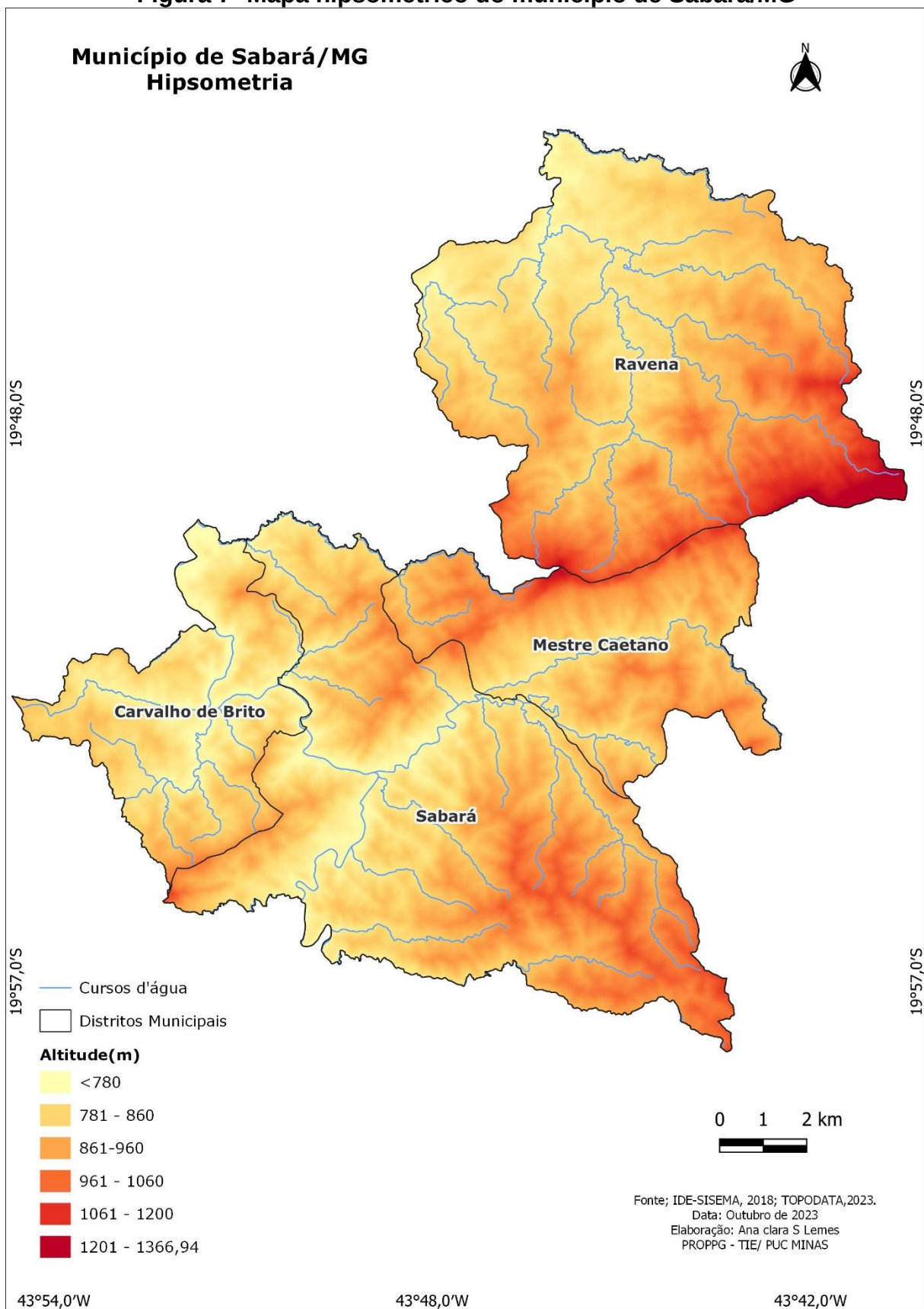
Por outro lado, a porção oeste/noroeste do município apresenta uma litologia dominante de granitos e gnaisses, que é uma rocha metamórfica de médio a alto grau. Isso significa que foi submetido a temperaturas e pressões elevadas ao longo de sua formação, no Brasil uma das rochas metamórficas mais comuns. Comparado ao filito, o granito gnaiss tende a oferecer maior estabilidade geotécnica e menor risco de movimentação de massa. Isso ocorre porque as rochas gnaisses geralmente têm uma estrutura mais sólida e resistente, resultado do processo metamórfico pelo que passou. Portanto, em áreas onde predomina o granito gnaiss, as preocupações com a movimentação da terra e a instabilidade do solo tendem a ser menores em comparação com as áreas onde o filito é predominante.

De forma geral, o município apresenta uma porção significativa de seu território composta por xistos. O primeiro ocasiona solos argilosos, enquanto o segundo resulta em solos arenosos. Ambos apresentam riscos, tais como drenagem deficiente, erosão do solo, compactação do solo, entre outros. De forma geral, esse tipo de rocha apresenta foliação, ou seja, as camadas minerais possuem uma orientação preferencial. Sua textura geralmente é fina a média, com presença de planos de clivagem em minerais como a mica.

4.2.2 Geomorfologia

A análise da geomorfologia parte da interpretação hipsométrica da região em estudo, pois é a partir dela que se consegue compreender a distribuição e variação de faixas altimétricas em relação às unidades horizontais. A hipsometria apresenta os níveis de dissecação do terreno e as áreas com maior resistência litológica, devido ao seu grau de preservação. No município de Sabará, as altitudes encontradas variam de 666 metros, nas regiões mais baixas, a 1.366 metros, na Serra da Piedade. A figura 7 apresenta a hipsometria obtida através da modelagem do MDE.

Figura 7 -Mapa hipsométrico do município de Sabará/MG



Elaboração: Autora, 2023

Com base nos dados obtidos no mapa hipsométrico (Figura 7), é possível identificar três compartimentos altimétricos no município: alta, média e baixa vertente. Cada um desses compartimentos apresenta características distintas que influenciam a dinâmica hídrica e o uso do solo.

A alta vertente é a região de maior altitude do município (1061m a 1366,94 m), situada principalmente na faixa nordeste-sudoeste e na porção sudeste. Essa área é marcada por uma elevada quantidade de rios em seu leito natural, encaixados no relevo, o que contribui para a preservação da dinâmica natural dos cursos d'água, uma vez que a topografia acidentada limita modificações humanas extensivas, como canalizações e avenidas sanitárias. A presença de interflúvios, ou divisores de água, faz dessa região uma importante zona de recarga do aquífero, onde ocorre infiltração significativa de água pluviométrica. No topo das colinas, o escoamento superficial é laminar, encurtando a formação de sulcos, ravinas ou voçorocas.

A vertente média (861m a 1060m), localizada de forma dispersa pelo município, corresponde às áreas de transição entre os interflúvios e os vales. Nessa faixa altimétrica, o solo se torna mais espesso em relação à alta vertente, inferior ao início da abertura dos vales. O escoamento superficial é concentrado, aumentando a probabilidade de processos erosivos como sulcos, ravinas e voçorocas. Essa região, denominada zona de contribuição dinâmica, recebe parte da água que não foi totalmente infiltrada na zona de recarga, contribuindo para o fluxo em direção ao aquífero.

A baixa vertente possui altitudes de 666m a 860 metros, correspondente ao fundo dos vales e áreas próximas aos cursos principais d'água, a baixa vertente apresenta uma topografia mais aberta, o que reduz a velocidade do escoamento superficial e facilita a deposição de sedimentos. Nessas áreas, o escoamento superficial concentrado diminui, inibindo a formação de sulcos, ravinas e voçorocas. Essas características

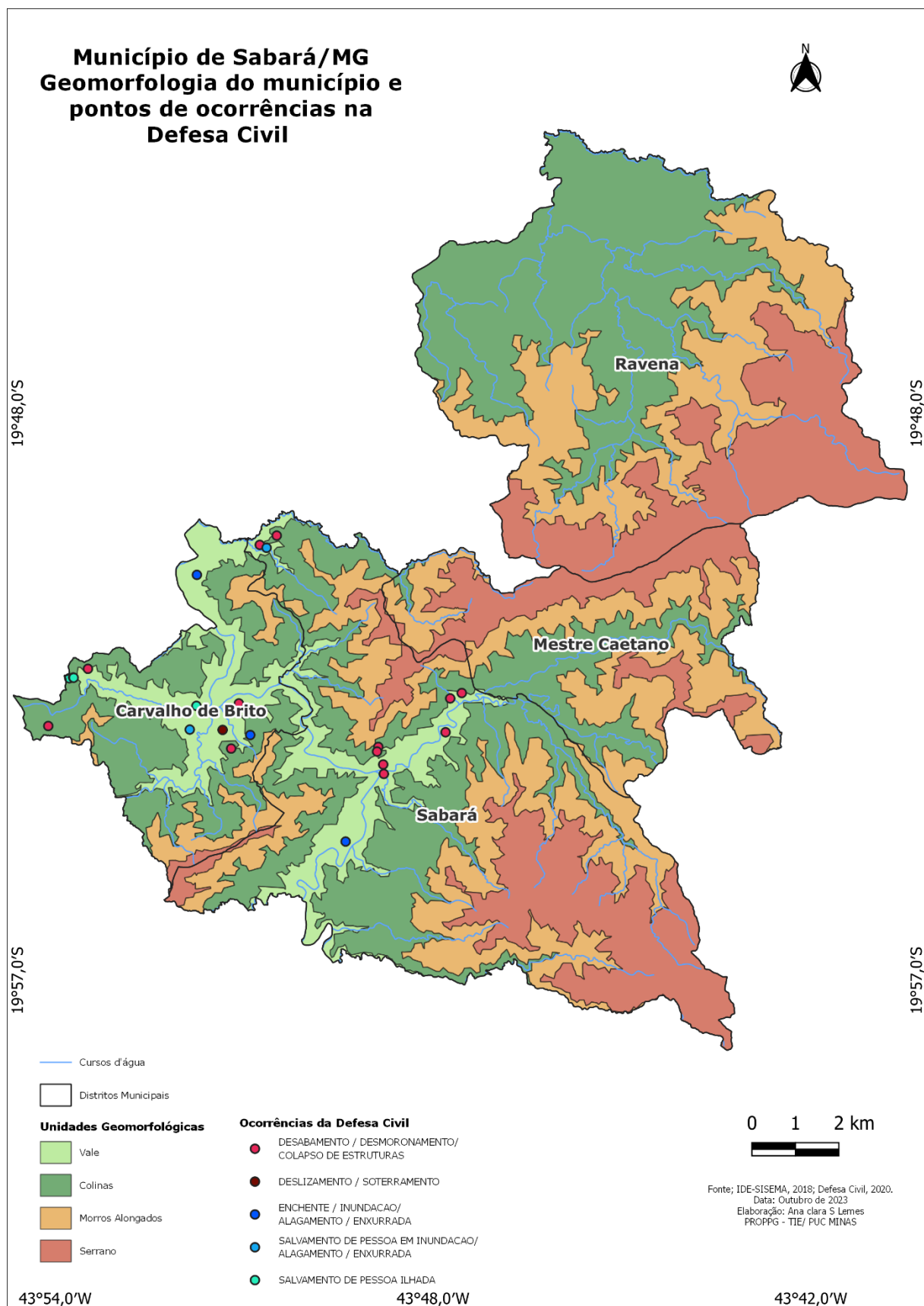
fazem da baixa vertente uma área mais estável e, comumente, mais sujeita à ocupação urbana, o que pode trazer desafios para a preservação dos corpos d'água.

A macroestrutura geológica permite definir duas grandes unidades de relevo: a Depressão de Belo Horizonte e as Serras do Quadrilátero Ferrífero, subdivididas em quatro unidades geomorfológicas sendo elas Depressões, Colinas, Morros alongados e Serrano (Planalto serrano), como apresentado na figura 8.

Os vales de rios são uma formação geográfica escavada pela ação erosiva de um rio ao longo do tempo. Os vales fluviais possuem uma forma alongada e podem ser em "V" ou "U", dependendo do tipo de erosão e do relevo ao redor. No município de Sabará, observa-se uma predominância desse tipo de relevo em dois distritos localizados na porção sul: Carvalho de Brito e a Sede (Sabará). As áreas de Vale também registraram o maior número de ocorrências relatadas pela defesa civil no ano de 2020.

No caso das formas de relevos conhecidas como colinas, trata-se de elevações suaves. As vertentes apresentadas em comprimentos médios e suas altitudes não são tão significativas, porém são suficientes para tornar sua orientação suscetível a uma erosão maior. Essa região possui um relevo caracterizado por espigões, colinas de topo plano a arqueado e encostas policonvexas de declividades variadas nas laterais dessas feições e nas transições.

Figura 8 -Mapa de Geomorfologia do município e pontos de ocorrências na Defesa Civil em Sabará/MG



Elaboração: Autora, 2023.

O município de Sabará está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, que é o maior afluente do Rio São Francisco em extensão. O Rio das Velhas tem sua nascente na Serra do Veloso, na região de Ouro Preto, e deságua no Rio São Francisco. Suas águas percorrem cerca de 716 km e drenam uma bacia de 29.173 km². Essa bacia se subdivide em Alto, Alto Médio, Médio Baixo e Baixo Rio das Velhas, sendo que a área de estudo abrange 63% do seu território localizado no Alto Rio das Velhas. No entanto, essa região está sendo prejudicada pelo lançamento de esgotos e efluentes industriais.

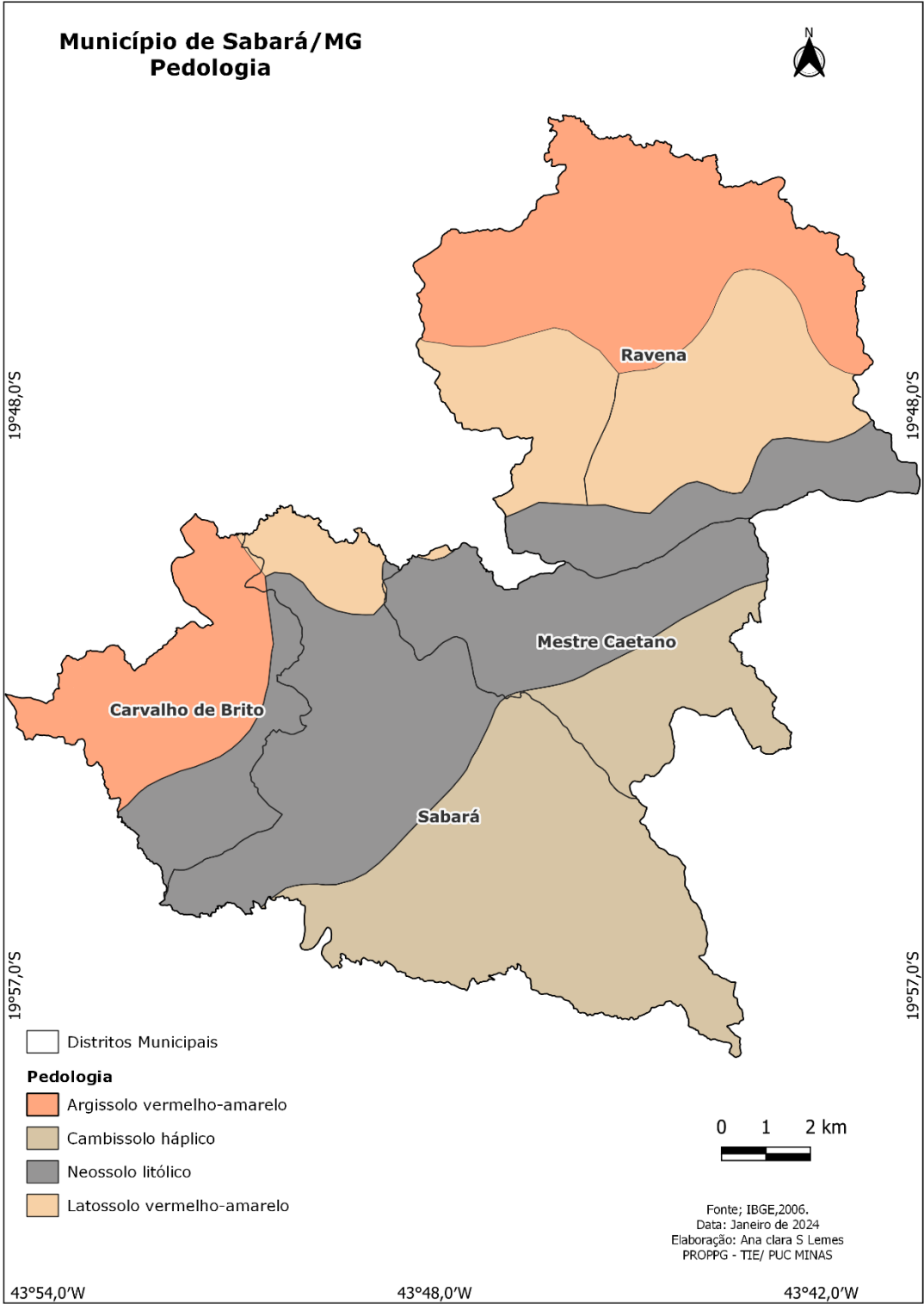
O Alto Rio das Velhas abrange uma área de 1.943 km², que se estende desde a sua nascente até os municípios de Sabará e Raposos. É nessa região que está localizada um dos principais mananciais de abastecimento de água urbana da região metropolitana, sendo responsável pelo atendimento de 2 milhões de habitantes dessa área. O Alto Rio das Velhas possui uma importância econômica devido à intensa atividade mineradora da região, com as explorações principais envolvendo minério de ferro, ouro e gemas. Além disso, observa-se um crescente adensamento populacional que impulsiona o crescimento imobiliário. No entanto, esta situação apresenta grandes incompatibilidades e uma grande propensão a conflitos (Nonato *et al.*, 2007).

Outro curso d'água importante para o município é o Ribeirão Sabará, que é um afluente da margem direita do Rio das Velhas com sua nascente localizada no município de Caeté, por isso em algumas situações é denominado Ribeirão Caeté-Sabará. Atualmente, a mineração é uma das atividades econômicas que mais pressionam a sub-bacia do Ribeirão Caeté-Sabará.

4.2.3 Pedologia

O mapeamento das classes de solo foi realizado conforme o manual técnico de pedologia (2015). O município de Sabará apresenta três tipos de solos, sendo eles: Argissolo Vermelho Estrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Cambissolo háplico, conforme apresentado a seguir (Figura 9).

Figura 9 - Mapa de Pedologia do Município de Sabará/MG



Fonte: Elaborado pela autora

Os Cambissolos são formados principalmente devido à ação do intemperismo nos materiais geológicos. Geralmente, são encontrados em regiões com abundância de água, mas com pouca atuação da lixiviação, resultando na remoção limitada de nutrientes do solo. Em relação aos seus horizontes, o horizonte B é encontrado em estágio inicial, formado logo abaixo do horizonte A de qualquer tipo, geralmente com menos de 40 cm de profundidade e apresentando baixo desenvolvimento pedogenético. Apesar de representarem uma porção significativa no município, não constituem a classe mais abrangente, (EMBRAPA, 2018.)

Em relação aos Argissolos, eles são caracterizados pelo horizonte B textural, no qual ocorre o acúmulo de argila. Geralmente, esse acúmulo resulta da translocação da argila do horizonte A para o B. Os Argissolos apresentam argila de baixa atividade e baixa saturação por bases. Seu desenvolvimento se inicia por meio de materiais diversos e pode ocorrer em terrenos planos e montanhosos, (EMBRAPA, 2018). Apesar de estarem localizados em regiões de relevo suave ondulado, são suscetíveis à erosão. Portanto, seu uso e ocupação devem ser acompanhados de medidas preventivas e de conservação. No município de Sabará, esses solos ocupam a maior parte do território.

4.2.4 Clima

A compreensão do clima de Sabará se inicia pela análise da dinâmica climática do estado de Minas Gerais. Este apresenta uma grande variabilidade topográfica, com complexos de serras como as Serras da Mantiqueira, Canastra e Espinhaço. Além disso, não é fronteiro ao oceano, características que, por si só, conferem ao estado sua variabilidade climática. A topografia varia aproximadamente entre 76 a 2892 metros, influenciando a circulação da atmosfera no estado, principalmente a orientação dos ventos e sua velocidade. É importante observar que áreas com elevações montanhosas geralmente possuem temperaturas mais baixas do que as depressões (Nimer, 1989).

Outro fator que influencia o clima é a disposição do uso e ocupação do solo. Em áreas com cobertura vegetal, por exemplo, a energia recebida é utilizada para realizar a evapotranspiração. Nas áreas urbanas, por outro lado, a energia tende a se armazenar, ocasionando o aquecimento local e impactando na amplitude térmica das cidades, especialmente da capital (Reboita *et al.*, 2015).

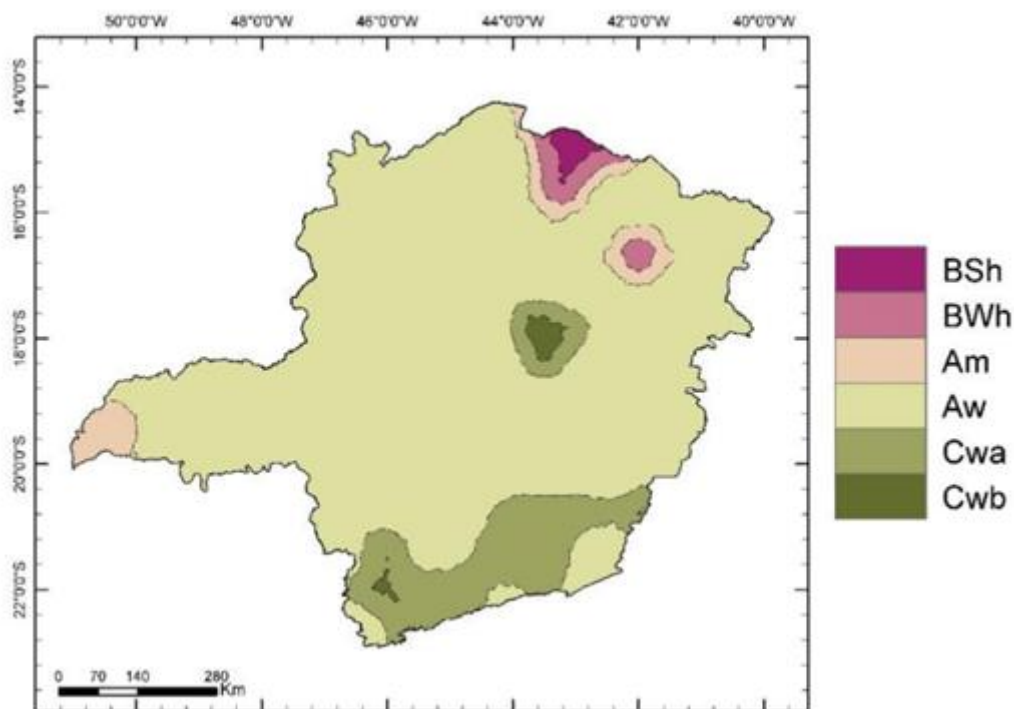
A estação chuvosa em Minas Gerais ocorre durante o verão devido às altas taxas de radiação solar, que causam diferenciação de temperatura e pressão, intensificando e deslocando massas de ar. Por outro lado, a estação seca, com baixos índices de precipitação, ocorre nos meses de inverno. Isso se deve ao caminho aparente do Sol para o hemisfério norte, resultando em menor intensidade de radiação solar e influência das massas polares e frentes frias (Nimer, 1989).

Na região sul do estado, as menores temperaturas (máximas, mínimas, médias) são atribuídas principalmente à maior latitude e topografia, como a Serra do Espinhaço. Essa região está associada às baixas temperaturas nas latitudes 43°-44°W e 17-18°S (Reboita *et al.*, 2015). Minas Gerais é marcado por uma grande amplitude térmica em seus ciclos diurnos. Por exemplo, no sul do estado, durante o verão, a temperatura mínima é aproximadamente 18°C, enquanto a máxima atinge 28°C, resultando em uma amplitude de 10°C entre o período mais quente e mais frio do dia. Já na região noroeste do estado, a temperatura mínima é cerca de 20°C, e a máxima chega a 31°C (Reboita *et al.*, 2015).

O mapa elaborado por Reboita, *et al.* (2015), indica a predominância do clima Aw (tropical com inverno seco) em Minas Gerais. No entanto, devido às elevações topográficas, o extremo sul do estado e a região entre 18°S e 43°W apresentam climas Cwa (temperado quente), e pequenas áreas podem ser identificadas com climas Cwb (temperado frio). Ambos os climas possuem inverno seco, mas o Cwb tem temperaturas inferiores. No Cwa, o verão tem temperaturas mais elevadas que o Cwb. Esses resultados são semelhantes aos de Reis (2005), que classifica Belo Horizonte como pertencente ao clima temperado quente (Cwa). Além desses tipos climáticos,

no extremo norte do estado ocorre o clima Am (tropical de monção), e pequenas áreas possuem climas Bsh (semiárido quente) e BWh (desértico quente).

Figura 10 - Mapa de Classificação climática do Estado de Minas Gerais Koppen-Geiger (1998 a 2012)



Fonte: REBOITA *et. al.* (2015)

No município de Sabará, situado no centro-sul de Minas Gerais, o clima é semelhante ao da capital do estado, Belo Horizonte, devido à sua proximidade. Ressalta-se que o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) não possui estações meteorológicas no município de Sabará, dessa forma os dados obtidos no município de Belo Horizonte podem ser usados como parâmetro de análise para o município em estudo, em especial a estação meteorológica da Pampulha (Código Estação A521).

De acordo com a classificação de Koppen-Geiger (1998-2012), o município apresenta um clima classificado como mesotérmico do tipo Cwa. A primeira letra "C" refere-se ao grupo climático, indicando um clima temperado ou temperado quente, com a

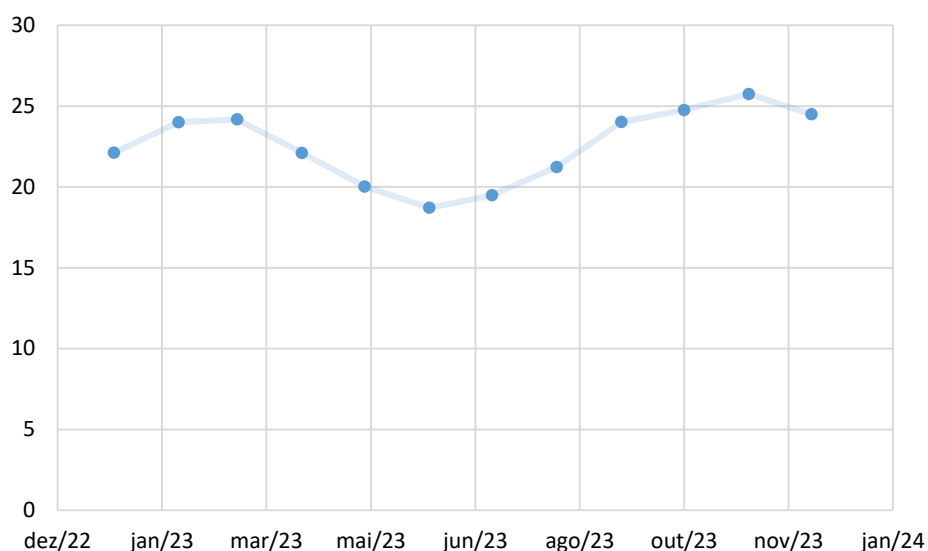
temperatura do mês mais frio variando entre 10°C e -0,3°C, e a temperatura do mês mais quente superior a 10°C.

A segunda letra "w" está associada à presença de uma estação seca coincidente com o inverno e um período chuvoso nos meses de verão. A letra "a" indica que a menor temperatura do mês mais quente foi superior a 22°C. A maioria das localidades na região sudeste, próximas a serras ou grandes elevações, foi classificada como clima mesotérmico (temperado). Dessa forma entende-se que as condições climáticas do município são caracterizadas por uma atmosfera quente e temperada.

Conforme os dados obtidos na estação meteorológica da Pampulha, em Belo Horizonte, as médias mensais alcançadas variaram próximo a 22,5°C, conforme ilustrado no gráfico a seguir. Observa-se pouca variação nas temperaturas, um cenário típico das áreas tropicais, nas quais o município está inserido. Deve-se considerar que, no contexto de Sabará, o clima quente pode exercer influência significativa sobre os processos geológicos e na distribuição da vegetação.

As altas temperaturas podem favorecer a formação dos conhecidos solos tropicais, devido ao volume de chuva característico dessa região. Apesar de serem bastante heterogêneos, esses solos são suscetíveis à erosão, que, quando combinada com outros fatores, pode ocasionar desastres ambientais.

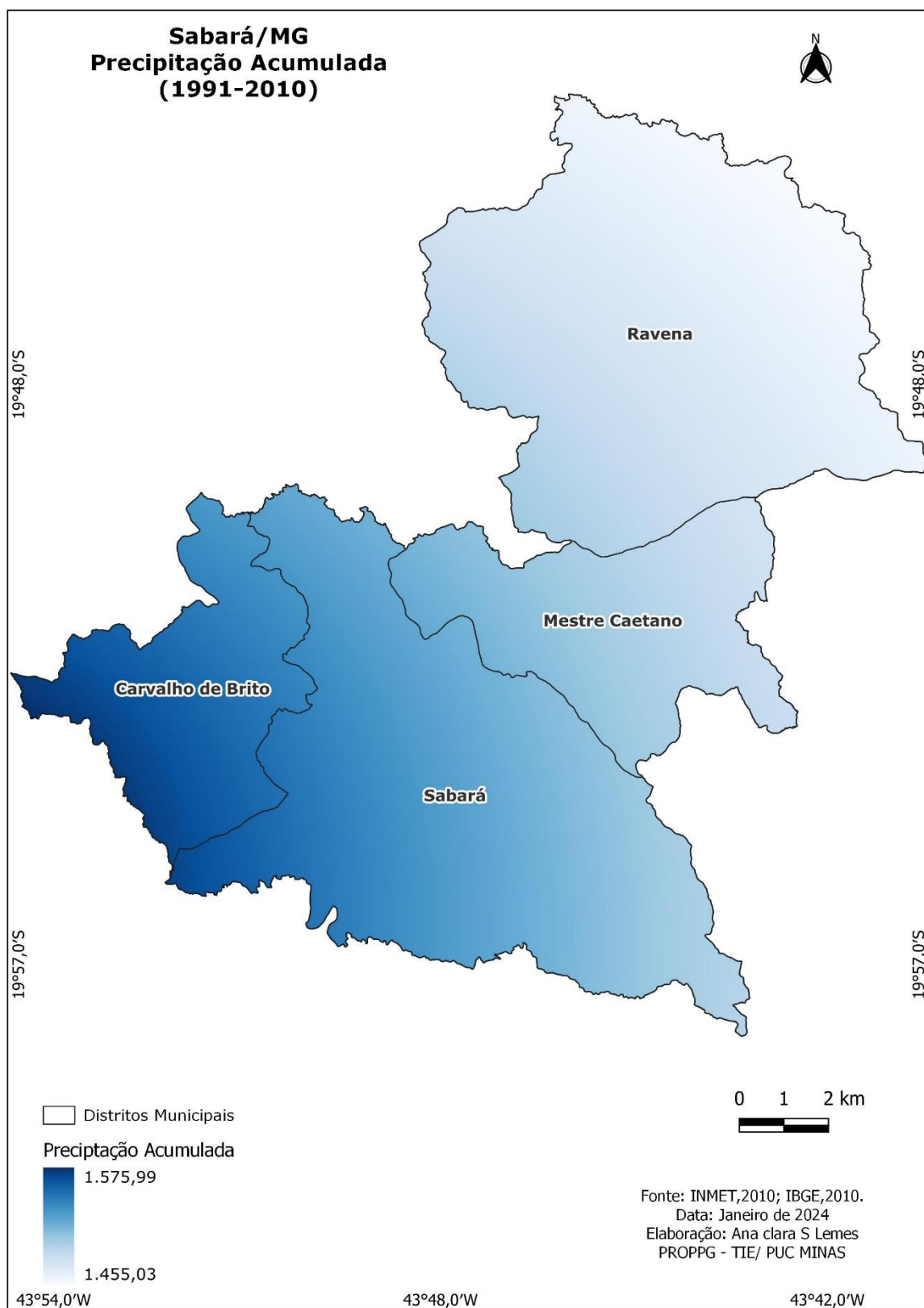
Gráfico 1 - Temperatura Média Mensal Estação meteorológica da Pampulha (2023)



Fonte: Inmet, 2023.

A pluviosidade, tem relação direta com o clima local, os dados coletados dos anos de 1991- 2010. (INMET, 2010) sugere a alta relativa de chuvas. Através do método de interpolação espacial, que assume que valores semelhantes estão mais correlacionados quando estão próximos, e a influência diminui à medida que a distância aumenta, foi possível estimar valores em locais não amostrados, visto que não há estações meteorológicas no município, como apresentado na figura 11.

Figura 11 - Precipitação acumulada entre os anos de 1991-2010



Fonte: Elaborado pela autora

As áreas a sudoeste do município registram os maiores índices de precipitação, com média em torno de 1575 mm. Em contrapartida, a região norte exhibe volumes de chuva de 1455 mm no mesmo período. Notavelmente, as máximas precipitações coincidem com áreas de densa ocupação humana. Observa-se que a diferença não é muito significativa, ficando em torno de 8,25%.

A intensidade e duração elevadas das precipitações podem desencadear inundações, um risco ampliado pelo avanço urbano. A urbanização intensa contribui para a impermeabilização do solo, impedindo a absorção de água e forçando seu acúmulo sobre a superfície ou em cursos d'água, elevando o potencial de inundações.

Além do risco de enchentes e inundações, a saturação do solo por chuvas contínuas amplia a suscetibilidade a movimentos de massa nas encostas. Construções e outras alterações antrópicas aumentam a pressão sobre terrenos já fragilizados, potencializando a vulnerabilidade dessas áreas a deslizamentos. Assim, a conjunção de alta pluviosidade, urbanização acelerada e intervenções humanas no relevo configura um cenário propício a eventos geológicos adversos, como inundações e deslizamentos, sublinhando a importância de uma gestão eficaz do uso do solo e medidas preventivas em áreas de risco.

4.3 Uso e Ocupação do solo do Município de Sabará

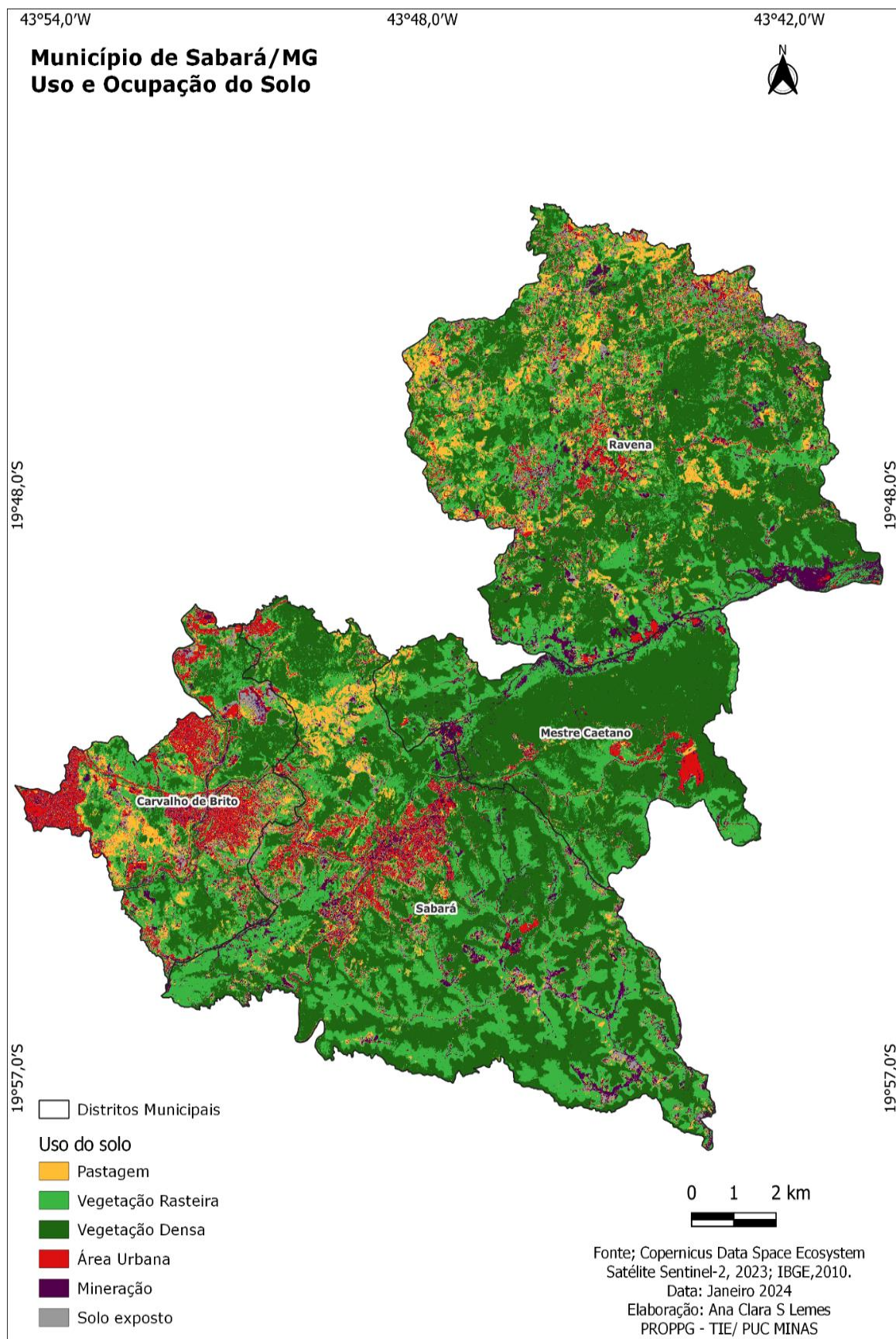
A análise do uso e ocupação do solo foi conduzida por meio do Plugin de Classificação Semiautomática (SCP), permitindo a classificação supervisionada de imagens de sensoriamento remoto. A imagem utilizada foi do Sentinel-2, com resolução espacial de 10m, escolhida devido à sua capacidade de proporcionar uma análise mais detalhada, datada no mês de dezembro de 2023.

O município de Sabará foi subdividido em seis classes, conforme apresentado na figura 12. A categoria 'Pastagem' refere-se a regiões planas com pouca vegetação em

áreas de terra, propícias para alimentação e criação de animais. 'Vegetação Densa' identifica áreas com vegetação de porte arbóreo, significativamente altas e cobrindo uma parcela considerável da área. Por outro lado, 'Vegetação Rasteira' engloba áreas com plantas de crescimento vertical baixo, frequentemente encontradas nas altas vertentes.

A 'Área Urbana' compreende regiões com modificações humanas significativas. 'Mineração' refere-se às áreas onde a atividade mineradora está em operação no município. Por fim, 'Solo Exposto' caracteriza espaços onde a vegetação foi removida sem posterior replantio, deixando o solo exposto e vulnerável à erosão.

Figura 12 - Cobertura Vegetal uso e ocupação do solo



Fonte: Elaborado pela autora

Com base nos resultados obtidos na classificação, observa-se que a maior parte do território é composta por vegetação, seja ela densa ou rasteira. No entanto, destaca-se um adensamento significativo na área urbana, especialmente no distrito de Carvalho de Brito, que faz divisa com a capital mineira. Baixas concentrações de solo exposto foram identificadas, e quando presentes, geralmente estavam próximas a regiões minerárias ou relacionadas a trilhas e estradas abertas para a mobilidade da população. As atividades minerárias identificadas estão localizadas afastadas da mancha urbana, concentrando-se nos distritos de Mestre Caetano e Ravena, essa distribuição está atribuída às necessidades da indústria minerária.

A localização da população em Sabará está intrinsecamente ligada a dois fatores determinantes. Por um lado, a presença e distribuição, dos cursos d'água desempenham um papel fundamental, favorecendo a implantação de comunidades ao longo das margens. No entanto, a proximidade com Belo Horizonte, uma metrópole em ascensão, também exerce sua influência, levando muitas vezes os habitantes a trabalhar na capital e residir em regiões mais próximas.

Atualmente, registros recorrentes de inundações destacam os desafios enfrentados pela população. A interação complexa entre fatores históricos, geográficos e ambientais influencia diretamente o padrão de ocupação e uso do solo em Sabará, evidenciando a necessidade de considerar esses elementos na gestão urbana e planejamento territorial.

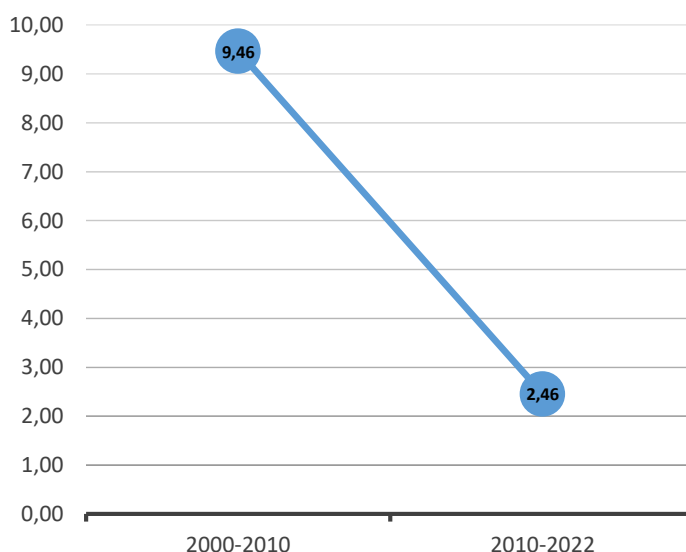
Diante desses contextos, entende-se que os padrões de uso e ocupação do solo em Sabará incluem vegetação predominante, adensamento urbano em áreas como o distrito de Carvalho de Brito, presença de solo exposto próximo a regiões minerárias, distribuição populacional ao longo dos cursos d'água e influência da proximidade com Belo Horizonte. Os desafios incluem inundações recorrentes, destacando a necessidade de considerar esses fatores na gestão urbana.

4.4 Características demográfica e socioeconômicas do município de Sabará

A dinâmica de ocupação do solo no Brasil tem passado por mudanças nas últimas décadas, impulsionadas pelo processo de industrialização. Observa-se um grande êxodo rural, motivado por diversos fatores, especialmente pela modernização do campo e pelo desejo de melhorar as condições de vida, devido à maior oferta de emprego nas cidades. Esse processo teve início no século XX e se intensificou ao longo de 1950, mas, segundo o IBGE (2010), ainda havia em torno de 69% da população residente em áreas rurais. No entanto, no ano de 2000, após 60 anos, a população urbana ultrapassou a população rural, alcançando 81,2%.

Esses dados evidenciam um processo acelerado de urbanização no Brasil, muitas vezes sem um planejamento adequado, o que acarreta em diversas consequências. Uma delas é a macrocefalia urbana, que se refere à concentração desigual de recursos e serviços em uma única cidade, originada em vários problemas. Além disso, houve o aumento da segregação urbana, o crescimento das áreas periféricas e da favelização, o aumento do trabalho informal, entre outros desafios.

No caso específico de Sabará, como mencionado anteriormente, seu processo de urbanização foi impulsionado pela chegada da indústria siderúrgica em seu território, bem como pela expansão urbana da capital, devido à sua proximidade geográfica. Após examinar os dados dos censos demográficos mais recentes, foi observado um aumento constante na taxa de crescimento do município. Entre os anos de 2000 e 2010, a taxa de crescimento simples foi registrada em 9,46%, indicando um crescimento rápido. No entanto, entre 2010 e 2022, embora o crescimento tenha continuado, houve uma queda acentuada na taxa de crescimento, registrando uma taxa de 2,46%, apenas, conforme mostrado no gráfico abaixo.

Gráfico 2 - Taxa de crescimento populacional simples

Fonte: IBGE, 2000, 2010, 2022; elaborado pela autora.

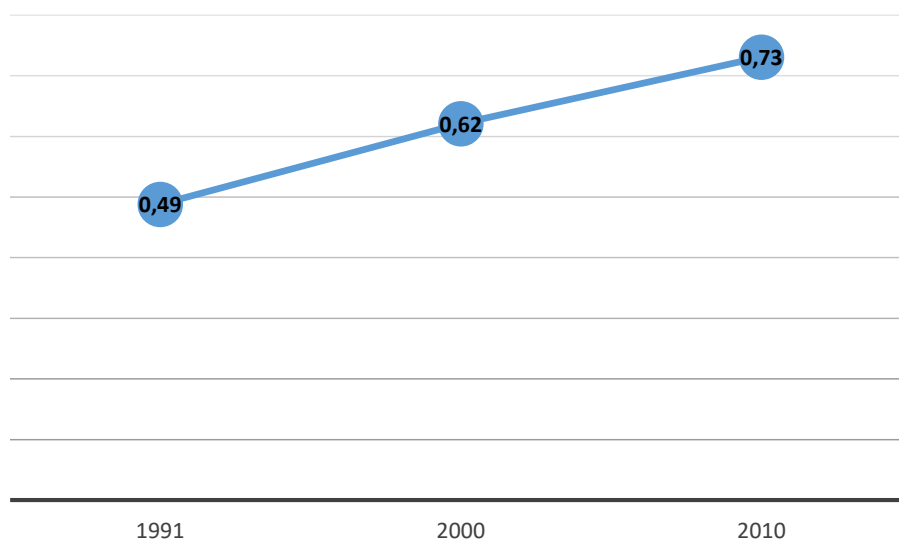
Em relação ao produto interno bruto, conforme os dados disponibilizados pelo IBGE (2000; 2010) observou-se que o PIB a preços correntes em 2000 foi de 420.539,00 reais e em 2010 aumentou para 1.391.193,00 reais. Esses números representam o valor total de todos os bens e serviços finais produzidos dentro da economia durante os anos em questão, considerando os preços correntes celebrados na época. No período de 2000 a 2010, o PIB a preços aumentou significativamente. Esses números indicam um aumento de aproximadamente 230% no PIB ao longo dessa década. Esse crescimento indica uma expansão econômica e aumento da produção de bens e serviços durante o período em análise.

Em relação ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do município em análise, os dados obtidos pelo IBGE revelam um índice baixo no ano de 1991. No entanto, há um crescimento gradual desse índice ao longo do tempo, indicando melhorias nos setores responsáveis pela qualidade de vida da população, como educação, saúde e renda per capita.

Conforme demonstrado no gráfico 3, observa-se um aumento constante no IDH do município ao longo dos anos. Isso sugere que medidas e políticas voltadas para o

desenvolvimento social foram implementadas, confiantes para a melhoria da qualidade de vida da população local.

Gráfico 3 - Índice de Desenvolvimento Humano de Sabará



Fonte: IBGE, 1991;2000;2010.

Para realizar uma análise interna do município, foi adotada a divisão territorial em setores censitários, uma vez que não havia uma base cartográfica georreferenciada dos bairros na época de realização dessa pesquisa. Ressalta-se que até o momento da conclusão deste trabalho, somente os dados preliminares do censo de 2022 haviam sido publicados. Portanto, o ano de 2010 será utilizado como base para a análise.

Para compreender a dinâmica demográfica interna de Sabará, a análise mapa populacional dividido em setores censitários no ano de 2010, conforme ilustrado na figura 13, se faz necessária. Diante disso, observe-se que a maior concentração populacional está nas proximidades da rodovia MG-262, que é a principal via de ligação com a capital de Minas Gerais. Outra área densamente povoada encontra-se na região oeste do território, onde ocorre a conurbação entre Sabará e Belo Horizonte. O grande adensamento observado está relacionado ao êxodo rural que vem ocorrendo no município nas últimas décadas, tabela 3, ocasionando uma sobrecarga da área urbana.

Tabela 1 - Situação de domicílio

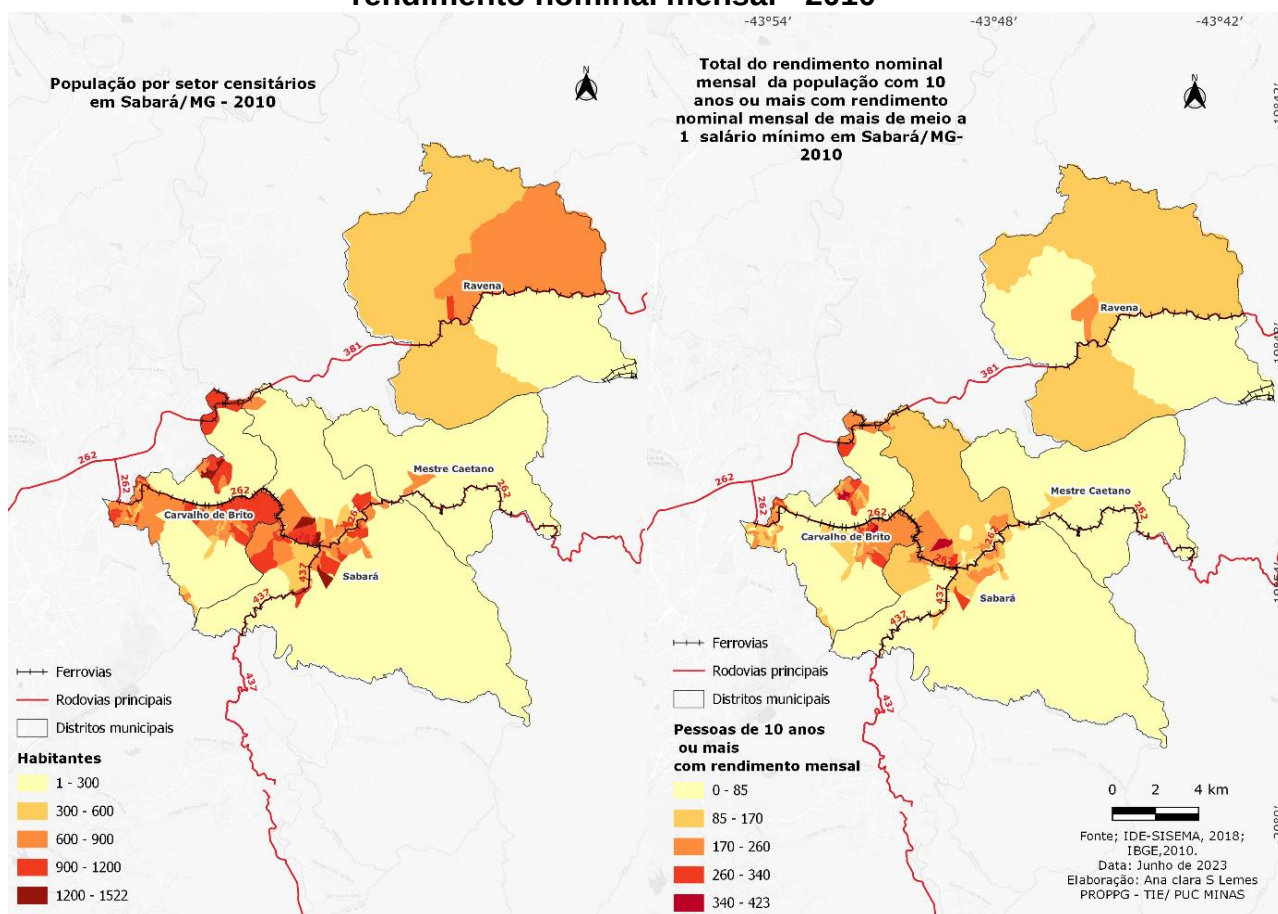
Município	Situação de domicílio	2000	2010
Sabará (MG)	Urbana	112694	123084
	Rural	2658	3185

Fonte: IBGE, 2000;2010

Ainda em relação a figura 13, é possível observar que a urbanização do município de Sabará segue um padrão semelhante ao modelo geral do país. Os espaços urbanos apresentam uma distribuição desigual, com áreas que foram apropriadas de forma irregular para o parcelamento do solo. Essa irregularidade é uma tentativa de adequar as condições topográficas da região, adaptando a ocupação humana às características do terreno

Além disso, o adensamento populacional observado revela um padrão antigo da sociedade, no qual as pessoas tendem a se estabelecer nas margens dos rios. Isso ocorre devido às facilidades oferecidas pelos cursos d'água, como acesso à água para consumo, atividades agrícolas e transporte. Essa relação entre a população e os rios é uma característica comum em muitas regiões, inclusive em Sabará.

Figura 13 - Mapa de população por setor censitário em Sabará/MG e Total do rendimento nominal mensal - 2010



Elaborado pela autora, 2023.

Os dados socioeconômicos revelam uma vulnerabilidade de renda na região de maior adensamento populacional, como mostrado na figura 6, especialmente nos distritos de Carvalho de Brito e Sabará, localizados nas margens do rio das Velhas. Essa análise indica a presença de uma população mais vulnerável que enfrenta desafios socioeconômicos flutuantes sugerindo que essas áreas requerem maior atenção e cuidado por parte do poder público.

5 ESTUDO DE CASO: Vulnerabilidade Ambiental no município de Sabará

A ocupação urbana de Sabará, é caracterizada pela irregularidade e influenciada pela topografia local. A cidade enfrentou desafios decorrentes de sua localização em uma região acidentada, resultando em uma expansão urbana desordenada. A relação entre essa dinâmica urbana e a vulnerabilidade ambiental é ponto de partida na busca por compreender os padrões de ocupação e identificar áreas de maior risco ambiental na cidade. Compreende-se que as características físicas expostas anteriormente comprometem o município.

Os principais tipos de solo em Sabará são Argissolo Vermelho Eutrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Cambissolo Háplico, cada um com suas características específicas em termos de formação e uso. Seu clima é classificado como mesotérmico do tipo Cwa, com uma estação seca no inverno e chuvas concentradas no verão. As altas temperaturas e o alto índice pluviométrico podem resultar em inundações e deslizamentos de terra. Além disso, a maior parte do território é coberta por vegetação, entretanto há uma área urbana significativa, especialmente no distrito de Carvalho de Brito.

Sabará enfrenta desafios relacionados ao manejo de recursos naturais, preservação ambiental, gestão de riscos naturais e planejamento urbano, todos os quais exigem uma abordagem integrada e sustentável para o desenvolvimento da região, levando em consideração a necessidade de análise da vulnerabilidade de seu território.

Para a análise, foi adotada a abordagem proposta por Souza (2021), que introduz uma metodologia adaptada, incluindo variáveis como forma de terreno. Além disso, destaca a importância de abordar as variáveis de forma individual e atribuir pesos a elas. Souza (2021) argumenta que as demais utilizam intervalos rígidos, resultando em dados imprecisos, enquanto a abordagem fuzzy emprega intervalos que variam de 0 a 1. Apesar da variedade de operadores de inferência fuzzy disponíveis, este estudo se concentrou na análise usando o operador gama, assim como proposto pelo autor.

Para realizar a análise, foi necessário normalizar as variáveis mencionadas no capítulo 03 da pesquisa. Foi realizada uma transformação linear simples, onde todos os valores das variáveis foram ajustados para ficarem entre 0 e 1. Esse processo é fundamental para manter a estrutura algébrica de posicionamento na grade, além de preservar características como operações de adição vetorial e multiplicação escalar, como citado por Souza (2021).

- **Fator topográfico: Comprimento da vertente e declividade (Fator LS)**

O comprimento da rampa associado à declividade desempenha um papel crucial nos processos erosivos, especialmente em regiões com baixa inclinação. Nas unidades de Colinas, caracterizadas por áreas de vertente retilínea-retilínea, retilínea-côncava, de média a baixa declividade, e com presença de ravinas e voçorocas, essa relação se torna evidente. Essa observação empírica, derivada de levantamentos de campo, destaca a importância do fator LS como uma das variáveis no modelo de fragilidade, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos processos erosivos nessas áreas. (Souza, 2021)

A declividade, é a razão entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos, ou seja, podemos dizer que a declividade é a inclinação do terreno em relação a parte mais horizontal. Conforme, com Pereira e Thomaz (2013, p. 3494), a declividade das encostas é um aspecto amplamente investigado, uma vez que desempenha um papel crucial em uma variedade de processos de vertente, como movimentos de massa e erosão, além de influenciar diretamente os padrões de uso e ocupação do solo.

Em Sabará, há vários pontos onde a declividade favorece erosões e deslizamentos, como ilustrado nas figuras abaixo. O alto grau de inclinação, juntamente com o padrão de uso e ocupação do solo adotado, influencia nos eventos observados em campo. Na figura 14, apresentada a seguir, nota-se a presença de construções no topo da vertente, e o peso dessas construções é mais um fator que potencializa os eventos de erosão. Isso ocorre porque o acúmulo de água e a pressão exercida pelo peso das

edificações podem enfraquecer a estabilidade do solo, aumentando assim o risco de deslizamentos e erosões nessa área.

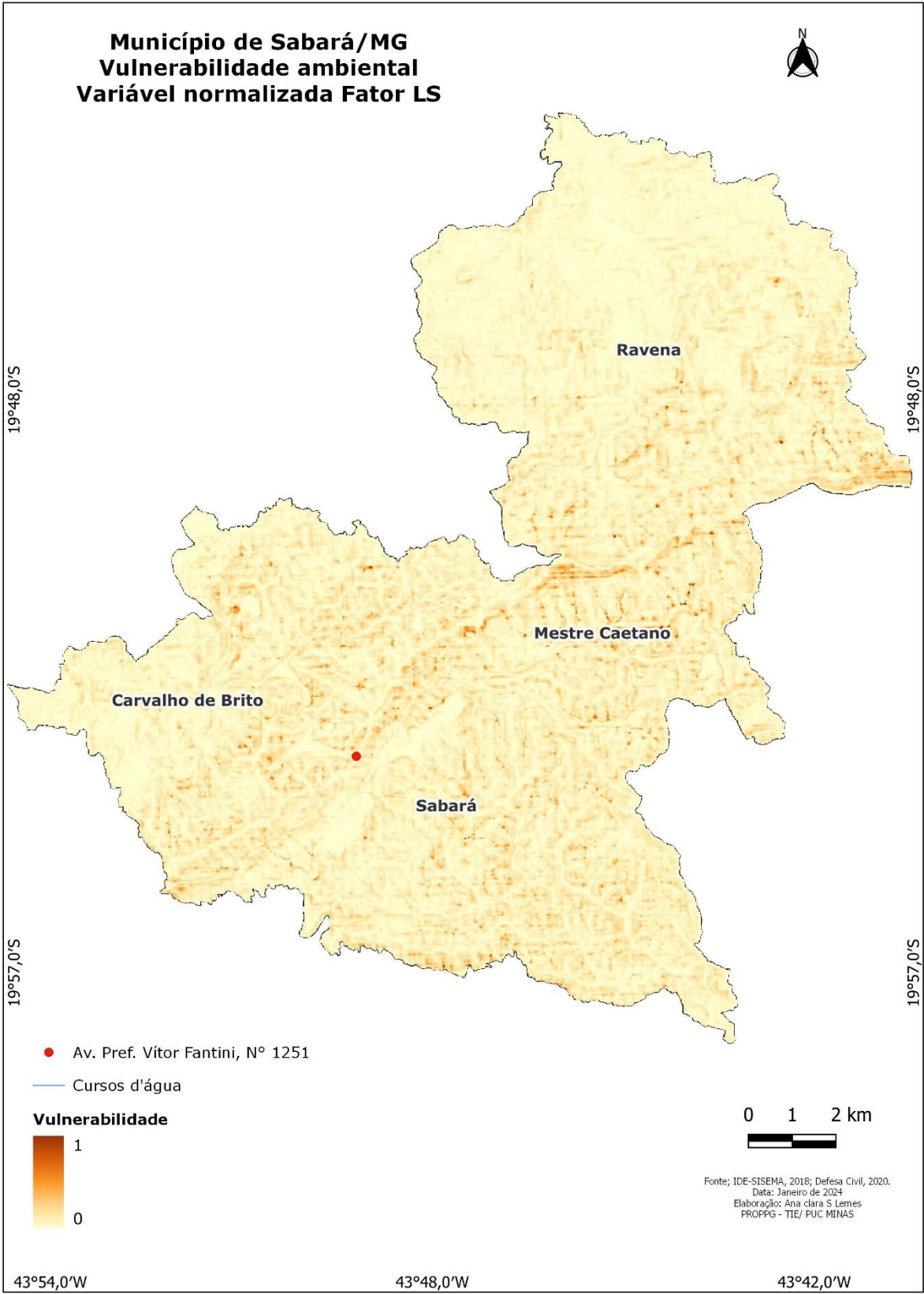
Figura 14 - Vista da Av. Pref. Vítor Fantini, N° 1251



Fonte: Autora, 2024

Bigarella (2007) sustenta que o escoamento superficial desempenha um papel fundamental na erosão causada pela chuva. No entanto, no estágio inicial do processo, a energia disponível não é suficiente para provocar a erosão. Entretanto, o potencial erosivo cresce à medida que se avança pela vertente, sendo influenciado pelo aumento do comprimento desta e pela inclinação da superfície. Ao avaliar a variável de declividade normalizada, nota-se que o ponto descrito está classificado como de vulnerabilidade média, indicando um grau moderado de risco ambiental nessa região específica, como apresentado no mapa a seguir, que apresenta bons resultados, visto que nas porções mais baixas são encontradas os níveis de vulnerabilidade mais alto.

Figura 15 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável declividade



Fonte: Elaborado pela autora.

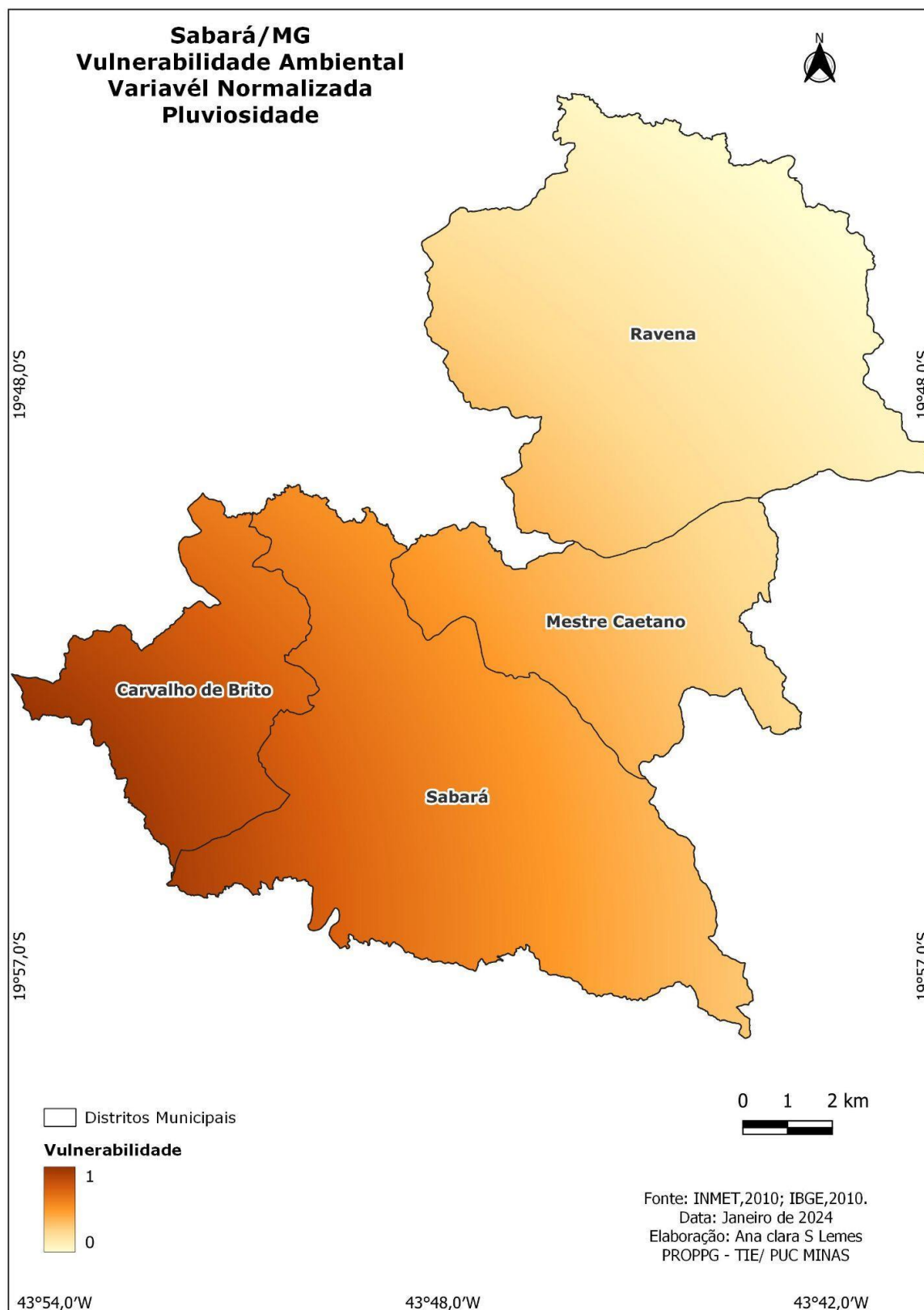
- **Pluviosidade**

Segundo Castro (2006), a precipitação refere-se a toda água proveniente do meio atmosférico que alcança a superfície terrestre, podendo ocorrer em diversas formas, cada uma caracterizada pelo estado físico da água, como neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve. Essas formas de precipitação são classificadas em três categorias principais: convectivas, que têm grande intensidade, curta duração e são restritas a pequenas áreas; orográficas, que têm baixa intensidade, longa duração e cobrem pequenas áreas; e ciclônicas, que têm longa duração, afetam grandes áreas e têm intensidade média.

Já a pluviometria, por sua vez, trata das medidas utilizadas para caracterizar a chuva, incluindo altura, duração, intensidade e frequência. Essas grandezas são geralmente registradas em estações pluviométricas, equipadas com pluviômetros e pluviógrafos, que fornecem dados essenciais para o estudo e monitoramento dos padrões de precipitação em determinada região.

As altas chuvas representam riscos ambientais significativos, incluindo erosão do solo, inundações e deslizamentos de terra. Esses eventos podem causar danos às propriedades, infraestruturas e representar perigo para a segurança humana. A análise da vulnerabilidade do município para a variável pluviosidade revelou que dos 4 distritos que compõem Sabará, 3 apresentam os maiores graus de vulnerabilidade, com destaque para Carvalho de Brito, onde prevalecem os graus forte e muito forte. Nota-se que as regiões com os maiores graus de vulnerabilidade são também aquelas com os maiores índices pluviométricos, como apresentado no mapa a seguir (figura 16).

Figura 16 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável pluviosidade



Fonte: Elaborado pela autora

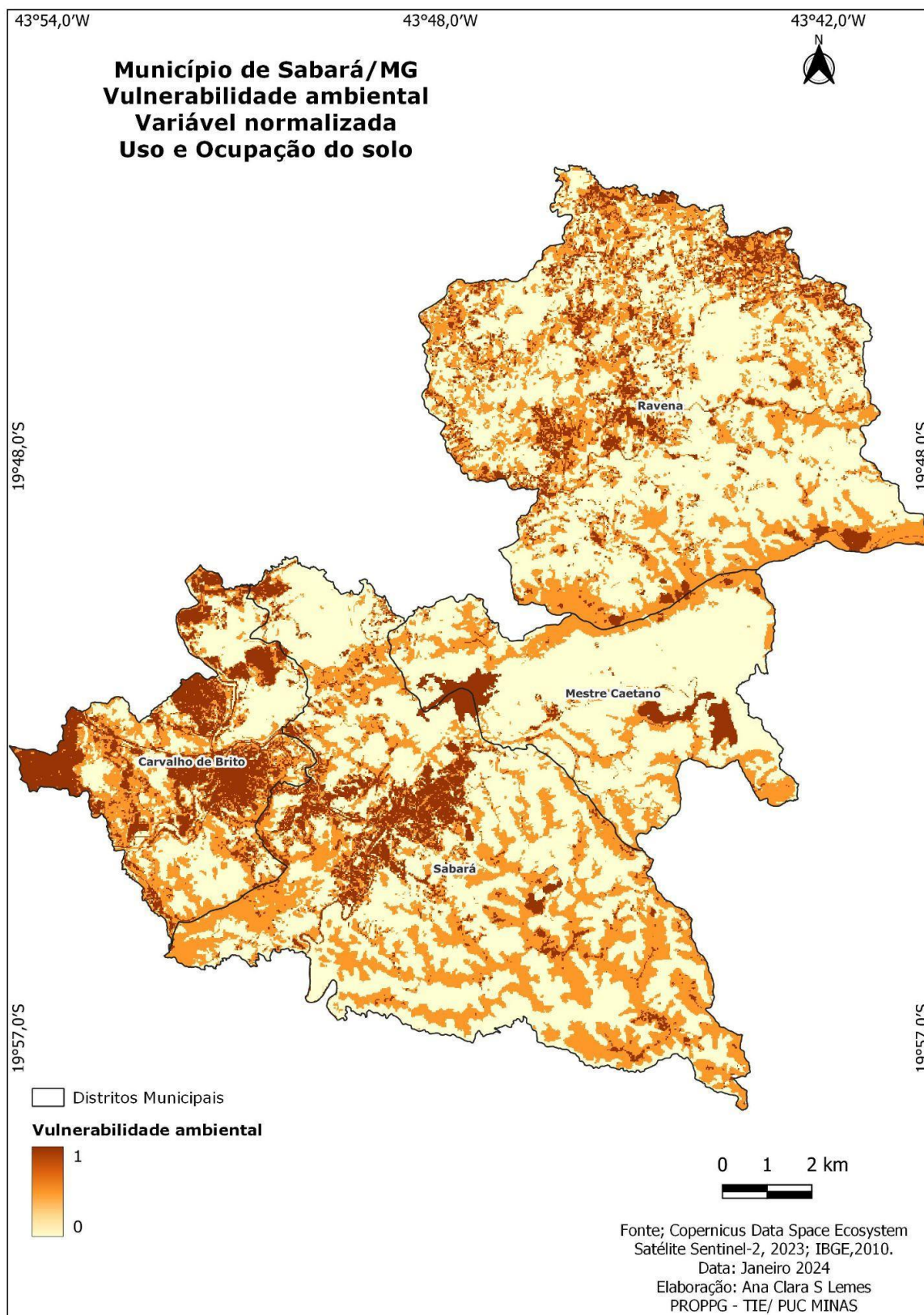
- **Cobertura e Uso da Terra**

Segundo Seabra e Cruz (2012), a cobertura da terra é uma representação das atividades humanas na superfície terrestre e está estreitamente relacionada com o uso e manejo da terra. Estudos que analisam a caracterização da cobertura da terra e seus diversos usos e manejos são ferramentas importantes para entender a magnitude e o tipo de mudanças que ocorrem em determinadas áreas.

Diante das mudanças que as regiões podem sofrer, impactos significativos podem resultar em diversos eventos ambientais danosos. Por isso, Seabra e Cruz (2012) destacam que a intensidade de um determinado uso também é relevante nesse tipo de análise. Por exemplo, no contexto da urbanização, nem sempre o crescimento das áreas ocupadas pode ser considerado mais impactante do que o aumento da densidade das ocupações.

Diante desse contexto, as mudanças realizadas acabam configurando um cenário de vulnerabilidade ambiental, conforme observado na figura 17. É possível notar que os maiores graus de vulnerabilidade estão concentrados em áreas, principalmente com solos expostos ou em áreas urbanizadas. Os solos expostos são grandes agentes potencializadores de erosões, que frequentemente resultam em deslizamentos e desmoronamentos. O Distrito de Carvalho de Brito, mais uma vez, se destaca como o distrito com os maiores graus de vulnerabilidade.

Figura 17 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável Uso e ocupação do Solo

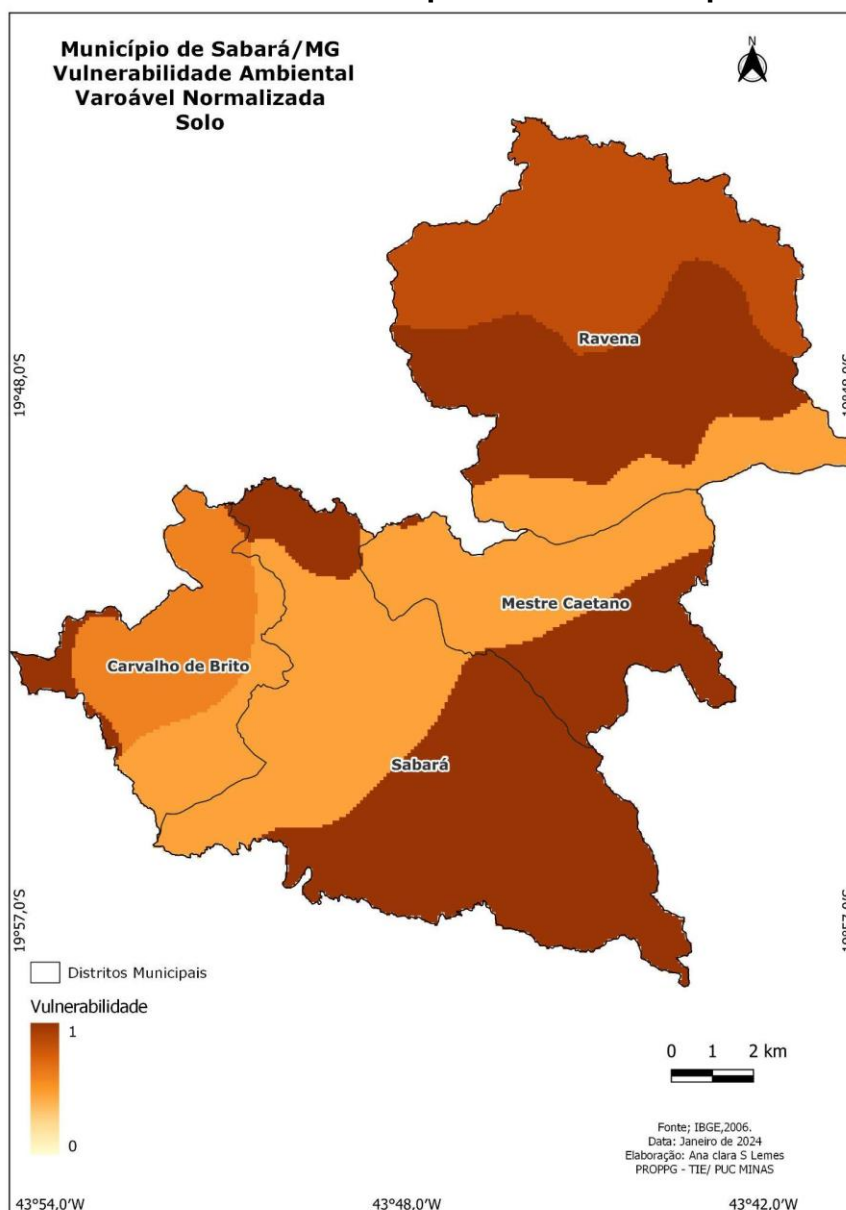


Fonte: Elaborado pela autora

- **Geologia e solo**

Em relação às variáveis Geologia e Solo, observa-se um alto grau de vulnerabilidade em ambas. No caso do solo, a maior parte do município encontra-se em grau de vulnerabilidade de forte a muito forte como apresentado na figura 18. Isso ocorre porque o município é formado por Neossolos, Argissolos, Cambissolos e Latossolos, que geralmente possuem uma susceptibilidade elevada a processos erosivos e deslizamentos devido às características do material e à topografia da região.

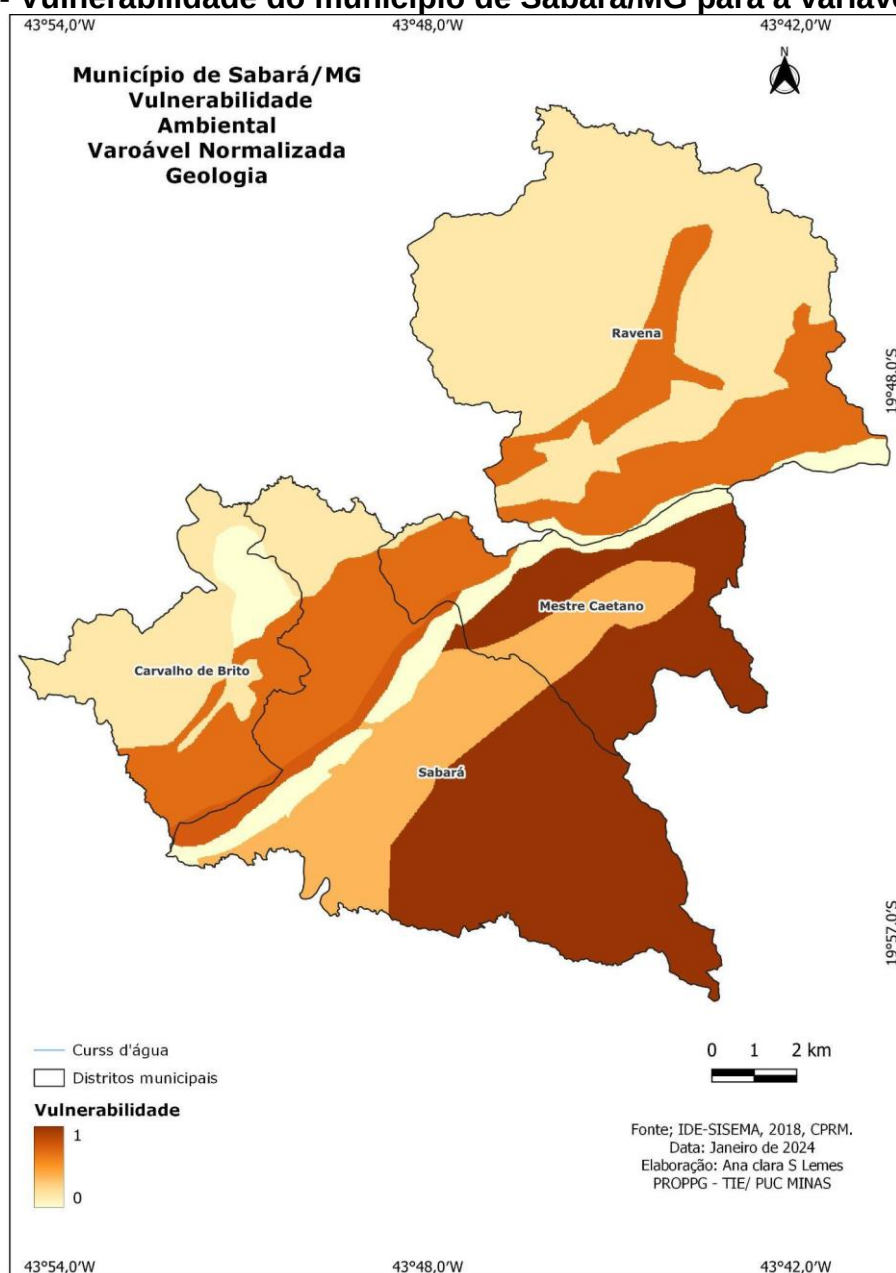
Figura 18 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável Solo



Fonte: Elaborado pela autora

Em relação à geologia, observa-se uma área maior com graus de vulnerabilidade menores do que os do solo. Entretanto, na porção sudeste do município, há um grau muito forte de vulnerabilidade. Essas regiões estão localizadas onde encontramos rochas sedimentares metamorfizadas. Nas áreas com vulnerabilidade média e forte, encontramos rochas xistosas, que também são rochas metassedimentares.

Figura 19 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável geologia



Fonte: Elaborado pela autora

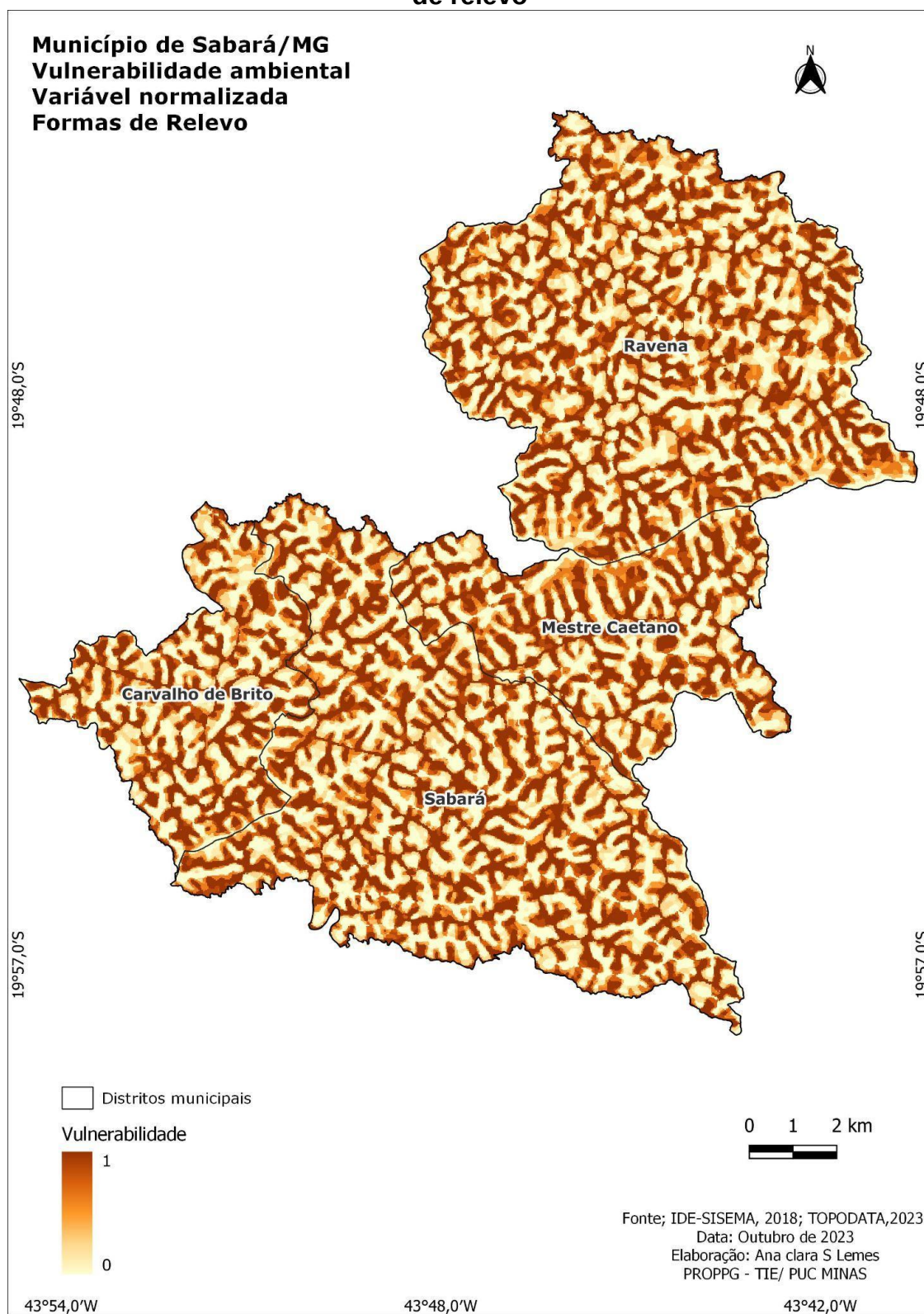
- **Formas de Relevo**

As formas de relevo são determinadas pela sobreposição entre as camadas de curvatura horizontal e vertical. Onde são atribuídos valores para cada tipo de

curvatura, e a soma desses valores representa uma determinada forma. Ao associar a curvatura vertical (côncava, retilínea e convexa) com a curvatura horizontal (convergente, planar e divergente), foram estabelecidas nove classes distintas para as formas do terreno. (V, 2003).

Entre as classes do relevo, aquela que demonstra o maior índice de vulnerabilidade é a convergente concava, caracterizada por uma concentração e acúmulo de escoamento superficial. Em contraste, a classe divergente concava e convexa mostra um baixo grau de vulnerabilidade. Isso se deve ao de pelo maior poder de dispersão do escoamento, apresentando baixa pontencialidade de perda de solo.

Figura 20 - Vulnerabilidade do município de Sabará/MG para a variável formas de relevo



Fonte: Elaborado pela autora

5. 1 Mapeamento da Vulnerabilidade ambiental com o Operador de Inferência Fuzzy Gama

A metodologia empregada na aplicação da modelagem fuzzy para este estudo envolveu duas fases. Inicialmente, ocorreu a padronização dos mapas que indicam vulnerabilidade. Seguiu-se, então, a integração de todos os indicadores visando a criação de um mapa compósito que sintetiza as informações.

Durante o processo de padronização, as funções de transformação mais recorrentes em estudos de modelagem ambiental incluem as lineares e as sigmoidais, conforme citado por diversos autores (Calijuri *et al.*, 2007; Gonçalves; Araújo; Imai, 2016; Souza, 2021). Experimentações com ambas as funções foram conduzidas, identificando-se que, embora a função sigmoideal tendesse a produzir resultados com estimativas superiores ou inferiores às esperadas, a função linear demonstrou uma adequação mais precisa aos intervalos de vulnerabilidade definidos para este estudo. Portanto, optou-se pelo emprego de uma função linear crescente na ferramenta de modelagem fuzzy, implementada nos ARCGIS e QGIS. A padronização foi efetuada com base em um sistema de avaliação que varia de 0 a 1, onde valores próximos a 0 indicam áreas de menor vulnerabilidade e valores próximos a 1, áreas de maior vulnerabilidade.

Na subsequente fase do estudo, procedeu-se à agregação dos indicadores. Essa integração foi realizada utilizando o operador gama fuzzy, que oferece flexibilidade na geração de cenários de fragilidade, conforme a equação que se segue

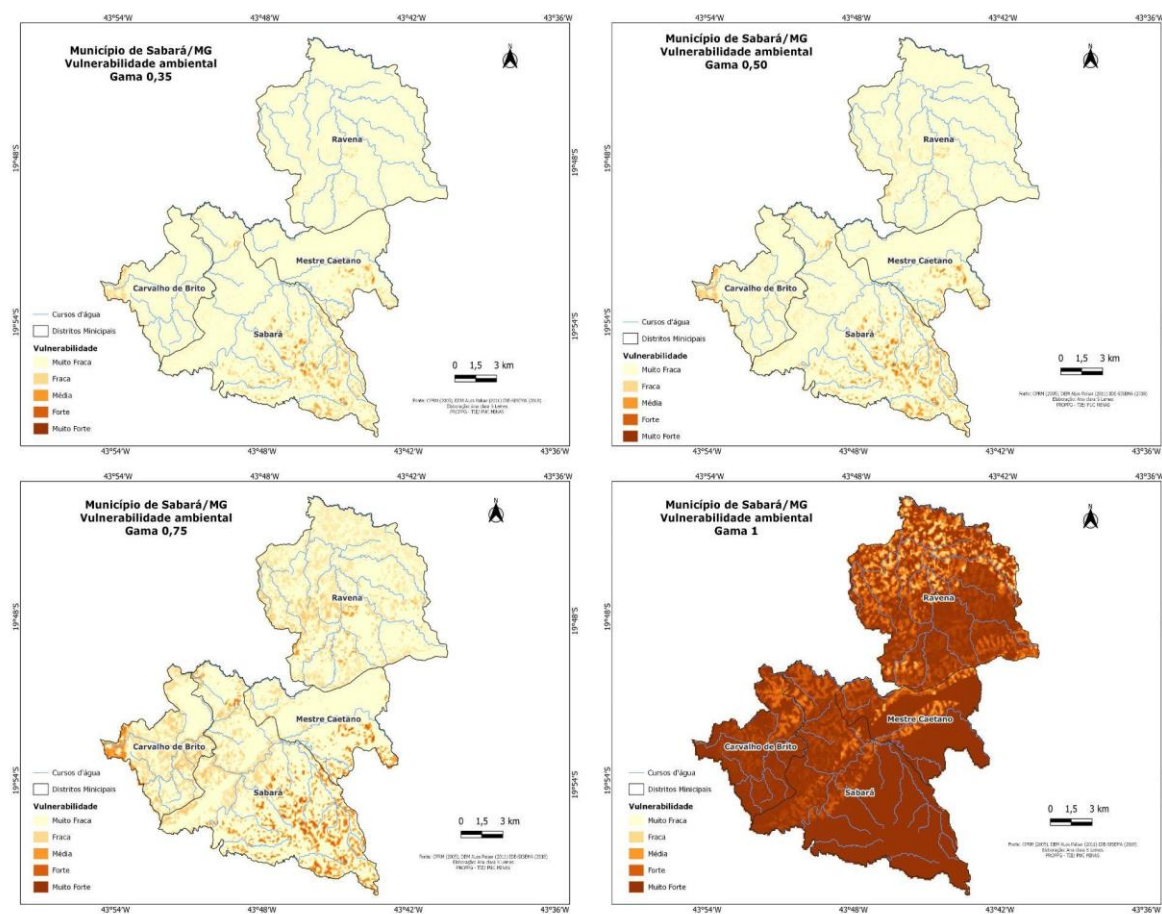
$$\text{Gama} = (\text{soma algébrica fuzzy})^{\gamma} \times (\text{produto algébrico fuzzy})^{1-\gamma}$$

Onde γ é um valor escolhido entre zero e 1, representando o nível de flexibilização. Segundo Souza (2021), valores de gama entre 0 e 0,35 têm um caráter "diminutivo", ou seja, são sempre menores ou iguais ao menor membro Fuzzy de entrada. Valores de gama entre 0,8 e 1,0 têm um caráter "aumentativo", e o valor de saída será igual ou maior que o maior membro Fuzzy de entrada. Para valores de gama entre 0,35 e 0,8, o resultado não apresenta nem um caráter "aumentativo" e "diminutivo"; os valores de saída estarão sempre entre o menor e o maior valor de entrada.

Para o município de Sabará, modelagem e aos procedimentos adotados, na etapa de inferência fuzzy gama, foram escolhidos diversos valores, para que fosse possível a realização de comparação e a escolha do que melhor representasse a realidade, sendo assim foram escolhidos os seguintes valores para o índice γ : 0,35; 0,50; 0,75 e 1,0. Assim foram gerados mapas temáticos conforme a escala proposta por Ross (1994) muito fraca (1), fraca (2), média (3), alta (4) e muito alta (5).

A análise comparativa demonstrou que ao aumentar o valor do índice gama, os cenários de vulnerabilidade também aumentam. Por outro lado, nota-se que abaixo do índice 0,50, há uma maior incidência de cenários com vulnerabilidade mais baixa, conforme apresentado na figura 21 a seguir.

Figura 21 - Cenários da modelagem da vulnerabilidade ambiental do município de Sabará, obtidos pelo operador gama, com diferentes graus de pertinência.



Fonte: Elaborado pela autora

Entre os 4 cenários analisados nesta pesquisa, identificou-se uma grande diferença entre a soma algébrica Fuzzy (gama 1) e o produto algébrico Fuzzy (gama 0,35). Isso mostra que a partir do produto algébrico fuzzy (0,35), há uma tendência de aumento da vulnerabilidade. Nota-se que o crescimento vai desde as áreas menos suscetíveis até as mais suscetíveis. Isso ocorre porque, no caso do índice 0,35, há uma maior porcentagem de áreas identificadas com menor fragilidade, enquanto no gama 1, a porcentagem mais significativa refere-se às classes de maior fragilidade.

De acordo com Souza (2021), no contexto do produto algébrico, as multiplicações ocorrem entre vários números menores que 1. Isso implica que os resultados serão sempre menores ou iguais ao menor valor do membro Fuzzy. À medida que o valor de gama se aproxima de 1 (soma algébrica), há um aumento nas classes de maior fragilidade. Por outro lado, na soma algébrica, o resultado será sempre um valor maior ou igual ao maior valor do membro Fuzzy. Essas observações estão em consonância com os resultados obtidos na análise.

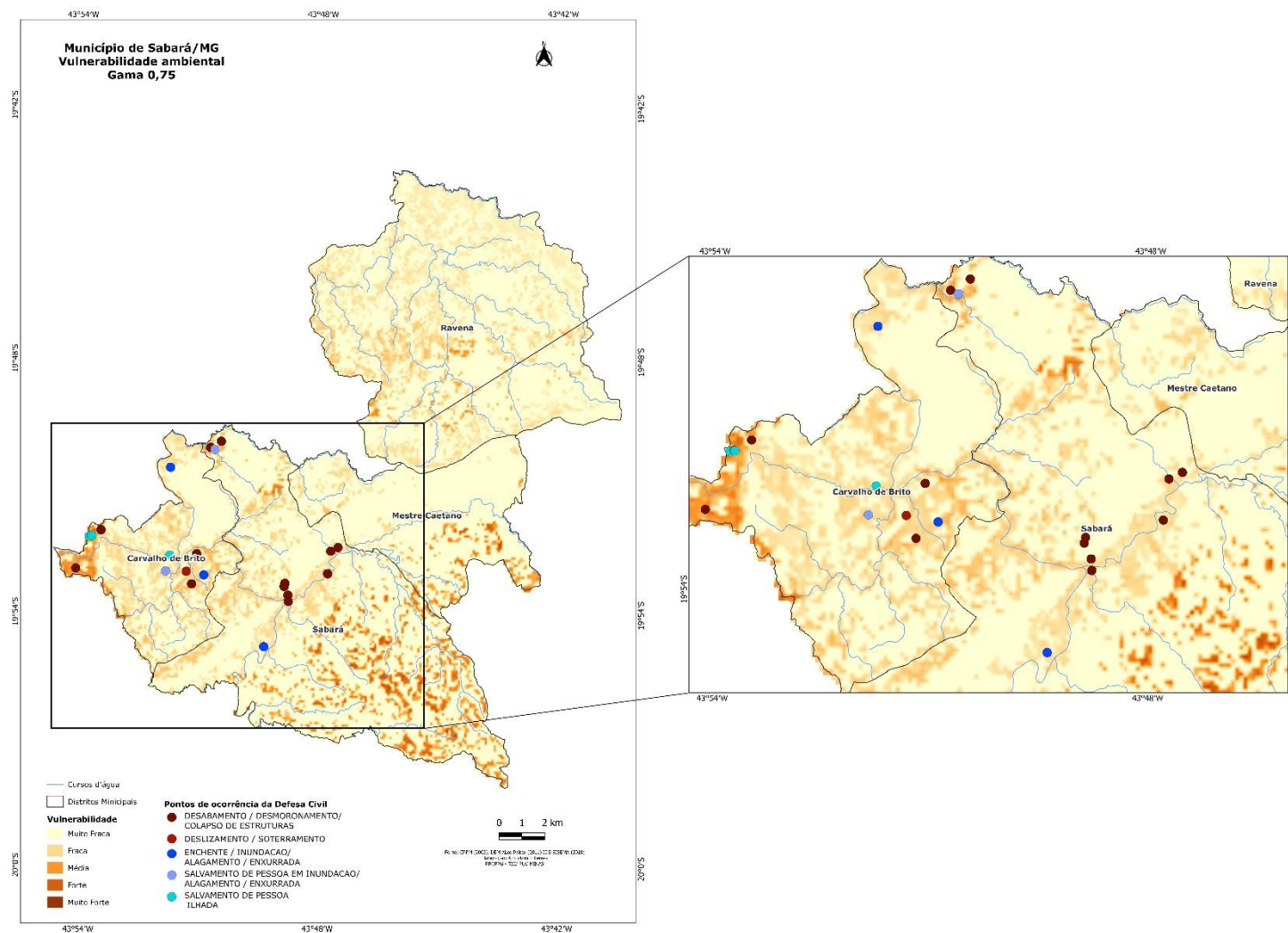
O modelo com coeficiente gama de 0,75 exibiu os resultados mais precisos na avaliação da vulnerabilidade no município de Sabará. O modelo com coeficiente gama de 1 foi excluído da análise devido à sua propensão em categorizar o município inteiro sob uma única classe de alta vulnerabilidade. A seleção do modelo mais representativo da realidade municipal baseou-se na análise de dados sobre ocorrências fornecidos pela Defesa Civil no ano de 2020. Foram considerados apenas os eventos reais, excluindo-se os casos que envolviam unicamente vistorias de risco

No modelo com coeficiente gama 1, todas as ocorrências estão concentradas em áreas classificadas como de vulnerabilidade muito alta ou alta. Ao utilizar um coeficiente gama de 0,5, observamos que 22% das ocorrências estão localizadas em regiões de média a baixa vulnerabilidade, enquanto a maioria está em áreas classificadas como de vulnerabilidade muito baixa. Já no modelo com coeficiente gama 0,3, todas as ocorrências são encontradas em regiões de baixa a muito baixa vulnerabilidade.

Dessa maneira, o modelo com coeficiente gama de 0,75 provou ser o mais eficaz, localizando aproximadamente 82,5% das ocorrências em áreas classificadas de vulnerabilidade baixa a média. Em contrapartida, cerca de 22% das ocorrências foram

identificadas em zonas de alta vulnerabilidade. Os resultados detalhados podem ser visualizados na figura subsequente.

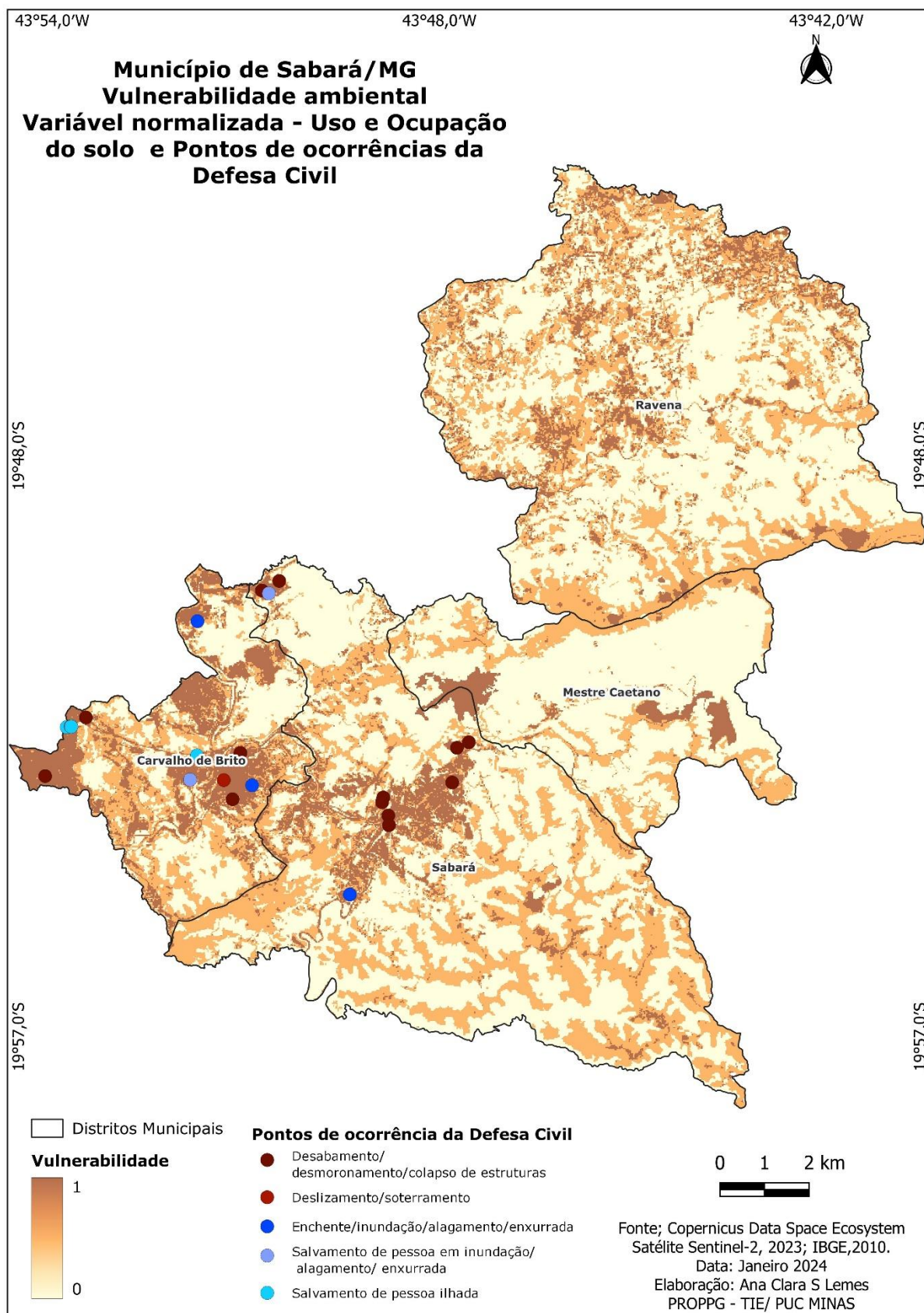
Figura 22 - Vulnerabilidade ambiental do município de Sabará, com base no método de inferência Fuzzy Gama (Gama 0,75)



Esta observação está intimamente ligada às características do uso do solo detalhadas na seção 4.3.4 deste estudo. A maior parte do território em análise é caracterizada pela presença de vegetação densa ou rasteira, além de uma notável densidade urbana no distrito Carvalho de Brito. Essa área específica registra o maior número de ocorrências identificadas, corroborando a hipótese de que o uso e a ocupação do solo atuam como fatores determinantes nos eventos de vulnerabilidade observados no município, tais como deslizamentos e desmoronamentos.

Adicionalmente, a aplicação do operador fuzzy, utilizando a variável de uso do solo normalizada, indica que tais eventos ocorrem predominantemente em regiões classificadas como de alta vulnerabilidade, conforme ilustrado na figura 24. Isso reforça a significativa influência do padrão de uso e ocupação do solo adotado em Sabará, que se desenvolveu de maneira não planejada e acelerada, impulsionada pela expansão urbana da metrópole.

Figura 23 - Vulnerabilidade ambiental Variável normalizada - Uso e Ocupação do solo e Pontos de ocorrências da Defesa Civil



Fonte: Elaborado pela autora

A análise realizada neste capítulo deixa claro que o município de Sabará enfrenta desafios notáveis, decorrentes principalmente de sua situação em uma área de topografia acidentada e de complexidade geológica significativa. A expansão urbana sem planejamento adequado, exacerbada pelas características topográficas do local, tem aumentado a vulnerabilidade ambiental da cidade, elevando os riscos de eventos climáticos extremos.

A diversidade geológica do município, caracterizada pela presença de variados tipos de rocha e formas de relevo, aliada aos diferentes tipos de solo e ao clima específico da região, configura um ambiente susceptível a fenômenos como erosão, movimentos de massa e inundações. Esse cenário é ainda mais complexificado pela tensão entre a preservação da densa vegetação nativa e o avanço da urbanização, notadamente em áreas de expansão recente como o distrito de Carvalho de Brito. Tal dinâmica enfatiza a complexidade dos desafios ambientais enfrentados por Sabará.

Nesse contexto, torna-se imperativo adotar uma abordagem holística e sustentável para o desenvolvimento futuro de Sabará, que enfatize o manejo eficaz dos recursos naturais, a conservação ambiental e a gestão de riscos associados a fenômenos naturais. A reformulação do modelo de uso e ocupação do solo em Sabará, mediante um planejamento estratégico focado em sustentabilidade, é importante para atenuar os efeitos adversos já observados e fomentar um desenvolvimento mais resiliente e harmonioso no município.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de inferência fuzzy utilizadas neste estudo confirmaram que os pontos de maior vulnerabilidade estão concentrados no distrito de Sabará. No entanto, observou-se que a incidência de ocorrências está mais pronunciada no distrito de Carvalho de Brito. Esta disparidade nos resultados pode ser atribuída às características específicas de uso e ocupação do solo em cada área. Em Carvalho de Brito, há uma maior impermeabilização do solo, devido à presença de áreas urbanas densamente construídas, o que resulta em um número de ocorrências mais elevado. Isso ocorre devido à redução da capacidade de infiltração da água no solo, aumentando o potencial de enchentes e deslizamentos. Nessas áreas, a presença de vegetação é limitada, ou até mesmo ausente, o que contribui para uma maior vulnerabilidade ambiental.

Por outro lado, em regiões com menor impermeabilização do solo, como o caso do distrito de Sabará e os demais, e maior cobertura vegetal, o risco de ocorrências é significativamente reduzido. A vegetação desempenha um papel importante na absorção de água, estabilização do solo e redução da erosão, o que pode mitigar os impactos de eventos climáticos extremos.

É evidente que a urbanização desordenada, especialmente próxima à metrópole, contribui significativamente para a vulnerabilidade ambiental em Sabará. Tal crescimento das áreas urbanas, sem um planejamento adequado, tem priorizado regiões próximas aos cursos d'água e frequentemente se estabelece em vertentes de alta declividade. Essas práticas exacerbam os riscos ambientais, aumentando a suscetibilidade a eventos como deslizamentos de terra, erosão do solo e enchentes.

Diante desse cenário, é fundamental apresentar soluções que visem mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade no município de Sabará. Algumas medidas que podem ser adotadas incluem:

- Implementação de políticas de ordenamento territorial que promovam um crescimento urbano planejado e sustentável, considerando a conservação dos recursos naturais e a redução dos riscos ambientais.
- Promoção de práticas de manejo sustentável do solo e conservação da vegetação, visando reduzir a erosão e melhorar a capacidade de infiltração da água.
- Fortalecimento da participação comunitária e engajamento público na gestão ambiental, incentivando a conscientização e ações coletivas para a proteção do ambiente.

Essas soluções, quando implementadas de forma integrada e colaborativa, têm o potencial de promover uma maior resiliência ambiental e melhorar a qualidade de vida das comunidades locais em Sabará.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGTERBERG, F. P. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: APCOM SYMPOSIUM, 21., 1989, Las Vegas. Anais... Las Vegas: Proceedings, 1989.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1977349364>. Acesso em: 14 dez. 2023.

AQUINO, Afonso Rodrigues; PALETTA, Francisco Carlos; ALMEIDA, Josimar Ribeiro. Vulnerabilidade ambiental. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2017. Disponível em: https://web.archive.org/web/20180720112316id_/http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/openaccess/9788580392425/completo.pdf. Acesso em: ago. 2023.

BARBOSA, C. C. F.; CORDEIRO, J. P. C. Manual de Referência em LEGAL. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, M. V. M. (Coords.), *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 325-345.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, D. B.; PASSOS, E. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007. v. 2.

CALIJURI, M. L. Treinamento em Sistemas de Informações Geográficas. Viçosa-MG: Núcleo SIGEO, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 156 p.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; CARVALHO, M. S. Análise Espacial de Dados Geográficos. In: DRUCK, S. et al. (Org.). Brasília: EMBRAPA, 2004. Disponível em: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.21.01.34.59/doc/2000_camar5.pdf. Acesso em: ago. 2023.

CÂMARA, G. et al. Inferência geográfica e suporte à decisão. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em:
<http://64.233.169.104/search?q=cache:EQYHIDcZp8gJ:mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.15.04/doc/cap9-inferencia.pdf>. Acesso em: ago. 2023.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V.

Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore*, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rarv/a/cXmkNxXTThc8ksdjWwFM6vNt/>. Acesso em: ago. 2023.

CARVALHO JR, W. Classificação supervisionada de pedopaisagens do domínio dos mares de morros utilizando redes neurais artificiais. 2005. 160 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. Disponível em:
http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_5cfa018b5c2c2eabf1b66802ae6d15d1. Acesso em: ago. 2023.

CASTRO, J. M. G. Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. Disponível em:
<https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/2737>. Acesso em: fev. 2024.

CORREA, I. M. C.; BERTOL, I.; RAMOS, J. C.; TAKIZAWA, M. M. Rugosidade da superfície de um Cambissolo Húmico relacionada com o preparo e compactação do solo sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 567-576, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/xmYWYztcdQjtJN6Z3hrZxYH/>. Acesso em: ago. 2023