

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial

Izabely Fernandes Souza

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL E MODELAGEM DE ÁREAS DE RISCO DE  
INUNDAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO JIRAU - MG**

Belo Horizonte  
2025

Izabely Fernandes Souza

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL E MODELAGEM DE ÁREAS DE RISCO DE  
INUNDAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO JIRAU - MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -  
Graduação stricto sensu em Geografia da Pontifícia  
Universidade Católica de Minas Gerais, campus  
Coração Eucarístico, como requisito para obtenção  
do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Batista de Souza

Área de concentração: Análise Espacial  
Linha de pesquisa: Geoprocessamento (SIG)

Belo Horizonte

2025

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S729d Souza, Izabely Fernandes  
Diagnóstico ambiental e modelagem de áreas de risco de inundação na sub-bacia do Ribeirão Jirau - MG / Izabely Fernandes Souza. Belo Horizonte, 2024.  
130 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. Bacias hidrográficas. 2. Risco. 3. Inundações - Santa Maria de Itabira (MG). 4. Mapeamento ambiental. 5. Sistemas de informação geográfica. 6. Solo - Uso. 7. Crescimento urbano. 8. Análise espacial (Estatística). 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: 911.2

Izabely Fernandes Souza

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL E MODELAGEM DE ÁREAS DE RISCO DE  
INUNDAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO JIRAU - MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -  
Graduação stricto sensu em Geografia da Pontifícia  
Universidade Católica de Minas Gerais, campus  
Coração Eucarístico, como requisito para obtenção  
do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Batista de Souza

Área de concentração: Análise Espacial Linha de  
pesquisa: Geoprocessamento (SIG)

---

Prof. Dr. Jorge Batista de Souza (Orientador)

---

Prof. Dr. Bruno Durão (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Alecir Moreira (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Alan Nunes Araújo (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 24 de abril de 2025.

“Veni, Vidi e Vici”  
(Júlio César)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me conduziu com lições de fé, amor e paciência, além de conceder força e coragem para chegar até o final dessa jornada. Agradeço com grande carinho e alegria no coração a minha família, em especial a minha mãe Geralda Perpetua Fernandes, que me motivou e acreditou nos meus sonhos e no sucesso do meu trabalho. Ao meu amor e companheiro de vida, Gabriel Caldeira Gomes, agradeço pelas colaborações na construção de conceitos primordiais, para uma melhor elaboração do trabalho e por partilhar seus conhecimentos e sugestões.

Agradeço também a mim mesma, por ter saído da minha cidade sozinha aos 17 anos em busca de estudar e realizar meus sonhos. Por nunca ter desistido, mesmo com todas as dificuldades ao decorrer desse caminho. Hoje vejo que cada luta valeu a pena, me levando a alcançar todos os sonhos que idealizei.

No campo pessoal agradeço a todos os amigos, que de alguma forma contribuíram durante minha vida e desenvolver do mestrado. Em especial agradeço a Gisele Costa, Ívia Lemos, Juliana Torres, Keula de Jesus, Layla dos Reis e Letícia Craveiro. A família que ganhei ao chegar em Belo Horizonte, agradeço por todo apoio, carinho e acolhimento, em especial agradeço a minha sogra Marli Soares Caldeira, que se fez uma segunda mãe.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil, cujo financiamento foi fundamental para viabilizar a relaização desta pesquisa. Agradeço fraternalmente ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Batista de Souza, por nortear sabiamente a pesquisa e por todo apoio no processo de elaboração deste trabalho. Afetuosamente, agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia Tratamento da Informação Espacial – PPGTIE, por todo ensinamento ao decorrer dessa caminhada.

Em especial, agradeço os professores Bruno Durão, Alecir Moreira e Alan Nunes, por todas as sugestões e orientações ao decorrer da pesquisa. Estendo também os meus agradecimentos aos especialistas que compuseram o painel para definição de pesos para as variáveis que foram implantadas na modelagem ambiental. E, por fim, agradecemos a todos que de alguma forma participaram desse processo de crescimento e conquista acadêmica.

## RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, localizada na região centro-leste de Minas Gerais, revelou uma área de aproximadamente 282,66 km<sup>2</sup>, dividida entre os municípios de Itabira e Santa Maria de Itabira. Esta Sub-Bacia, do afluente do Rio Tanque inserida na macro Bacia do Rio Doce, enfrentou graves problemas de inundação devido às suas características fisiográficas e à história de eventos climáticos extremos. As intensas chuvas de 1979, 2009 e, mais recentemente, em janeiro de 2021, demonstraram o impacto devastador das cheias sobre a infraestrutura e a vida local, evidenciando a vulnerabilidade das áreas afetadas. O objetivo principal desta pesquisa foi identificar as áreas de maior risco de inundações na Sub-Bacia, através da modelagem ambiental e análise espacial, com foco nas características geológicas, pedológicas, hidrográficas e geomorfológicas, bem como as alterações no uso do solo, influenciaram a dinâmica das inundações. A pesquisa também buscou avaliar como o crescimento urbano e as mudanças no uso da terra aumentaram o risco a desastres. Assim, a pesquisa em questão tem natureza aplicada e o método científico orientador da pesquisa é o hipotético-dedutivo, no qual formulam-se hipóteses para expressar as possíveis respostas ao problema. De forma específica, para a composição da síntese espacial da modelagem ambiental a risco de inundações, recorreu-se a análise multicritério por peso de evidência, em que atribui-se pesos para os indicadores, sendo este atribuído por um painel de especialistas, por meio da técnica AHP. Os resultados obtidos demonstraram que o Índice de Umidade Topográfico (TWI) e o Hand Model, são os mais influentes para a determinação de áreas com médio e alto potencial a risco de inundação. Assim a compreensão das áreas de risco de inundação na Sub-bacia do Ribeirão Jirau, pode ser um suporte ao poder público responsável pelos municípios que ela se localiza.

Palavras-chave: Inundação. Modelagem Ambiental. Riscos.

## ABSTRACT

The Ribeirão Jirau Hydrographic Basin, located in the central-eastern region of Minas Gerais, revealed an area of approximately 282.66 km<sup>2</sup>, divided between the municipalities of Itabira and Santa Maria de Itabira. This a tributary of the Tanque River Basin inserted in the Rio Doce macro-Basin, has faced serious flooding problems due to its physiographic characteristics and history of extreme weather events. The intense rains of 1979, 2009 and, more recently, in January 2021, demonstrated the devastating impact of floods on infrastructure and local life, highlighting the vulnerability of the affected areas. The main objective of this research was to identify the areas at greatest risk of flooding in the Sub-Basin, through environmental modeling and spatial analysis, focusing on geological, pedological, hydrographic and geomorphological characteristics, as well as changes in land use, which influenced the dynamics of flooding. The research also sought to assess how urban growth and changes in land use have increased the risk of disasters. Thus, the research in question is applied in nature and the scientific method guiding the research is hypothetical-deductive, in which hypotheses are formulated to express possible responses to the problem. Specifically, to compose the spatial synthesis of the environmental modeling of flood risk, multicriteria analysis by weight of evidence was used, in which weights are attributed to the indicators, which are assigned by a panel of experts, using the AHP technique. The results obtained demonstrated that the Topographic Wetness Index (TWI) and the Hand Model are the most influential in determining areas with medium and high potential for flood risk. Thus, understanding the areas at risk of flooding in the Ribeirão Jirau Sub-basin can be a support to the public authorities responsible for the municipalities where it is located.

Keywords: Flood. Environmental Modeling. Risks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	16
Figura 2: Pontes e Estruturas abaladas em Santa Maria de Itabira-MG no ano de 2021. ....	17
Figura 3: Lama pelas ruas de Santa Maria de Itabira-MG no ano de 2021. ....	18
Figura 4: Classificação Ameaças, Perigos, Fatores Naturais de Risco. ....	22
Figura 5: Perfil esquemático do processo de enchente, inundação e alagamento. ....	23
Figura 6: Estrutura de uma Sub-Bacia Hidrográfica. ....	26
Figura 7: Representação de Nilômetros do Egito Antigo. ....	29
Figura 8: Representação de Estação Fluviométrica. ....	31
Figura 9: Etapas Metodológicas da Pesquisa. ....	34
Figura 10: Formas de Vertente. ....	39
Figura 11: (a) MDE corrigido (b) Direção de fluxo (c) Fluxo de acumulação, e (d) Raster com altura acima da drenagem mais próxima HAND. ....	41
Figura 12: Escala proposta por Silva Neto (2013) adaptado de Valeriano (2008). ....	45
Figura 13: Classificação Climática do Brasil de acordo com Koppen (1936). ....	50
Figura 14: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. ....	57
Figura 15: Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero. ....	58
Figura 16: Geologia da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	62
Figura 17: Pedologia da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	65
Figura 18: Domínios Morfoestruturais do Brasil. Fonte: IBGE (2009). ....	67
Figura 19: Unidades Geomorfológicas do Brasil. ....	68
Figura 20: Hipsometria da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	70
Figura 21: Declividades da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	73
Figura 22: Índice Topográfico de Umidade da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	75
Figura 23: Formas de Vertente da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	78
Figura 24: Hand Model da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	85
Figura 25: Distância Euclidiana para Cursos Hídricos da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais. ....	87
Figura 26: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 1985. ....	91
Figura 27: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 1995. ....	92

Figura 28: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 2005. ....	93
Figura 29: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 2015. ....	94
Figura 30: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 2023. ....	95
Figura 31: Grupos Hidrológicos dos Solos da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau. ...	101
Figura 32: Curve Number da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau. ....	103
Figura 33: Modelagem Ambiental Simplificada da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau. .....	107
Figura 34: Riscos de Inundações Simplificado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Sede Municipal de Santa Maria de Itabira. ....	110
Figura 35: Riscos de Inundações Simplificado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Bairro Pedreira - Itabira. ....	112
Figura 36: Modelagem Ambiental Ponderada da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau. .....	115
Figura 37: Riscos de Inundações Ponderado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Sede Municipal de Santa Maria de Itabira. ....	117
Figura 38: Riscos de Inundações Ponderado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Bairro Pedreira - Itabira. ....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materias e Técnicas utilizadas para elaboração da presente pesquisa.....	35
Tabela 2: Curvaturas do relevo.....	39
Tabela 3: Valores de Curve Number com base no tipo uso e classes de solos. ....	43
Tabela 4: Atribuição de notas para as Classes de Formas de Vertentes.....	45
Tabela 5: Escala de importância relativa de comparação das variáveis.....	46
Tabela 6: Especialistas e suas áreas de atuação.....	47
Tabela 7: Distribuição dos pesos dos indicadores conforme método AHP (em porcentagem %). .....	47
Tabela 8:Valores para interpretação de coeficiente de compacidade (Kc) .....	79
Tabela 9:Valores para interpretação de fator de forma (Ff) .....	80
Tabela 10:Valores para interpretação de índice de circularidade (Ic) .....	80
Tabela 11:Valores para interpretação de densidade de drenagem (Dd) .....	81
Tabela 12: Aspectos morfométricos da Sub-bacia do Ribeirão Jirau.....	81
Tabela 13: Uso e Ocupação do Solo (Km <sup>2</sup> ) da Sub-bacia do Ribeirão Jirau. ....	89
Tabela 14: Evolução da Classe Formação Florestal.....	96
Tabela 15: Evolução da Classe Pasto. ....	97
Tabela 16: Evolução da Classe Mosaico de Usos. ....	98
Tabela 17: Evolução da Classe Plantação Florestal. ....	99
Tabela 18: Evolução da Classe Mineração.....	100

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Extrato do Balanço Hídrico Mensal – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)	53
Gráfico 2: Balanço Hídrico Normal Mensal – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)	54
Gráfico 3: Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica ao longo do ano – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)	55
Gráfico 4: Capacidade de Armazenamento x Armazenamento – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)	56
Gráfico 5: Porcentagem das Formas de Vertentes da Sub-Bacia do Ribeirão Jirau– MG	77
Gráfico 6: Histograma Raster da Distância Euclidiana dos Cursos Hídricos	86
Gráfico 7: Evolução das Classes de Uso e Ocupação Predominantes na Área de Estudo	90
Gráfico 8: Potencial de Risco de Inundação Simplificado na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau - MG	106
Gráfico 9: Riscos de Inundação por Áreas Edificadas na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau – MG	108
Gráfico 10: Potencial Risco de Inundação Simplificado – Edificações na Sede de Santa Maria de Itabira– MG	109
Gráfico 11: Potencial Risco de Inundação Simplificado – Edificações no Bairro Pedreira - Itabira– MG	111
Gráfico 12: Potencial de Risco de Inundação Ponderado na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau - MG	113
Gráfico 13: Potencial de Risco de Inundação Ponderado – Edificações	116
Gráfico 14: Potencial de Risco de Inundação Ponderado – Edificações na Sede de Santa Maria de Itabira	116
Gráfico 15: Potencial de Risco de Inundação Ponderado – Edificações no Bairro Pedreira em Itabira	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ANADEM	Modelo Digital de Terreno para a América do Sul
CETEC	Centro Tecnológico
CGE	Centro de Estudo e Gestão Estratégica
CN	Curve Number
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRED	Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres
Dd	Densidade de Drenagem
DPSV	Departamento de Solos de Viçosa
Ff	Fator de Forma
FPA	Frente Polar Atlântica
Ic	Índice de Circularidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE SISEMA	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Is	Índice de Sinuosidade
Kc	Coeficiente de Compacidade
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDT	Modelo Digital de Terreno
NRCS	Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos Estados Unidos
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PUC MINAS	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
QF	Quadrilátero Ferrífero
QGIS	Quantum GIS
SCS	SCS
SIBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de Informações Geográficas

TWI	Topographic Wetness Index
UFRS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFV	Universidade Federal de Viçosa
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	19
2.1	Desastres e Riscos a Inundações .....	20
2.2	Bacias Hidrográficas.....	25
2.3	Resgate de Eventos de Inundações no Mundo e no Brasil .....	27
2.4	Evolução de Metodologias e Técnicas para o Mapeamento e Monitoramento de Inundações .....	29
3	METODOLOGIA .....	33
3.1	Materiais e Técnicas .....	35
3.2	Referencial Teórico e Conceitual .....	36
3.3	Caracterização dos Aspectos Fisiográficos da Área de Estudo.....	37
3.4	Evolução do Uso e Ocupação no Município e Modelagem de Escoamento Superficial – Curve Number .....	42
3.5	Modelagem Ambiental Ponderada e Simplificada de Áreas com Risco a Inundação 44	
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	49
4.1	Caracterização Climática.....	49
4.1.1	Zona Climática, Classificação de Köppen-Geiger e Fenômenos Climáticos.....	49
4.1.2	Normal Climatológica .....	52
4.2	Caracterização Geológica.....	56
4.2.1	Contexto Geológico Regional .....	57
4.2.2	Litologia .....	59
4.3	Caracterização Pedológica.....	63
4.3.1	Tipos de Solos .....	63
4.4	Caracterização Geomorfológica .....	66
4.4.1	Domínios Morfoestruturais, Regiões e Unidades Geomorfológicas .....	66
4.4.2	Hipsometria e Declividade .....	69
4.4.3	Índice de Umidade Topográfico – TWI .....	74
4.4.4	Formas de Vertentes .....	76
4.5	Caracterização Hidrográfica.....	79
4.5.1	Índices Morfométricos de Sub-Bacia Hidrográfica.....	79
4.5.2	Hand Model .....	83
4.5.3	Distância Euclidiana de Cursos Hídricos .....	86
5	DIAGNÓSTICO AMBIENTAL E MODELAGEM DE ÁREAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO JIRAU.....	88
5.1	Uso e Ocupação do Solo na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau.....	88

5.1.1	Análise Evolutiva do Uso e Ocupação do Solo – 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023	88
5.1.2	Modelagem de Escoamento Superficial – Curve Number .....	101
5.2	Modelagem Ambiental de Áreas com Potencial Risco a Inundação na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau .....	104
5.2.1	Modelagem Ambiental Simplificada.....	104
5.2.2	Modelagem Ambiental Ponderada .....	113
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
7	REFERÊNCIAS .....	124



somente os municípios mineiros, mas também os municípios do Espírito Santo, deixando diversas perdas humanas e materiais (CRUZ, 2015). Já em 2009, Minas Gerais novamente sofreu com inundações que corroboraram com mais perdas e danos aos municípios que a Sub-Bacia abarca.

Em janeiro de 2021, Santa Maria de Itabira foi novamente atingida por fortes chuvas que resultaram em uma das piores inundações da história recente da cidade. As chuvas torrenciais causaram o transbordamento do Ribeirão Jirau e de seus afluentes, resultando em inundações severas que afetaram amplamente o centro da cidade e os bairros periféricos. Várias ruas foram interditadas, e pontes foram danificadas ou destruídas, dificultando o acesso às áreas afetadas. Muitas residências e comércios foram submersos, e os danos à infraestrutura foram significativos, incluindo a perda de estradas e a deterioração de sistemas de drenagem. A inundação deixou diversas pessoas desabrigadas e causou perdas materiais substanciais. A resposta das autoridades incluiu a coordenação de esforços de resgate e a implementação de medidas emergenciais para ajudar os residentes e iniciar a recuperação. (ESTADO DE MINAS, 2021) (Figura 2 e Figura 3).

**Figura 2: Pontes e Estruturas abaladas em Santa Maria de Itabira-MG no ano de 2021.**



**Fonte: Estado de Minas, 2021.**

**Figura 3: Lama pelas ruas de Santa Maria de Itabira-MG no ano de 2021.**



**Fonte: Estado de Minas, 2021.**

Considerando as características fisiográficas intrínsecas à Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - incluindo sua estrutura geológica, composição pedológica, rede hidrográfica e parâmetros geomorfométricos, levanta-se a hipótese de que estes fatores desempenham um papel crucial na predisposição a inundações. Nesse contexto, a pesquisa busca responder às seguintes perguntas:

De que maneira os atributos fisiográficos do local - geologia, pedologia, hidrografia e variáveis geomorfométricas - contribuem para a ocorrência dos desastres identificados na área de estudo? Quais as áreas de maior risco a inundação?

Esta pesquisa tem por objetivo identificar as áreas de maior risco de inundação na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - MG, através da integração de técnicas de modelagem ambiental e análise espacial. Para o atendimento do objetivo desta pesquisa foi proposto alguns objetivos específicos como:

- **Caracterização fisiográfica e socioespacial:** Analisar os aspectos fisiográficos da Sub-Bacia, com ênfase nas particularidades geológicas, pedológicas, hidrográficas, geomorfológicas e morfométricas que influenciam na dinâmica das inundações.
- **Evolução do Uso e Ocupação Humana:** Caracterizar a evolução da ocupação

humana na Sub-Bacia entre os anos de 1995 a 2023, avaliando como as alterações no uso e ocupação do solo contribuíram para o aumento da vulnerabilidade a eventos de inundação.

A relevância desta pesquisa é destacada pela exploração de uma área geográfica pouco investigada e pela necessidade de desenvolver novos estudos sobre o tema. Além disso, a pesquisa propõe o uso de metodologias e técnicas avançadas, capazes de identificar, com maior precisão, as áreas com uma maior predisposição à inundação na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau. Este estudo não só preenche uma lacuna no conhecimento científico, mas também oferece subsídios valiosos para a implementação de políticas públicas e estratégias de gestão de riscos ambientais mais eficazes.

Ademais, ao focar na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, a pesquisa contribui para um entendimento mais detalhado das dinâmicas hidrológicas e dos impactos das atividades humanas na região, fornecendo informações cruciais para a mitigação de desastres naturais e a adaptação das comunidades locais às mudanças climáticas. O desenvolvimento de modelos mais precisos e a integração de dados espaciais proporcionam uma base sólida para ações de planejamento urbano e ambiental, promovendo a sustentabilidade e a resiliência das áreas afetadas.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo apresenta o arcabouço teórico que norteia a pesquisa, proporcionando uma compreensão aprofundada dos conceitos e abordagens fundamentais para o estudo de inundações em bacias hidrográficas. Serão explorados os seguintes tópicos:

**Desastres e Riscos a Inundações:** Serão discutidos os conceitos de desastres e riscos, com foco específico nas inundações, suas causas, impactos e fatores que influenciam sua ocorrência e magnitude.

**Sub-Bacias Hidrográficas:** Serão abordados os conceitos e características das sub-bacias hidrográficas, suas particularidades e sua importância na gestão de recursos hídricos e na análise de riscos de inundação.

Resgate de Eventos de Inundações no Mundo e no Brasil: Serão apresentados exemplos de eventos de inundação significativos ocorridos no mundo e no Brasil, destacando suas causas, consequências e lições aprendidas para a gestão de riscos.

Evolução de Metodologias e Técnicas para o Mapeamento e Monitoramento de Inundações: Serão revisadas as principais metodologias e técnicas utilizadas para o mapeamento e monitoramento de inundações, desde abordagens tradicionais até o uso de tecnologias modernas como sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas.

A compreensão desses tópicos fornecerá o embasamento teórico necessário para a análise da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, permitindo uma avaliação abrangente dos riscos de inundação na região e contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e mitigação de desastres.

## 2.1 Desastres e Riscos a Inundações

A ocorrência de desastres é uma realidade que afeta desde as regiões mais preparadas e que possuem maior avanço tecnológico até as regiões mais pobres do planeta. São inúmeros os fenômenos que podem provocar desastres como, por exemplo, inundações, tempestades, terremotos, escorregamentos, erosão, furacões etc. A Política Nacional da Defesa Civil (BRASIL, 2007, p. 8), classifica desastre como:

[...] resultados de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais e, consequentes prejuízos econômicos e sociais. A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e a vulnerabilidade do sistema e é quantificada em função de danos e prejuízos.

Os desastres são conceituados como o resultado de eventos adversos que causam grandes danos e impactos para a sociedade, sendo distinguidos principalmente em função de sua origem, isto é, da natureza do fenômeno que o desencadeia (TOBIN; MONTZ, 1997 apud MARCELINO, 2007, p. 10). A Defesa Civil no Brasil, obedecendo às normativas da Política de Defesa Civil, classifica os desastres como: naturais, humanos e mistos:

**Desastres naturais:** são causados pelo impacto de um fenômeno natural de grande intensidade sobre uma área ou região povoada, podendo ou não ser agravado pelas atividades antrópicas; **Desastres humanos:** são aqueles gerados pelas ações ou omissões humanas, como acidentes de trânsito, incêndios industriais, contaminação de rios, entre outros; **Desastres mistos:** são considerados aqueles desastres que

resultam da soma de eventos naturais e de ações antrópicas, os quais, por seus efeitos globais, acabam por alterar substancialmente os ecossistemas naturais, afetando grandes extensões do meio ambiente. (BRASIL, 2007, p.41-42)

Além da conceituação do termo “Desastre” torna-se necessário compreender o conceito de “Risco”. Entende-se que riscos são avaliados por meio de perspectivas técnicas como algo capazes de ocasionar possíveis danos à saúde humana ou aos ecossistemas. Essa noção de risco abarca sempre uma qualificação específica associada ao tipo de perigo efetivo ou potencial, como risco ambiental, social, tecnológico, natural, biológico, químico, radiológico, e vários outros, associados à seguridade social e ambiental, às condições de saúde e de qualidade de vida, ou seja, ao cotidiano do conjunto social moderno (SILVA, 2009, p. 16,17).

Tendo em vista os aspectos abordados, os riscos são ocasionados sobre diversas ações, tais como falta de planejamento urbano, ambiental e em grande parte atos de políticas de escolha, aludindo a valores e pontos de vista diversificados. Em outras palavras, esse termo está interligado às decisões e ações inadequadas e desinformadas do corpo social (SILVA, 2009, p. 16,17).

De acordo com Philippi Junior et al (2004, p. 791), apesar da preocupação com o risco está aumentando em todo o mundo, as raízes dessa inquietude podem ser detectadas já nas antigas civilizações egípcia, helênica e romana. Vários significados para o termo risco têm sido apresentados ao longo do desenvolvimento da civilização ocidental, principalmente a partir da Idade Média: a expressão *rozik*, que na língua persa significa destino; a palavra latina *resecum*, que pode significar perigo; e o vocábulo grego *rhiza* (penhasco) estão ligados às origens desta palavra.

Dentro desse raciocínio, a Política Nacional de Defesa Civil (BRASIL, 2007, p. 8), classifica riscos da seguinte forma:

[...] medida de danos ou prejuízos potenciais, expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis. Relação existente entre a probabilidade de que uma ameaça de evento adverso ou acidente determinado se concretize, com o grau de vulnerabilidade do sistema receptor a seus efeitos.

Partindo desse pressuposto, o risco é comumente estimado pelo produto entre a probabilidade e as consequências. Em contrapartida, a interpretação mais global em relação a risco envolve a comparação da probabilidade e consequências, nas quais não se utiliza o produto

matemático entre dois termos para expressar os níveis de risco

O risco natural é aquele derivado da própria instabilidade dos sistemas, como os deslizamentos de encostas e inundações, sendo objetivamente relacionado “a processos e eventos de origem natural ou induzida por atividades humanas” (CASTRO; PEIXOTO; RIO 2005, p. 22).

Sob tal ótica, os riscos naturais são separados em cinco tipos dinâmicos diferentes, biológico, geofísico, hidrológico, meteorológico e climatológico, nos quais são citados e representados no quadro. (Figura 5)

Figura 4: Classificação Ameaças, Perigos, Fatores Naturais de Risco.



Fonte: CRED

Nesse contexto, levando adiante e de forma mais abrangente esse conceito de risco natural é descrito por Marandola como:

[...]Todos estes fenômenos são eventos, não raro, eventos extremos, que rompem um ciclo ou um ritmo de ocorrência dos fenômenos naturais, sejam estes geológicos, atmosféricos ou na interface destes. Contudo, não serão todos os terremotos ou furacões que serão considerados hazards, mas, como mostra White, apenas aqueles que estão em relação ou ocorrendo em áreas ocupadas pelo homem, gerando danos,

perdas e colocando em perigo estas populações. É por isso que um hazard não é natural em si, mas trata-se de um evento que ocorre na interface sociedade-natureza (MARANDOLA JR.; HOGAN, 2004a, p.98)

Partindo desse pressuposto, o risco natural é tudo aquilo que ocorre na natureza que pode gerar riscos de vida ao conjunto social, riscos tais como enchentes, alagamentos, inundações e entre outros fatores. Ressalta-se também que cada um desses eventos ocorre em diferentes velocidade e ritmos.

Torna-se necessário, para o desenvolvimento dessa pesquisa, a conceitualização mais aprofundada do conceito de Risco Hidrológico, mais precisamente no conceito de inundação e a diferenciação, desse fenômeno, com os conceitos de alagamento e enchente. (Figura 6):

O conceito de inundação é muito utilizado, principalmente em eventos que acontecem nas áreas urbanas. A inundação é o transbordamento das águas de determinado curso d'água, que atinge a planície de inundação ou a área de várzea (Morais et al, 2017, p. 15).

Segundo Tucci (2007), a ocorrência de inundações em centros urbanos é tão antiga quanto às cidades ou qualquer aglomerado urbano. A inundação ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupa áreas onde a população utiliza para moradia, transporte, recreação, comércio, indústria, entre outros.

Figura 5: Perfil esquemático do processo de enchente, inundação e alagamento.



Fonte: Defesa Civil de São Bernardo do Campo – SP.

Ainda segundo o autor, as inundações são causadas devido ao comportamento natural dos rios e também são intensificadas e ampliadas por ações do homem, como a urbanização, impermeabilização do solo e a canalização dos cursos d'água (TUCCI, 2007).

Já as enchentes segundo Pompêo (2000) são conceituadas como fenômenos naturais, que ocorrem durante um determinado período nos cursos d'água devido a chuvas de grande magnitude. Estas, em áreas urbanas, podem ser decorrentes de chuvas intensas de longo período de retorno ou devido a transbordamentos de cursos d'água provocados por mudanças no equilíbrio no ciclo da água em regiões a montante das áreas urbanas; ou ainda, causadas pelo próprio processo de urbanização.

Para Tucci (2001, p.27), as enchentes são divididas em dois tipos: as causadas devido à urbanização e as enchentes em áreas ribeirinhas:

[...] a primeira é caracterizada pelo aumento de sua frequência e magnitude devido à ocupação do solo com superfícies impermeáveis e rede de condutos de escoamentos. Adicionalmente, o desenvolvimento urbano pode produzir obstruções ao escoamento como aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento. As enchentes em áreas ribeirinhas são naturais, atingindo a população que ocupa o leito maior dos rios. Essas enchentes ocorrem, principalmente, pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior, de acordo com os eventos extremos, em média com tempo de retorno da ordem de 2 anos.

Os alagamentos correspondem ao acúmulo de água momentânea em locais que possuem deficiência em seus sistemas de drenagem (Morais et al, 2017, p. 15).

Segundo Grilo (1992), os alagamentos ocorrem, geralmente, em áreas planas ou com depressões e fundos de vales, com o escoamento superficial comprometido pela topografia e falta ou insuficiência de um sistema pluvial no ambiente urbano. Ainda, quanto menor a extensão de áreas verdes, menor a infiltração de água no solo, que alimenta os aquíferos suspensos, causando menor auxílio para o escoamento superficial, quais poderiam atenuar as causas dos mesmos (BRAGA, 2016).

Nesse sentido, após a discussão aprofundada sobre os riscos e desastres a inundação, faz-se necessário a discussão dos eventos de inundação em escala global, nacional e local, possibilitando compreender a sua distribuição espacial e temporal.

## 2.2 Bacias Hidrográficas

A Lei nº 9.433, datada de 8 de janeiro de 1997 e conhecida como Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelece uma estrutura normativa e principiológica para a gestão dos recursos hídricos, adotando as bacias hidrográficas como a unidade fundamental de análise e administração. Nesse contexto, é imprescindível que gestores e pesquisadores desenvolvam uma compreensão aprofundada do conceito de sub-bacia hidrográfica. A referida lei também institui a sub-bacia hidrográfica como a unidade territorial para a implementação da PNRH e para a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Tal definição apresenta a bacia hidrográfica como um elemento central no processo de planejamento, uma vez que a água constitui um recurso natural vital para todas as formas de vida no planeta.

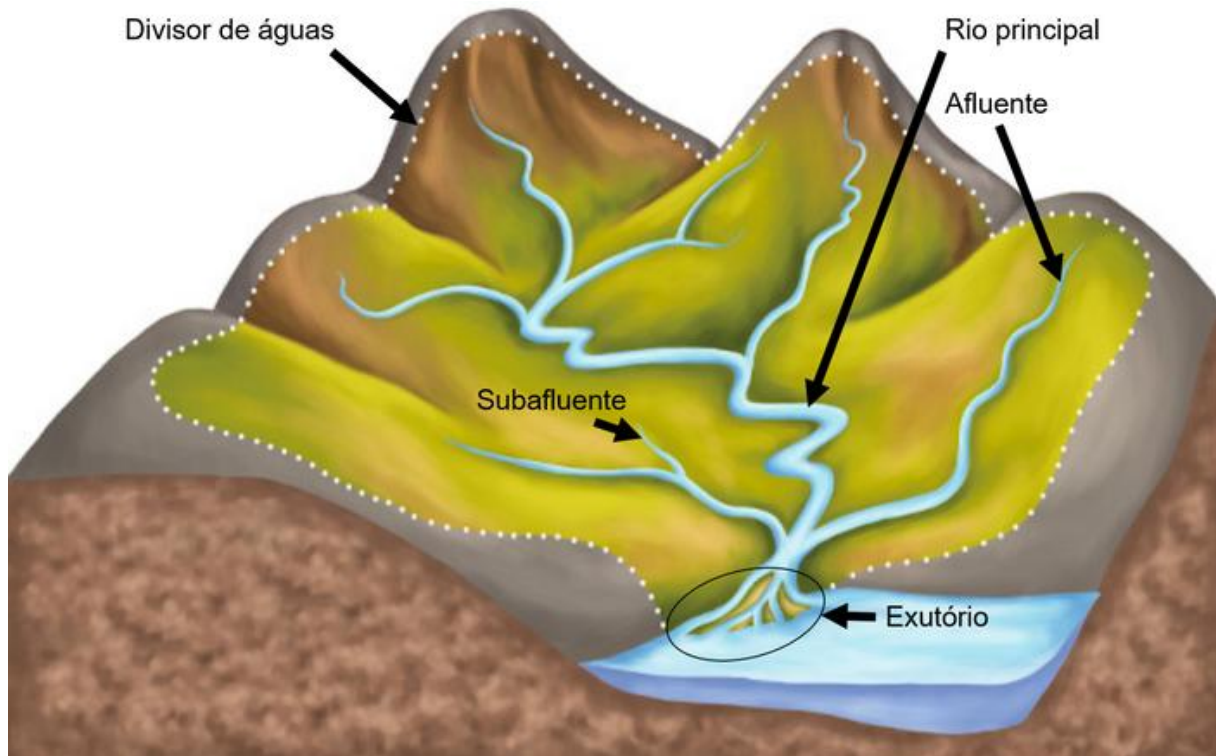
Várias definições de bacia hidrográfica foram propostas ao longo do tempo, mas todas mantêm um padrão de definição semelhante. Segundo Christofolletti (1980), uma bacia hidrográfica é uma “área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial”. Essa área drenada corresponde a uma parte da superfície terrestre esculpida naturalmente pela ação da água, que ao longo do tempo e com a ação de processos como a erosão e a deposição de sedimentos, molda os canais fluviais e as formas do relevo, incluindo vales e divisores de água.

Guerra e da Cunha (1995) descrevem a bacia hidrográfica como uma região da superfície terrestre que coleta água, sedimentos e materiais dissolvidos para um ponto comum de saída em um canal fluvial. O limite dessa área é conhecido como divisor de drenagem ou divisor de águas. De maneira semelhante, Santana (2003) define a bacia hidrográfica como uma unidade geográfica natural delimitada por divisores de água, que são as áreas de maior altitude dentro da bacia que influenciam a distribuição de água e sedimentos no sistema fluvial.

Borsato e Martoni (2004) propuseram uma definição mais detalhada de bacia hidrográfica. Segundo eles, uma bacia hidrográfica é uma região delimitada por um divisor de águas, que a separa das bacias vizinhas e atua como área de coleta natural da água de precipitação através de superfícies inclinadas. A água é direcionada para a seção de exutório por meio de uma rede de drenagem formada por cursos d’água. O exutório é o ponto de menor altitude dentro da bacia, onde ocorre a totalidade do escoamento superficial, definindo a área

banhada por esse curso d'água.

**Figura 6: Estrutura de uma Sub-Bacia Hidrográfica.**



**Fonte: OLIVEIRA (2020) adaptado de MATIAS (2019)**

De acordo com Santana (2004), as bacias hidrográficas podem ser subdivididas em várias sub-bacias, dependendo do ponto de saída escolhido ao longo do eixo principal ou canal coletor. Cada bacia se conecta a outra de ordem hierárquica superior, formando uma sub-bacia em relação à última. Em termos simples, as sub-bacias correspondem às áreas de drenagem dos afluentes do curso d'água principal. É importante notar que diferentes autores utilizam distintas unidades de medida para definir essas sub-bacias. Faustino (1996) estipula que sub-bacias têm áreas entre 100 km<sup>2</sup> e 700 km<sup>2</sup>, enquanto Rocha (1997 apud Martins, 2005) considera que elas variam de 20.000 ha a 30.000 ha, equivalente a 200 km<sup>2</sup> a 300 km<sup>2</sup>.

Já sobre as microbacias, CALIJURI e BUBEL (2006) definem como áreas formadas por canais de 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> ordem e, em alguns casos, de 3<sup>a</sup> ordem, devendo ser definida como básica na dinâmica dos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos. As microbacias são áreas frágeis e frequentemente ameaçadas por perturbações, nas quais as escalas espacial e temporal e observacional são fundamentais.

Assim, a bacia hidrográfica é uma região de drenagem com uma configuração natural e distintiva, onde áreas elevadas direcionam a água da chuva para canais que convergem em um curso d'água principal, fluindo em direção às zonas mais baixas. Esse sistema, aberto e interdependente, é influenciado por uma série de fatores complexos e abrange componentes como nascentes, rios principais, afluentes e diversas seções ao longo do curso d'água.

Além disso, faz-se necessário uma reflexão acerca dos desastres e riscos a inundações voltada para as bacias, que inclui o modo de ocupação e as ações antrópicas. E neste sentido, que se entende o conceito de bacia hidrográfica como unidade de análise e planejamento para compreender a inundações da área de estudo.

### **2.3 Resgate de Eventos de Inundações no Mundo e no Brasil**

Os relatos de inundações no mundo advém de milhares de anos, com registros importantes desde o Antigo Egito, com as grandes cheias do Rio Nilo. Ao decorrer dos anos os eventos de inundações se tornaram responsáveis por milhares de mortes em todo mundo, além dos incalculáveis prejuízos causados por essas catástrofes.

Berz (2000) relata que entre os anos 1985 e 1999, 53% das mortes no mundo foram causadas por inundações, que corresponde a cerca de 302.084 mortes. Com as inundações, registrou na mesma época inumeráveis prejuízos nos municípios que eram atingidos por esses desastres, chegando a cerca de US\$ 275 bilhões (Berz, 2000).

Complementando as afirmativas anteriores Jakubicka et al. (2010), os dados do Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED-EM-DAT) do período de 1900 a 2011, verificaram uma alta incidência de inundações e catástrofes naturais. Esse aumento pode ser justificado pela combinação de fatores naturais e atividades antrópicas. Fatores naturais incluem variações climáticas e meteorológicas, enquanto as ações humanas, incluem o desmatamento, a degradação do solo, a urbanização e a drenagem urbana inadequada, sendo ambos um conjunto significativo para a intensificação desses desastres.

A grande maioria dos municípios não possui Planos Diretores eficientes ou nem possuem planos diretores, que ajudem no controle das inundações. Tucci (2003) destaca que na América do Sul quase todas as cidades não possuem restrições em seus planos diretores que impeçam a população de se instalarem em áreas de risco, corroborando na exposição das

mesmas a esses desastres.

No Brasil as inundações atingem diversos municípios todos os anos, levando a elevados prejuízos e perdas. Os prejuízos chegam a cerca de US\$ 1 bilhão anuais, onde casas são danificadas ou destruídas e pessoas atingidas (MCT/CGE, 2002). Segundo a Nota Técnica 1/2023 da Secretaria Especial de Articulação e Monitoramento/Secretaria Adjunta VI - Recursos Hídricos, foram identificados 1.942 municípios brasileiros (34,9%) mais susceptíveis a desastres naturais, associados a inundações, movimentos de massa, alagamentos e enxurradas. Esses dados correspondem a 148.885.714 da população brasileira (73,3%). Desses municípios 1.811 estão associados a inundações (52,1%) e 1.766 a alagamentos e enxurradas.

Ainda de acordo com a Nota Técnica 1/2023, a região com mais incidência de de população exposta a riscos e desastres de inundações é a Região Sudeste, sendo o estado de Minas Gerais com o maior número de municípios com riscos a esses desastres (283). A Região Nordeste vem em segundo, com o estado da Bahia com o maior número de municípios em suscetibilidade. Na Região Sul, o estado de Santa Catarina apresenta o maior número de municípios (207) com risco. Em quarto lugar, a Região Norte apresenta inundações esporádicas, com o estado do Pará com o maior quantitativo de municípios (82). Em último encontra-se a Região Centro-Oeste com a menor porcentagem, com o estado do Mato Grosso com apenas 40 municípios.

No estado de Minas Gerais existem diversos estudos que reafirmam o quanto as inundações ocorrem de forma frequente e intensa em seus municípios. Andrade et. al (2014) é um dos autores que estudou essa temática e seu enfoque foi nas inundações ocorridas da Sub-Bacia Hidrográfica do Córrego São Pedro em Uberlândia. Já Ávila; Neto e Felipe (2017) estudaram as inundações nas Sub-Bacias hidrográficas do Rio do Peixe na Zona da Mata. Outros autores que contribuíram nesses estudos foram Guimarães e Penha (2009) que estudaram os riscos de inundações no município de Muriaé.

Os dados apresentados acima corroboram para compreender a dinâmica dos riscos e desastres presentes no Brasil. Destaca-se que o estado de Minas Gerais onde está inserido a área de estudo da presente pesquisa se apresentou no topo, com a maior incidência de municípios em suscetibilidade a inundações. Isso comprova as informações e ocorrências identificadas na área de estudo, demonstrando que ela está em um região que precisa de urgente atenção e medidas mitigadoras para os impactos gerados por esses desastres.

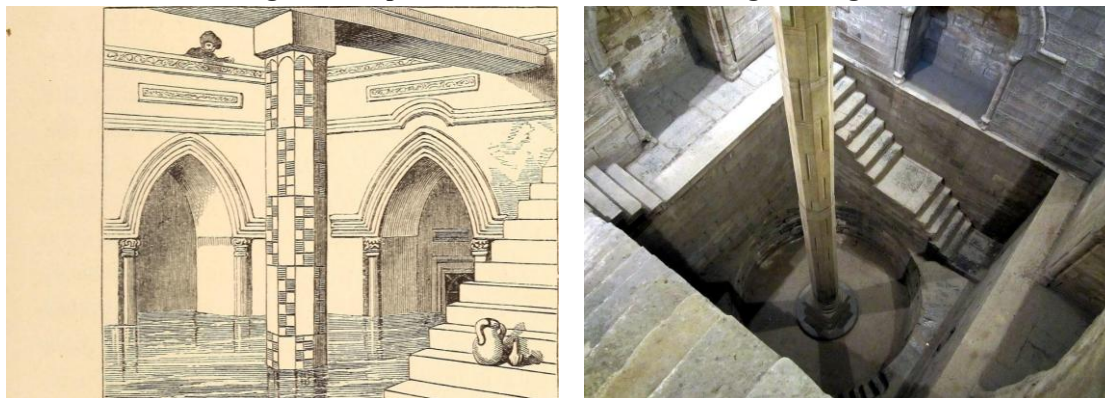
Nesse sentido, faz-se necessário a discussão de metodologias e técnicas para mapear e monitorar os desastres e riscos a inundações, possibilitando compreender como evoluiu as tecnologias ao decorrer dos anos e como essas corroboram de forma positiva em diversos aspectos para o controle das inundações nos meios urbanos.

#### **2.4 Evolução de Metodologias e Técnicas para o Mapeamento e Monitoramento de Inundações**

As primeiras informações sobre a medição de inundações são datadas dos povos do Egito Antigo. Essa tecnologia era denominada de Nilômetro e foi criada pelos egípcios para medição da água que transbordava do Rio Nilo em épocas chuvosas. Os egípcios construíram um poço, com uma coluna octogonal de mármore no meio, dividida em 19 segmentos de cerca de 50 centímetros cada. Assim, os povos egípcios avaliavam as cheias de acordo com a altura que a água atingia o nilômetro. Quando a água atingia os 19 segmentos a população já sabia que o Egito estava passando por fortes cheias. Já se chegasse apenas em 12 segmentos, faltaria água para suprir a agricultura (Figura 7).

Ressalta-se que, apesar dos conflitos ocorridos no Egito e das conquistas do território por outros povos, os nilômetros continuaram sendo utilizados por muitos anos. Entretanto com o passar dos anos, os nilômetros foram sendo destruídos, ficando em ruínas. Atualmente, existem poucos nilômetros em todo mundo, como por exemplo o nilômetro de Helwan, no sul do Cairo.

**Figura 7: Representação de Nilômetros do Egito Antigo.**



**Fonte: Wikimedia Commons e Flickr.**

Decorrer dos anos foram criadas as estações fluviométricas, que consistem em pontos instalados, para monitorar cota e vazão nos cursos hídricos. Essas estações fazem a utilização

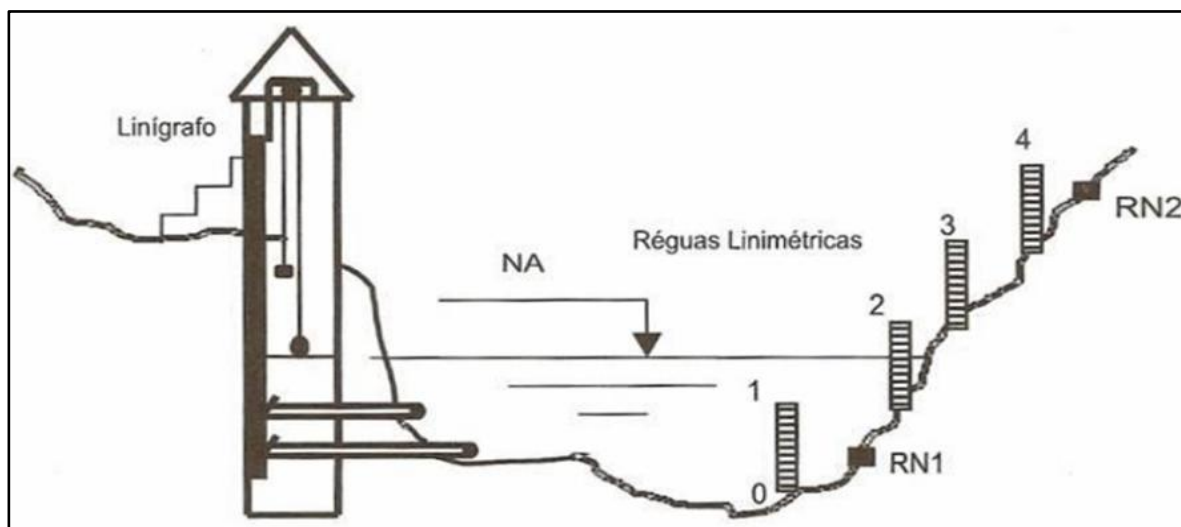
de equipamentos como as réguas linimétricas e os linígrafos (equipamento que registra automaticamente), que são usadas em conjunto, para validar as informações de ambas. As estações geram informações que ajudam no monitoramento de períodos de seca e cheia dos rios, possibilitando o controle por meio do poder público.

Segundo a ADASA (2011), às estações fluviométricas podem ser divididas em estações manuais e automáticas. As estações manuais utilizam seções de réguas linimétricas (três) e realização de leitura no início da manhã (7h) e no final da tarde (17h). Já as estações automáticas, fazem uso de sensores que detectam as cotas de 15 em 15 minutos, sendo transmitidas para uma plataforma de banco de dados. As réguas linimétricas de acordo com BOULOMYTIS & FABBRO NET (2011), consistem em um conjunto de réguas que são instaladas em uma secção de um rio, em altimetria conhecida e consolidada no terreno, em locais com fácil acesso, possibilitando uma boa leitura e minimização dos erros.

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2010), afirma que a utilização das réguas linimétricas em conjunto com os linígrafos (sensores automáticos), permite uma confiabilidade maior dos dados coletados. Ressalta-se que as réguas podem ser utilizadas como precaução no caso do mau funcionamento dos sensores automáticos. Entretanto, autores como Melchior (2006), defendem que a utilização de réguas linimétricas podem levar a diversos erros, tanto pela dificuldade de coletar os dados em períodos de cheia dos rios, quanto pela desatenção de quem está coletando.

Diante do exposto, é notório que a estação fluviométrica, se usada de maneira correta, corrobora com o monitoramento e mapeamento de inundações, sendo uma peça chave para prevenir períodos de cheia.

Figura 8: Representação de Estação Fluviométrica.



Fonte: TSUTYIA, 2006.

A precipitação pluvial (chuva) é um fenômeno natural que ajuda na manutenção do meio ambiente, sendo o principal agente regulador do ciclo hidrológico, atuando no escoamento superficial, vazão dos rios, infiltração dentre vários outros processos importantes para a regulação hidrológica terrestre (BLAINSKI, GARBOSSA e ANTUNES 2012). A medição ou monitoramento das chuvas, é um técnica muito utilizada para compreender a dinâmica do ciclo hidrológico, como também, para identificar possíveis anomalias. Para a medição do volume da chuva e da sua intensidade é utilizada as estações pluviométricas convencionais ou automáticas.

Segundo Blainski, Garbossa e Antunes (2012) às estações convencionais utilizam da relação entre a altura da chuva total (volume) e seu tempo de duração. As estações automáticas podem ser divididas em analógicas e digitais. Os pluviômetros analógicos, podendo ser chamados também de pluviógrafos, esses equipamentos fazem uso de gráficos (pluviogramas), onde vai sendo registrado a altura das chuvas em relação ao tempo (BLAINSKI, GARBOSSA e ANTUNES 2012). Os pluviômetros digitais, ao contrário dos outros, utilizam de tecnologias mais avançadas, onde registram automaticamente o volume das chuvas ao longo do tempo, armazenando esses dados em formato digital (BLAINSKI, GARBOSSA e ANTUNES 2012).

As estações automáticas são um ótimo meio de quantificar os dados de altura, intensidade e duração do evento de precipitação. Essas estações possuem três tipos mais utilizados: o de flutuador, balança e balsa.

Atualmente com o crescimento urbano das cidades e o seu desenvolvimento intenso, as novas tecnologias começaram a ser utilizadas para a gestão dos cursos hídricos. O

geoprocessamento integrado ao sensoriamento remoto e ao sistema de informação geográficas são exemplos de tecnologias que ajudam no monitoramento e gestão desses corpos hídricos.

Segundo Eckhardt (2008) um dos principais benefícios da integração dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) nos estudos de recursos hídricos é o suporte que esses sistemas oferecem na coleta e análise de informações espaciais. Eles também fornecem dados essenciais para modelos de simulação e sistemas de apoio à decisão.

Em consonância Farias e Mendonça (2019) afirma que, a aplicação de SIGs e ferramentas de geoprocessamento tem integrado o processo de entrada para diversos modelos hidrológicos. O SIG é uma tecnologia projetada para lidar com dados espaciais e possui várias aplicações em áreas ambientais. Ao integrar informações sobre relevo, clima e uso do solo em porções de uma Sub-Bacia hidrográfica, o SIG facilita a visualização de cenários históricos e atuais e futuros.

Em síntese, a evolução das tecnologias de monitoramento de inundações, desde os antigos nilômetros egípcios até as modernas estações fluviométricas e pluviométricas, reflete um progresso contínuo na compreensão e gestão dos recursos hídricos. As inovações tecnológicas, como as estações automáticas e os Sistemas de Informações Geográficas, proporcionam dados precisos e em tempo real, permitindo uma gestão mais eficiente dos cursos hídricos e a antecipação de eventos extremos.

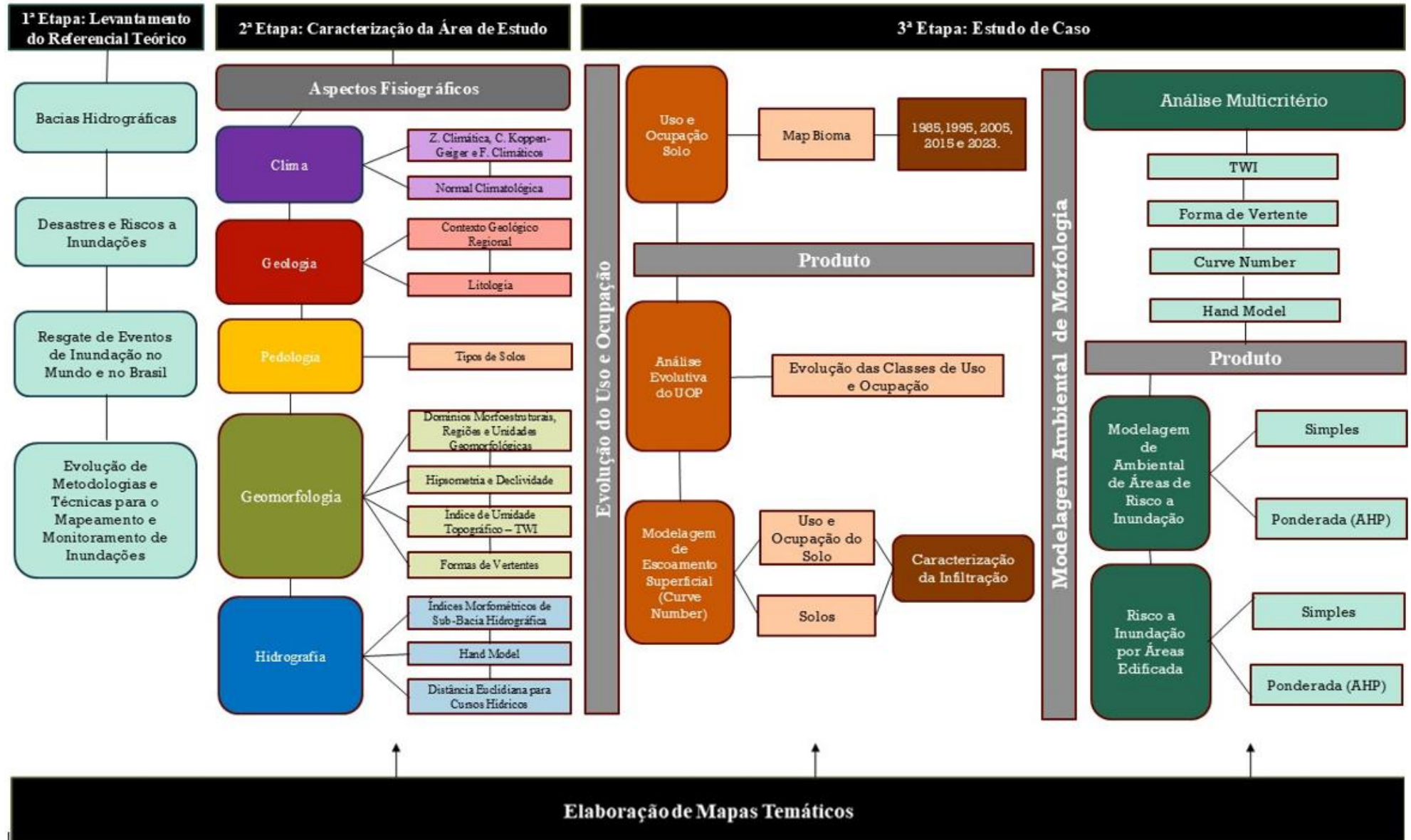
Com o avanço do geoprocessamento e a integração de diversas ferramentas tecnológicas, a capacidade de prever e mitigar os impactos das inundações se fortalece, oferecendo um suporte crucial para a sustentabilidade das cidades e a proteção do meio ambiente. Portanto, o desenvolvimento e a aplicação dessas tecnologias não apenas preservam o legado histórico dos métodos antigos, mas também garantem um futuro mais seguro e bem gerido para os recursos hídricos.

### **3 METODOLOGIA**

A pesquisa em questão tem natureza aplicada e o método científico orientador da pesquisa é o hipotético-dedutivo, no qual formulam-se hipóteses para expressar as possíveis respostas ao problema. A natureza da pesquisa é exploratório e explicativo, procurando possibilitar maior proximidade com o problema citado e identificar os motivos que o implicam, por meio da abordagem quali-quantitativa.

Nesse sentido, os procedimentos metodológicos que orientaram essa pesquisa, foram divididos em quatro etapas: referencial teórico e conceitual, caracterização dos aspectos fisiográficos da área de estudo, a evolução do uso e ocupação no município e modelagem de vulnerabilidade à inundação. A seguir, é representado o fluxograma com a síntese dos processos e etapas da pesquisa.

Figura 9: Etapas Metodológicas da Pesquisa.



Fonte: Autora (2024).

### 3.1 Materiais e Técnicas

Para a execução dos tópicos abordados nesta pesquisa, foram utilizados diversos materiais e técnicas específicas, que foram selecionados com base nas exigências metodológicas de cada etapa do estudo. Esses recursos foram fundamentais para garantir a precisão dos resultados e a confiabilidade das análises realizadas. A seguir, apresentam-se os materiais e as técnicas empregados, organizados na tabela abaixo, com o intuito de proporcionar uma visão clara e estruturada dos recursos utilizados ao longo do processo investigativo.

**Tabela 1: Materias e Técnicas utilizadas para elaboração da presente pesquisa.**

Tema	Subtema	Materiais	Técnicas	Fonte
Introdução	Localização	Hidrográfica Ottocodificada Multiescala / Bacias Hidrográficas Ottocodificadas Nível 3, 4 e 5	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap	ANA - 2017/ IBGE
Referencial Teórico	-	Artigos, Teses e Dissertações.	Ánalise Bibliográfica	-
Climatologia	Normal Climatológica	Normal Climatológica	Elaboração de Gráficos	INMET – 1981-2010
Geologia	Litologia	Base Litológica (1:1.000.000)	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap	CPRM
Pedologia	Solos	Base de Solos (1:250.000)	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap	IBGE -2023
Geomorfologia	Hipsometria	MDT ANADEM-UFRS 30m	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap	UFRS
	Declividade	MDT ANADEM-UFRS 30m / Classificação Embrapa	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap	UFRS
	TWI	MDT ANADEM-UFRS 30m	SAGA GIS	UFRS
	Formas de Vertente	MDT ANADEM-UFRS 30m	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap	UFRS/ Valeriano - 2008
Hidrografia	Ind. Morfométricos de Bacia Hidrográfica	Hidrográfica Ottocodificada Multiescala / Bacias Hidrográficas Ottocodificadas Nível 3, 4 e 5	Elaboração de Índices e Tabela/ Cálculo de Índices/ ArcGIS ArcMap	ANA -2017
	Hand Model	MDT ANADEM-UFRS 30m	Modelo Hand	INPE
	Dist. Euclidiana para Cursos	Hidrográfica Ottocodificada Multiescala / Bacias	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap : Euclian	ANA -2017

Tema	Subtema	Materiais	Técnicas	Fonte
	Hídricos	Hidrográficas Ottocodificadas Nível 3, 4 e 5	Distance	
Evolução do Uso e Ocupação	Evolução do Uso e Ocupação	Base de Uso e Ocupação	Elaboração de Mapas – ArcGIS ArcMap	MapBioma – 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023
	Modelagem de Escoamento Superficial	Base de Uso e Ocupação e Base de Solos (1:250.000)	Curve Number	MapBioma – 2023/ IBGE -2023
Modelagem Ambiental de Risco a Inundação	Modelagem Ambiental Simplificada	Hand Model/TWI/Formas de Vertentes/ Curve Number	Análise Multicritério: Simples	ANA - 2017/ Valeriano - 2008/ UFRS / INPE / MapBiomias – 2023/ IBGE -2023
	Modelagem Ambiental Ponderada	Hand Model/TWI/Formas de Vertentes/ Curve Number	Análise Multicritério: Ponderada AHP	

Fonte: Autora (2024).

### 3.2 Referencial Teórico e Conceitual

Para a realização do referencial teórico conceitual, foi realizado o levantamento de bibliografias que abordam a temática de inundações. Assim, levou-se em consideração textos científicos, teses, dissertações, artigos e reportagens relacionadas à temática, para alcançar um entendimento mais denso e suporte para a realização do estudo.

O levantamento bibliográfico foi dividido em quatro tópicos com abordagens que corroboram com a pesquisa em questão. O primeiro tópico apresenta a discussão sobre Sub-Bacias hidrográficas e autores como: Christofolletti (1980); Guerra e da Cunha (1995); Santana (2003); Borsato e Martoni (2004); Santana (2004); Faustino (1996); Rocha (1997 *apud* Martins, 2005) e CALIJURI e BUBEL (2006) discorreram sobre as diversas definições sobre essa temática e o complexo sistema, dotado de atributos que a mesma possui.

O segundo tópico aborda a temática de desastres e riscos a inundação, que utilizou como autores principais: BRASIL (2007) com a discussão da classificação de desastres e riscos; SILVA (2009) e PHILIPPI JUNIOR et al (2004) com os tipos de riscos; CASTRO, PEIXOTO, RIO (2005) e MARANDOLA JR.; HOGAN (2004) com a discussão sobre risco natural; MORAIS et al (2017) e TUCCI (2007) com o conceito de inundações; POMPÊO (2000) e TUCCI (2001) com a abordagem sobre enchentes e GRILO (1992), BRAGA (2016) e MORAIS et al (2017) trazendo conceitos de alagamentos.

O terceiro tópico trouxe consigo o resgates dos eventos de inundações no mundo e no Brasil. Dessa forma, utilizou-se Berz (2000), Tucci (2003) e Jakubicka et al. (2010) para discorrer sobre as inundações no mundo; em sequência os dados obtidos na MCT/CGE (2002) e na Nota Técnica 1/2023, contribuíram para a análise das inundações no Brasil. Por fim, em escala local analisou os estudos sobre inundações no estado de Minas Gerais com os autores Andrade et. al (2014), Ávila; Neto e Felipe (2017) e Guimarães e Penha (2009).

O quarto tópico abordou a temática da evolução das metodologias para mapeamento e monitoramento das inundações. Inicialmente buscou-se compreender quando e onde iniciou essa busca constante por entender a dinâmica hídrica dos rios e sua relação com a chuva. Assim, é encontrado as primeiras informações no Egito Antigo a partir do uso do Nilômetro. Depois do passar dos anos, foram criadas as estações fluviométricas e autores como ADASA (2011), BOULOMYTIS & FABBRO NET (2011), ANA (2010) e MELCHIOR (2006), corroboraram para definição desse tema. Em concomitante foram criadas as estações pluviométricas e autores como BLAINSKI, GARBOSSA e ANTUNES (2012), ajudaram na discussão desse equipamento. Já atualmente para corroborar com a utilização de tecnologias Eckhardt (2008) e Farias e Mendonça (2019), defendem a integração dos SIGs e do geoprocessamento na gestão dos cursos hídricos e monitoramento de inundações.

### **3.3 Caracterização dos Aspectos Fisiográficos da Área de Estudo**

Para a caracterização dos aspectos fisiográficos foram desenvolvidas temáticas relacionadas ao clima, geologia, pedologia, geomorfologia e hidrografia. Cabe destacar que a confecção dos mapas para cada temática se deu por meio da utilização de *softwares*, como o SAGA GIS e o Modelo Hand. Foi também utilizado o software Arcmap – Arcgis nos Laboratórios de Geoprocessamento da PUC Minas.

Para o clima inicialmente foi realizada a contextualização da zona climática na qual a área se insere, em seguida foi utilizado a classificação de Koppen para compreender em qual classe está inserida e como se dá sua dinâmica. Posteriormente foram discorridos os sistemas climáticos ( ZCIT, ZCAS e FPA) que podem influenciar na dinâmica pluvial da área. Por fim, foi utilizado a Normal Climatológica do INMET de 30 anos (1991-2010), para entender em uma escala mais detalhada as características médias do clima. Essa escala temporal foi utilizada devido a escala temporal mais recente possuir ausência de dados.

Para a geologia foi realizado inicialmente um contexto geológico regional utilizando os estudos de Dorr (1969); Almeida (1977); Alkmim & Marshak (1998) e Endo *et. al* (2019b) e posteriormente a caracterização litológica da área, a partir dos dados fornecidos pelas bases do CPRM na escala de 1:1.000.000. A partir disso foram demonstrados os grupos, formações e litotipos predominantes na área de estudo. Cabe destacar que também foi realizado um mapa geológico com as bases do CPRM para ilustrar toda a discussão. Para a pedologia foi realizada uma caracterização dos tipos de solos predominantes na área de estudo, por meio dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), utilizando a base na escala de 1:250.000.

A caracterização da geomorfologia foi elaborada a partir contextualização geomorfológica da área de estudo, a partir do Manual Técnico Geomorfológico do IBGE (2009), onde foi discutido o domínio e unidade geomorfológica que a área de estudo se insere. Foram discutidos a hipsometria e declividade a partir do MDT adquirido por meio da ANADEM-UFRS de 30m. Dessa forma, foi elaborado o mapa de hipsometria e declividade através do software ArcMap, usando a ferramenta *Slope* para gerar a declividade. Também foram discutidos dois indicadores geomorfométricos: o TWI e Formas de Vertentes.

O TWI, se caracteriza por ser um índice que tem o objetivo de expressar possíveis áreas que podem possuir um excesso de umidade na superfície (SIRTOLI et al., 2008). Dessa forma, foi realizado o cálculo do TWI, que consiste na utilização de duas variáveis, a declividade e a acumulação do fluxo. Assim será utilizado o MDT da ANADEM-UFRS de 30m, para a geração do cálculo. Portanto, para gerar o TWI será utilizado o cálculo proposto por Beven e Kirk (1979), onde **A** é a acumulação do fluxo, **B** a declividade em radianos, **ln** é o logaritmo e **tan** a tangente:

$$TWI = \ln \frac{A}{\tan (B)}$$

As formas de vertentes, como o próprio nome já diz, são as formas do relevo. Para esse indicador foram utilizados como base o método proposto por Valeriano (2008), que

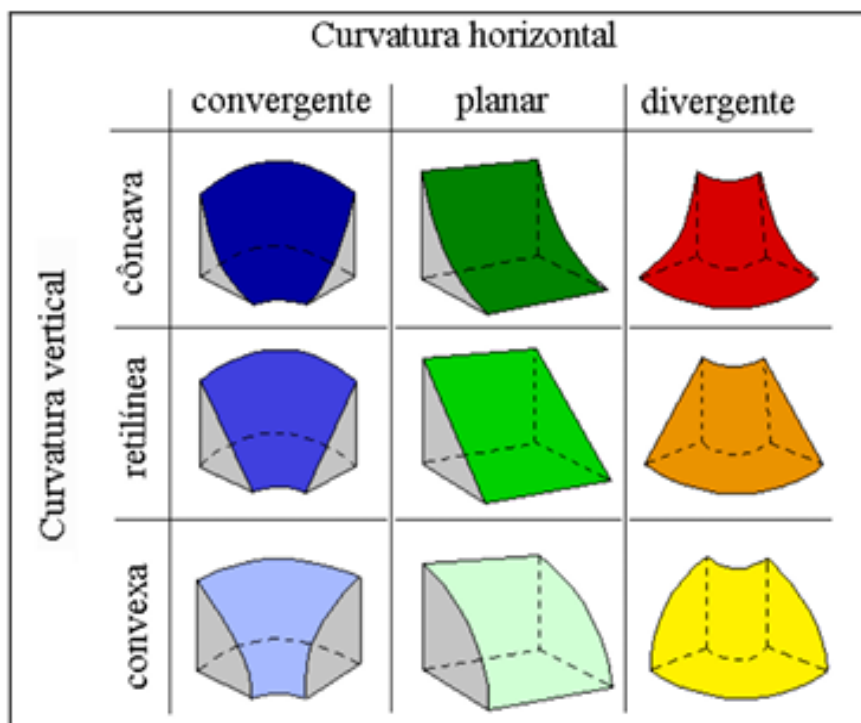
propõe a execução de ensaios comparativos com descrições geomorfológicas, valores para curvatura horizontal e vertical, que ao serem cruzados propiciam a identificação das formas de vertente (Tabela 2 e Figura 10). Assim, também foi utilizado o MDT da ANADEM-UFRS de 30m, para a realização desse método.

**Tabela 2: Curvaturas do relevo.**

Curvatura	Vertentes	Valores
Horizontal	Retilíneas	-0,010°/m a 0,010°/m
	Concâvas	< -0,010°/m
	Convexas	> 0,010°/m
Vertical	Planares	-0,038°/m a 0,051°/m
	Convergente	< -0,038°/m
	Divergente	> 0,051°/m

Fonte: Adaptado de Valeriano (2008).

**Figura 10: Formas de Vertente.**



Fonte: Valeriano (2008)

Para caracterizar a hidrografia foram utilizados os Parâmetros Morfológicos de Sub-Bacia, que auxiliam no entendimento das dinâmicas das Bacias Hidrográficas, visando compreender o processo de infiltração, escoamento superficial e sua fragilidade ambiental. Segundo Domingues et al., (2020), essas dinâmicas hidrológicas possuem relação direta com o tamanho, a rede de drenagem, a forma e declividade da Sub-Bacia, o tamanho e o

comprimento dos tributários, dentre diversas outras características.

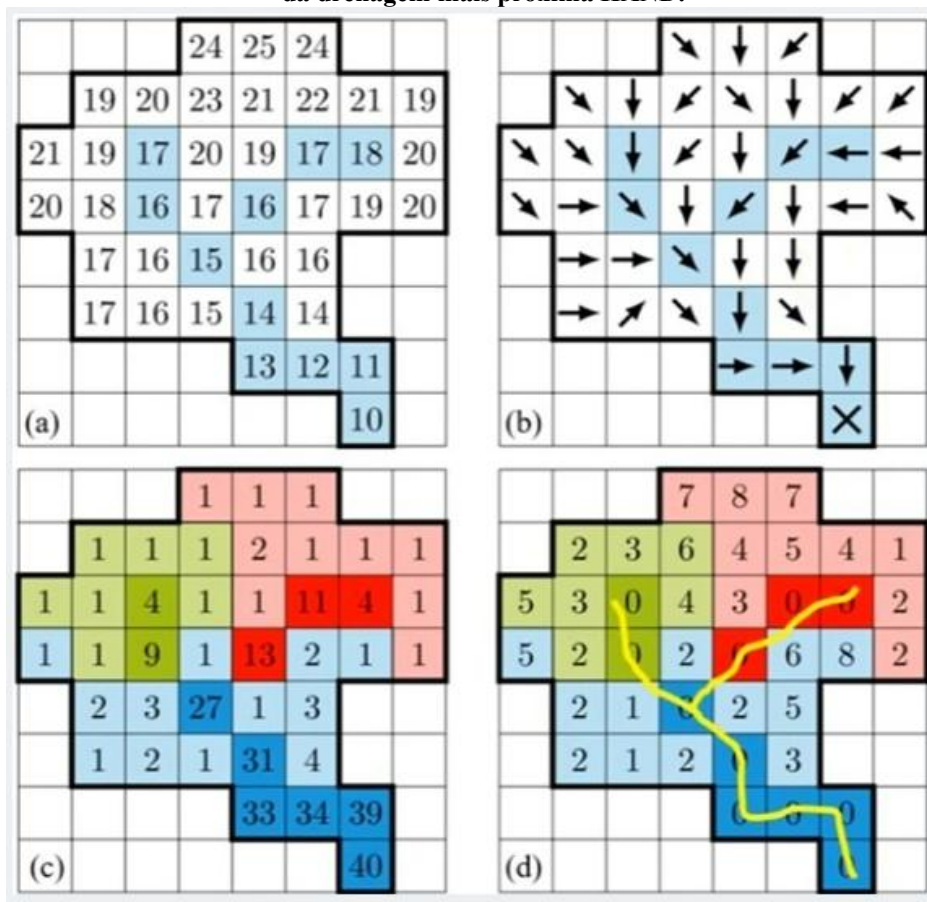
Dessa forma, os parâmetros utilizados podem ser divididos em: Coeficiente de Compacidade ( $K_c$ ); Fator Forma ( $F_f$ ) da Sub-Bacia, Índice de circularidade ( $I_c$ ); Densidade de drenagem ( $K_m/K_m^2$ ) ( $D_d$ ) e Índice de sinuosidade ( $I_s$ ). Para a realização do coeficiente de compacidade ( $K_c$ ) foi utilizado a equação, onde  $P$  é o perímetro da sub-bacia (km) e  $A$  a área de drenagem ( $km^2$ ):  $K_c = 0,28 \times P/\sqrt{A}$ . Para a realização do fator de forma ( $F_f$ ) foi utilizado o cálculo, onde  $A$  é a área ( $km^2$ ) e  $C$  o comprimento axial da sub-bacia (km):  $F_f = A/C^2$ .

O índice de circularidade ( $I_c$ ) foi elaborado pelo cálculo, onde  $A$  é a área ( $km^2$ ) e  $P$  é o perímetro (km):  $I_c = 12,57 \times A/P^2$ . A elaboração da densidade de drenagem ( $D_d$ ), foi feita a partir da equação  $D_d = L_t/A$ , em que  $L_t$  é o comprimento total dos canais (km) e  $A$  é a área da bacia ( $km^2$ ). Por fim, foi realizado o índice de sinuosidade ( $I_s$ ), que tem como equação  $I_s = L/L_v$ , onde  $L$  é o comprimento do rio principal (km) e  $L_v$  é o comprimento vetorial do rio principal (km).

Outro parâmetro utilizado foi o Hand Model, elaborado por pesquisadores do INPE, sendo caracterizado como um novo modelo digital de terreno. Esse modelo foi obtido através do MDT do ANADEM-UFRS de 30m, que foi inserido no *software* Modelo Hand, onde é desenvolvido em quatro etapas (Figura 11).

A primeira etapa é referente a correção do MDT, onde este é ajustado para apresentar de forma mais detalhada o terreno. A segunda etapa é composta pela definição da direção do fluxo hídrico. A terceira etapa é feito o cálculo de acumulação da água em cada porção do terreno estudado. A quarta e última etapa é calculado o HAND, ou seja, a altitude de algum ponto em relação ao curso hídrico mais próximo.

Figura 11: (a) MDE corrigido (b) Direção de fluxo (c) Fluxo de acumulação, e (d) Raster com altura acima da drenagem mais próxima HAND.



Fonte: HydroAI (2024).

Após a geração do modelo Hand Model foi utilizado a método de classificação proposto por França (2024), onde ele propõe 5 classes para análise desse modelo: Muito Alta (0m a 1m), Alta (1m a 5m), Média (5m a 10m), Baixa (10m a 25m), Muito Baixa (25m a 100m).

Corroborando com a caracterização hidrográfica, foi também utilizado a distância euclidiana dos cursos hídricos, que foi obtida por meio da base de hidrografia para compreender quais porções da área de estudo estão mais próximas desses cursos hídricos, e portanto possuem maior tendência de recepção de inundações. As bases dos cursos hídricos foram adquiridas a partir da Agência Nacional das Águas (2017), e logo em seguida foram trabalhadas em ambiente SIG por meio da ferramenta *Euclian Distance* do ArcMap e a medida métrica em metros (m).

### **3.4 Evolução do Uso e Ocupação no Município e Modelagem de Escoamento Superficial – Curve Number**

Para o desenvolvimento do tópico da evolução do uso e ocupação na Sub-bacia do Ribeirão Jirau, foi analisado o uso e ocupação a partir da utilização das bases do Map Biomas dos anos de 1985, 1995 e 2005, 2015 e 2023. A partir disso, foi realizado a análise das 14 classes presentes na área de estudo, verificando assim a predominância de apenas 5 classes (Formação Florestal, Pasto, Silvicultura, Mosaico de Usos e Mineração), que foram escolhidas para as análises principais. Essas análises foram feitas a partir da geração de mapas comparativos no software ArcGis – Arcmap do Laboratório de Cartografia e Geoprocessamento da PUC Minas.

Também, foi elaborado um gráfico de linha comparativo, ilustrando a evolução das 5 classes escolhidas na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau, ao decorrer da escala temporal determinada. Esse gráfico possibilitou analisar a dinâmica entre as classes e como uma influência na outra. Acompanhando as análises, foi elaborado uma tabela geral, com os valores anuais da evolução das 14 classes presentes na área de estudo. Para análise das 5 classes predominantes, foram elaboradas tabelas com os cálculos de perda e ganho ao decorrer décadas. Esses resultados foram obtidos, a partir do:

**“VALOR BRUTO ANO POSTERIOR – VALOR BRUTO ANO ANTERIOR”.**

Posteriormente, foi realizado a modelagem de escoamento superficial (curve numb), para compreender a dinâmica de infiltração da área de estudo. Para essa modelagem utilizou as camadas de solos do IBGE (2023) de escala 1:250.000, a camada de uso e ocupação do solo disponibilizada pelo MapBiomas (2023) e as classes hidrológicas de Sartori et.al (2005).

A metodologia utilizada foi a desenvolvida pelo Serviço dos Solos (SCS) dos EUA em 1930, com o intuito de compreender a dinâmica do escoamento superficial e a capacidade de armazenamento. Segundo Anjinho et. al. (2018) os parâmetros da CN variam de 0 a 100, sendo que valores próximos a 0 indicam taxa de armazenamento de água alta, ou seja, são bacias mais permeáveis. Já valores próximos a 100 indicam bacias mais impermeáveis e com retenção zero de água.

Em ambiente GIS, primeiramente foi feito o mapeamento dos quatro grandes grupos hidrológicos de acordo com a capacidade de infiltração e escoamento superficial para os tipos de solos presentes na bacia. Os solos que fazem parte do grupo A possuem alta taxa de infiltração e apresentam boa drenagem. Os solos do grupo B são solos que apresentam moderada taxa de infiltração. Os solos do grupo C são profundos ou pouco profundos e apresentam baixa taxa de infiltração. Já os solos do grupo D apresentam taxa de infiltração muito baixa e solos mais rasos (OLIVEIRA et.al., 2022).

Com o produto obtido, foi realizado cruzamento dos dados de solo/classes hidrológicas com o uso e ocupação, atribuindo para cada tipo de uso um tipo de solo. Para esse cruzamento foi utilizada a ferramenta “*Associar atributos por local*” presente no software Qgis. Após o cruzamentos de todos os dados, foram atribuídos valores aos tipos de uso em relação as classes hidrológicas, sendo utilizado os pesos propostos pela ANA (2022) adaptado de Tucci (2001). A Tabela 3 apresenta os valores utilizados no cruzamentos dos dados de uso e solos.

**Tabela 3: Valores de Curve Number com base no tipo uso e classes de solos.**

MapBiomas (Níveis 2, 3 e 4)	A	B	C	D
Formação Florestal	26	52	65	69
Formação Savânica	46	68	78	84
Mangue	87	89	90	91
Floresta alagável	57	71	78	80
Silvicultura	25	55	70	77
Campo Alagado e Área Pantanosa	98	98	98	98
Formação Campestre	36	60	73	79
Outras Formações não Florestais	45	66	77	83
Pastagem	47	67	81	88
Agricultura (Cana)	39	61	74	80
Mosaico de Usos	42	64	77	84
Praia, Duna e Areal	30	58	71	78
Área Urbanizada	67	78	85	89
Outras Áreas não vegetadas	72	82	87	89
Afloramento Rochoso	98	98	98	98
Mineração	72	82	87	89
Aquicultura	98	98	98	98
Apicum	87	89	90	91
Rio, lago e oceano	98	98	98	98
Agricultura (Dendê)	45	66	77	83

MapBiomias (Níveis 2, 3 e 4)	A	B	C	D
Agricultura (Soja)	60	72	81	84
Agricultura (Arroz)	60	71	78	82
Agricultura (lavouras temporárias)	60	72	81	84
Agricultura (Café)	36	60	73	79
Agricultura (Citrus)	36	60	73	79
Agricultura (lavouras perenes)	36	60	73	79
Restinga Arbórea	36	60	70	76
Restinga Herbácea	45	66	77	83
Agricultura (Algodão)	49	69	79	94

Fonte: ANA (2022) adaptado de Tucci (2001)

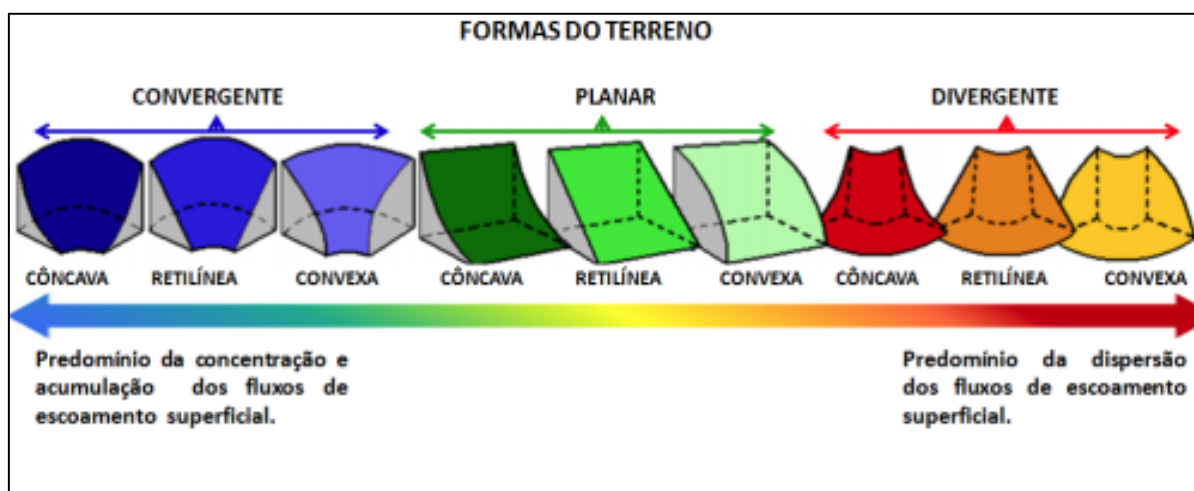
### 3.5 Modelagem Ambiental Ponderada e Simplificada de Áreas com Risco a Inundação

O uso de indicadores foi o método escolhido para análise da Modelagem Ambiental a Inundação, para a compreensão dos principais impactos ambientais encontrados nas áreas da sub-bacia, que afetam diretamente a população que ali residem. Assim, foi escolhido um conjunto de indicadores ambientais e urbanas, que auxiliaram na construção do índice de vulnerabilidade ambiental à inundação. Para essa modelagem, foram escolhidos os seguintes indicadores: topographic wetness index (TWI), ou seja, índice de umidade topográfico; formas de vertentes; hand model e curve numb.

Os indicadores TWI, Hand Model e Curve Number, por serem variáveis que ocorrem no espaço de forma quantitativa contínua, não tiveram intervalos de classes definidos, de modo a preservar toda a amplitude de valores desses indicadores. Nesse sentido, utilizou a Lógica Fuzzy com método de atribuição linear para padronizar os indicadores, pois o Hand Model ocorre em metros e o TWI e o Curve Number são adimensionais.

Já o indicador Formas de Vertentes, é uma variável que ocorre no espaço de forma qualitativa, dessa forma, foi necessária a reclassificação atribuindo notas de 1 a 9 (Tabela 4) para as classes, sendo utilizado a escala proposta por Silva Neto (2013) adaptado de Valeriano (2008) como base (Figura 12). Após a reclassificação foi também aplicado a Lógica Fuzzy nesse indicador, para padronizar com os outros indicadores.

Figura 12: Escala proposta por Silva Neto (2013) adaptado de Valeriano (2008).



Fonte: Silva Neto (2013) adaptado de Valeriano (2008).

Tabela 4: Atribuição de notas para as Classes de Formas de Vertentes.

Classes	Nota
Côncava-Convergente	1
Retilínea-Convergente	2
Convexa-Convergente	3
Côncava-Planar	4
Retilínea-Planar	5
Convexa-Planar	6
Côncava-Divergente	7
Retilínea-Divergente	8
Convexa-Divergente	9

Fonte: Autora (2025) adaptado de Silva Neto (2013).

Para a obtenção da base de modelagem ambiental simples e ponderada de risco a inundação recorreu-se à análise multicritério por peso de evidência, em que atribuiu-se pesos para os indicadores. Os pesos foram obtidos a partir do método Analytic Hierarchy Process (AHP), o qual consiste na ajuda da tomada de decisão a partir de uma série de fatores, sejam eles quantitativos ou qualitativos. Dessa forma, DIAS, V.S.B & SILVA, A.B (2014, p. 1366) destacam que:


[...] a utilização do AHP como operadores de análise espacial para a integração dos dados e destaca o êxito do algoritmo para o método geossistêmico por permitir hierarquizações que são consideradas características do geossistema.

A matriz de comparação de indicadores por pares da SCB Associates Ltd (2012) foi utilizada neste estudo, sendo apresentada como uma planilha interativa que pode ser aberta

no Microsoft Excel. Ela segue uma estrutura hierárquica, o que permite, ao final do processo, identificar qual indicador é a mais importante. No momento de decidir qual indicador do par tem mais peso, o especialista começa avaliando se o indicador da linha é mais ou menos importante que a da coluna. Em seguida, ele atribui um nível subjetivo de importância, que pode ser igual a 1, indicando que ambos os indicadores têm a mesma importância, ou pode variar de 2 a 9, conforme o indicador da linha ganha mais relevância. Também é possível usar valores entre 1/9 e 1/2 para indicar que um indicador é menos importante que o outro. A Tabela 5 mostra como essa escala de importância é organizada.

**Tabela 5: Escala de importância relativa de comparação das variáveis**

<b>Fundamental Importância</b>		
Extremamente menos importante que	1/9	1/8
Muito fortemente menos importante que	1/7	1/6
Fortemente menos importante que	1/5	1/4
Moderadamente menos importante que	1/3	1/2
Igualmente importante a	1	2
Moderadamente mais importante que	3	4
Fortemente mais importante que	5	6
Muito fortemente mais importante que	7	8
Extremamente mais importante que	9	



Fonte: Adaptação e tradução de SCB Associates Ltd (2016)

Para implementar a técnica AHP, é fundamental aplicá-la em um painel de especialistas. Assim, foram convidados 6 profissionais que atuam em subáreas da geografia. (Tabela 6).

**Tabela 6: Especialistas e suas áreas de atuação.**

Especialistas	Formação	Título	Áreas de Atuação
<b>Especialista 1</b>	Geografia	Mestre em Geografia - Análise Espacial - Meio Ambiente	Geomorfologia - Hidrologia - Modelagem Ambiental- Geoprocessamento
<b>Especialista 2</b>	Geografia	Especialista em Geoprocessamento Análise Espacial	Geoprocessamento e Licenciamento Ambiental Espeleológico
<b>Especialista 3</b>	Geografia	Doutor em Geografia - Análise Espacial - Meio Ambiente	Sensoriamento Remoto, Modelagem Ambiental e Vulnerabilidade Ambiental
<b>Especialista 4</b>	Geografia	Especialista em Geoprocessamento e Análise Espacial	Meio Ambiente, Socioambiental e Licenciamento Ambiental
<b>Especialista 5</b>	Ecologia	Doutor em Geografia Análise Espacial - Meio Ambiente	Geomorfologia, Pedologia, Ecologia e Modelagem Ambiental
<b>Especialista 6</b>	Geografia	Mestre em Geografia - Análise Espacial - Meio Ambiente	Geoprocessamento, Modelagem Ambiental e Licenciamento Ambiental Espeleológico

Fonte: Elaboração da autora (2025)

O método utilizado possibilitou a hierarquização dos indicadores e a percepção da importância das mesmas para a construção de um cenário de múltiplos riscos, ou seja, a análise dos especialistas proporcionou um olhar mais aguçado sobre a área de estudo. Nesse sentido, cada especialista realizou análises comparativas das variáveis escolhidas da área de estudo, obtendo assim cada um seu próprio resultado (todos com valor checagem de consistência <10%)—que posteriormente foram somados e divididos pelo número de especialistas, de modo a obter a média geral, traduzida em uma síntese relacional do painel de especialistas disposta na

Tabela 7.

**Tabela 7: Distribuição dos pesos dos indicadores conforme método AHP (em porcentação %).**

Indicadores	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5	Especialista 6
<b>TWI</b>	47	44	17	40	31	27
<b>Formar de Vertentes</b>	16	11	6	9	8	10

Indicadores	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5	Especialista 6
Hand Model	28	22	52	23	51	25
Curve Number	10	22	25	27	10	38

Fonte: Elaboração da autora (2025)

Posteriormente, com a obtenção dos pesos, foi realizada a álgebra de mapas por meio do software Arcmap 10.18, no qual utilizou-se a ferramenta “calculadora raster”. Foram gerados inicialmente 6 bases da modelagem ponderada, sendo cada uma resultante da utilização dos rasters já reclassificados e dos resultados da obtenção dos pesos via método AHP para cada um dos especialistas consultados. Utilizou-se a seguinte expressão para obtenção do resultado:

$$\text{EXPRESSÃO} = (\text{Topographic Wetness Index} * \text{Peso}) + (\text{Formas de Vertentes} * \text{Peso}) + (\text{Hand Model} * \text{Peso}) + (\text{Curve Number} * \text{Peso})$$

Em seguida, repetiu-se a expressão, contudo, utilizou-se a média gerada pelos valores atribuídos pelos especialistas. Desta forma, obteve-se o mapa síntese da vulnerabilidade ambiental ponderada, que representa um índice espacial com indicadores hierarquizados para a área de estudo.

Por fim, efetuou-se também a geração da modelagem simplificada, que é um índice espacial sem hierarquização de indicadores. A obtenção desta base foi importante, uma vez que permitiu a comparação com a base ponderada e assim forneceu melhor compreensão acerca da importância de cada variável no cenário da modelagem ambiental. A expressão utilizada para geração da modelagem simplificada é apresentada a seguir:

$$\text{EXPRESSÃO} = (\text{Topographic Wetness Index}) + (\text{Formas de Vertentes}) + (\text{Hand Model}) + (\text{Curve Number}) / 4$$

A pesquisa utilizou dados da coleção *Open Buildings V3 Polygons*, disponibilizada pela *Google*, para analisar pegadas construtivas em uma região de interesse. Inicialmente, os dados foram acessados via *Google Earth Engine* e filtrados conforme os limites da área de

estudo. Em seguida, os dados foram visualizados em um mapa, utilizando imagens de satélite como base para facilitar a interpretação espacial da distribuição dos edifícios. Após a verificação visual, os dados filtrados foram exportados no formato SHP para armazenamento e análise posterior em sobreposição a base resultante da modelagem de risco potencial de inundação.

Após a obtenção desses dados, foram recortados para o limite da bacia todas as edificações que se localizam em sua extensão. Em seguida, usando a modelagem simplificada, foi feito o recorte das áreas de risco a inundação, utilizando as edificações obtidas. Assim, foi calculado o potencial de risco de inundações por áreas edificadas da bacia. Esse mesmo processo foi realizado para a modelagem ponderada, para possibilitar diferentes perspectivas de análise.

## **4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

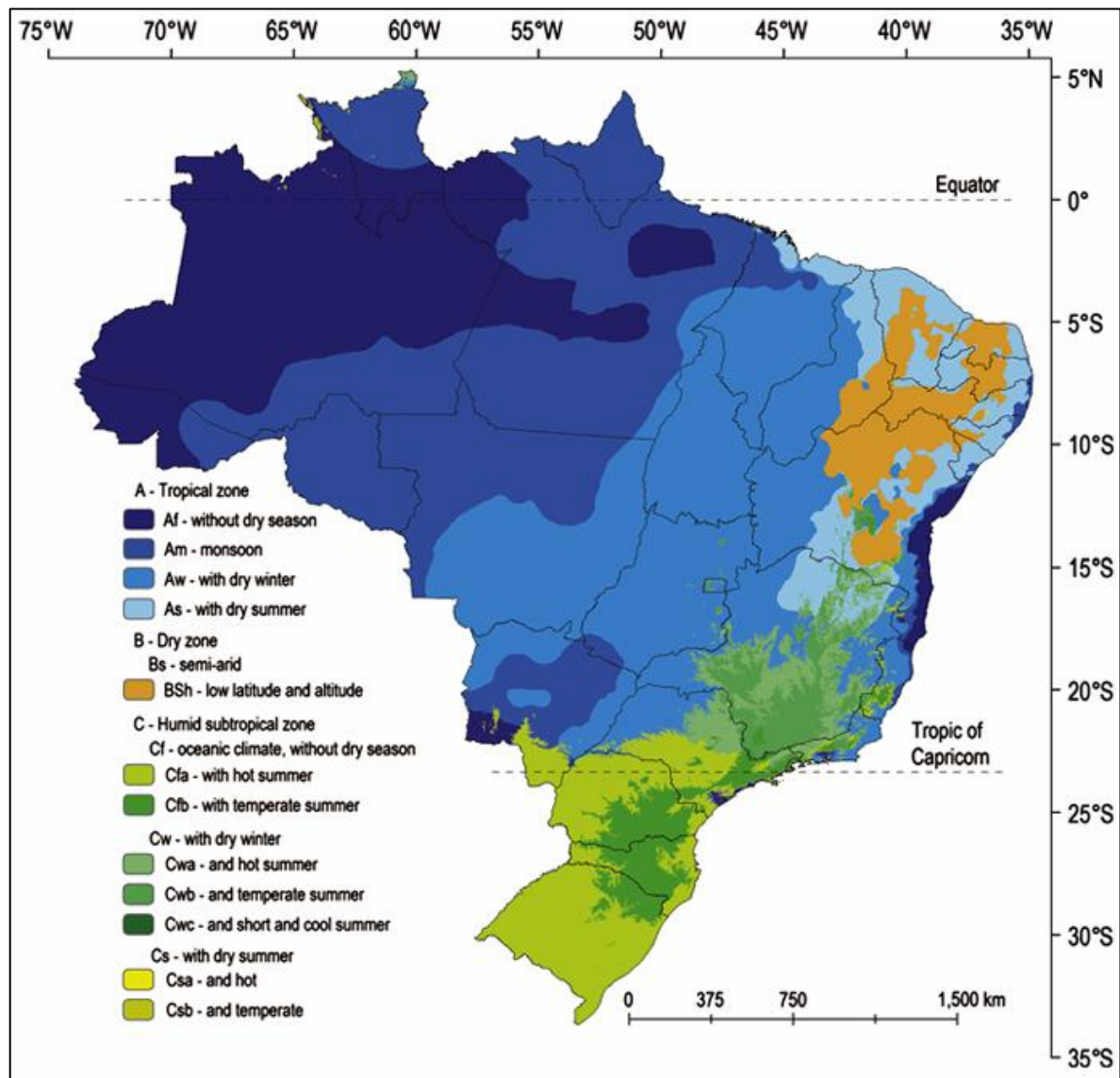
### **4.1 Caracterização Climática**

#### *4.1.1 Zona Climática, Classificação de Köppen-Geiger e Fenômenos Climáticos*

Uma zona climática se caracteriza por ser uma região geográfica que possui condições climáticas semelhantes, como temperatura, precipitação e umidade. Essas zonas são definidas para entender e classificar o clima global e são úteis para estudos e previsões meteorológicas. Cada uma dessas zonas reflete diferentes padrões climáticos e ambientais, influenciando a vegetação, a agricultura e o modo de vida local. A localização de uma área em uma zona climática específica é determinada por fatores como latitude, altitude e correntes oceânicas.

A área de estudo está localizada na zona climática denominada clima tropical de altitude. Segundo a Classificação de Köppen-Geiger a área de estudo é classificado como Cwa, com verões quentes e invernos amenos, com temperaturas médias anuais moderadas devido à altitude da região. Durante o verão, as temperaturas variam entre 20°C e 30°C, enquanto no inverno os termômetros registram entre 10°C e 20°C. A estação chuvosa ocorre no verão, com chuvas mais intensas, enquanto o inverno é mais seco, com menor volume de precipitação. A umidade relativa do ar é geralmente mais alta na estação chuvosa e mais baixa na seca, refletindo as características típicas desse tipo climático.

Figura 13: Classificação Climática do Brasil de acordo com Koppen (1936).



Fonte: C.A. Alvares et al, (2013)

De acordo com Nimer (1989), o clima da região Sudeste, e, por conseguinte, o do Estado de Minas Gerais, é caracterizado como uma zona de transição entre as latitudes tropicais, que são mais quentes, e as médias, que possuem um clima temperado. Esse clima de transição resulta da influência de fenômenos climáticos provenientes de diferentes direções (sul, leste e oeste) que afetam a região. Essas variações contribuem para uma diversidade climática que mistura características das zonas tropicais e temperadas ao longo do ano.

Os fenômenos climáticos são conhecidos por serem eventos e processos naturais que influenciam o clima e o tempo em diferentes escalas. Eles podem ser de curto ou longo prazo e podem afetar desde pequenas áreas até o planeta como um todo. No Brasil ocorre a atuação

de diversos fenômenos que influenciam diretamente no clima e no tempo das regiões, sendo exemplo a ZCIT, ZCAS e FPA.

A Zona de Convergência Intertropical, mais conhecida como ZCIT é um dos eventos climáticos de grande importância que atua principalmente nos trópicos e perto da faixa equatorial. Sua estrutura ajuda na caracterização de diversos eventos climáticos e sobre as condições do tempo de regiões tropicais (FERREIRA, 1996). Segundo Ferreira (1996), a ZCIT ocorre em uma zona que tem enorme interação com outros fenômenos atmosféricos e também oceânicos, como a zona de confluência dos alísios (ZCAS); a zona do cavado equatorial; a zona de máxima temperatura da superfície do mar; a zona de máxima convergência de massa e a zona de banda de máxima cobertura de nuvens convectivas, no qual todas se interagem aproximadas da linha do equador.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul, mais conhecido como ZCAS é um evento climático de escala intrasazonal que exerce influência na distribuição de precipitação, no qual em muitos casos, pode ser responsável por variações no clima de certas regiões (QUADRO, 1994). Esse fenômeno ocorre geralmente na América do Sul, mais especialmente no verão, no qual se caracteriza por causa de uma banda de nebulosidade que segue de noroeste até sudeste, onde tem ligação com uma zona de convergência de níveis baixos (QUADRO, PEZZI e ROSA, 2016).

De acordo com Ferreira et al. (2004), pode-se considerar que a ZCAS atua no território brasileiro desde o centro sul da Amazônia até as regiões do Centro- Oeste e Sudeste, o sul da Bahia, norte do Paraná, e indo até o Oceano Atlântico Sudoeste. Também, podemos dizer que esse fenômeno é responsável pelos grandes índices pluviométricos do verão e da primavera, que fazem chuvas persistentes e de grande intensidade (QUADRO et al., 2012).

A Frente Polar Atlântica (FPA) também conhecida como Massa Polar Atlântica (mPA) é um fenômeno composto de alta pressão e umidade, que tem origem no Atlântico Sul, mais especificamente na região da Patagônia. Monteiro (1968) caracteriza esse fenômeno como:

(...) É uma massa fria e úmida, mercê de sua origem marítima. Segundo a classificação internacional de Bergeron, é sempre representada com mP. Quando, em cartas sinópticas brasileiras, é sinalizada como cP, isto significa apenas que sua trajetória é mais sobre o continente do que sobre o oceano (MONTEIRO, 1968, p. 122).

Monteiro (1968) ainda ressalta sobre como a FPA possui maior potência no seu avanço de sul para norte, influenciando nas regiões brasileiras principalmente no período do inverno.

Segundo Nimer (1966) a FPA pode ser considerada como um anticiclone devido a sua natureza e sua alta pressão, sendo assim ele afirma que:

(...) Originam-se na zona subantártica ocupada pelo “pack” e outros gelos flutuantes levados pelas correntes antárticas. Trata-se de uma zona de transição entre o ar polar e o tropical. Dessa zona partem os anticiclones subpolares que periodicamente invadem o continente sul-americano, com ventos de SW a W. Estas massas quase não possuem subsidência, o que permite a distribuição, em altitude, do calor e umidade colhida na superfície quente do mar, aumentando à proporção que a massa caminha para o trópico. Em decorrência de sua temperatura baixa, chuvas mais ou menos abundantes assinalam a sua passagem (NIMER, 1966, p. 234).

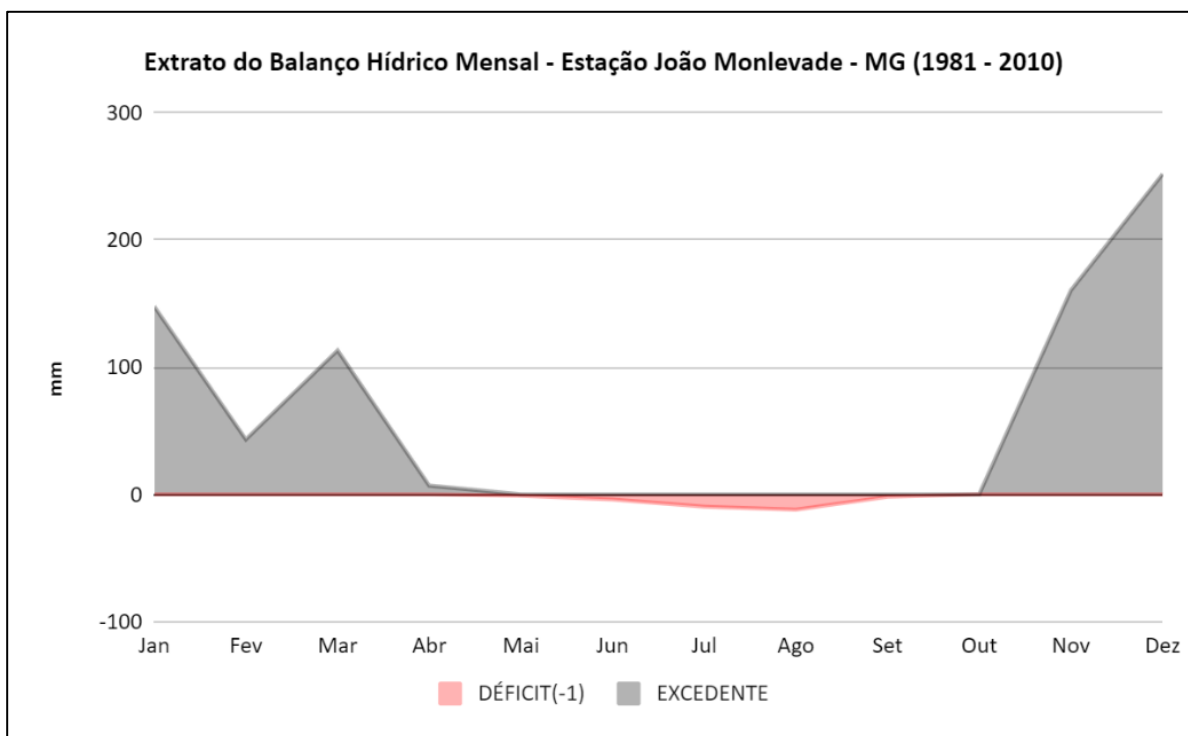
Com isso, a área de estudo, sofre com duas estações bem determinadas, sendo a primeira fria e seca (inverno), onde existe a atuação da Frente Polar Atlântica (FPA) e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Já a segunda é caracterizada por ser bem quente e úmida (verão), no qual ocorre a ação de sistemas convectivos que estão relacionados ao aquecimento do continente, e também a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Oliveira, 1986 e Nobre, 1988).

#### *4.1.2 Normal Climatológica*

Para compreender a ação do clima na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau foi elaborado o balanço hídrico por meio do método de Thornthwaite & Mather (1955), utilizando os dados da normal climatológica do INMET de 1981-2010, devido a ausência de dados no período de 1991-2010.

Observou-se que durante os meses de outubro a março (período chuvoso) a situação da disponibilidade hídrica de águas provenientes de precipitação é bastante excedente, chegando a cerca de 250mm. Se apresentou nula nos meses de maio e setembro, e nos meses de junho e agosto observou um pequeno déficit, sendo meses considerados do período seco (Gráfico 1).

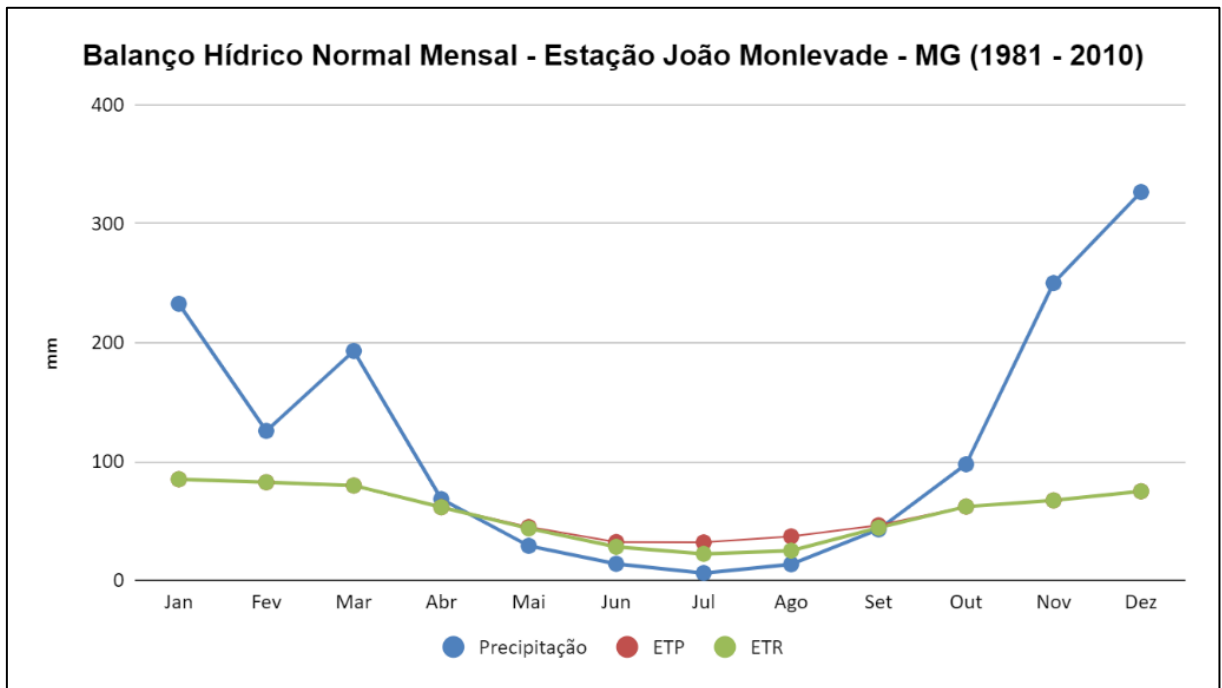
**Gráfico 1: Extrato do Balanço Hídrico Mensal – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)**



**Fonte: INMET – Normal Climatológica 1981-2010.**

O balanço hídrico normal mensal (Gráfico 2) revela que a precipitação média para janeiro é de 232,8 mm, reduzindo em fevereiro para 125,9 mm, se elevando para 193,1 mm em março e posteriormente reduzindo até julho, chegando a apenas 6,3 mm, e, em seguida inicia-se no mês de agosto o aumento gradativo da precipitação, até seu ápice em dezembro, chegando a 326,7 mm. A evapotranspiração potencial e evapotranspiração real seguem relativamente o mesmo comportamento, mas com médias consideravelmente inferiores à da precipitação, sendo superadas pela precipitação somente nos meses de maio a agosto.

**Gráfico 2: Balanço Hídrico Normal Mensal – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)**

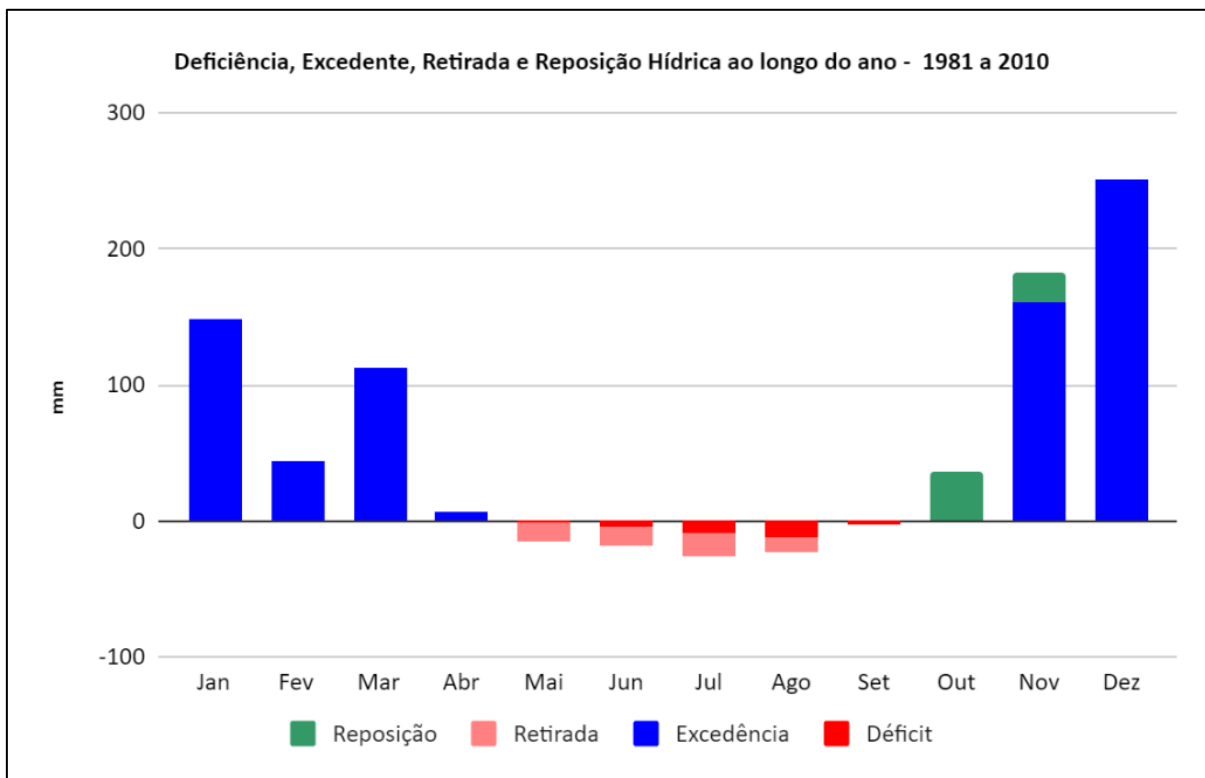


**Fonte: INMET – Normal Climatológica 1981-2010.**

Para complementar a análise climática da região onde está inserida a Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, é importante entender a relação entre deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica ao longo do ano (

Gráfico 3). Como mostrado, o mês de julho apresentou o maior valor de retirada, com um total de -16,17 mm. Em contraste, agosto foi o mês com a maior deficiência hídrica, acumulando um déficit de -11,97 mm. Em relação a reposição hídrica, outubro se destacou com um aumento de 35,60 mm no sistema. Ao longo do ano, foram registrados excedentes hídricos em diversos meses, como janeiro (147,6 mm), fevereiro (43,2 mm), março (113,2 mm), novembro (160,3 mm) e dezembro (251,6 mm).

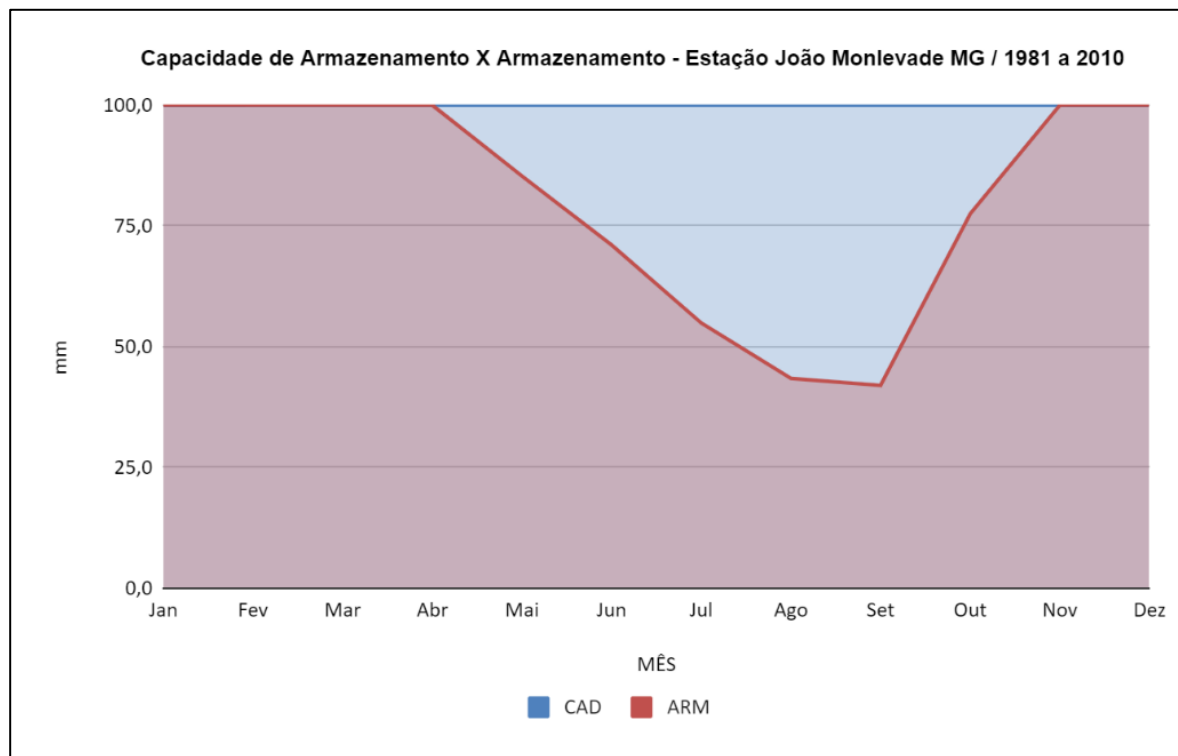
**Gráfico 3: Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica ao longo do ano – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)**



Fonte: INMET – Normal Climatológica 1981-2010.

Outro aspecto importante para se compor a análise é compreender a dinâmica de capacidade de armazenamento e o armazenamento efetivo (Gráfico 4). Foi notado que durante a maior parte do período (novembro a abril) o armazenamento é igual a 100%. Apenas nos meses de maio a outubro que o armazenamento se encontra abaixo, sendo o menor valor de 41,9% no mês de setembro. Isso significa que o sistema fica com nenhuma capacidade de armazenamento durante quase todo o ano, aumentando significativamente a capacidade apenas de maio a outubro.

**Gráfico 4: Capacidade de Armazenamento x Armazenamento – Estação João Monlevade – MG (1981-2010)**



**Fonte: INMET – Normal Climatológica 1981-2010.**

Portanto, entender o clima da região é de grande importância para compreender as inundações que ocorrem frequentemente na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau e como a distribuição da precipitação, sua relação com a evapotranspiração, os valores hídricos de deficiência, excedentes, retiradas, reposição e a capacidade de armazenamento, são aspectos necessários para a evolução desta pesquisa. Nesse sentido, é relevante também analisar a litologia da área e entender sua dinâmica e influência no processo de inundação da Sub-Bacia.

## **4.2 Caracterização Geológica**

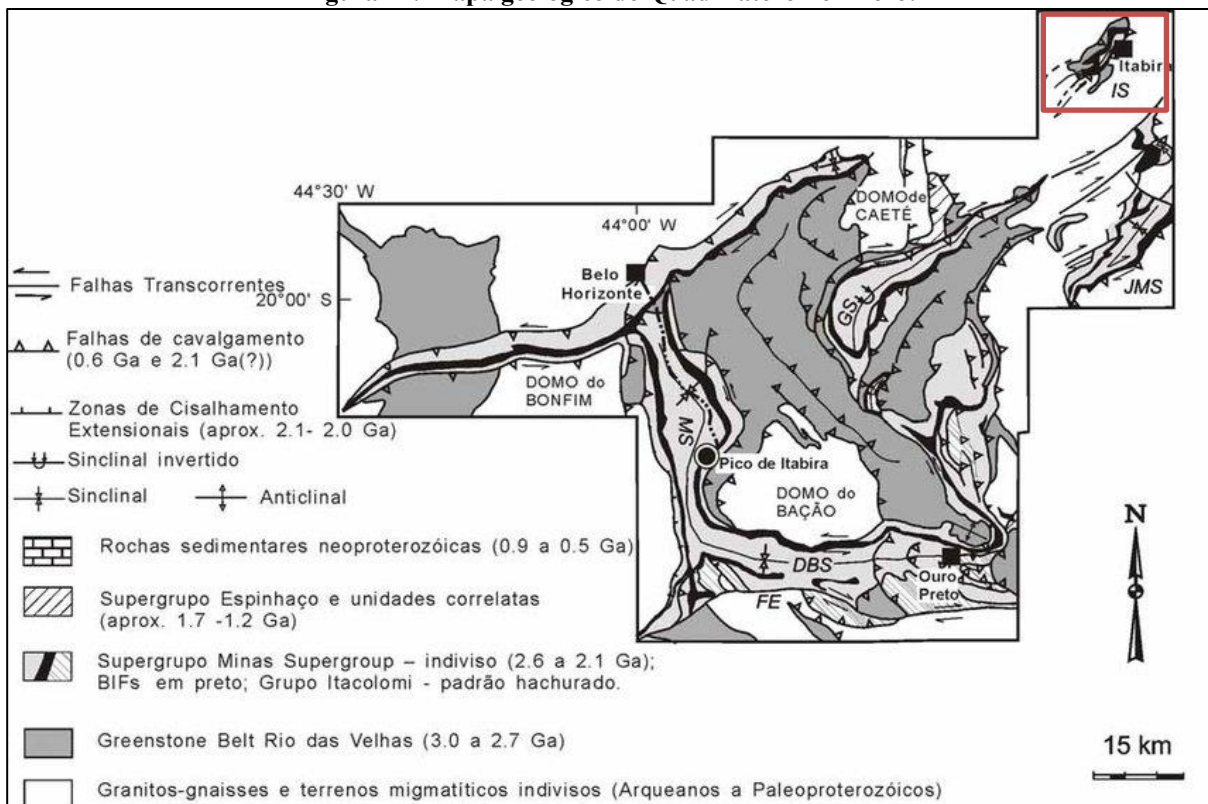
Para analisar a dinâmica do local onde está situada a Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, é fundamental primeiro conhecer sua geologia, pois ela estabelece os fundamentos para entender a interação entre o ambiente físico e os processos ecológicos, ajudando a criar estratégias de gestão mais eficazes.

#### 4.2.1 Contexto Geológico Regional

A Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau insere quase por completo no Quadrilátero Ferrífero (QF), uma área de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> localizada no centro do estado de Minas Gerais, no extremo sul do Cráton São Francisco, é notável por sua rica ocorrência de formação ferrífera (Dorr, 1969). Este território, que se estende entre as latitudes 19°45' e 20°30' S e longitudes 43°22'30'' e 44°7'30'' W, apresenta um complexo registro geológico que abrange rochas Arqueanas a Paleoproterozoicas e testemunha a sobreposição de eventos deformacionais do Paleoproterozoico e, possivelmente, do Neoproterozoico (Almeida, 1977). Circundado por cinturões orogênicos brasileiros que convergem para seu interior (Alkmim & Marshak, 1998).

A área de estudo se posiciona a nordeste na QF, especificamente no Sinclínório de Itabira, que é caracterizado por ser uma grande estrutura sinformal com eixo de direção N30°-40°E/20°, com a presença de anticlinais e sinclinais (Figura 14).

Figura 14: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.

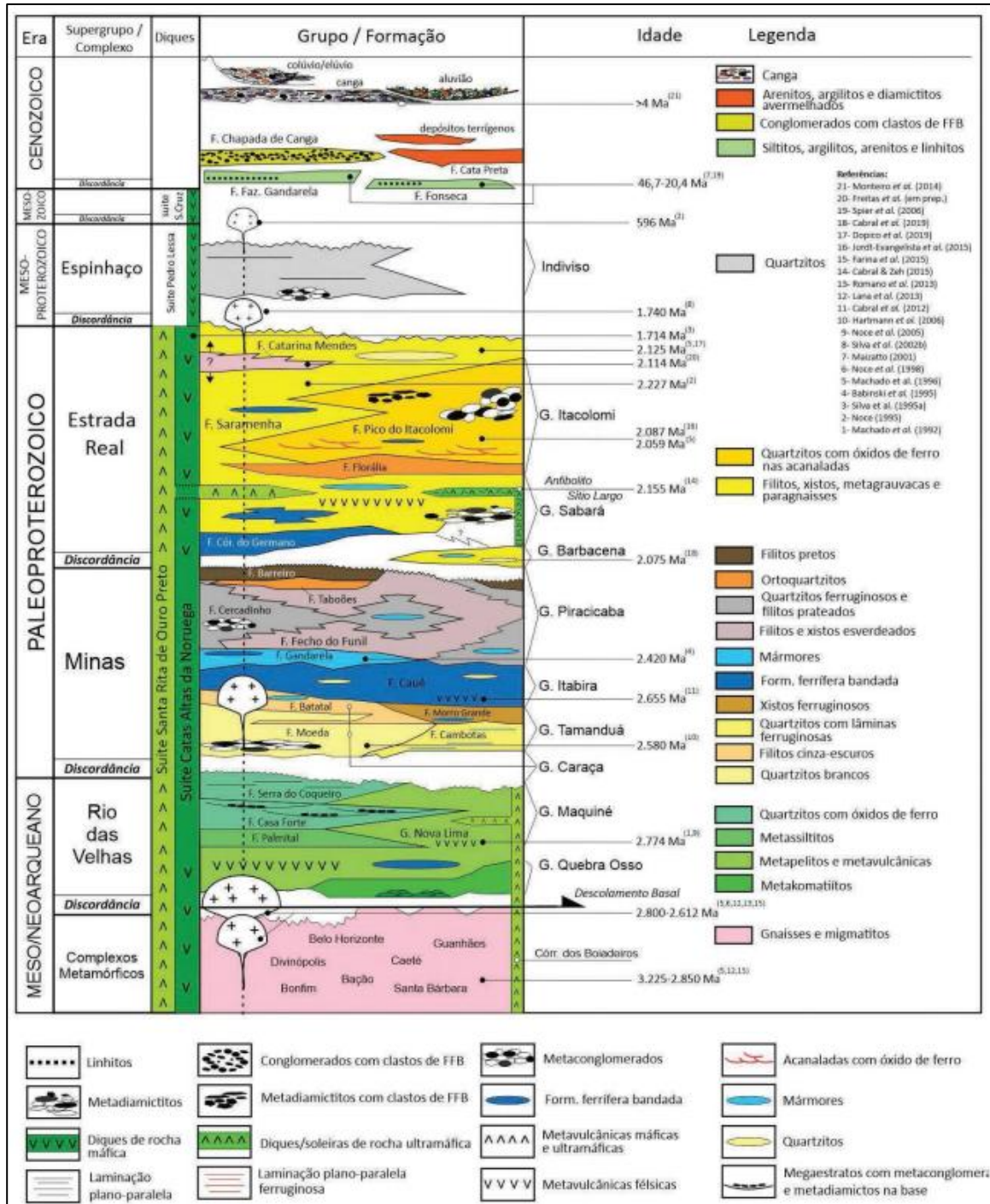


Fonte: Modificado de Dorr, 1969 e de Baars & Rosière, 1997.

Do ponto de vista estratigráfico é composto por cinco unidades principais: o

embasamento cristalino arqueano, a sequência vulcanossedimentar arqueana (Supergrupo Rio das Velhas), a sequência metassedimentar paleoproterozóica (Supergrupo Minas), as rochas intrusivas pós-Minas e a sequência detrítica neoproterozóica (Grupo Itacolomi) (Alkmim & Marshak, 1998). A seguir é apresentada a versão mais recente da coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, de acordo com Endo et. al (2019b) (Figura 15)

Figura 15: Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Endo et. al (2019)

#### 4.2.2 Litologia

A geologia da área de estudo pode ser subdividida em Unidades e Litotipos, conforme consta no Serviço Geológico do Brasil (CPRM). As unidades, se dividem em: Suíte Borrachudos Granito e Sienogranito; Supergrupo Minas, onde se insere o Grupo Piracicaba, Grupo Itabira e Grupo Carcaça; Complexo Basal de Guanhões e o Supergrupo Rio das Velhas, onde se insere o Grupo Maquiné e o Grupo Nova Lima. Em relação à litologia, área onde se insere o Ribeirão Jirau apresenta uma ampla variedade de rochas, abrangendo os três principais tipos: sedimentar, metamórfico e magmático. O mapa a seguir ilustra as informações descritas (Figura 16).

A litologia representada pela sigla **PP4yb** é encontrada na porção leste, oeste e sul da Sub-Bacia se estendendo em seu sentido sudoeste e norte. Corresponde às rochas predominantemente magmáticas, sendo elas: granito, ortognaisse e gnaisse-augen granítico, quartzo monzonito, álcali-feldspato granito. São componentes da Unidade Suíte Borrachudos, que datam do período Estateriano, da era Paleoproterozóico, do éon Proterozóico (entre 1,6 Ga e 1,8 Ga atrás) (CPRM).

A litologia identificada pela sigla **PP12mp** encontra-se situada na porção sudoeste do polígono. É composta por rochas metamórficas, sendo: dolomito, filito, formação ferrífera bandada, mármore dolomítico, metaconglomerado, quartzito, quartzito ferruginoso, sericita xisto, xisto. É parte, do Supergrupo Minas e do Grupo Piracicaba que data do período Riáciano, da era Paleoproterozóico, do éon Proterozóico, (entre 2,05 Ga e 2,5 Ga atrás) (CPRM).

A litologia simbolizada pela sigla **A4PP1mi** apresenta-se em pequeno fragmento ao sudoeste na área de estudo. É composto por rochas metamórficas e sedimentares, do tipo itabirito, itabirito dolomítico e anfibolítico, além de dolomito, com pequenas lentes de filito e marga e horizontes manganésíferos. Essa litologia encontra-se inserida no Supergrupo Minas e no Grupo Itabira na unidade Formação Cauê, datando do período Sideriano, da era Paleoproterozóico, do éon Proterozóico (entre 2,3 Ga e 2,8 Ga atrás) (CPRM).

A litologia traduzida pela sigla **A4PP1mc** encontra-se, um pequeno fragmento concentrado na porção sudoeste da Sub-Bacia do Ribeirão Jirau. Corresponde a rochas metamórficas de quartzito grosso de origem fluvial e quartzito fino, filito de origem

transicional marinha e metaconglomerado. Essa litologia encontra-se inserida no Supergrupo Minas e no Grupo Caraça. Essas estruturas, correspondem aos períodos Sideriano, da era Paleoproterozóico, inseridos no éon Proterozóico (entre 2,3 Ga e 2,8 Ga atrás) (CPRM).

A litologia descrita pela sigla **PP23gsn** pode ser localizada na porção central da Sub-Bacia, onde se desenvolve tanto em sentido sudeste quanto para a direção sudoeste. Se trata de formações metamórficas, constituídas por gnaisses, quartzitos, anfíbolitos, metabasaltos komatiíticos, metavulcânicas félsicas, itabiritos dolomíticos, xistos, calcissilicáticas e formações ferríferas bandadas. Encontra-se inserida na unidade Complexo Basal de Guanhões, que possui datação estimada do período Riáciano, da era Paleoproterozóico, inseridos no éon Arqueano (entre 2,8 Ga e 3,2 Ga atrás) (CPRM).

A litologia contida pela sigla **A3y1cbg** se apresenta em um pequeno fragmento na área coberta, na porção norte. Se trata de rochas ígneas e metamórficas, compostas por metagranito, metagranodiorito, metatonalito, quartzo monzonito. Encontra-se inserida na unidade Complexo Basal de Guanhões, que possui datação estimada do período Riáciano, da era Paleoproterozóico, inseridos no éon Arqueano (entre 2,8 Ga e 3,2 Ga atrás) (CPRM).

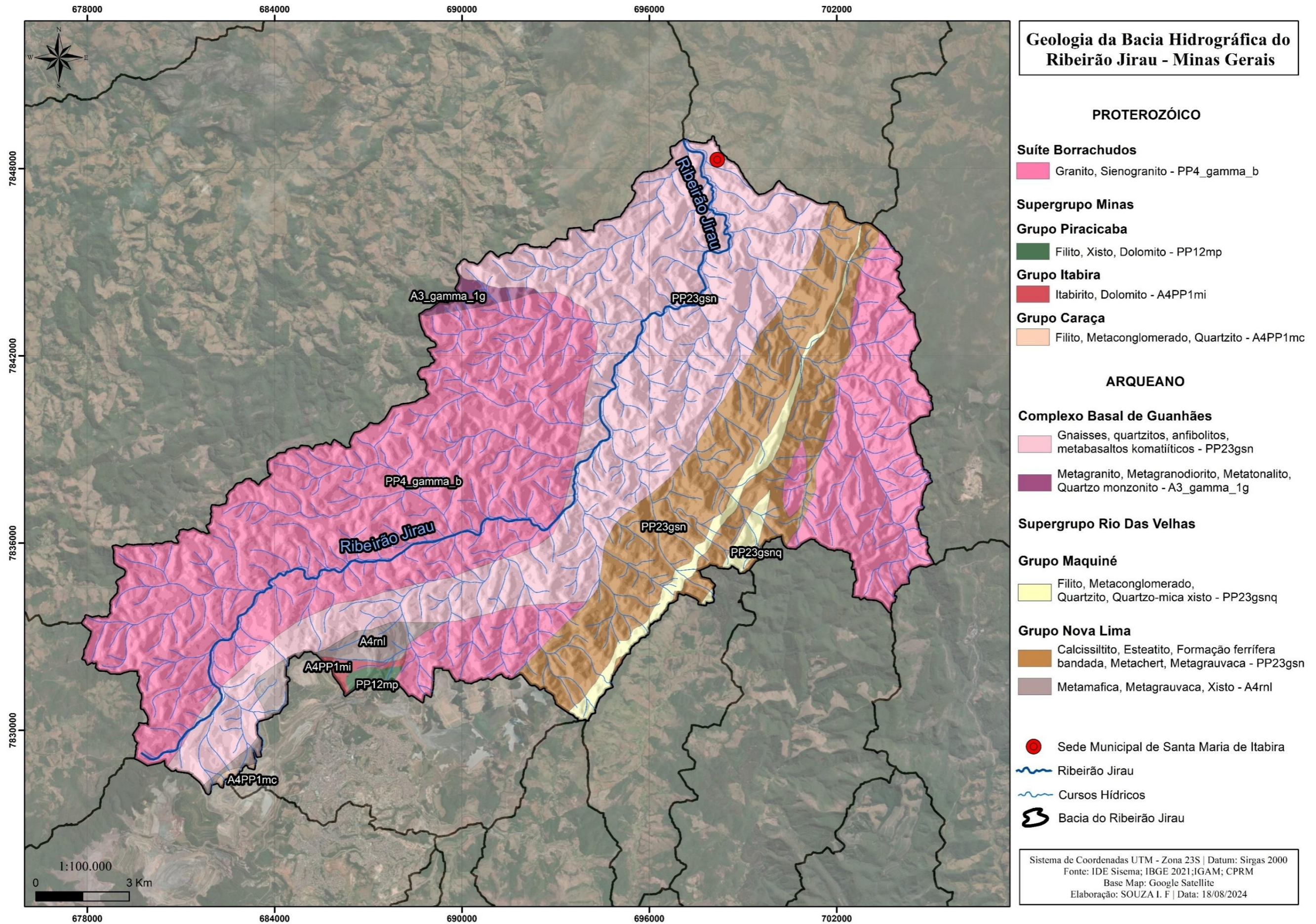
Quando a litologia representada pela sigla **PP23gsnq**, pode ser localizada em uma extensa faixa que se prolonga na porção leste, se estendendo de nordeste a sul. É classificada como rochas ígneas, formadas por quartzitos que transicionam a quartzo-sericita xisto na base e quartzito sericítico, metaconglomerado polimítico, sericita xisto e sericita-quartzo xisto com estratificação cruzada no topo. Encontram-se dispostos dentro do Supergrupo Rio das Velhas e Grupo Maquiné possuem datação estimada do período Riáciano, da era Neoarqueano, do éon Arqueano (entre 2,5 Ga e 2,8 Ga atrás) (CPRM).

A litologia identificada pela sigla **PP23gsn**, encontra-se localizada em uma extensa faixa que se prolonga na porção leste, se estendendo de nordeste a sul. É composta por rochas metamórfica, sendo: calcissiltito, esteatito, formação ferrífera bandada, metachert, metagrauvaca, metamáfica, metavulcânica máfica, metavulcânica ultramáfica, rocha metaultramáfica, sericita-quartzo xisto, xisto. Pertence ao Supergrupo Rio das Velhas e ao Grupo Nova Lima e possuem datação estimada do período Riáciano, da era Neoarqueano, do éon Arqueano (entre 2,5 Ga e 2,8 Ga atrás) (CPRM).

Por fim, a litologia identificada pela sigla **A4rnl**, encontra-se localizada em pequenos

fragmentos pela porção sudoeste da Sub-Bacia. É composta por rochas metamórfica e sedimentar, sendo: metagabro, serpentinito e xisto. Pertence ao Supergrupo Rio das Velhas e ao Grupo Nova Lima e possuem datação estimada da era Neoarqueno e do éon Arqueano (entre 2,5 Ga e 2,8 Ga atrás) (CPRM).

Figura 16: Geologia da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2020 e 2021; ANA; Igam, CPRM. Elaboração: Autora. 2024

### 4.3 Caracterização Pedológica

Estudar os solos é fundamental para entender e otimizar a utilização dos recursos naturais que se inserem na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau. Compreender a composição, a estrutura e as características dos diferentes tipos de solos permitem o conhecimento detalhado sobre os solos, ajudando a mitigar problemas relacionados a sustentabilidade dos recursos naturais.

#### 4.3.1 Tipos de Solos

Através da hierarquização e classificação realizada pela pesquisa de levantamento de solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV) em 2010, identificou-se os seguintes solos na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau: PVAd; LVd; LVAd e CXj, predominando a categoria das ordens dos Latossolos.

Segundo o SIBCS (2018) os Latossolos são solos que apresentam predominância em sua composição de material mineral, onde se configura com o horizonte B latossólico, seguido de qualquer tipo de horizonte A, entre cerca de 200 cm partindo da superfície do solo ou dentro de 300 cm se o horizonte A tiver cerca de 150 cm. Os Argissolos também apresentam em sua composição predominância de material mineral, apresentando horizonte B textural abaixo do A, com argila em grande atividade ou baixa (SIBCS, 2018).

Os Cambissolos tem composição de material mineral, onde seu horizonte B se apresenta incipiente em relação a outro horizonte superficial. Possui argila em alta atividade e saturação por bases alta (SIBCS, 2018). A seguir, na Figura 17, encontra-se o mapa com a espacialização dos solos encontrados e descritos segundo suas respectivas classificações.

O solo classificado pela **LVd** se localiza na porção central da sub-bacia, expandindo para sudoeste e é constituído por Latossolo Vermelho distrófico típico, que possuem matiz mais avermelhada, textura argilosa, muito argilosa e argilosa cascalhenta, saturação por bases <50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (UFV-CETEC, 2010 e SIBCS, 2018).

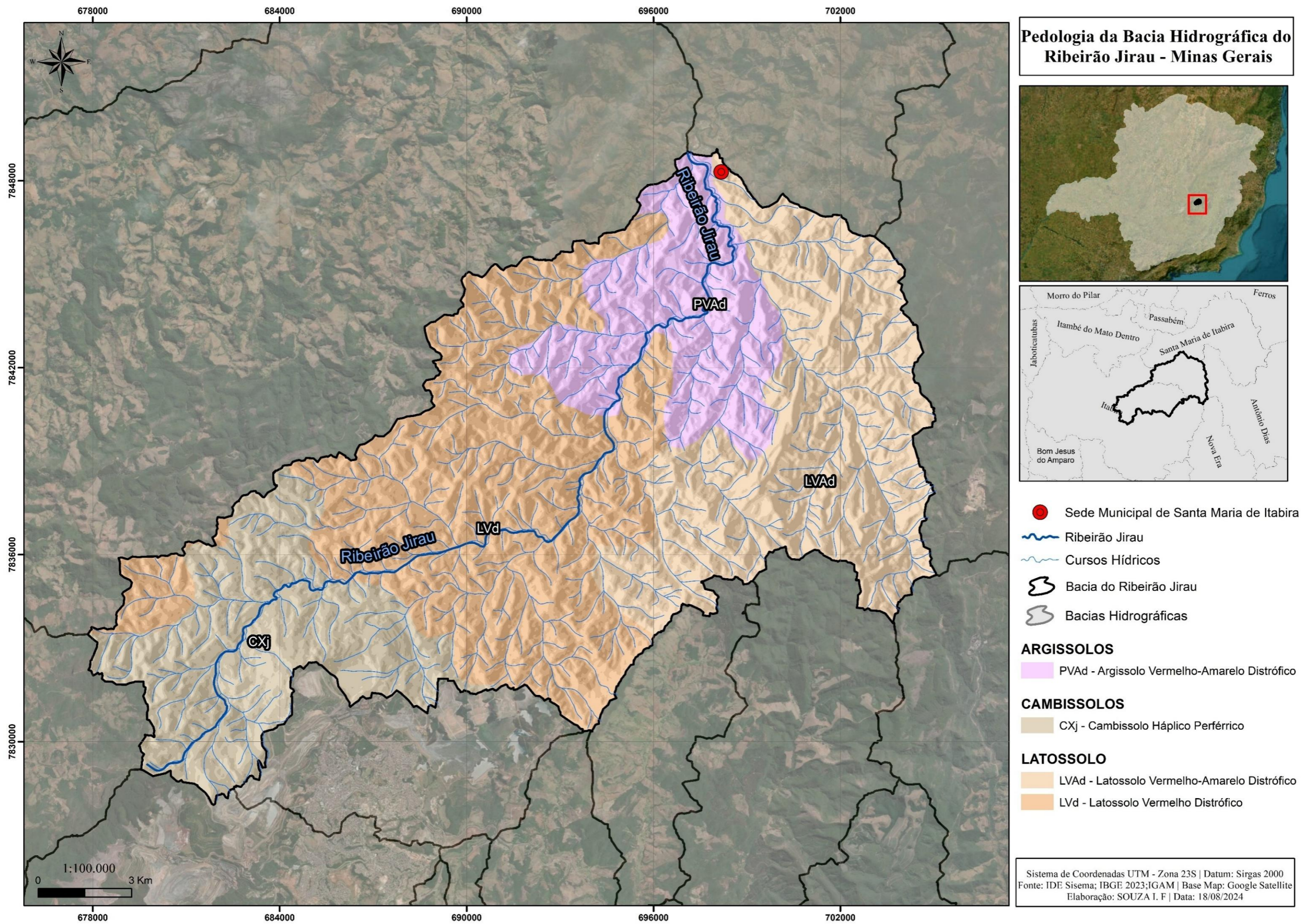
**LVAd** representa a área localizada no leste da Sub-Bacia, que possui Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, com saturação por bases <50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, textura argilosa e muito argilosa e matiz vermelho-

amarelado. (UFV-CETEC, 2010 e SIBCS, 2018).

A área simbolizada pela **PVAd** representa a ocorrência de Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, que possuem matiz vermelho-amareladas, com saturação <50% na maior parte dos 100 cm do horizonte B e textura média/argilosa, média cascalhenta e argilosa cascalhenta. Encontra-se localizado na porção norte, se estendendo para a porção central da bacia (UFV-CETEC, 2010 e SIBCS, 2018).

O solo classificado pela **CXj** se localiza na porção sudoeste da sub-bacia, expandindo é constituído por Cambissolo Háplico perférico típico e petroplíntico, solos com alto teor de  $Fe^2$   $O^3$  na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B (UFV-CETEC, 2010 e SIBCS, 2018).

Figura 17: Pedologia da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE,2023; ANA; Igam. Elaboração: Autora. 2024

## 4.4 Caracterização Geomorfológica

### 4.4.1 Domínios Morfoestruturais, Regiões e Unidades Geomorfológicas

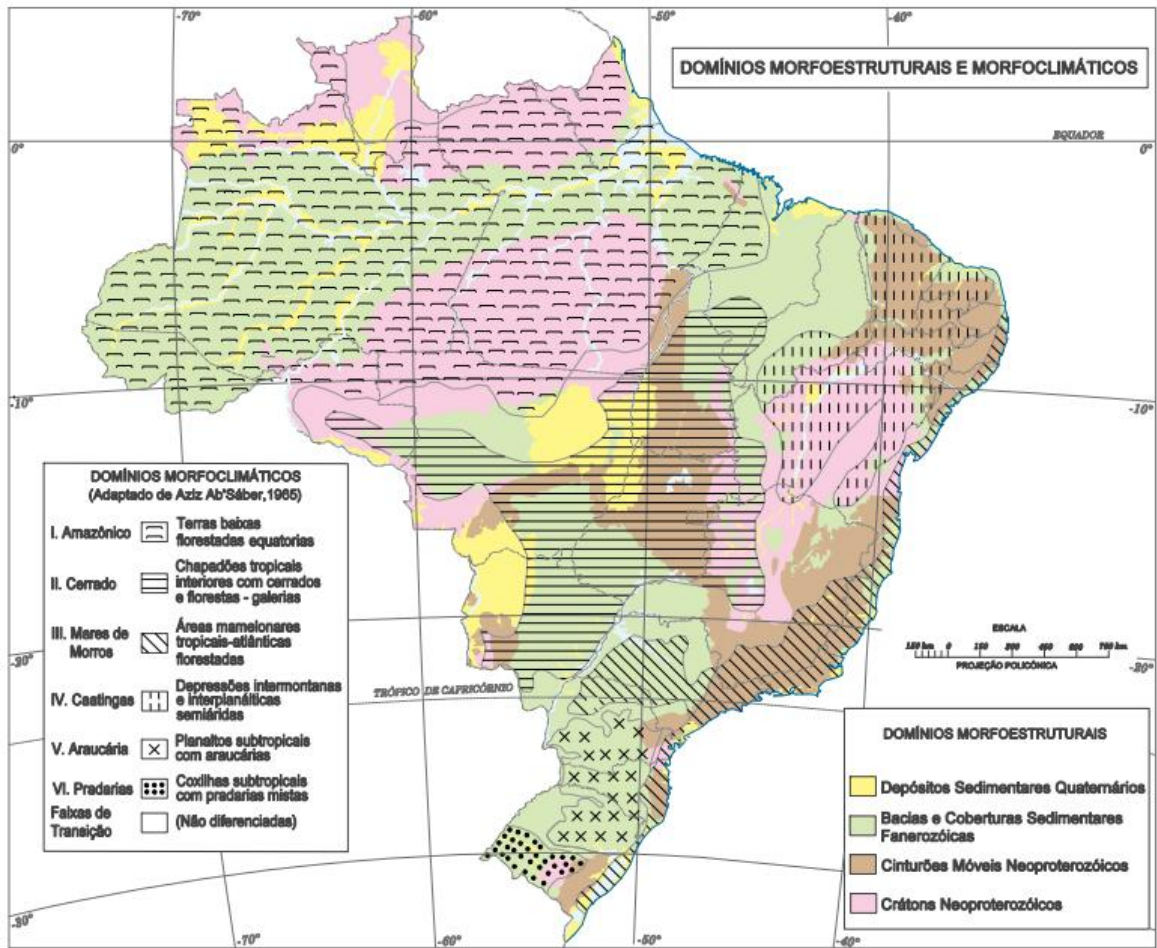
Os Domínios Morfoestruturais ocorrem em escala regional, sendo o maior táxon da compartimentação do relevo. Foram constituídos a partir do arcabouço geológico, pela tectônica de placas e sob influência climática, gerando extensos conjuntos de relevo com características específicas (IBGE, 2009). Os domínios podem ser divididos em Sub-Bacias sedimentares, cinturões móveis, plataformas, crátons, pediplanos e depressões. Para o Brasil, os domínios foram divididos em quatro compartimentos: Depósitos Sedimentares Quaternários, Sub-Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, Cinturões Móveis Neoproterozóicos e os Crátons Neoproterozóicos.

A área de estudo se encontra inserida no domínio dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos, que de acordo com o IBGE (2009) são grandes áreas caracterizadas por planaltos, alinhamentos serranos e depressões interplanálticas, inseridos em terrenos falhados e dobrados.

As Regiões Geomorfológicas são o segundo nível taxonômico do relevo que representam conjuntos de compartimentos inseridos nos conjuntos litomorfoestruturais, considerando também na sua classificação a localização geográfica IBGE (2009). A área de estudo se insere na região geomorfológica dos Planaltos do Leste de Minas.

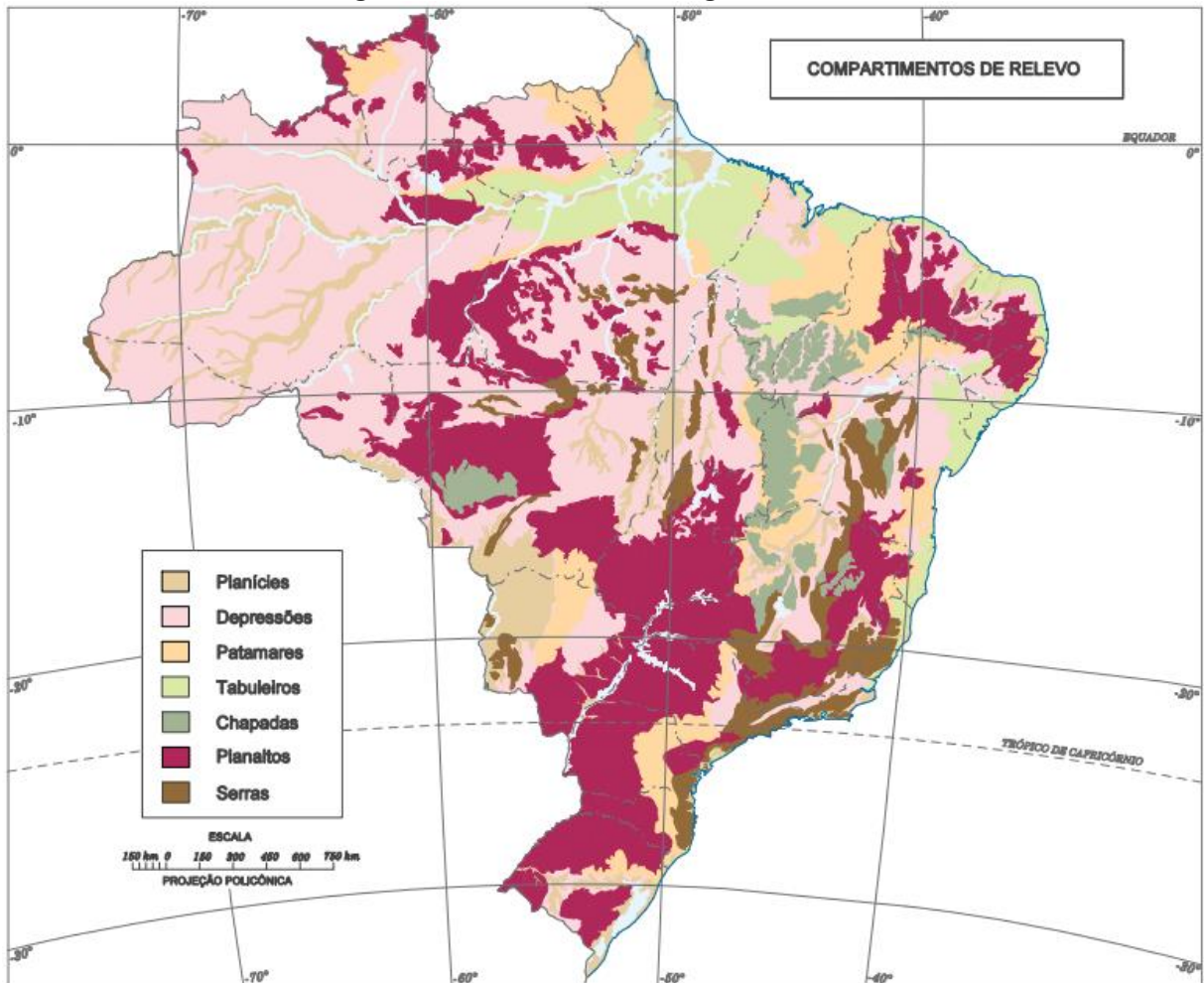
As Unidades Geomorfológicas constituem o terceiro nível taxonômico. De acordo com o IBGE (2009), as unidades são formadas a partir do conjunto das formas do relevo que são semelhantes em seus modelados. Os conjuntos de forma de relevo que fazem parte das unidades podem ser classificados como tabuleiros, chapadas, planaltos, planícies, serras, patamares e depressões. No Brasil existe uma variedade grande de unidades, com exemplo, a Planície Amazônica, Planalto do Campos Gerais, Serra da Canastra e a Chapada dos Parecis IBGE (2009).

Figura 18: Domínios Morfoestruturais do Brasil. Fonte: IBGE (2009).



Fonte: IBGE (2009).

**Figura 19: Unidades Geomorfológicas do Brasil.**



**Fonte: IBGE (2009).**

A área de estudo se insere na unidade geomorfológica do Planalto da Zona Metalúrgica Mineira. Esta área é parte do Complexo do Espinhaço, mais especificamente a Serra do Espinhaço Meridional que é uma cadeia montanhosa antiga e erodida, caracterizada por terrenos de altitudes médias e morfologia suavemente ondulada. O Planalto é conhecido por suas formações geológicas e solos minerais que influenciam a vegetação e a ocupação humana na região.

Na porção leste no limite entre Santa Maria de Itabira e Antônio Dias encontra-se a Serra do Corrente. Encontra-se também na porção leste da sub-bacia a Serra da Forquilha. Já na porção sudoeste da sub-bacia, no município de Itabira identifica-se a Serra do Cauê, que tem grande destaque pelas atividades minerárias realizadas na sua extensão.

Os modelados já compõem a quarta ordem de hierarquia e são um agrupamento de

formas do relevo que possuem suas geometrias próximas de acordo com a sua formação e dos processos de morfogênese que atual sobre elas (IBGE, 2009). Os modelados podem ser divididos em: dissecação, acumulação, aplanamento e dissolução. A área de estudo possui um modelado de dissecação homogênea com seus topos bem definidos e diversas densidades e aprofundamento das drenagens, segundo o IBGE (2009). Esse tipo de modelado ocorre de forma mais generalista no Brasil e leva em conta a drenagem, os topos do relevo e também a declividade.

#### *4.4.2 Hipsometria e Declividade*

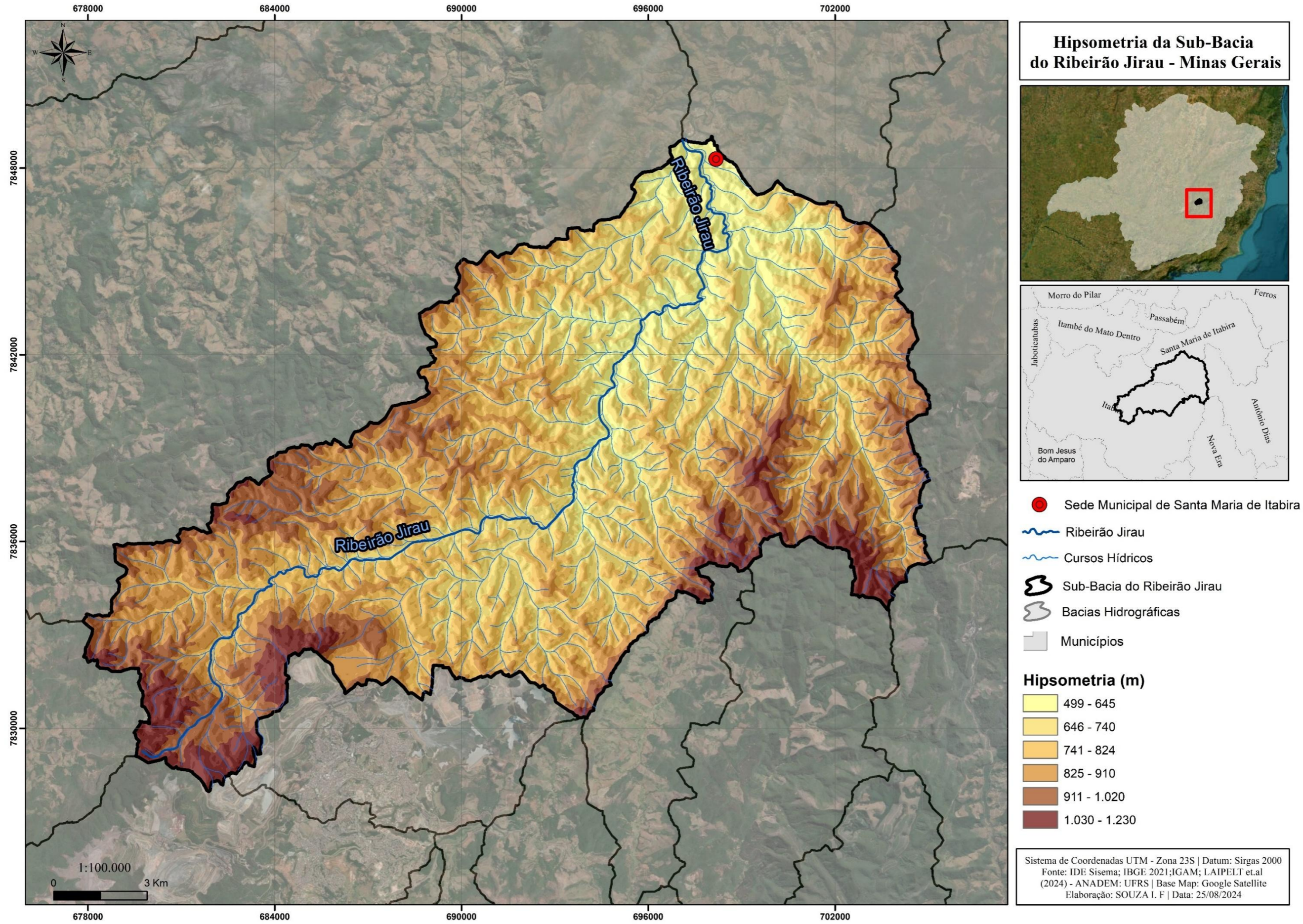
A avaliação da hipsometria e da declividade também é fundamental para entender a morfometria do terreno. A hipsometria mostra a relação entre as diferentes elevações na área, revelando características como divisores de bacias, vales e a configuração geral do relevo. Já a declividade analisa a variação das inclinações do solo, destacando a distribuição espacial das diferentes inclinações e sugerindo possíveis aplicações para essas áreas. Juntas, essas análises fornecem informações cruciais para determinar os usos mais adequados do solo com base em suas características topográficas.

Fez se a escolha por compartimentar a hipsometria em 6 classes, sendo elas: 499m a 645m; 646m a 740m; 741m a 824m; 825m a 910m; 911m a 1.016m; 1.017m a 1.232m. A amplitude dos dados cobertos é de 733 m de altitude. A menor cota altimétrica possui o valor de 499 m e a maior cota tem o valor de 1.232 m.

As maiores cotas altimétricas se apresentam entre 911m e 1.232m, se localizam nas bordas leste, oeste e sudoeste da sub-bacia. Essas cotas se inserem em litologia de formação ferrífera em sua maioria. As porções do território com cotas altimétricas médias, entre 741m e 910m, se localizam ao longo da parte medial das vertentes, possuindo maior representatividade na porção oeste, sudoeste e leste da sub-bacia, sobretudo na área correspondente a suíte borrachudos.

As menores cotas estão na porção central da sub-bacia, próxima ao leito do Ribeirão Jirau, possuindo entre 499m e 740m de altitude, seguidas pela porção sul onde se encontra as menores elevações.

Figura 20: Hipsometria da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2020 e 2021; ANA; Igam, LAIPELT et.al (2024) - ANADEM: UFRS . Elaboração: Autora. 2025

Outra variável observada foi a distribuição espacial da declividade na área de estudo. Dessa forma, dividiu-se está em seis classes, sendo: Plano, Suave Ondulado, Ondulado, Forte Ondulado, Montanhoso e Escarpado (EMBRAPA, 1979). Essas classes correspondem aos diversos graus de inclinação que se encontra na área da sub-bacia.

A classe Plana ( $0^{\circ}$  a  $3^{\circ}$ ) corresponde às superfícies horizontalizadas, são encontradas principalmente nas porções do leito do Ribeirão Jirau, local em que os processos erosivos, são menores (GRANELL-PÉREZ, 2004). Entretanto, esse tipo de classe possibilita a acumulação do fluxo hídrico superficial, possibilitando a inundações.

A classe Suave Ondulado ( $3,1^{\circ}$  a  $5^{\circ}$ ) encontra-se predominantemente na porção sudoeste da sub-bacia, esta classe indica um relevo com mínima ondulação, que é composta por um conjunto de colinas e fundos de vale. Nas porções em que a declividade apresenta essa classificação, verifica-se a predominância de escoamento laminar e incidência de possíveis sulcos erosivos (GRANELL-PÉREZ, 2004).

Já a classe Ondulado ( $5,1^{\circ}$  a  $16^{\circ}$ ) corresponde a um relevo ondulado com declives acentuados, que observa-se com maior expressividade na porção central da sub-bacia e na porção sul e leste, e é formada pelos morros. Esse tipo de relevo que se apresenta dentro desta classe está exposta a possíveis ações de movimentos de massa, como escorregamento e creep, além disso, há a possibilidade de ocorrência de sulcos e ravinas (GRANELL-PÉREZ, 2004). O relevo apresentado também contribui de forma expressiva na velocidade do fluxo hídrico superficial.

A classe Forte Ondulado ( $16,1^{\circ}$  a  $25^{\circ}$ ) apresneta relevo movimentado, com declividades fortes, é encontrado na parte centro-leste de forma expressiva e sudoeste dasub-bacia de forma fragmentada, e é composta morros. Segundo Granell-Pérez (2004), “encostas do tipo serranas, sujeitas a movimentos de massa do tipo creep e escorregamentos, além disso, nestas feições a erosão linear é muito forte, causando perda de solo”. Destaca-se que em porções onde a declividade é mais acentuada o fluxo superficial possui maior velocidade de escoamento.

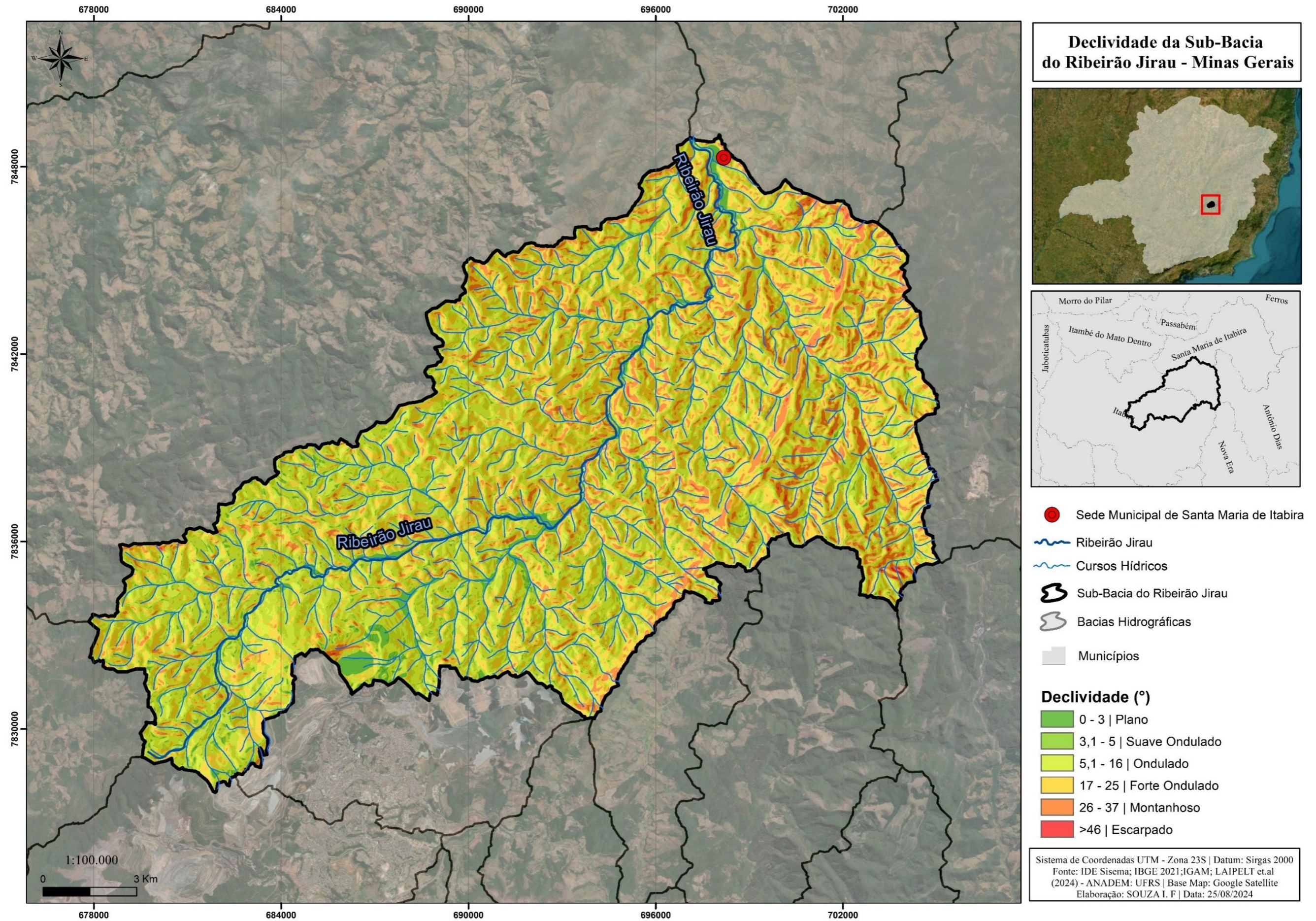
A classe Montanhoso ( $25,1^{\circ}$  a  $37^{\circ}$ ) se encontra distribuída em pequenas porções sobre a porção central do polígono da sub-bacia e corresponde. De acordo com, Granell-Pérez (2004), essa clase possui “superfície topográfica vigorosa, formas acidentadas, constituídas

por morros, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamento relativamente grandes com declives que podem ser considerados fortes e muito fortes”. É comum nestas áreas a ocorrência de grande perda de solo, pois a erosão é muito forte devido a angulação do relevo.

Já a classe Escarpado ( $>37^\circ$ ) encontra-se distribuída, sobretudo, na porção centro-leste da área de estudo em pequenos fragmentos. São às áreas com predomínio de formas declivosas, incorporando escarpas, que podem variar de flancos de serras a inclinações muito fortes de vales encaixados.

O relevo da Sub-Bacia do Ribeirão Jirau é caracterizado por uma topografia acentuada, com variações expressivas de elevação e um grau significativo de declividade, demonstrando pelo menos três padrões de distribuição bem definidos, sendo eles: áreas altas e aplainadas ao sudoeste, áreas altas e abruptas no leste, e, áreas baixas e aplainadas na porção central.

Figura 21: Declividades da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2020 e 2021; ANA; Igam, LAIPELT et.al (2024) - ANADEM: UFRS . Elaboração: Autora. 2024

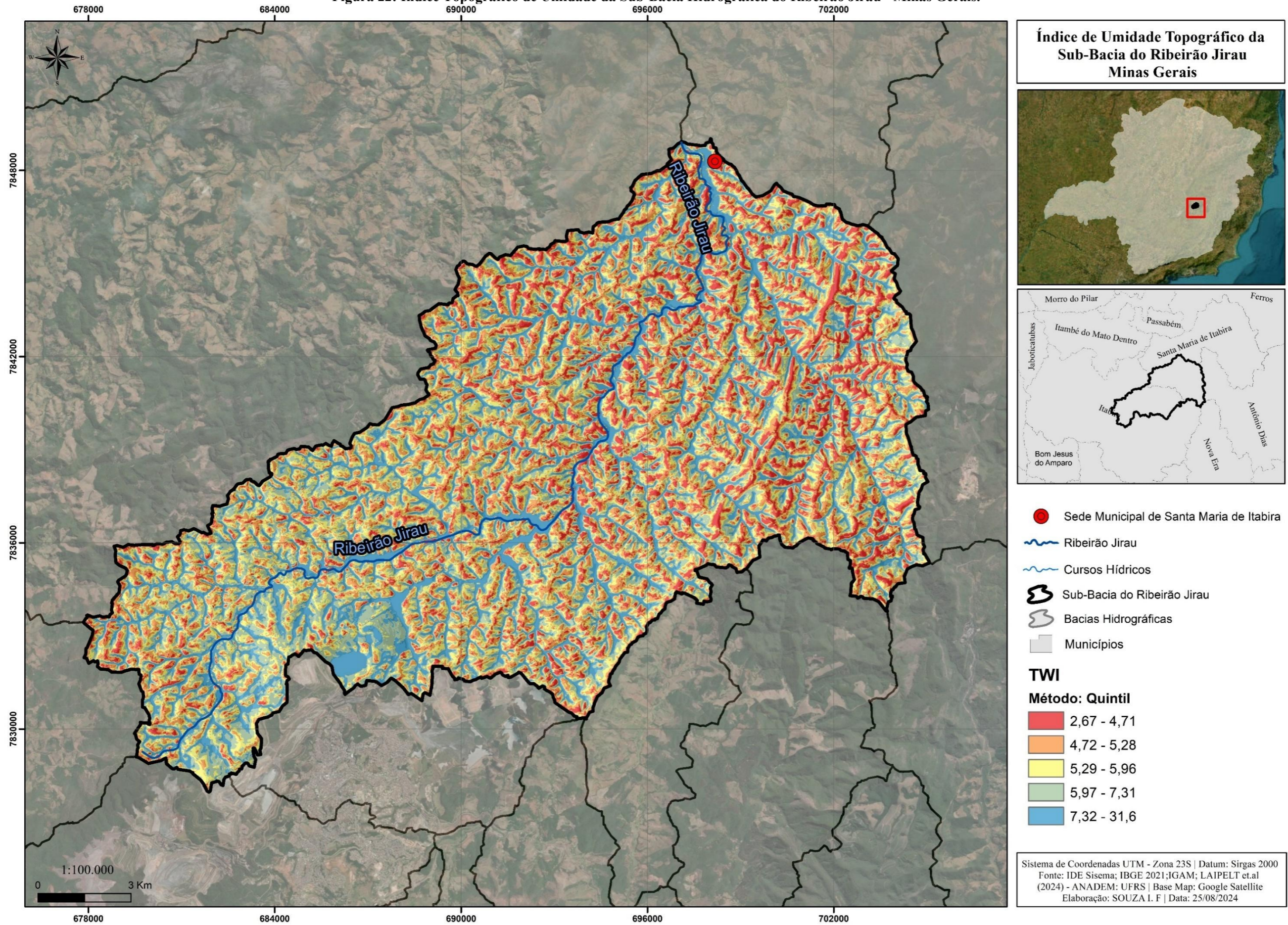
#### *4.4.3 Índice de Umidade Topográfico – TWI*

O reconhecimento e a distribuição espacial das áreas com saturação hídrica permanente ou temporária, podem ser realizados usando o índice topográfico de umidade (TWI) (CAPOANE et al., 2015). Esse índice é calculado com base na relação entre a declividade local e a acumulação do fluxo, chegando em resultados espaciais consideráveis para se entender os eventos de inundação. Dessa forma, através do cálculo proposto por Beven e Kirk (1979), foi realizado o TWI.

A partir do índice de umidade topográfica da área de estudo, observou-se que as áreas que possuem uma maior tendência a saturação de umidade na superfície, ou seja, o relevo, estão diretamente ligadas a formação dos cursos hídricos da sub-bacia.

Nesse sentido, nota-se que, à medida que se afasta dos talvegues (em azul), a tendência de saturação de umidade diminui progressivamente, até se tornar inexistente (indicado em vermelho). Assim, as áreas que possuem maiores confluências, tendem a acumulação dos fluxos, principalmente em épocas de intensas chuvas, resultando em possíveis inundações ou extravasamento hídrico dos canais. Um bom exemplo disso é a confluência do Ribeirão Jirau com o Rio Tanque, localizado na porção da sede municipal de Santa Maria de Itabira (ao norte da sub-bacia). Essa região é marcada pelos eventos de inundação, que ocorrem em períodos de intensas chuvas, como o ocorrido em 2021.

Figura 22: Índice Topográfico de Umidade da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2020 e 2021; ANA; Igam, LAIPELT et.al (2024) - ANADEM: UFRS . Elaboração: Autora. 2024

#### 4.4.4 Formas de Vertentes

A análise das formas das vertentes é essencial para compreender a dinâmica dos fluxos hídricos com a morfometria do relevo, possibilitando entender quais vertentes tendenciam a obter mais acumulação, em consequência possíveis inundações.

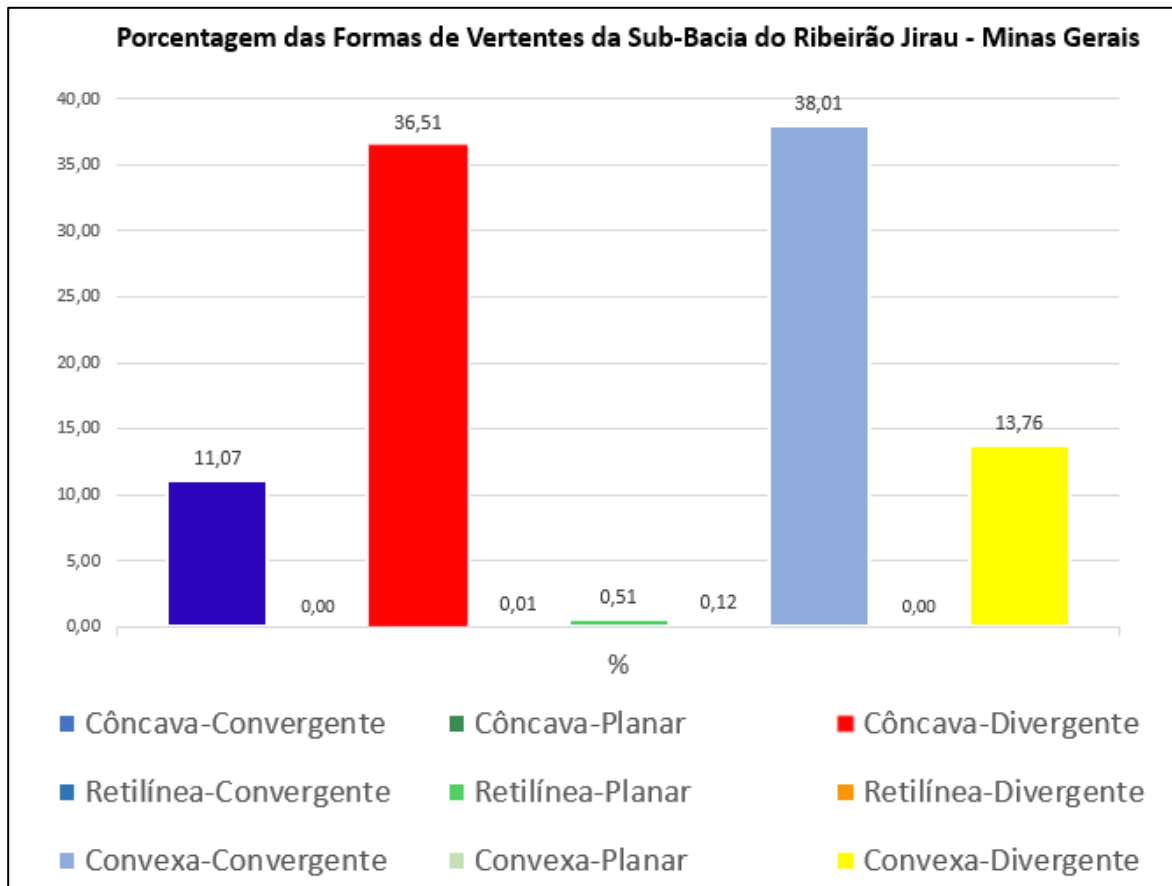
De acordo com Christofolletti (1980) as vertentes possuem a definição bem específica e a geomorfologia apresenta essas formas como aquelas que foram moldadas pelos processos de desgaste, erosão e intemperismo, que ocorrem no presente ou ocorreram no passado, e que destaca a dinâmica do relevo entre o interflúvio e o vale.

As vertentes podem apresentar diversas formas, podem ser classificadas de acordo com a sua curvatura horizontal: convergente, planar e divergente; ou sua curvatura vertical: côncava, retilínea e convexa (FLORENZANO, 2008).

Nesse sentido, através da metodologia e classificação realizada pela pesquisa de Valeriano (2008), destaca-se que de acordo com a modelagem morfométrica efetuada as formas de relevo da Sub-bacia do Ribeirão Jirau são compostas majoritariamente por dois tipos, sendo elas convexa-convergente (38,01%) e côncava-divergente (36,51%). Os tipos de vertentes encontradas são típicas de áreas com relevo de mares de morros formado por litologias granito-gnáissicas, como é o caso da maioria da sub-bacia. Esse tipo de vertente relacionada com a litologia da área que detém de porções formadas por filitos e quartzitos, possibilita o surgimento de erosões, ravinamentos e voçorocas. Além disso, a predominância de vertentes convexas-convergentes e côncavas-divergentes, demonstram que na alta vertente tendem a predominar um escoamento laminar de fluxo lento e na média vertente tende a acumulação dos fluxos em linhas de drenagens e o aumento da velocidade.

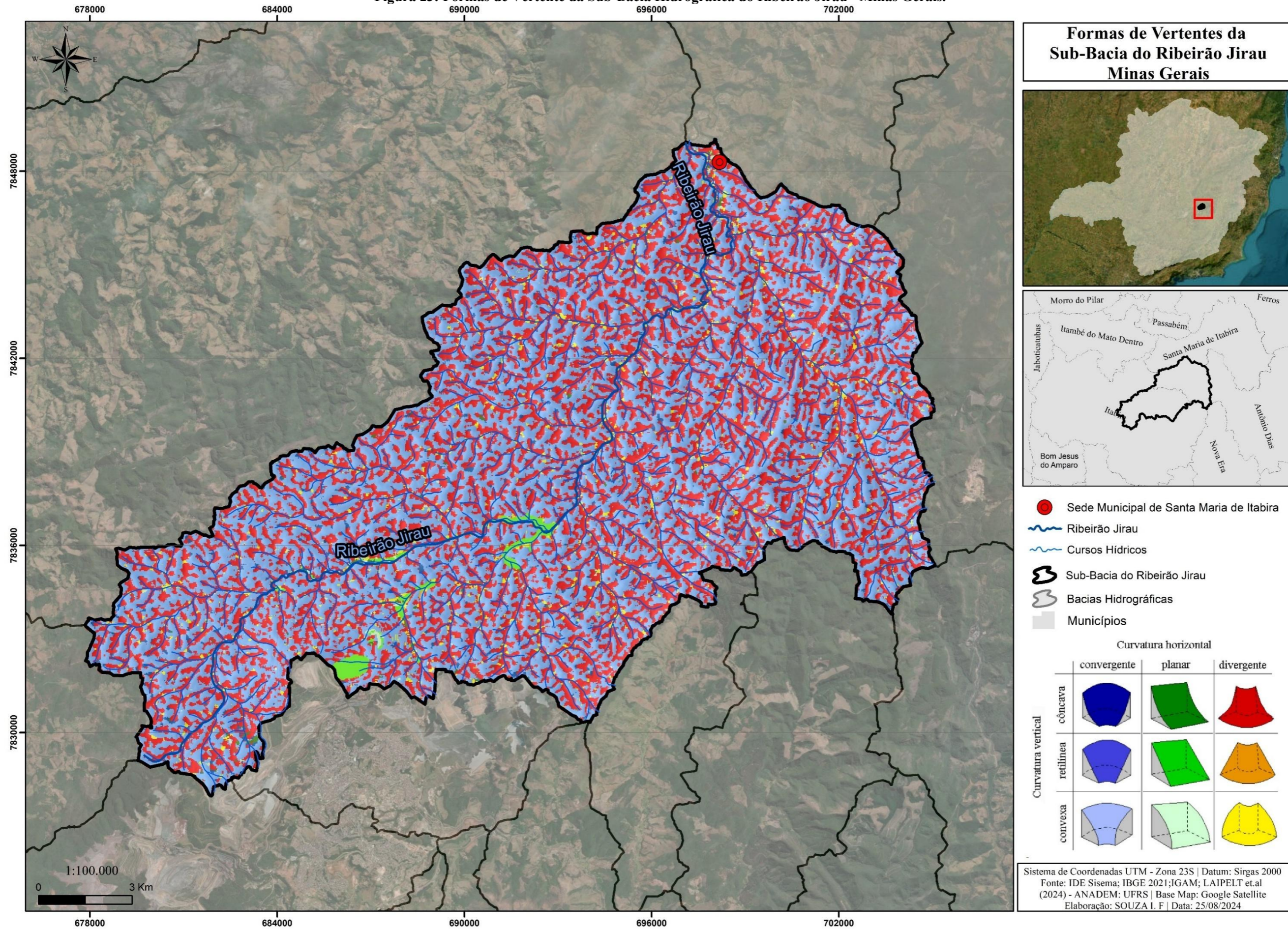
Em menor expressão espacial, tem-se as formas retilíneo-planares (0,51%), que ocorrem ao longo das planícies de inundação, côncava-planar (0,01%), que ocorre próximo aos terraços aluvionares, convexa-divergente (13,76%) e côncavo-convergente (11,07%), que se comportam como faixa de transição entre côncavas-divergente e convexa-convergente. As demais classes são inexpressivas para o contexto da sub-bacia. O Gráfico 5 a e Figura 23 apresentam o resultado da modelagem morfométrica para o tema formas de vertente.

**Gráfico 5: Porcentagem das Formas de Vertentes da Sub-Bacia do Ribeirão Jirau– MG**



Fonte: Autora (2024)

Figura 23: Formas de Vertente da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2020 e 2021; ANA; Igam, LAIPELT et.al (2024) - ANADEM: UFRS . Elaboração: Autora. 2024

## 4.5 Caracterização Hidrográfica

### 4.5.1 Índices Morfométricos de Sub-Bacia Hidrográfica

A análise morfométrica de uma sub-bacia hidrográfica é um procedimento executado nos estudos ambientais visando esclarecer questões sobre o entendimento das dinâmicas de infiltração e do escoamento superficial associando aos elementos físicos da bacia. Por meio desses índices é possível compreender a bacia como um todo e sua fragilidade a inundações.

Para a realização da análise da morfométrica da Sub-Bacia do Ribeirão Jirau, foi necessário a delimitação de atributos básicos, tais como: área (Km<sup>2</sup>), perímetro (Km), comprimento do canal principal (km), comprimento do canal axial (km), amplitude altimétrica (m), comprimento total da drenagem (km) e número de segmentos de rio. A partir desses atributos, foram calculados os índices de forma da bacia, como os valores de coeficiente de compactidade (Kc), fator de forma (Ff), índice de circularidade (Ic), densidade da drenagem (Dd), índice de sinuosidade (Is).

O **Coefficiente de compactidade (Kc)** é um índice que estabelece uma relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia hidrográfica. De acordo com Villela e Mattos (1975), o Kc refere-se a um valor adimensional que varia com a forma da bacia, independentemente de seu tamanho, ou seja, quanto mais irregular a forma, o coeficiente de compactidade, maior será. Desse modo, um coeficiente mínimo igual à unidade corresponderia a uma bacia circular e, para uma bacia alongada, seu valor é significativamente superior a 1. Nesse sentido, uma bacia será mais suscetível a inundações mais extremas caso seu coeficiente for mais próximo da unidade. Para esse parâmetro, foi utilizado a tabela de Villela e Mattos (1975), adaptada por Vale, Costa e Pimentel (2019), para ajudar na interpretação dos resultados obtidos.

**Tabela 8: Valores para interpretação de coeficiente de compactidade (Kc)**

Kc	Formato	Interpretação para Bacia Hidrográfica
1,0 – 1,25	Redonda	Alta tendência a inundações
1,25 – 1,50	Mediana	Média Tendência a inundações
1,50 – 1,70	Oblonga	Baixa tendência a inundações
>1,70	Comprida	Tendência a conservação

Fonte: Villela e Mattos (1975). Adaptado por Vale; Costa; Pimentel (2019).

O **Fator de forma (Ff)** é conhecido como fator de Gravellius, é a razão entre a área da bacia de drenagem e o comprimento axial da mesma (da foz ao ponto mais longe do divisor de água). Dessa forma se uma bacia possuir um fator de forma baixo estará menos sujeita a inundações que outra com o mesmo tamanho, mas com fator de forma maior, como descrito por Villela e Matto (1975). Para esse parâmetro, também foi utilizado a tabela de Villela e Mattos (1975), adaptada por Vale, Costa e Pimentel (2019), para ajudar na interpretação dos resultados obtidos.

**Tabela 9: Valores para interpretação de fator de forma (Ff)**

Ff	Formato	Interpratação para Bacia Hidrográfica
0,75 – 1,0	Redonda	Alta tendência a inundações
0,50 – 0,75	Mediana	Média Tendência a inundações
0,30 – 0,50	Oblonga	Baixa tendência a inundações
>0,30	Comprida	Tendência a conservação

Fonte: Villela e Mattos (1975). Adaptado por Vale; Costa; Pimentel (2019).

O **Índice de circularidade (Ic)**, compara a área da bacia com a área de um círculo de perímetro igual ao da bacia, sendo assim, esse valor tende a unidade ao passo que se aproxima da forma circular e diminui de acordo com que a forma se torna alongada, concomitantemente ao coeficiente de compacidade (CARDOSO et al., 2006). Também foi utilizado a tabela de Villela e Mattos (1975), adaptada por Vale, Costa e Pimentel (2019), para ajudar na interpretação dos resultados obtidos.

**Tabela 10: Valores para interpretação de índice de circularidade (Ic)**

Ic	Formato	Interpratação para Bacia Hidrográfica
1,0 – 0,8	Redonda	Alta tendência a inundações
0,8 – 0,6	Mediana	Média Tendência a inundações
0,6 – 0,4	Oblonga	Baixa tendência a inundações
>0,40	Comprida	Tendência a conservação

Fonte: Villela e Mattos (1975). Adaptado por Vale; Costa; Pimentel (2019).

Outro parâmetro importante de se utilizar para as análises é a **Densidade de Drenagem (Dd)**, que é a divisão entre o comprimento total dos cursos hídricos pela área da bacia hidrográfica. Dessa forma, quando se obtém valores de Dd baixos, indicada que existe

um baixo escoamento e alta infiltração, enquanto tem-se resultados altos, apresenta-se um alto escoamento superficial e baixa infiltração (VILLELA e MATTOS, 1975). Nesse sentido, utilizou-se para análise e interpretação a tabela elaborada por França (1968), adaptada por Vale, Costa e Pimentel (2019)

**Tabela 11: Valores para interpretação de densidade de drenagem (Dd)**

Dd (km/km <sup>2</sup> )	Tipo	Interpretação para Bacia Hidrográfica
<1,5	Baixa	Baixo escoamento superficial e maior infiltração
1,5 – 2,5	Média	Tendência mediana de escoamento superficial
2,5 – 3,0	Alta	Alta tendência ao escoamento superficial e enxurradas
>3,0	Muito Alta	Alta tendência ao escoamento superficial, enxurradas e erosão.

Fonte: França (1968). Adaptado por Vale; Costa; Pimentel (2019).

O **Índice de Sinuosidade (Is)** é a relação do comprimento do canal principal da nascente até a foz e o comprimento do canal axial, ou seja, a distância mais curta em linha reta. Esse índice denota a velocidade do escoamento do canal principal. Dessa maneira, quanto maior for o Is, mais meândrico ele será e mais difícil será atingir a foz do canal principal, pois a velocidade do fluxo de escoamento será mais lenta (SANTOS et al., 2012). Os valores desse índice variam de 1 a 2, sendo o valor próximo a 1 classificados como cursos retílineos e valores superiores a 2 cursos mais sinuosos (SILVA et al., 2018).

**Tabela 12: Aspectos morfométricos da Sub-bacia do Ribeirão Jirau.**

Parâmetros Morfométricos	Valor
Área	282,66 km <sup>2</sup>
Perímetro	108,93 km
Comprimento Canal Principal	37,63km
Comprimento Total dos Cursos Hídricos	638,62 km
Comprimento Axial do Canal Principal	31,51km
Altitude mínima	503 m
Altitude máxima	1098 m
Amplitude Altimétrica	595 m
Coefficiente de Compacidade (Kc)	1,81
Fator de Forma (Ff)	0,28
Índice de Circularidade (Ic)	0,29
Densidade de Drenagem (Dd)	2,25 km/km <sup>2</sup>

Parâmetros Morfométricos	Valor
Índice de Sinuosidade (Is)	1,19 km/km <sup>-1</sup>

Fonte: Autora (2024).

A Sub-Bacia do Ribeirão Jirau apresenta uma área de 282,66 km<sup>2</sup>, um perímetro de 108,93 km, comprimento total dos cursos hídricos de 638,62 km, sendo o curso principal com comprimento de 37,63 km. Além dos atributos apresentados acima, a sub-bacia apresenta um padrão de drenagem do tipo dendrítico.

A sub-bacia tem um fator de forma de 0,28, seu índice de circularidade é de 0,29 e coeficiente de compacidade de 1,81. O resultado obtido demonstrou que a bacia, de modo geral, não favorece a concentração do fluxo fluvial, seu formato é comprido e tem baixa tendência à ocorrência de inundações em condições normais de precipitação. Entretanto ressalta-se que por a área de estudo estar em uma região com altos índices de pluviosidade esse cenário poderia levar a inundações principalmente na confluência do Ribeirão Jirau com o Rio Tanque, que se encontra na área urbana do município de Santa Maria de Itabira.

O Is obtido é de 1,19 km, caracterizando o Ribeirão Jirau como um canal retilíneo, pois valores próximos de 1 representam a tendência de canais mais lineares. Dessa forma, em consonância com a amplitude altimétrica da nascente ao exutório da sub-bacia (595 m), entende-se que o canal principal possui um gradiente hidráulico alto, por ser um curso retilíneo com uma rampa de escoamento bastante declivosa. Essa característica faz com que ocorra o aumento da velocidade do escoamento superficial chegando até o exutório, onde encontra-se a confluência do Ribeirão Jirau com o Rio Tanque. A confluência ali presente, em conjunto com as características apresentadas acima possibilita o aumento de probabilidade de extravassamento e inundações na sub-bacia.

A Dd encontrada foi de 2,25 km/km<sup>2</sup>, indicando que a bacia apresenta mediana capacidade de drenagem, ou seja, médio escoamento superficial e média capacidade de infiltração. A Dd obtida possui ligação com a drenagem dendrítica da sub-bacia, que tem relação com relevos policonvexos da área. Outro aspecto que corrobora com o índice obtido são os Latossolos, solos esses que são mais permeáveis a água. A formação litológica da área também é outro aspecto que confirma esse índice, pois é composta por rochas com alto grau impermeabilidade como Granitos, Sienogranitos, Filitos e Gnaisses, e também por rochas com alto grau de permeabilidade como Formação Ferrífera, Quartizitos e Dolomitos, afirmando a

média capacidade de drenagem da sub-bacia.

Em suma, as características morfométricas denotam que a Sub-bacia do Ribeirão Jirau possui dois cenários, um de condições naturais a uma conservação, e o outro de condições a ocorrência de inundações. Esses cenários são possíveis pela dualidade do resultados obtidos, onde alguns índices demostraram a baixa tendência à ocorrência de inundações em condições normais de precipitação. Já o segundo cenário demonstra, que em decorrência do canal principal ser mais retilíneo e amplitude altimétrica ser alta da nascente até o exutório, ocorre um fluxo intenso e rápido até a confluência do Ribeirão Jirau com o Rio Tanque, fato esse que implica no surgimento de inundações.

#### 4.5.2 *Hand Model*

O Hand Model, é conceituado como um novo modelo digital de terreno elaborado por pesquisadores do INPE. Esse modelo segundo Nobre et al (2011), possibilita a captura da relação topográfica entre solo e água, de forma clara e válida, permitindo análises mais precisas e aplicações em desastres naturais como as inundações.

A partir do modelo gerado é possível simular possíveis cenários de manchas de inundações, sendo identificado a sua extensão pelo terreno. O Hand Model permite também identificar áreas de risco, ajudando na elaboração de ações preventivas ou mitigadoras, por parte dos gestores urbanos, para minimizar os impactos gerados pelas inundações.

Considerando o cenário hipotético gerado pelo Hand Model (Figura 24), a classe muito alta representa áreas que estão até 1metro de altitude em relação ao leito do curso hídrico, ou seja, são as áreas com mais propensas a inundação. As áreas inseridas na classe alta se localizam de 1m a 5m de altitude em relação ao leito do rio, sendo assim, para que ocorra inundação seria necessário o curso hídrico chegar até 5m de altitude. Na classe média estão inseridas as áreas que se localizam de 5m a 10m do leito da drenagem, assim, para certas áreas serem inundadas necessitaria do nível do curso chegasse até 10m de altitude. Já a classe baixa e muito baixa, representam respectivamente as áreas que estão de 10m a 25m e 25 a 100m, ou seja, para estas regiões o aumento do curso hídrico teria que ser muito elevado para que inundasse essas porções.

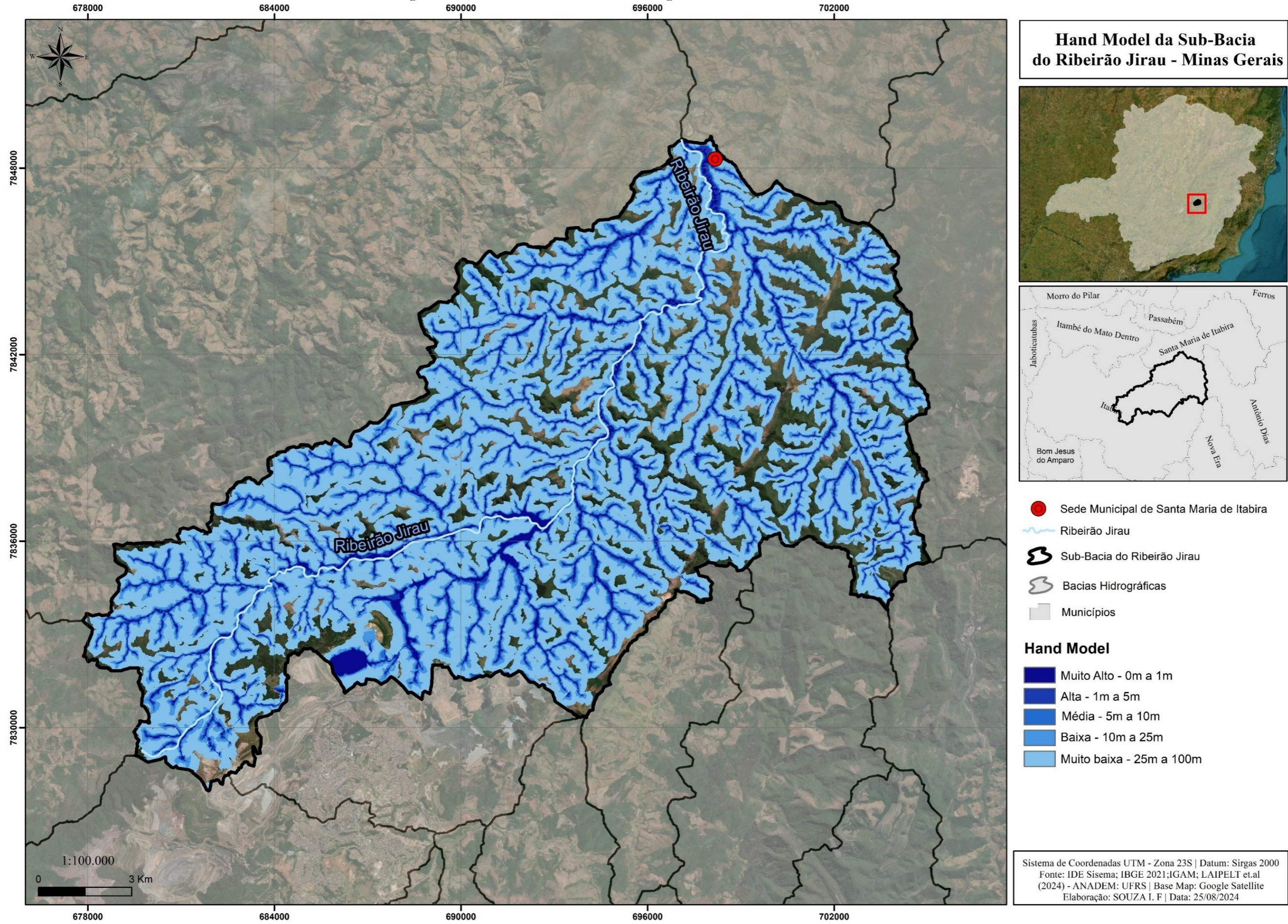
A Sub-Bacia do Ribeirão Jirau sofre em alguns pontos com a cheias em sua rede drenagem e o modelo Hand Model ajudou a identificar um possível cenário de inundações.

Um ponto em destaque é a região ao norte da bacia, onde esta inserida a sede municipal de Santa Maria de Itabira. Neste ponto foi possível identificar uma mancha de inundação com uma extensão maior, devido a maioria das áreas estarem de 0m a 1m de altitude dos cursos hídricos. Neste mesmo local existe a confluência do Ribeirão Jirau com o Rio Tanque, que em épocas de grandes cheias, intensifica a possibilidade de inundações nessa porção da bacia.

Outros pontos identificados nesse modelo são referentes aos barramentos, localizados no centro-oeste e no sudoeste da bacia. O primeiro é referente a Barragem de Santana do empreendimento minerário presente no município de Itabira. O segundo é referente a Barragem Cemig I e Barragem Cemig II. O terceiro é referente a outro barramento do mesmo empreendimento já citado.

Houve a identificação de outros locais com possível cenário de inundação, principalmente na extensão do próprio Ribeirão Jirau. A Figura 24 o modelo obtido pelo Hand Model da Sub-Bacia do Ribeirão Jirau.

Figura 24: Hand Model da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2020 e 2021; ANA; Igam, LAIPELT et.al (2024) - ANADEM: UFRS . Elaboração: Autora. 2024

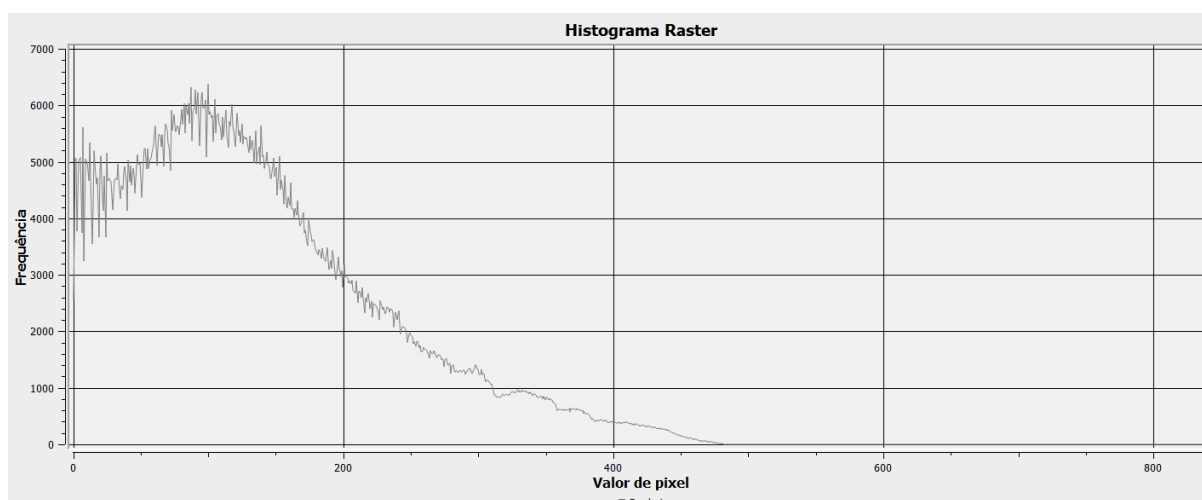
### 4.5.3 Distância Euclidiana de Cursos Hídricos

A distância euclidiana para os cursos hídricos, expõe que quanto mais próximo uma área de cursos hídricos maior será a tendência de inundações, ou seja, a proximidade dos cursos hídricos é um tema que possibilita compreender até onde esses eventos podem chegar destruindo diversas vias públicas, atingindo moradias e afetando a população. Isso ocorre principalmente, pelo histórico de instalação de muitas cidades entorno de cursos hídricos, ajudando assim a agravar a situação. Nesse sentido, observa-se que quanto mais afastado das drenagens as áreas estiverem, menor será a tendência de recepção de influência de eventos de inundação e em consequência espera-se que apresentem melhores condições ambientais que as áreas próximas a esses cursos hídricos.

O histograma abaixo (Gráfico 6) demonstra que na sub-bacia existe a prevalência de distância euclidiana para cursos hídricos variando entre 0 a 200 m, com tendência descendente na sequência. Esse aspecto permite analisar que a sub-bacia possui mais áreas próximas a cursos hídricos, gerando um possível cenário de inundação.

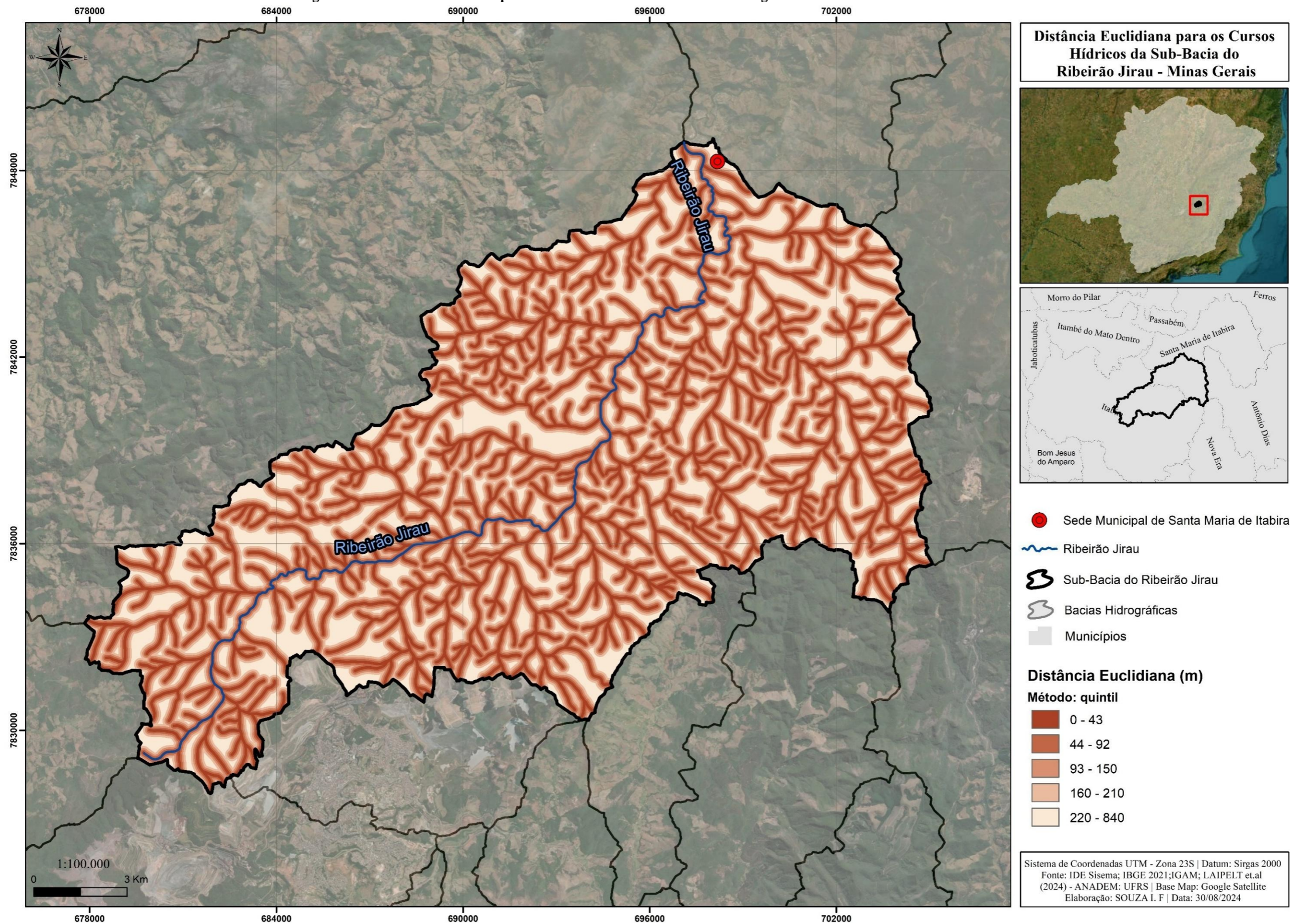
Nesse sentido a Figura 25 apresenta as área da sub-bacia que apresentam maior proximidade aos cursos hídricos.

**Gráfico 6: Histograma Raster da Distância Euclidiana dos Cursos Hídricos.**



Fonte: Autora (2024) - QGIS.

Figura 25: Distância Euclidiana para Cursos Hídricos da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2020 e 2021; ANA; Igam, LAIPELT et.al (2024) - ANADEM: UFRS . Elaboração: Autora. 2024

## **5 DIAGNÓSTICO AMBIENTAL E MODELAGEM DE ÁREAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO JIRAU**

### **5.1 Uso e Ocupação do Solo na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau**

#### *5.1.1 Análise Evolutiva do Uso e Ocupação do Solo – 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023*

A evolução do uso e da ocupação do solo é um fenômeno complexo que reflete as transformações socioambientais ao longo do tempo. Desde os primeiros períodos da história humana, o homem tem alterado o meio ambiente de maneiras diversas para atender às suas necessidades de sobrevivência, expansão e desenvolvimento. De acordo com Houghton (2003), a interação entre o homem e a natureza ao longo da história tem sido um processo dinâmico, sendo que, inicialmente, as sociedades humanas utilizavam a terra de forma mais sustentável, com práticas agrícolas rudimentares, caça e coleta, sempre em harmonia com os recursos naturais disponíveis. No entanto, com o passar dos séculos e com o crescimento populacional, as necessidades de exploração dos recursos naturais aumentaram, provocando mudanças significativas na forma de uso do solo.

Com a Revolução Industrial, observou-se um aumento substancial na urbanização, que gerou uma forte pressão sobre os ecossistemas naturais, provocando um aumento na demanda por recursos e espaços urbanos, como apontado por Harvey (1990). Este processo resultou em novos padrões de ocupação do solo, com a criação de grandes cidades e a expansão de áreas agrícolas intensivas, muitas vezes com impactos ambientais significativos, como a degradação de solos e o desmatamento (Sachs, 2015). Além disso, Schueler (1994) destaca que o avanço das tecnologias e o crescimento das cidades, embora tenham gerado um maior desenvolvimento econômico, também intensificou os desafios ambientais e sociais relacionados à ocupação do solo.

Nos dias atuais, a discussão sobre o uso e ocupação do solo está intrinsecamente ligada a questões de sustentabilidade e planejamento urbano, buscando equilibrar o desenvolvimento humano com a preservação dos recursos naturais. A análise dessa evolução é essencial para compreender os desafios contemporâneos e as estratégias necessárias para um uso mais racional e consciente do solo, como afirmam Sachs (2015) e Cohen (2006). Essas reflexões são fundamentais para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes que promovam a integração entre crescimento urbano e conservação ambiental.

Nesse sentido, a Sub-Bacia do Ribeirão Jirau se configura como um território com uma grande diversidade de usos do solo, apresentando 14 classes distintas em sua extensão. Essas classes refletem a complexidade e as diferentes formas de ocupação, que vão desde áreas de preservação, como as formações florestais e savânicas, até usos mais intensivos, como a silvicultura, pastagem e áreas urbanas. A presença de mosaicos de usos e outras culturas perenes e temporárias também indica a heterogeneidade da paisagem, que envolve práticas agrícolas diversificadas e atividades econômicas variadas, como a mineração e o cultivo de café.

A Tabela 13 apresenta as classes de uso e ocupação do solo presentes na bacia e a evolução de sua distribuição ao decorrer de 1985 a 2023. As Figura 26 a Figura 30 apresentam a distribuição das classes ao decorrer das décadas.

**Tabela 13: Uso e Ocupação do Solo (Km<sup>2</sup>) da Sub-bacia do Ribeirão Jirau.**

Classes	Ano				
	1985	1995	2005	2015	2023
Formação Florestal	171,69	154,98	142,69	138	135,27
Formação Savana	0,40	0,16	0,11	0,17	0,23
Silvicultura	12,67	23,93	20,94	18,7	21,43
Pastagem	1,27	1,3	1,22	1,26	1,19
Pasto	69,79	80,24	87,78	88,06	83,09
Mosaico de Usos	14,76	8,88	15,03	18,64	21,4
Área Urbana	0,43	0,92	1,34	1,58	1,82
Outras Áreas Não Vegetadas	2,26	0,45	0,23	0,32	1,13
Afloramento Rochoso	0,67	0,67	0,55	0,5	0,49
Mineração	7,29	9,46	11,42	14,2	15,35
Rio, Lago e Oceano	1,42	1,6	1,23	1,22	1,17
Outras Culturas Perenes	0,01	0	0	0	0
Outras Culturas Temporárias	0,00	0,07	0,11	0	0
Café	0,00	0	0,01	0,01	0,09

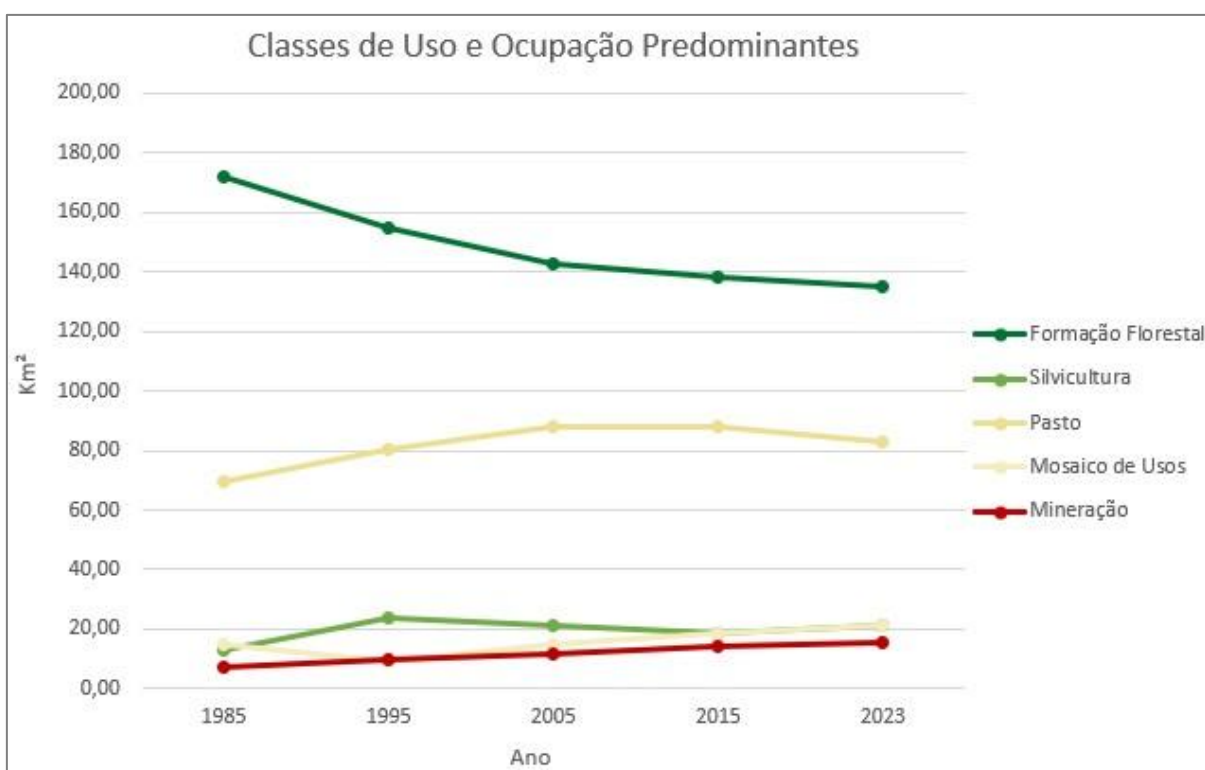
**Fonte: MapBiomias (2025), Adaptado por Autora (2025).**

Embora existam diversas classes de uso e ocupação do solo na região, nem todas têm uma grande expressão espacial. Ou seja, algumas ocupam áreas menores e não desempenham um papel tão significativo nas transformações do território. Por isso, as classes com

distribuição menos relevante não serão abordadas nas análises subsequentes, uma vez que sua contribuição para a compreensão das dinâmicas de uso do solo é limitada.

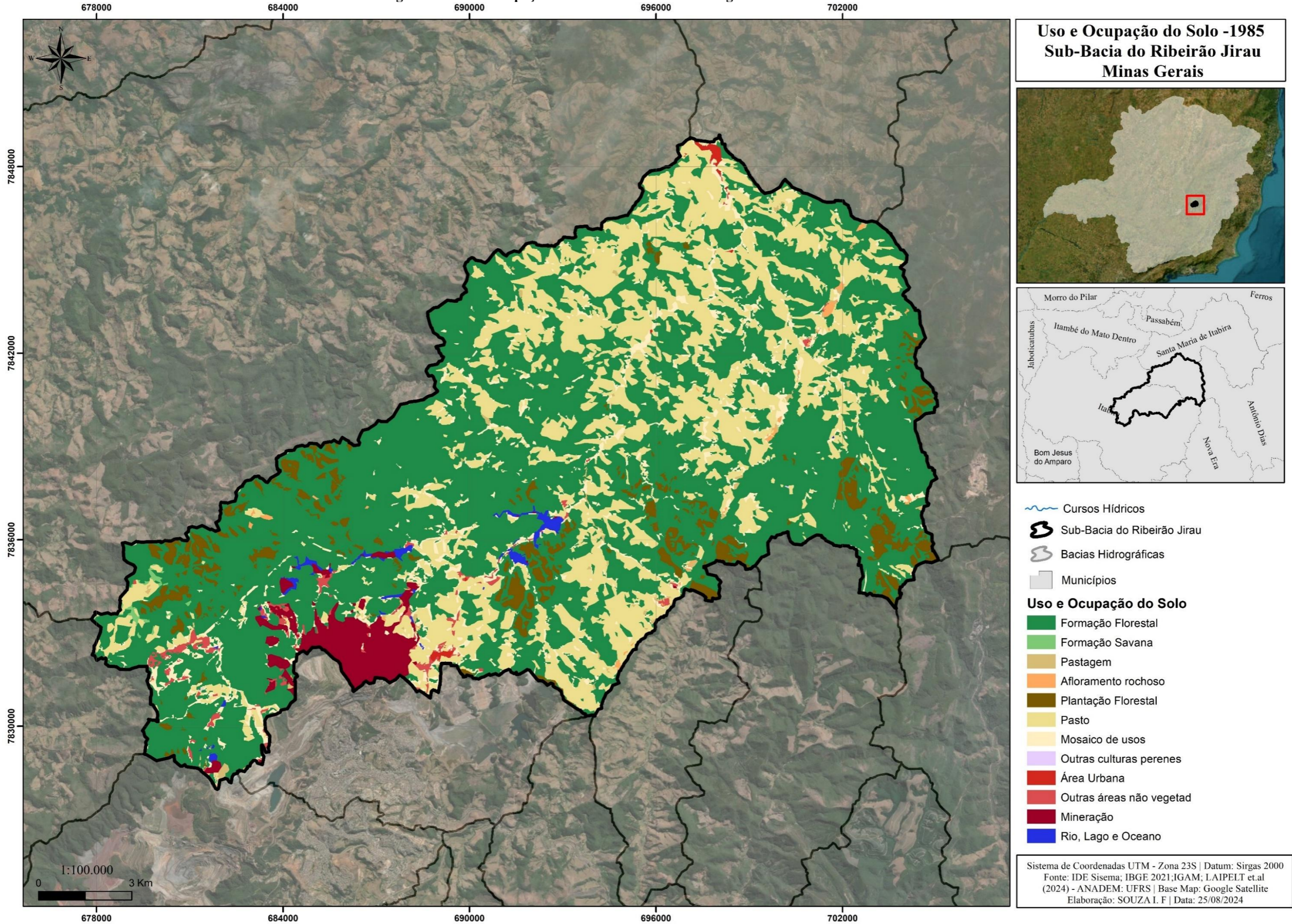
A análise, portanto, se concentrou nas classes mais expressivas, ou seja, aquelas que apresentam maior extensão e impacto, sendo essenciais para entender as mudanças no uso do solo ao longo do período avaliado. Essas classes, devido à sua abrangência, são as que melhor refletem as principais transformações e transições nos padrões de uso da terra, oferecendo uma visão mais precisa das dinâmicas que ocorreram na Sub-bacia do Ribeirão Jirau. Entre elas, foram selecionadas as classes de formação florestal, silvicultura, pasto, mosaico de usos e mineração.

**Gráfico 7: Evolução das Classes de Uso e Ocupação Predominantes na Área de Estudo.**



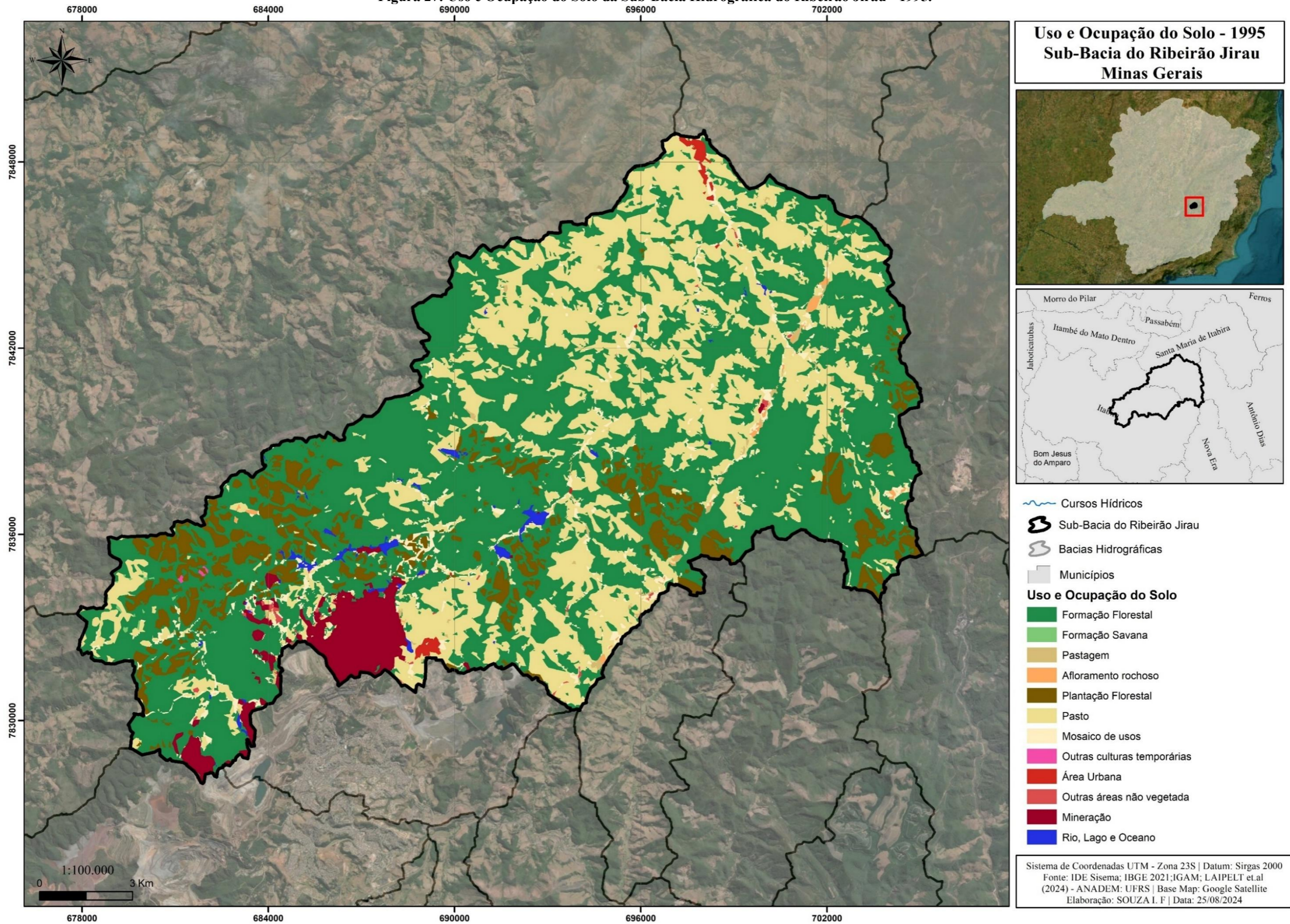
Fonte: MapBiomias (2025), Adaptado por Autora (2025).

Figura 26: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 1985.



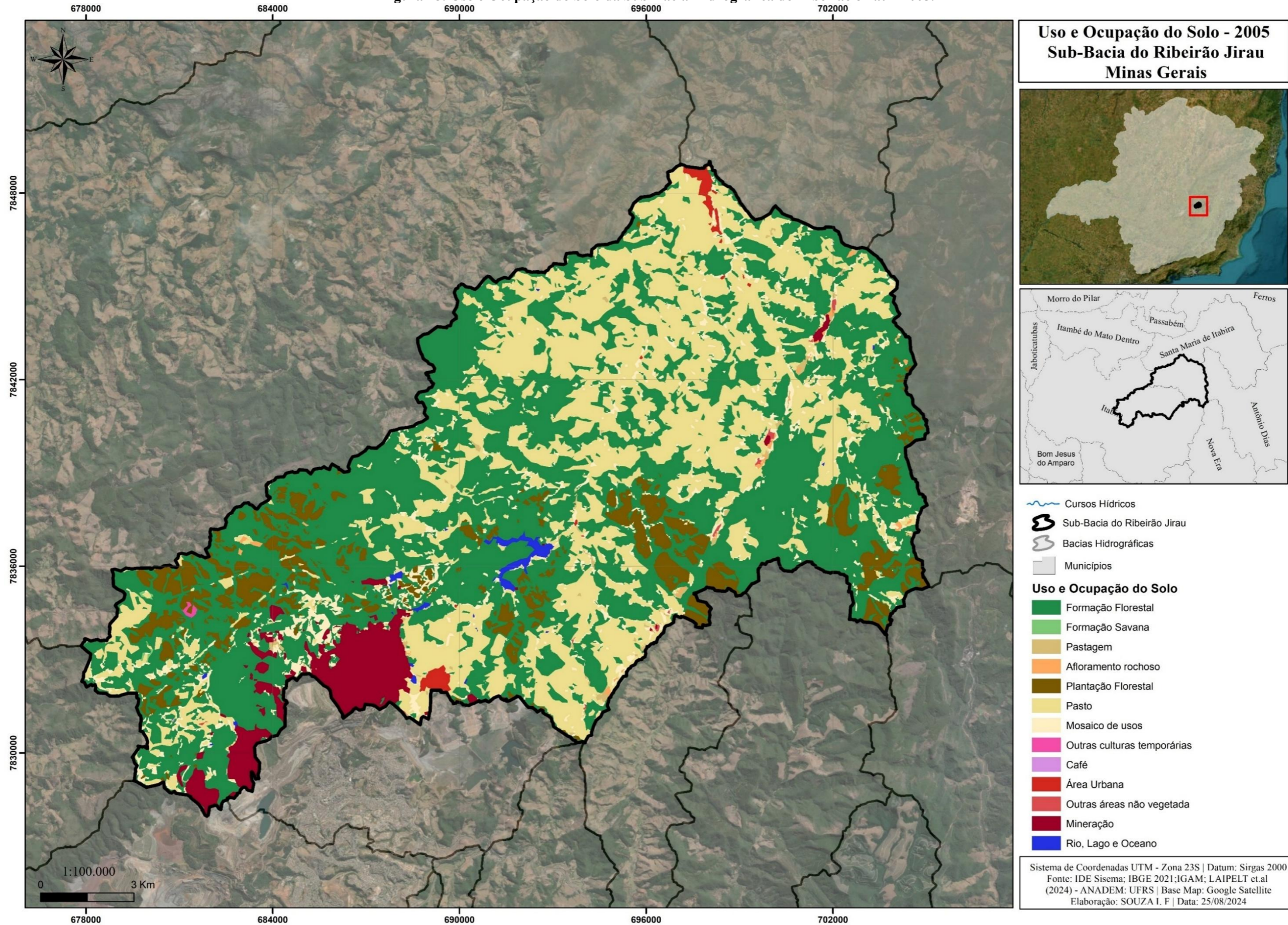
Fonte: MapBiomas (1985)

Figura 27: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 1995.



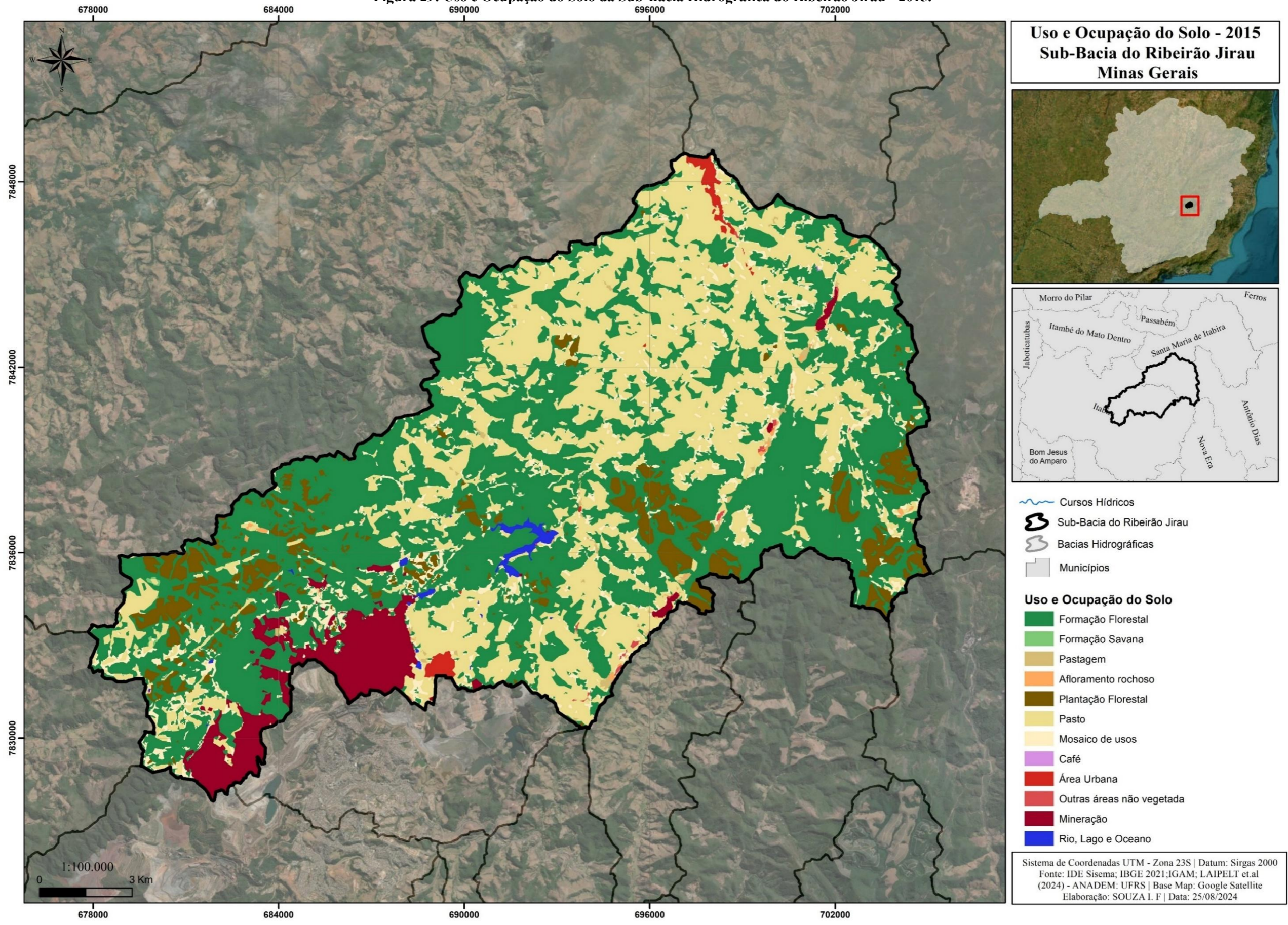
Fonte: MapBiomias (1995)

Figura 28: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 2005.



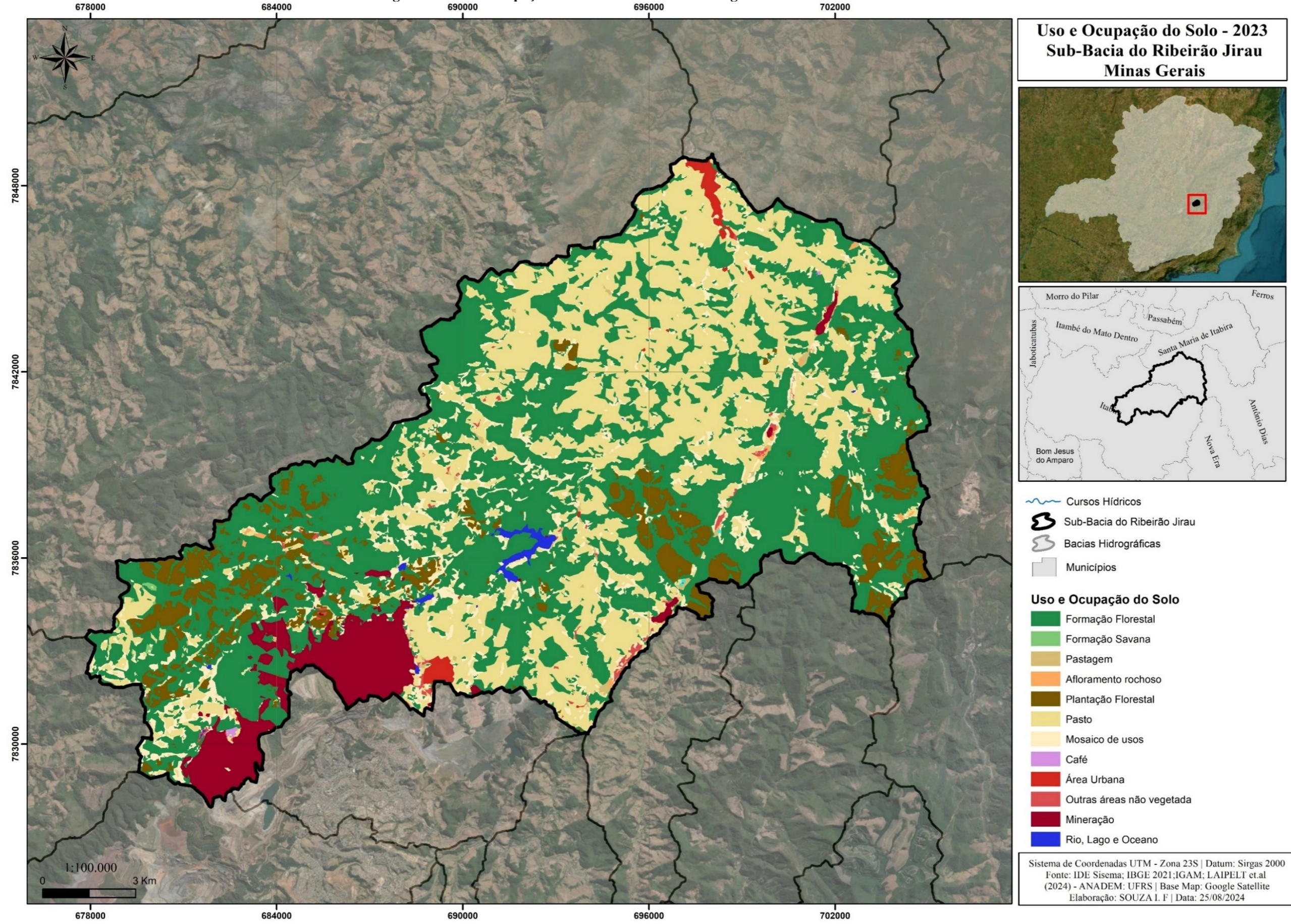
Fonte: MapBiomias (2005)

Figura 29: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 2015.



Fonte: MapBiomias (2015)

Figura 30: Uso e Ocupação do Solo da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - 2023.



Fonte: MapBiomias (2023)

Em 1985, aproximadamente 171,69 km<sup>2</sup> da bacia do Ribeirão Jirau eram cobertos por formação florestal, o que correspondia a 60,74% de sua área total. No entanto, até 1995, houve uma redução de 9,74% (equivalente a 16,71 km<sup>2</sup>) em relação à área de formação florestal registrada em 1985, o que resultou em 154,98 km<sup>2</sup> (54,83%) de cobertura florestal. Essa tendência de diminuição continuou de forma acentuada até 2005, com uma perda adicional de 7,93% (12,29 km<sup>2</sup>) da vegetação, em comparação com o total de 1995. Assim, em 2005, a área de formação florestal da bacia havia caído para 142,69 km<sup>2</sup>.

Entre 2005 e 2015, a bacia apresentou uma leve diminuição na área de formação florestal, com uma perda de aproximadamente 3,3% (equivalente a 4,69 km<sup>2</sup>). Comparado aos anos anteriores, essa queda foi relativamente pequena, indicando um cenário de estabilização na vegetação da bacia, que em 2015 totalizava cerca de 138 km<sup>2</sup> de cobertura florestal. Já entre 2015 e 2023, a formação florestal sofreu uma nova redução, embora também de forma modesta, com uma perda de 1,9% (2,73 km<sup>2</sup>). Com isso, a área de formação florestal na bacia alcançou o valor final de 135,27 km<sup>2</sup>.

Dessa forma, observa-se que entre 1985 e 2005 (Gráfico 7), a Sub-Bacia do Ribeirão Jirau passou por alterações significativas que resultaram na diminuição da classe de formação florestal. Essas mudanças foram impulsionadas principalmente pelo avanço da urbanização, pela expansão da mineração e pela intensificação da agricultura e pecuária na região, que transformaram parte da vegetação original em áreas voltadas para essas atividades econômicas. Além disso, o aumento populacional, embora de forma menos expressiva, nos municípios de Itabira e Santa Maria de Itabira também contribuiu para as transformações no uso do solo, pressionando ainda mais a cobertura florestal da bacia.

**Tabela 14: Evolução da Classe Formação Florestal.**

Classes	1985		1995		2005		2015		2023
	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto Final
Formação Florestal	171,69	-16,71	154,98	-12,29	142,69	-4,69	138	-2,73	135,27

Fonte: MapBiomias (2025), Adaptado por Autora (2025).

A classe pasto, por sua vez, em 1985, representava aproximadamente 24,69% (69,79 km<sup>2</sup>) da área total da bacia. Até 1995, essa classe teve um aumento de 14,97% em relação ao valor inicial de 1985, alcançando 80,24 km<sup>2</sup>. Esse crescimento continuou até 2005, com um ganho adicional de 9,4% (7,54 km<sup>2</sup>) em relação ao valor de 1995, totalizando 87,78 km<sup>2</sup>.

Entre 2005 e 2015, o aumento na área de pasto foi pouco expressivo, de apenas 0,32% (0,28 km<sup>2</sup>), em comparação com o valor de 2005, resultando em um total de 88,06 km<sup>2</sup> em 2015. No entanto, entre 2015 e 2023, houve uma redução significativa de 5,6% (4,97 km<sup>2</sup>) em relação a 2015, culminando em 83,09 km<sup>2</sup> de pasto na área.

Ao se analisar um recorte completo entre o início e o fim do período avaliado, observou-se que entre 1985 e 2015 (Gráfico 7), a Sub-Bacia do Ribeirão Jirau experimentou um crescimento considerável da área de pasto, o que está diretamente relacionado à diminuição da formação florestal no mesmo período. Essas alterações foram impulsionadas pelo aumento da atividade agrícola e pecuária, especialmente por moradores das zonas rurais da bacia, que expandiram essas práticas ao longo do tempo.

**Tabela 15: Evolução da Classe Pasto.**

Classes	1985		1995		2005		2015		2023
	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto Final
Pasto	69,79	10,45	80,24	7,54	87,78	0,28	88,06	-4,97	83,09

**Fonte: MapBiomias (2025), Adaptado por Autora (2025).**

Em 1985, os mosaicos de uso representavam 5,22% (14,76 km<sup>2</sup>) da área de estudo. Contudo, até 1995, houve uma queda significativa de 39,8% (5,88 km<sup>2</sup>) em relação ao valor de 1985, reduzindo a área para 8,88 km<sup>2</sup>. No período de 1995 a 2005, registrou-se uma recuperação dessa classe, com um aumento de 69,3% (6,15 km<sup>2</sup>) em relação a 1995, totalizando 15,03 km<sup>2</sup> em 2005.

O crescimento dessa classe continuou de forma exponencial e, em 2015, os mosaicos de uso aumentaram 24,34% (3,61 km<sup>2</sup>) em relação a 2005, alcançando 18,64 km<sup>2</sup>. Até 2023, a tendência de aumento persistiu, com uma expansão de 14,8% (2,76 km<sup>2</sup>) em relação a 2015, totalizando 21,4 km<sup>2</sup> no cenário atual.

O aumento constante dos mosaicos de uso ao longo dos anos reflete as mudanças na ocupação do solo da bacia, associadas à diversificação das atividades humanas, como agricultura, pecuária e outros usos do território. Esse fenômeno destaca a crescente complexidade da paisagem, resultante da intensificação de diferentes formas de uso e aproveitamento do solo na região.

**Tabela 16: Evolução da Classe Mosaico de Usos.**

Classes	1985		1995		2005		2015		2023
	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto Final
Mosaico de Usos	14,76	-5,88	8,88	6,15	15,03	3,61	18,64	2,76	21,4

Fonte: MapBiomias (2025), Adaptado por Autora (2025).

A silvicultura também teve uma presença significativa na área de estudo, representando 4,48% (12,67 km<sup>2</sup>) da bacia em 1985. Em 1995, observou-se um aumento expressivo de 88,9% (11,26 km<sup>2</sup>) em relação a 1985, atingindo um valor total de 23,93 km<sup>2</sup>. No entanto, até 2005, houve uma redução de 12,49% (2,99 km<sup>2</sup>) em comparação a 1995, resultando em 20,94 km<sup>2</sup> de silvicultura.

Essa tendência de queda continuou até 2015, com uma diminuição adicional de cerca de 10,7% (2,24 km<sup>2</sup>) em relação a 2005, totalizando 18,7 km<sup>2</sup>. Contudo, até 2023, o cenário local sofreu uma mudança, com a silvicultura voltando a crescer na bacia, registrando um aumento de 14,6% (2,73 km<sup>2</sup>) em relação a 2015. Assim, o valor final alcançado em 2023 foi de 21,43 km<sup>2</sup> de silvicultura na área de estudo.

Apesar das oscilações ao longo das décadas (Gráfico 7), é importante destacar a presença contínua dessa atividade na bacia. Sua expansão pode resultar não apenas na perda

de vegetação nativa, mas também em impactos nos recursos hídricos locais, especialmente devido ao cultivo de espécies como o eucalipto, que tem grande demanda por água, podendo afetar a disponibilidade hídrica do solo.

**Tabela 17: Evolução da Classe Plantação Florestal.**

Classes	1985		1995		2005		2015		2023
	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto Final
Silvicultura	12,67	11,26	23,93	-2,99	20,94	-2,24	18,7	2,73	21,43

Fonte: MapBiomias (2025), Adaptado por Autora (2025).

A mineração é a última classe de uso e ocupação do solo analisada no contexto da sub-bacia. Em 1985, essa atividade ocupava cerca de 2,58% (7,29 km<sup>2</sup>) da área total da bacia. Até 1995, a mineração teve um aumento de 29,77% (2,17 km<sup>2</sup>) em relação a 1985, atingindo 9,46 km<sup>2</sup>. O avanço da mineração continuou nos anos seguintes, e em 2005, houve um incremento de 20,72% (1,96 km<sup>2</sup>) em relação a 1995, totalizando 11,42 km<sup>2</sup> da bacia destinados à atividade minerária.

Entre 2005 e 2015, o crescimento foi de 24,34% (2,78 km<sup>2</sup>), em comparação a 2005, alcançando 14,2 km<sup>2</sup> em 2015. O avanço da mineração na bacia seguiu de forma contínua entre 2015 e 2023, com um aumento de 8,10% (1,15 km<sup>2</sup>) em relação a 2015, resultando em 15,35 km<sup>2</sup> de área minerada até o cenário atual.

O crescimento da mineração na bacia foi constante de 1985 a 2023 (Gráfico 7), sem períodos de retração entre os anos analisados. Esse avanço é impulsionado pelo crescimento da mineração na região, que abriga alguns dos maiores empreendimentos minerários do país. Municípios como Itabira, polo importante da mineração em Minas Gerais, desempenham papel central nesse processo. Portanto, o avanço da mineração é praticamente inevitável nessa região, que detém recursos naturais (ferro, manganês, ouro, entre outros) de grande interesse para os empreendimentos minerários.

**Tabela 18: Evolução da Classe Mineração.**

Classes	1985		1995		2005		2015		2023
	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto	Evolução	Valor Bruto Final
Mineração	7,29	2,17	9,46	1,96	11,42	2,78	14,2	1,15	15,35

Fonte: MapBiomias (2025), Adaptado por Autora (2025).

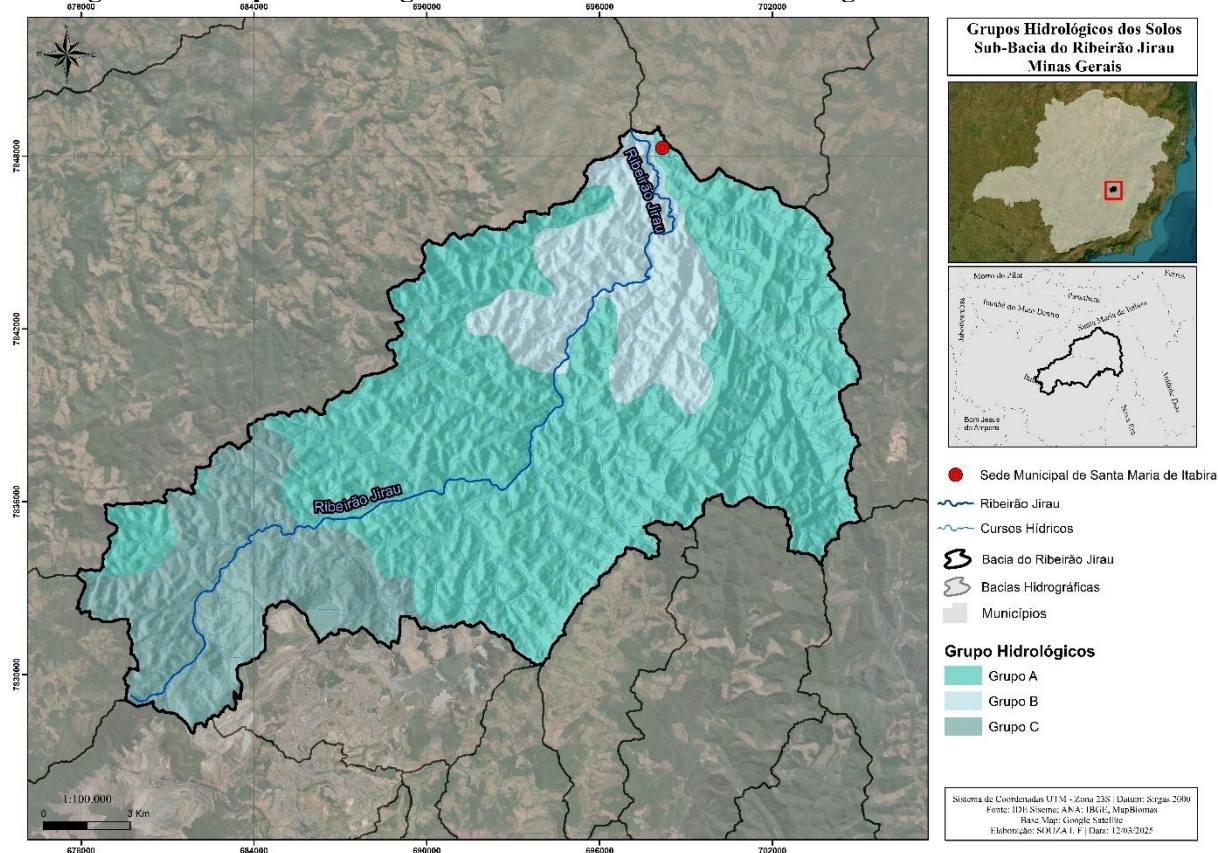
Dessa forma, as análises realizadas sobre o uso e ocupação do solo na Sub-bacia do Ribeirão Jirau evidenciam as transformações significativas ao longo das últimas décadas, destacando as classes de formação florestal, silvicultura, pasto, mosaico de usos e mineração como as mais representativas na região. O avanço desses usos, impulsionado por fatores como a urbanização, agricultura e mineração, tem causado impactos consideráveis na paisagem e nos recursos naturais da bacia. Enquanto algumas classes de uso apresentaram variações mais modestas, as mencionadas acima desempenham papel central nas dinâmicas de ocupação do solo, refletindo a interação entre o desenvolvimento econômico e os desafios ambientais enfrentados pela região, como é o caso das inundações que ocorrem em porções da bacia que estão localizadas em áreas urbanas. Assim, entender essas transformações é fundamental para o planejamento territorial e a busca por soluções que equilibrem o crescimento sustentável e a preservação dos recursos naturais locais.

### 5.1.2 Modelagem de Escoamento Superficial – Curve Number

A modelagem do Curve Number é amplamente utilizada na hidrologia para estimar o escoamento superficial de água em uma bacia hidrográfica, com base em dados de precipitação, uso da terra, tipo de solo, cobertura do solo e condições de umidade. O Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos Estados Unidos (NRCS) (SCS, 1986) foi o responsável por desenvolver esse método, e é comumente utilizado para a gestão de recursos hídricos.

Nesse contexto, a Sub-Bacia do Ribeirão Jirau compreende 4 classes pedológicas, As classes mais significativas na bacia são os Latossolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Vermelhos, ambos classificados no grupo hidrológico A, totalizando em 186,44 km<sup>2</sup> (66%). Os Argissolos Vermelho-Amarelos fazem parte de cerca de 15% da área total da bacia, somando em 41,4 km<sup>2</sup>, estes fazendo parte do grupo hidrológico B. Os Cambissolos Háplicos, classificados no grupo hidrológico C, abrange 54,82 km<sup>2</sup>, cerca de 19%.

**Figura 31: Grupos Hidrológicos dos Solos da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau.**



Fonte: IBGE (2022); MapBiomias (2023); ANA; IDE Sisema.

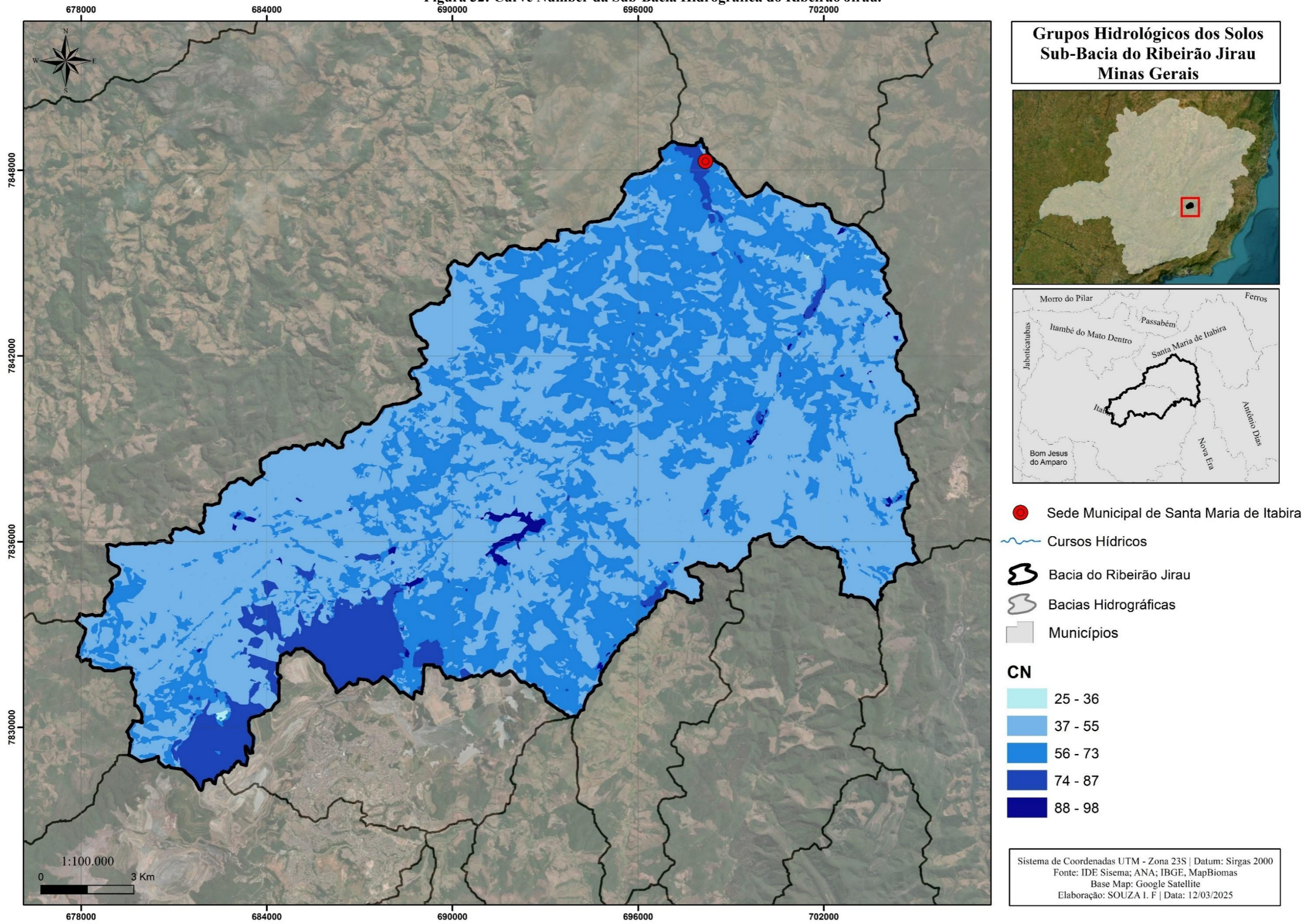
Em relação a dinâmica do uso do solo, a área de estudo se configura pelos seus diferentes usos, com destaque para formação florestal, silvicultura, pasto, mosaico de usos e mineração, este que representam 97,8% da bacia. Esses usos apresentaram mudanças significativas ao decorrer dos anos (Tópico 5.1.1), como é o exemplo da classe Formação Florestal que diminuiu e a classe Mineração que aumentou (Tabela 13). Essas alterações, combinadas com os tipos de solo presentes na bacia contribuíram significativamente para diminuição da permeabilidade na área.

As áreas que apresentaram valores de CN maiores do que 74, são aquelas ocupadas por áreas urbanizadas e mineração, como é o caso das manchas com azul mais forte na porção nordeste da área (município de Santa Maria de Itabira) e na porção sudoeste (Empreendimento Minerário). As áreas de 56 a 73 de CN, são aquelas compostas por pasto em sua grande maioria, que se encontram assentadas sobre Argissolos Vermelho-Amarelos que se caracterizam pela sua moderada taxa de infiltração. Ressalta-se também que a bacia é muito pouco urbanizada, fato que favorece os processos de infiltração e redução do escoamento superficial na maioria da sua extensão.

Esta modelagem possibilitou identificar os valores de CN e localizar as áreas mais impermeáveis da Sub-bacia do Ribeirão Jirau, destacando as regiões com maior potencial para a geração de escoamentos superficiais significativos, como é o caso da porção ao nordeste da bacia, onde se encontra a confluência do Rio Tanque com o Ribeirão Jirau. Embora a bacia seja pouco urbanizada em algumas porções, os tipos de solo presentes nela indicam uma tendência ao aumento do escoamento superficial em porções específicas. Dessa maneira, é importante o controle do uso do solo para evitar práticas que transformem as áreas de vegetação em usos que exponham o solo ou o torne impermeável.

Por fim, o método aplicado, também ofereceu suporte a gestão dos recursos hídricos, podendo ser utilizado para orientar o uso do solo de acordo com as características naturais da Sub-bacia do Ribeirão Jirau, a fim de prevenir eventos de inundação, o que contribui para melhorar a qualidade de vida da população situada em ambientes mais propensos a estes fenômenos.

Figura 32: Curve Number da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau.



Fonte: IBGE (2022); MapBiomias (2023); ANA; IDE Sisema.

## **5.2 Modelagem Ambiental de Áreas com Potencial Risco a Inundação na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau**

A modelagem ambiental de inundação avalia o grau de suscetibilidade ao risco de inundação ao qual uma população está exposta, considerando tanto os fatores naturais quanto os antrópicos. Essa ferramenta desempenha um papel importante no planejamento urbano e regional, permitindo identificar áreas propensas a inundações dentro de uma mesma região, fornecendo dados essenciais para a análise e a tomada de decisões mais eficazes pelo poder público. O método Analytic Hierarchy Process (AHP) tem sido aplicado para a realização de diversas modelagens, visando definir valores qualitativos e quantitativos para julgamentos das comparações, baseados em dados mensuráveis para a resolução de problemas de decisões complexas de priorização.

Nesse sentido, no presente capítulo foram apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia de modelagem ambiental simplificada (resultante da média simples entre os indicadores) e ponderada (resultante da média ponderada, com pesos atribuídos por meio do uso da metodologia AHP), ambas já apresentadas na metodologia.

### *5.2.1 Modelagem Ambiental Simplificada*

A modelagem ambiental simplificada de uma bacia hidrográfica, focada nas inundações, é uma ferramenta importante para entender como eventos intensos de chuva podem afetar as áreas ao redor. Ela busca representar, de maneira mais acessível, processos como a chuva, o escoamento da água pelas ruas e terrenos, e como o solo absorve ou não essa água. Embora seja uma abordagem mais simples, essa modelagem oferece uma visão rápida e prática dos riscos de alagamentos, ajudando na tomada de decisões para prevenir danos.

Nesse sentido, a modelagem ambiental simplificada da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, gerada com a utilização dos indicadores já citados anteriormente, demonstra a predominância do potencial médio (50,5%) ao risco de inundações em várias regiões da bacia, ou seja, nas áreas que se encontram próximas aos cursos hídricos (Figura 33 e Gráfico 8 ). O potencial mediano se deve pela morfometria da bacia e sua média taxa de armazenamento, fazendo com que a bacia seja mais permeável. Já o potencial baixo (40,7%) foi verificado especialmente em todas as porções da bacia, principalmente em regiões com formação florestal, demonstrando a importância da vegetação para o baixo risco de inundação (Figura 33

e Gráfico 8).

Entretanto, na porção onde se insere boa parte da cidade de Santa Maria de Itabira, foi registrado um potencial alto de inundações, decorrente da integração de múltiplos fatores, como a confluência do ribeirão Jirau com o rio Tanque e ao processo de urbanização do município nas margens e planície de inundação do Ribeirão Jirau, este que corta o núcleo urbano do município (Figura 33).

A confluência do ribeirão Jirau com o rio Tanque, em eventos intensos e prolongados de precipitação, acaba apresentando um cenário propício a inundações, pois o ribeirão Jirau fica balizado pelo rio Tanque e a água ao retornar, espalha-se pela planície de inundação, resultando em inundação da área urbana. Outros fatores como a alta amplitude altimétrica das nascentes ao exultório, bem como as características geomorfológicas da bacia (medida pelos índices já apresentados) são igualmente favoráveis a concentração e espalhamento dos fluxos.

Cabe destacar, que a malha urbana da cidade se valeu do terreno planificado das margens e várzeas para se consolidar e se propagar durante o ciclo do ouro e etapas posteriores. Este fator é comum em grande parte dos antigos municípios de Minas Gerais, e, até mesmo, de alguns relativamente mais recentes, como Belo Horizonte. As várzeas ou planícies de um rio correspondem a canais naturais que recebem de forma secundária os fluxos fluviais durante eventos de cheia, portanto, estas áreas são naturalmente suscetíveis a inundação. Dito isso, cabe-se a realização de reflexão sobre o modo de ocupação destas faixas no município ao longo da sua história.

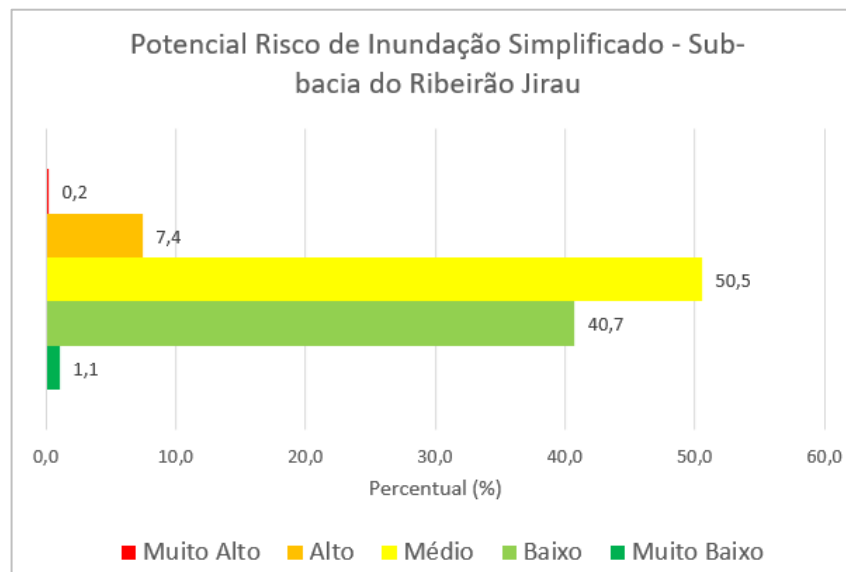
Em Santa Maria de Itabira, a ocupação das áreas de várzeas é consolidada, se justifica principalmente devido aos terrenos de alta declividade que são observados nas imediações do núcleo urbano, que impossibilitaram durante boa parte de sua história a realização da ocupação, devido a limitação nos métodos construtivos. Atualmente, os métodos construtivos tiveram grandes avanços, permitindo a ocupação de áreas com moderada declividade. Neste sentido, caso o município entenda que é necessário desocupar as áreas mais propensas a eventos de inundação, há a possibilidade de se remanejar as populações mais suscetíveis ao risco potencial para áreas mais elevadas e seguras.

Outras porções que apresentaram potencial alto de risco de inundações, por outro lado, estão ligadas diretamente a processos minerários, como cavas e pilhas de estéril e rejeitos, de

empreendimentos localizados no município de Itabira. Essas regiões apresentaram maiores vulnerabilidades devido a alteração morfológica do terreno (depressões antrópicas) e a alteração da cobertura do solo, efetivada por meio da supressão vegetal e retirada de *topsoil* para uso minerário. Estes fatores diminuem a capacidade de percolação e armazenamento de água, bem como, criam locais onde intencionalmente os fluxos são direcionados como sumps, bacias de contenção e reservatórios, que em caso de eventos de chuvas intensos e prolongados, sofrem com a variação do nível de água e podem extravasar, mesmo sendo pouco comum este tipo de ocorrência já que estas estruturas são planejadas e dimensionadas para uma capacidade de suporte superior ao valor de operação padrão. Contudo, como não há registros de edificações próximas a estes lugares, os riscos em relação a perda de vidas são pequenos.

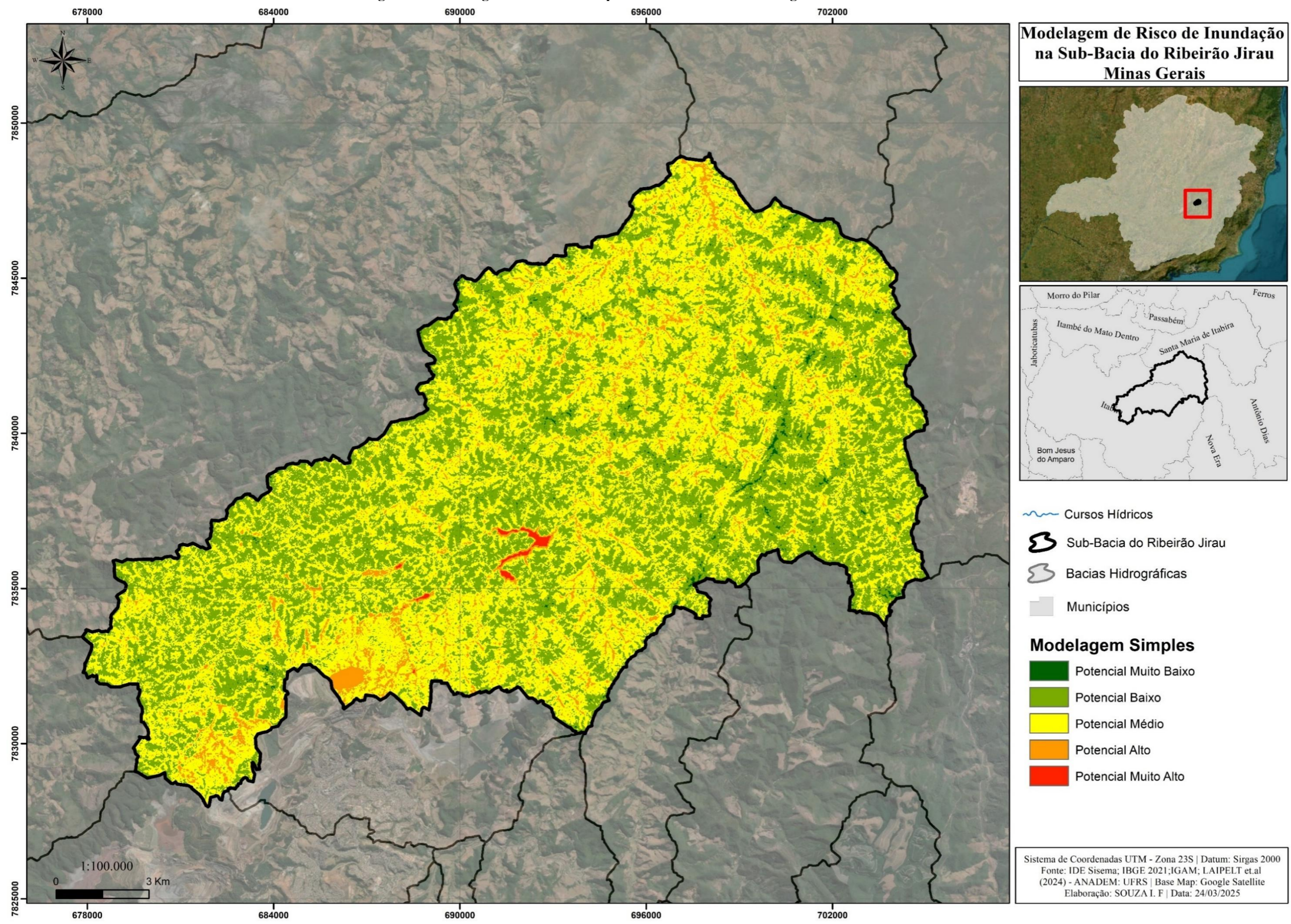
A porção que apresentou potencial muito alto (0,2%) de ocorrência de inundação está ligada diretamente com a área de represamento para fins de produção de energia da CEMIG e a Barragem de Santana, ambas na porção central da área de estudo (Figura 33 e Gráfico 8). A explicação para este valor de potencial risco de inundação é semelhante ao explicado para a área de estruturas de mineração. A flutuação dos níveis de água destes reservatórios tende a ser intensas ao longo do ano, mesmo apesar da ocorrência de controle de vazão por meio da abertura e fechamento das comportas. Outro ponto interessante e que justifica a sua classificação é que os indicadores *Hand Model* e TWI apresentam os maiores valores justamente nestas áreas. Contudo, como não há registros de edificações próximas a estes lugares, os riscos em relação a perda de vidas humanas e pequeno.

**Gráfico 8: Potencial de Risco de Inundação Simplificado na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau - MG**



Fonte: Autora (2025).

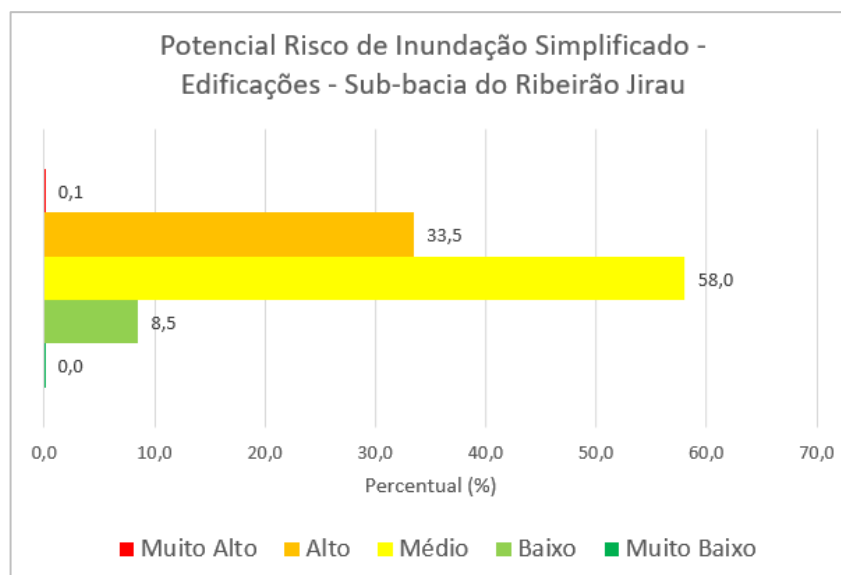
Figura 33: Modelagem Ambiental Simplificada da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau.



Fonte: IBGE (2022); MapBiomias (2023); ANA; IDE Sisema.

Para complementar as análises, foi extraída e analisada, sob a forma de porcentagem, a distribuição do risco potencial de inundação em áreas edificadas. Os resultados demonstraram que 58% dessas edificações estão suscetíveis a um médio risco de inundação (Gráfico 9). Além disso, identificou-se que 33,5% das áreas edificadas apresentam alto risco de inundações, enquanto apenas 8,5% das edificações foram classificadas como de baixo risco (Gráfico 9). Os níveis de risco muito alto e muito baixo não tiveram expressividade significativa nesta análise.

**Gráfico 9: Riscos de Inundação por Áreas Edificadas na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau – MG**



**Fonte: Autora (2025)**

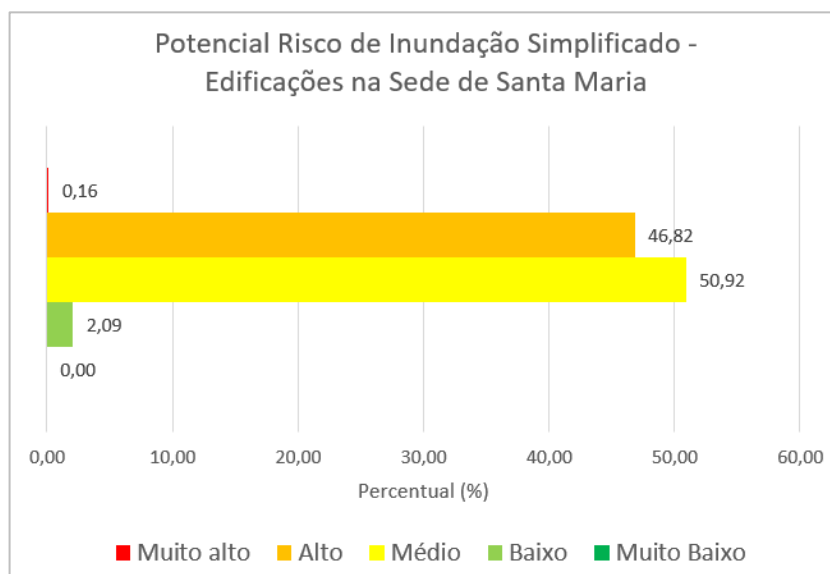
Na porção onde se insere a sede municipal de Santa Maria de Itabira, verificou-se que o risco potencial de inundação em áreas edificadas varia predominantemente entre médio (50,92%) e alto (46,82%) (Figura 34 e Gráfico 10). Esses dados evidenciam que quase metade das edificações está altamente suscetível a inundações provocadas pelo Ribeirão Jirau em eventos de chuvas intensas, especialmente devido à sua proximidade com cursos hídricos. Apenas uma pequena parcela, equivalente a 0,16%, apresentou um potencial muito alto de inundação.

Do ponto de vista da modelagem, os indicadores TWI (Topographic Wetness Index) e *HAND* (Height Above the Nearest Drainage) foram fundamentais para a identificação desses cenários de risco. O TWI revelou as áreas propensas ao acúmulo de fluxos hídricos, enquanto o *HAND* indicou a proximidade em relação aos canais fluviais, destacando que quanto menor for essa distância, maior o risco potencial atribuído à edificação.

Além disso, é importante considerar que outros fatores ambientais e antrópicos podem contribuir para o aumento do risco de inundação, tais como o grau de impermeabilização do solo, a ausência de infraestrutura de drenagem eficiente e a ocupação desordenada das margens dos rios.

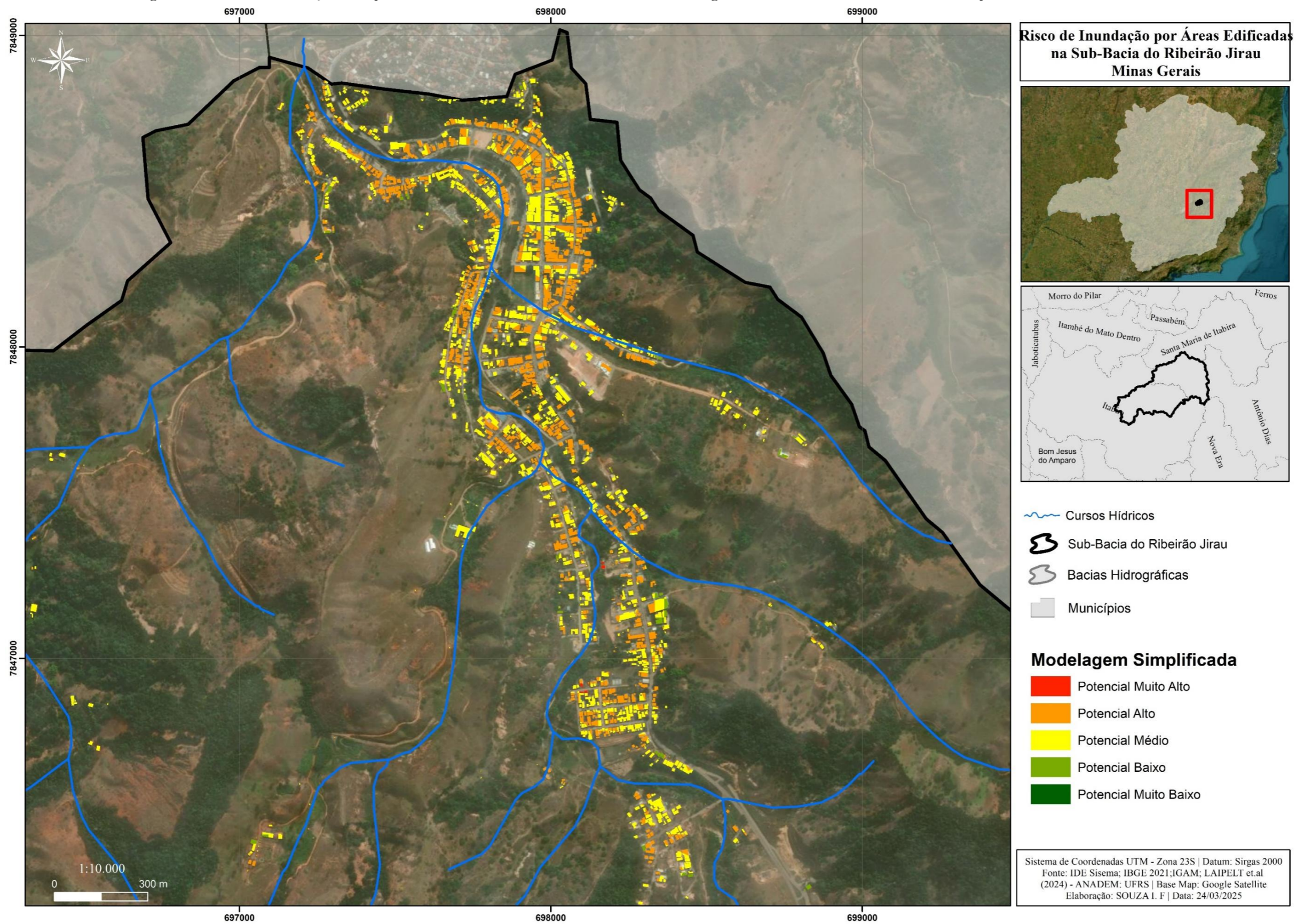
O Gráfico 10 apresenta a distribuição do potencial risco de inundação simplificado para as áreas edificadas na sede de Santa Maria de Itabira, enquanto a Figura 34 ilustra a espacialização dessas informações, permitindo uma melhor visualização da vulnerabilidade territorial.

**Gráfico 10: Potencial Risco de Inundação Simplificado – Edificações na Sede de Santa Maria de Itabira– MG**



**Fonte: Autora (2025)**

Figura 34: Riscos de Inundações Simplificado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Sede Municipal de Santa Maria de Itabira.

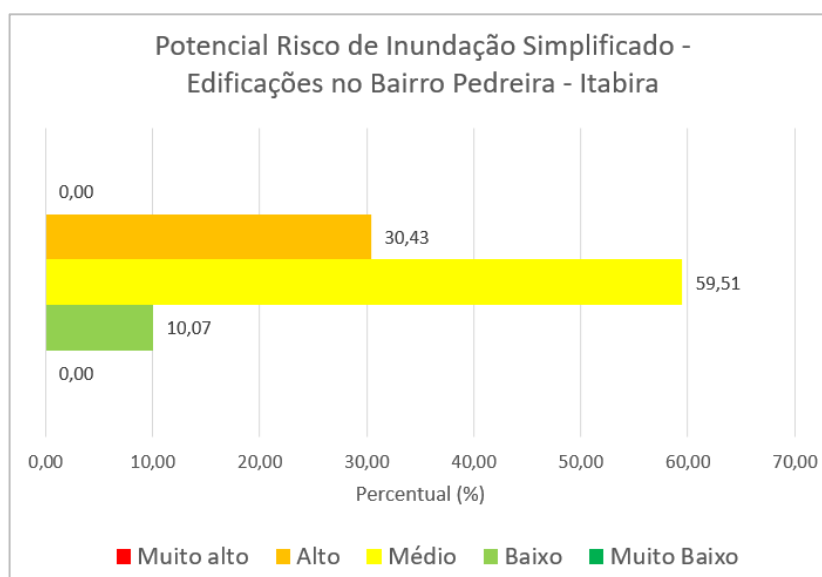


Fonte: IBGE (2022); MapBiomias (2023); ANA; IDE Sisema

Outra porção que apresenta uma potencialidade de média (59,51%) a alta (30,43%) probabilidade de risco de inundações de forma expressiva, é a região onde se insere o Bairro Pedreira, que faz parte do município de Itabira (Figura 35 e Gráfico 11). Diferente da sede municipal de Santa Maria de Itabira, essa região não está diretamente próxima ao Ribeirão Jirau. No entanto, sua vulnerabilidade está associada à proximidade de afluentes e, principalmente, às características do relevo, onde as vertentes convergentes-côncavas favorecem a concentração dos fluxos hídricos.

Além disso, o alto potencial de inundação é reforçado pelos valores do Curve Number, que indicam uma baixa taxa de infiltração da água. Isso se deve à predominância de solos argilosos pouco drenados e à presença de áreas com elevado grau de impermeabilização. Esses fatores combinados aumentam significativamente o risco de alagamentos. Já as demais regiões não foram avaliadas, pois não apresentam grandes áreas edificadas que possam sofrer impactos significativos.

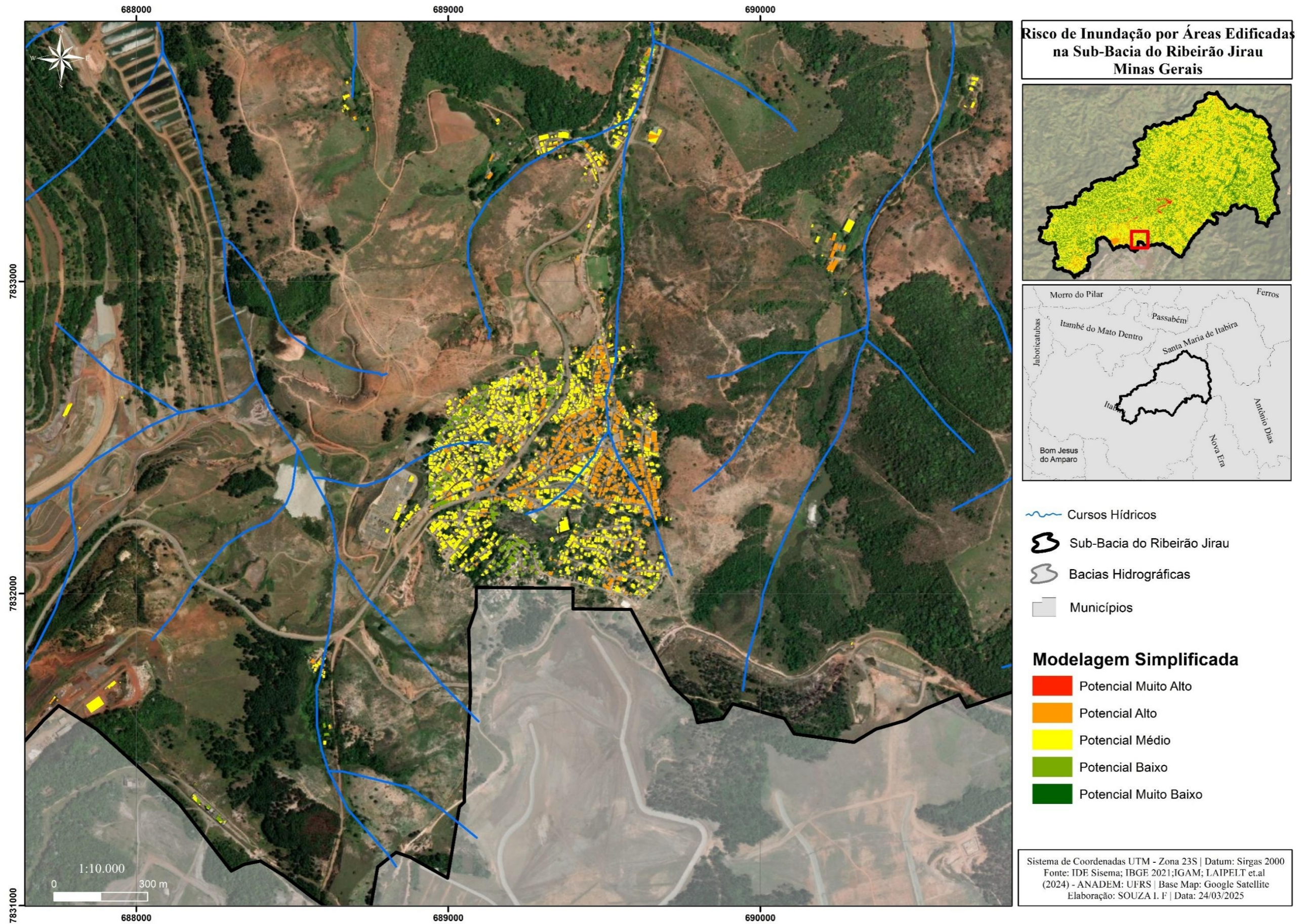
**Gráfico 11: Potencial Risco de Inundação Simplificado – Edificações no Bairro Pedreira - Itabira– MG**



**Fonte: Autora (2025)**

Com esse cenário foi possível compreender que a maioria das edificações se encontram em porções com grande potencial de inundação, como nas margens de cursos hídricos. Conforme supracitado, esse resultado é proveniente do contexto histórico que se deu a construção e desenvolvimentos dos municípios que essa bacia abarca, trazendo assim um alerta para em relação aos desastres que já ocorreram e aqueles que podem vir a ocorrer nessa região.

Figura 35: Riscos de Inundações Simplificado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Bairro Pedreira - Itabira.



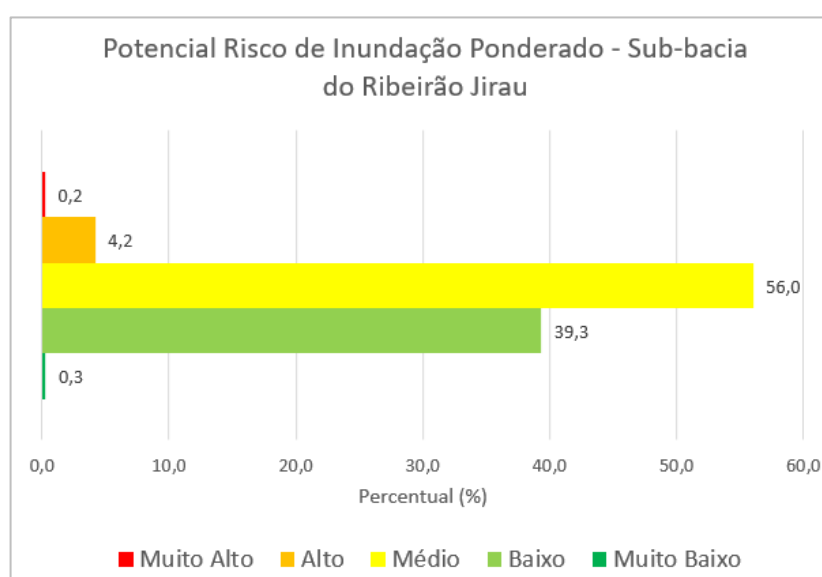
Fonte: IBGE (2022); MapBiomas (2023); ANA; IDE Sisema.

### 5.2.2 Modelagem Ambiental Ponderada

Os resultados da modelagem ambiental ponderada da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, foi gerada com a utilização do método AHP, com a ajuda de especialistas, que atribuíram notas para cada indicador em comparação com outro indicador, gerando assim uma hierarquia, que foi convertida em média estatística e foi utilizada como peso para a modelagem. Notou-se poucas divergências entre o universo amostrado, sendo necessário destacar que cada especialista indicou notas distintas, de acordo com suas experiências e áreas de atuação. Dessa forma, ao analisar o resultado obtido, observa-se que o indicador que mais se destacou na modelagem e foi mais importante para o estabelecimento das áreas de alto e médio risco a inundação foram respectivamente o TWI e o *Hand Model*.

Assim, identificou-se para a bacia a predominância do potencial médio (56%) ao risco de inundações em várias regiões, ou seja, nas áreas onde os indicadores TWI e *Hand Model* destacam como sendo possíveis áreas de inundação, neste caso os talwegues de cursos hídricos (Figura 36 e Gráfico 12). Já o potencial baixo (39,3%) foi verificado espacialmente por quase toda a bacia, principalmente em regiões com presença de formação florestal, que naturalmente se situam sobre solos mais desenvolvidos e profundos, que são também mais permeáveis, permitindo a percolação da água em seus horizontes ( Gráfico 12 e Figura 36).

**Gráfico 12: Potencial de Risco de Inundação Ponderado na Sub-Bacia do Ribeirão Jirau - MG**



Fonte: Autora (2025)

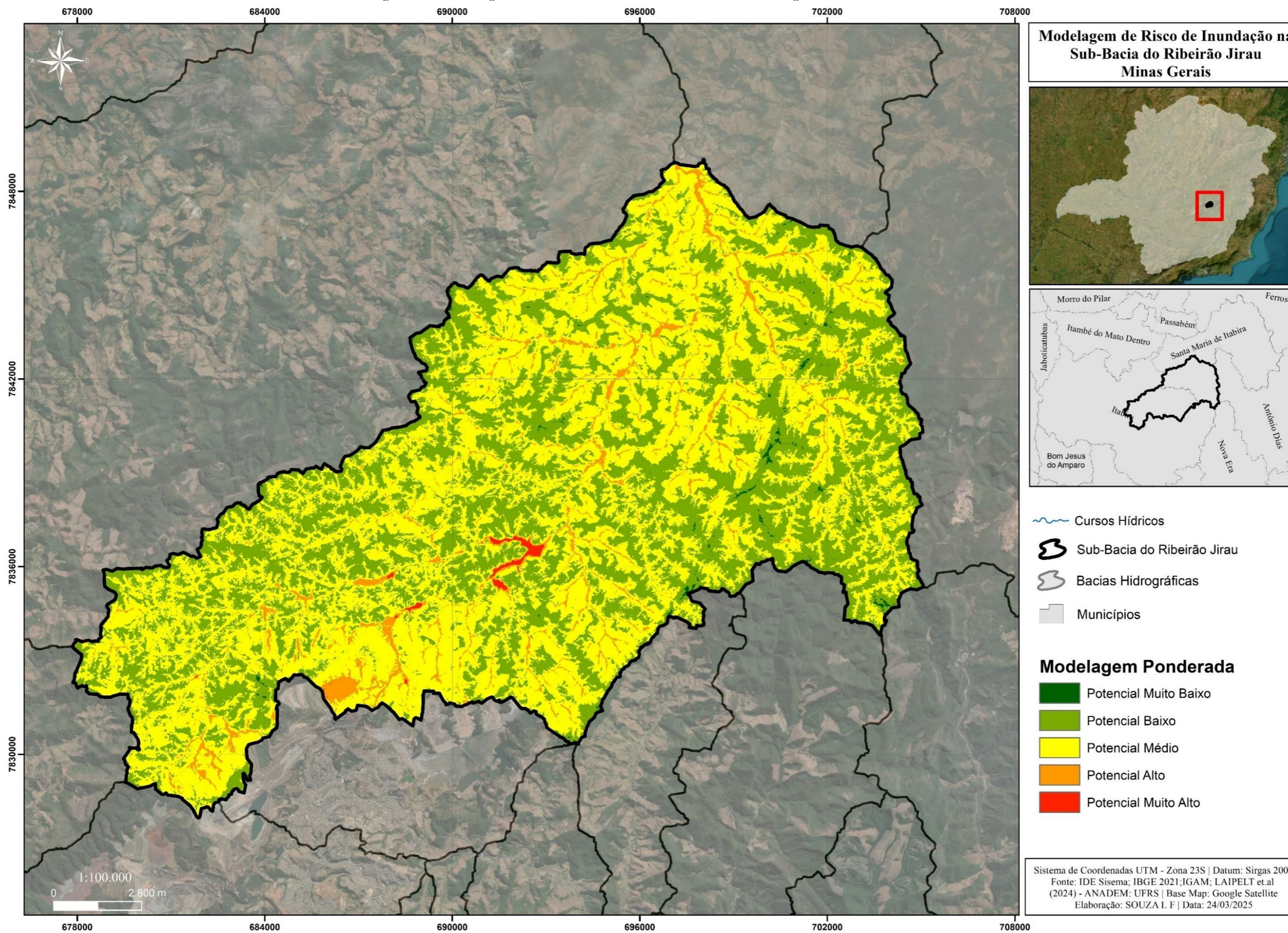
Corroborando com a modelagem simplificada, na porção onde se insere o município de Santa Maria de Itabira, foi também registrado um aumento do potencial alto de inundação, como também o aumento do potencial médio em áreas que na modelagem simples estavam com potencial baixo (Figura 36). Isso é decorrente do impacto gerado pela atribuição de maior peso aos indicadores TWI e *Hand Model* que indicaram maior tendência de inundação em áreas mais próximas a cursos hídricos.

A porção sudoeste (empreendimento minerário) que apresentou potencial alto e médio de risco de inundações na modelagem simples, também tiveram um significativo aumento dos seus riscos (Figura 36). Essas regiões apresentaram maior vulnerabilidade, onde os terrenos se encontram alterados por atividades antrópicas de mineração, como a presença de cavas e barragens, o potencial de risco de inundação se elevou.

As imediações da Barragem da CEMIG I e da Barragem de Santana, localizadas na região central da área de estudo, apresentaram um potencial muito alto de ocorrência de inundações na modelagem simples. Já na modelagem ponderada, observou-se um aumento na extensão das áreas classificadas nessa mesma categoria de risco, indicando uma maior vulnerabilidade a eventos de inundação (Figura 36).

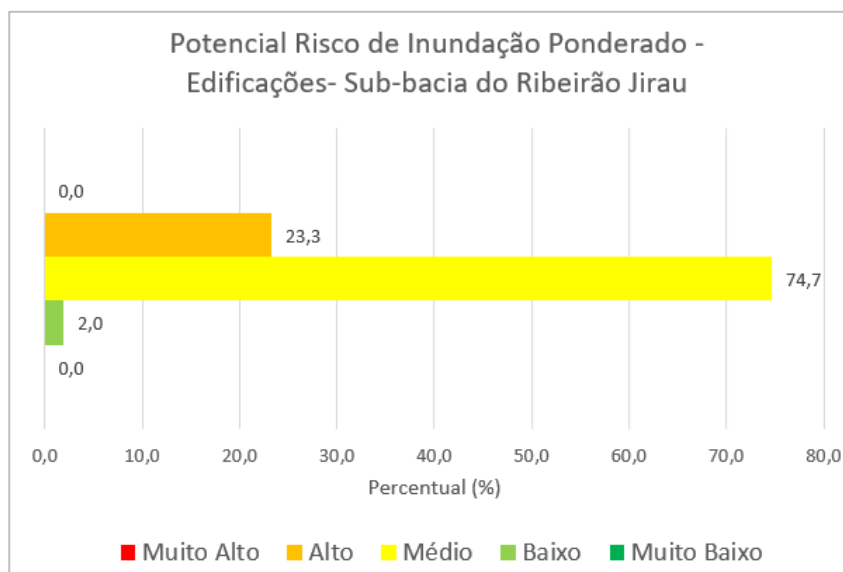
Para complementar as análises, foi realizado a porcentagem dos riscos de inundações por áreas edificadas da bacia, sendo possível identificar que 74,7% dessas edificações estão susceptíveis a um médio risco de inundação. O alto risco de inundações foi identificado em 23,3% das áreas edificadas e o baixo risco em 2% das edificações. O potencial muito alto e muito baixo não apresentou expressividade nesta análise. Comparado ao risco de inundações simplificado por edificações na bacia, nota-se que ocorreu o aumento considerável do potencial médio, como também a diminuição dos potenciais alto e baixo. Isso ocorreu devido à baixa importância atribuída para o indicador Formas de Vertente e *Curve Number*, que possuem menos amplitude de classe.

Figura 36: Modelagem Ambiental Ponderada da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau.



Fonte: IBGE (2022); MapBiomias (2023); ANA; IDE Sisema.

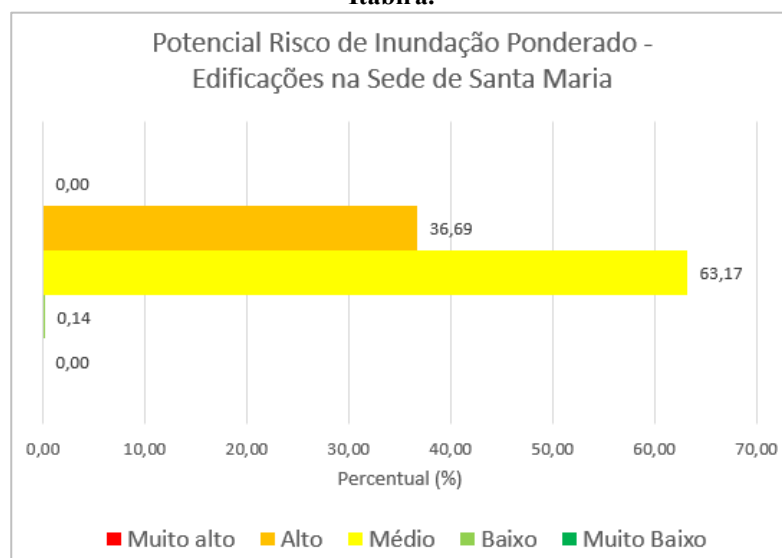
**Gráfico 13: Potencial de Risco de Inundação Ponderado – Edificações.**



**Fonte: Autora (2025).**

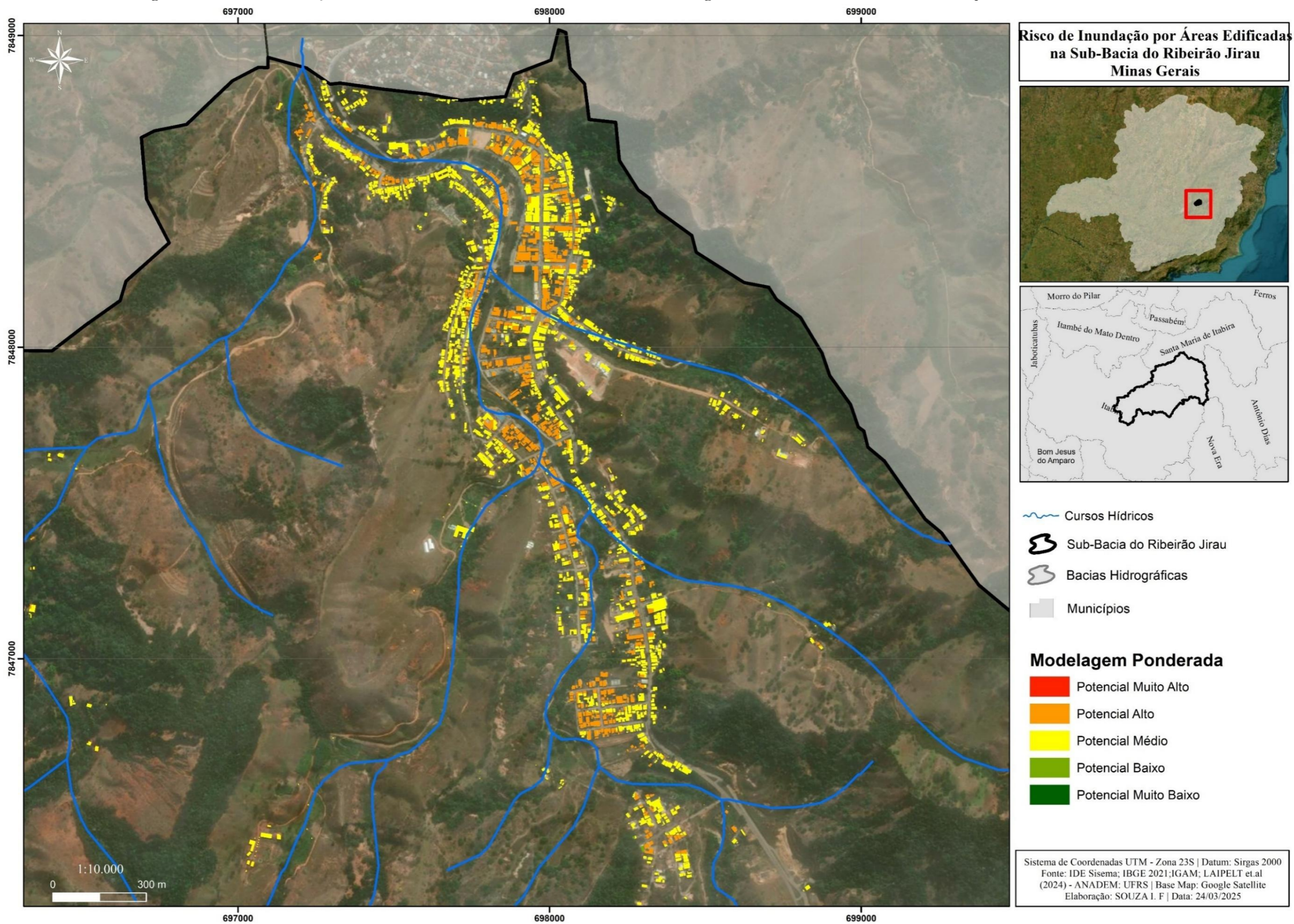
Com a modelagem ponderada na porção onde se insere o município de Santa Maria de Itabira, foi possível identificar um potencial variando de médio (63,7%) a alto (36,69%) de inundações por edificações (Gráfico 14), demonstrando uma queda no potencial alto (-10,13%) e um aumento no potencial médio (12,25%), se comparado a modelagem simplificada. Essas mudanças se deram pela atribuição de importância dos indicadores, onde alguns que obtinham as mesmas importâncias, com a ponderação passou a não destacar na análise, como é o caso das Formas de Vertentes, que era um fator que acabava acarretando nesse índice mais elevado.

**Gráfico 14: Potencial de Risco de Inundação Ponderado – Edificações na Sede de Santa Maria de Itabira.**



**Fonte: Autora (2025)**

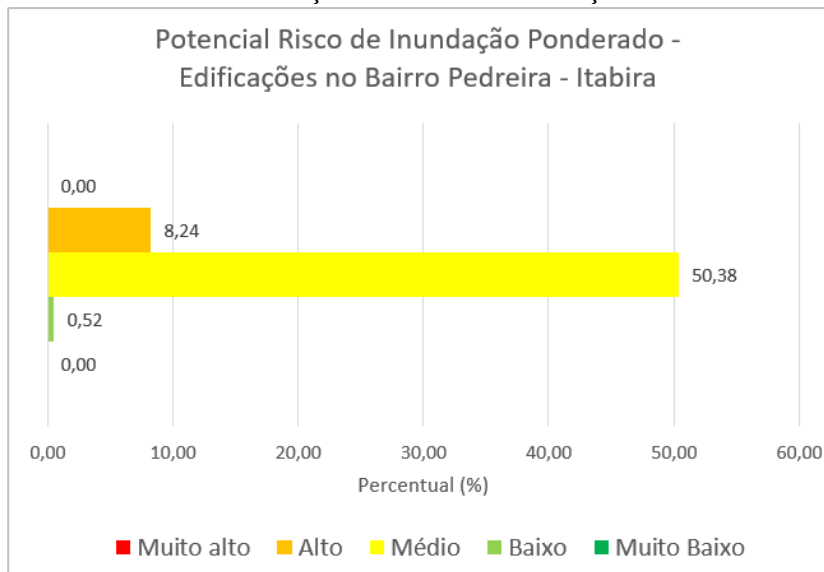
Figura 37: Riscos de Inundações Ponderado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Sede Municipal de Santa Maria de Itabira.



Fonte: IBGE (2022); MapBiomias (2023); ANA; IDE Sisema.

A porção onde se insere o Bairro Pedreira, apresentou a predominância de um potencial médio (50,38%) na modelagem ponderada. Comparando a análise simplificada, houve uma queda significativa no risco de potencial alto (-22,19%), devido a influência dos indicadores Formas de Vertentes e *Curve Number*, que na análise ponderada perderam sua importância, dando ênfase a indicadores como TWI e *Hand Model*.

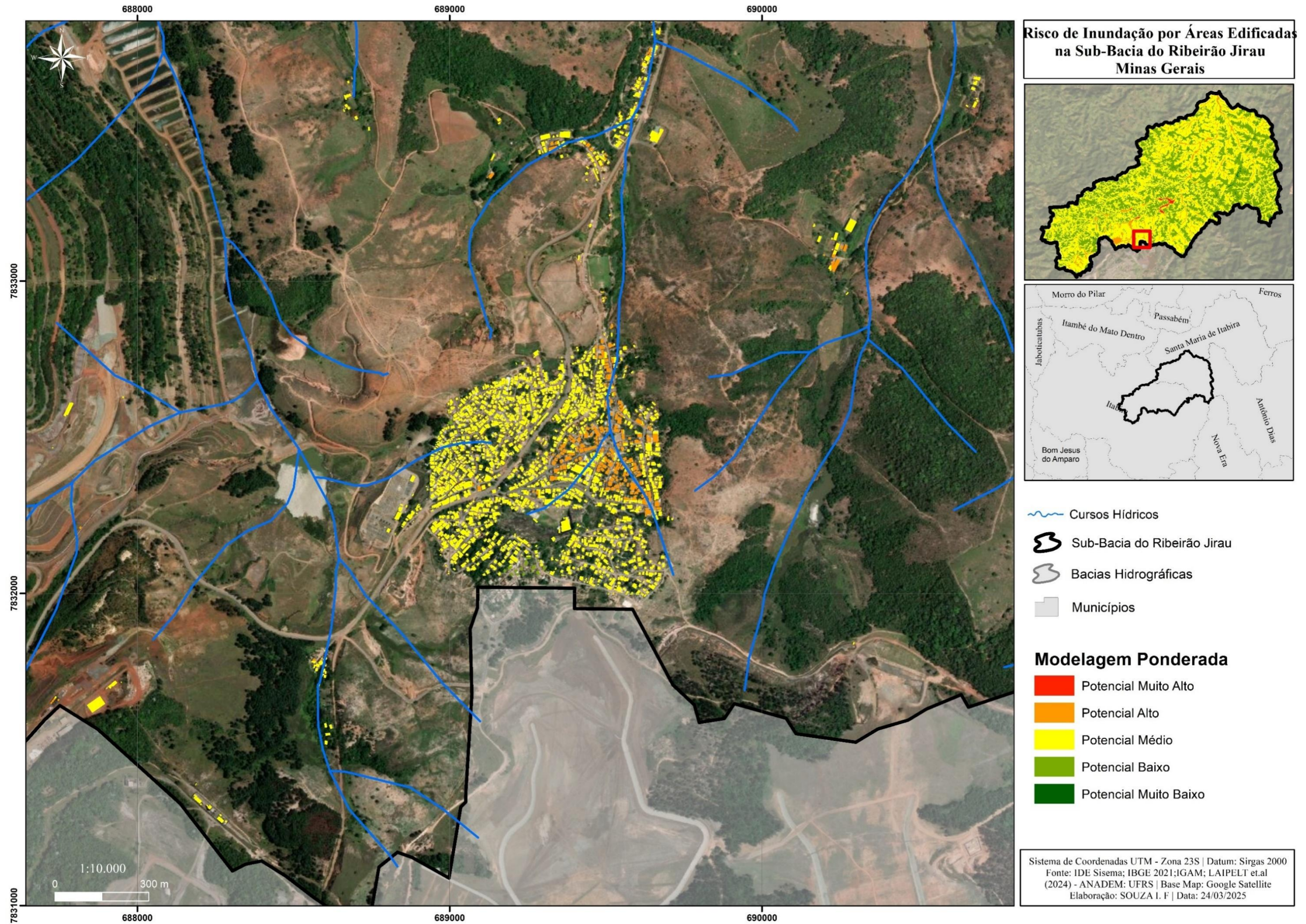
**Gráfico 15: Potencial de Risco de Inundação Ponderado – Edificações no Bairro Pedreira em Itabira.**



**Fonte: Autora (2025)**

A partir dessas análises, foi possível compreender que com a ponderação a modelagem ficou mais fiel a realidade, destacando com mais clareza e exatidão as áreas propensas a inundação da bacia. Esse resultado é proveniente de aspectos como, o contexto histórico que se deu a construção e desenvolvimentos das cidades nas margens do Ribeirão Jirau, como também a morfologia do terreno que possibilita a acumulação dos fluxos hídricos.

Figura 38: Riscos de Inundações Ponderado em Áreas Edificadas na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau – Bairro Pedreira - Itabira.



Fonte: IBGE (2022); MapBiomias (2023); ANA; IDE Sisema.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, localizada na região centro-leste de Minas Gerais, abrange os municípios de Itabira e Santa Maria de Itabira. Devido às fortes chuvas e às características geomorfológicas da região, a sub-bacia enfrenta recorrentes desastres socioambientais, resultando em perdas econômicas, ambientais e humanas. Eventos históricos, como as enchentes de 1979, 2009 e 2021, fez com que o município sofresse com transbordamentos severos do Ribeirão Jirau, causando destruição da infraestrutura municipal, desabrigando moradores e exigindo ações emergenciais para a recuperação da cidade.

Sendo assim, o objetivo geral visou identificar as áreas de maior risco de inundação na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau - MG, através da integração de técnicas de modelagem ambiental e análise espacial. Os objetos específicos visaram analisar os aspectos fisiográficos da sub-sacia, com ênfase nas particularidades geológicas, pedológicas, hidrográficas, geomorfológicas e morfométricas que influenciam na dinâmica das inundações. Além de caracterizar a evolução da ocupação humana na Sub-Bacia entre os anos de 1995 a 2023, avaliando como as alterações no uso e ocupação do solo contribuíram para o aumento da vulnerabilidade a eventos de inundação. Nesse prisma, de acordo com os dados levantados durante o período de pesquisa pode-se dizer que os objetivos foram atingidos, ou seja, eles foram atendidos e realizados.

Esta pesquisa é relevante por explorar uma região pouco investigada e empregar metodologias avançadas para identificar áreas propensas a inundações na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau. Além de preencher lacunas no conhecimento científico, oferece suporte para políticas públicas e gestão de riscos ambientais. O estudo também contribui para a compreensão das dinâmicas hidrológicas e dos impactos humanos na região, fornecendo informações essenciais para mitigar desastres naturais e planejar ações urbanas e ambientais efetivas.

Em relação aos riscos de inundação presentes na bacia, considerou a hipótese de que as características fisiográficas intrínsecas à Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jirau, incluindo sua estrutura geológica, composição pedológica, rede hidrográfica e parâmetros geomorfométricos desempenham um papel crucial na predisposição a inundações, o que se confirmou em parte na caracterização da área de estudo e em parte do estudo de caso. Essa confirmação se deu pelos resultados obtidos através das análises das características físicas do

terreno, como também o uso de indicadores geomorfométricos que demonstraram com exatidão, a predisposição de áreas mais expostas a riscos de inundações.

Na caracterização climática foi possível identificar que a região onde a bacia se localiza possui um balanço hídrico mais excedente de outubro a março, totalizando mais do que a metade do ano. Em conjunto foi possível identificar também que a capacidade de armazenamento se encontra em sua capacidade máxima na maior parte do ano. Isso significa que em um ano a mais excedente de precipitação do que déficit, que influência nessa capacidade máxima de armazenamento na maioria dos meses. Esses fatores mostraram que a possibilidade de inundação na região pode ser maior em eventos de precipitação extremos, devido à falta de capacidade de armazenamento da chuva em quase todo ano.

Na caracterização geomorfológica, no tópico do TWI, foi possível identificar que as áreas que possuem maiores confluências, tendem a acumulação dos fluxos, principalmente em épocas de intensas chuvas, resultando em possíveis inundações ou extravasamento hídrico dos canais, como foi possível identificar na confluência do Rio Tanque com o Ribeirão Jirau. No tópico onde abordou as formas de vertentes foi identificado a predominância de vertentes convexas-convergentes e côncavas-divergentes, denotando que na alta vertente tende a predominar um escoamento laminar de fluxo lento e na média vertente tende a acumulação dos fluxos em linhas de drenagens e o aumento da velocidade. Esse fator indicou que esses tipo de vertente côncava-divergente, podem tendenciar o aumento do risco de inundações devido a sua acumulação nos fluxos hídricos.

Na caracterização hidrográfica, no tópico sobre índices morfométricos da bacia, observa-se que a Sub-bacia do Ribeirão Jirau apresenta dois cenários distintos: um associado à conservação em condições naturais e outro favorável à ocorrência de inundações. Essa dualidade decorre dos resultados obtidos, que indicam, por um lado, uma baixa tendência a inundações sob precipitações normais. Por outro lado, o segundo cenário revela que a maior retilinidade do canal principal e a elevada amplitude altimétrica, da nascente ao exutório, favorecem um fluxo intenso e acelerado até a confluência com o Rio Tanque, contribuindo para a ocorrência de inundações.

Ainda na caracterização hídrica, foi apresentado o tópicido do *Hand Model*, este demonstrou que a Sub-bacia do Ribeirão Jirau apresenta pontos vulneráveis a cheias, com destaque para a região ao norte, onde está localizada a sede municipal de Santa Maria de

Itabira. O modelo *HAND* permitiu identificar uma extensa mancha de inundação nessa área, devido à baixa altitude em relação aos cursos hídricos e à confluência do Ribeirão Jirau com o Rio Tanque, fator que intensifica o risco de inundações em períodos de cheias. Além disso, o modelo também destacou a presença de barramentos no centro-oeste e sudoeste da bacia, incluindo a Barragem de Santana, associada a um empreendimento minerário em Itabira, e as barragens Cemig I e Cemig II, que influenciam a dinâmica hídrica da região.

A análise da evolução do uso e ocupação foi outro aspecto que possibilitou compreender a dinâmica da bacia. As transformações significativas das classes ao longo das últimas décadas, evidenciou o avanço dos usos impulsionados por fatores como a urbanização, agricultura e mineração. Esses fatores refletem a interação entre o desenvolvimento econômico e os desafios ambientais presentes na região, como é o caso das inundações recorrentes em porções da bacia. É válido destacar que a bacia apresentou aumento de sua área urbana em regiões próximas a cursos hídricos, como é o caso da sede municipal de Santa Maria de Itabira que se instala no entorno do rio principal da bacia.

A modelagem de escoamento superficial permitiu identificar os valores e mapear as áreas mais permeáveis e impermeáveis da Sub-bacia do Ribeirão Jirau, destacando regiões com maior potencial de escoamento superficial, como a confluência do Rio Tanque com o Ribeirão Jirau, no nordeste da bacia. Apesar da baixa urbanização em algumas porções da bacia, os tipos de solo indicaram tendência ao aumento do escoamento em certas áreas, tornando essencial o controle do uso do solo para evitar sua impermeabilização.

Ademais, a modelagem ambiental simplificada, possibilitou uma análise mais geral da pesquisa, onde possibilitou resultados importantes e comparativos com a modelagem ponderada. A análise mostrou que a bacia apresenta principalmente risco médio de inundação, especialmente nas áreas próximas aos cursos hídricos, devido à sua morfometria e permeabilidade. No entanto, o município de Santa Maria de Itabira apresentou um risco elevado devido à confluência do Ribeirão Jirau com o Rio Tanque e à urbanização nas margens do ribeirão. Regiões com atividades mineradoras também foram identificadas como áreas de alto risco devido à supressão vegetal e mudanças no uso do solo.

A modelagem simplificada revelou que 58% das edificações na bacia estão expostas a risco médio, e 33% a alto risco de inundação, com destaque para o município de Santa Maria de Itabira e a região do Bairro Pedreira, em Itabira, esta, apesar de não estar próxima a cursos

hídricos, sofre com a impermeabilização do solo e a falta de vegetação. Esses resultados indicam que muitas edificações estão em áreas vulneráveis, alertando para a necessidade de ação preventiva por parte do poder público para mitigar os riscos de desastres.

A aplicação da análise multicritério por intermédio do método AHP para a modelagem ponderada, proporcionou à pesquisa resultados importantes para a Sub-Bacia do Ribeirão Jirau. Em relação ao uso do método AHP, tendo como fundamento os resultados alcançados em cada uma dos 4 indicadores definidos por cada especialista, foi obtido resultados muito diferentes, mas mesmo com a forte influência da área de atuação dos mesmos, os indicadores que se destacaram e estabeleceram as áreas com alto e médio risco ambiental a inundações foram o TWI e o *Hand Model*. Também pode-se destacar que o Curve Number teve grande influência na composição dos potenciais de risco finais.

Dessa forma, o risco a inundações da área de estudo, encontra-se em sua grande maioria em médio e baixo potencial de inundações, já que essas duas classes representam grande parte da área. Outro ponto importante que foi observado, por meio do método aplicado, é que as áreas de risco a inundações alta, são compostas por áreas urbanizadas, principalmente próximas de curso hídricos. A utilização do método AHP possibilitou uma análise mais criteriosa da bacia, chegando em resultados significativos para compreendermos as áreas que precisam de mais atenção e cuidado na bacia.

Em suma, entende-se que pesquisas como esta da Bacia Hidrográfica Do Ribeirão Jirau são relevantes ao passo que, disponibilizam e apresentam informações que vão servir de base e apoio para os planejamentos urbanos e ambientais futuros. Além disso, a região de estudo possui muitas particularidades, como expansão urbana e minerária, a confluência de dois rios em uma sede municipal e diversos aspectos propiciando a eventos de inundações. Nesse sentido, a modelagem ambiental de riscos de inundações nesta bacia se caracterizou como uma importante base para a elaboração de futuras pesquisas para a área, que ainda requer muitos estudos sociais e ambientais sobre seu território.

## 7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Relatório do Diagnóstico do Ribeirão Pípiripau**. Brasília, 2010.

AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL – ADASA. **Boletim de Monitoramento da Sub-Bacia do Ribeirão Pípiripau**, 2011.

ALKIMIM, F. F., MARSHAK. S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, 90:29–58.

ALMEIDA, F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, 7:285– 295.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, Samuel Lacerda; DE OLIVEIRA FERREIRA, Vanderlei; SILVA, Mariana Mendes. Elaboração de um mapa de risco de inundações da Sub-Bacia hidrográfica do córrego São Pedro, área urbana de Uberlândia-MG. **Caderno de Geografia**, v. 24, n. 41, p. 1-16, 2014.

ANJINHO, P. S.; BARBOSA, M.A.G.A.; SANTOS, A.R.; MAUAD, F.F. (2018). Espacialização do Parâmetro Curve Number (CN) na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Lobo para o período de 1985 e 2017. In: **XVI SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL**, 2018, São Carlos. Anais [...]. São Paulo: PPG-SEA, 2009. 12 p.

ASSOCIAÇÃO PÚBLICA. Nota técnica 1/2023: **No Brasil, 3 a cada 4 vivem em municípios com mais risco de desastres causados por chuvas**. São Paulo, 2024. Disponível em: [https://apublica.org/wp-content/uploads/2024/05/Nota-Tecnica-1-2023-SADJ-VI-SAM-CC-PR\\_SEI\\_00042.000497\\_2023\\_74\\_No-Brasil-3-a-cada-4-vivem-em-municipios-com-mais-risco-de-desastres-causados-por-chuvas.pdf](https://apublica.org/wp-content/uploads/2024/05/Nota-Tecnica-1-2023-SADJ-VI-SAM-CC-PR_SEI_00042.000497_2023_74_No-Brasil-3-a-cada-4-vivem-em-municipios-com-mais-risco-de-desastres-causados-por-chuvas.pdf). Acesso em: 04 ago. 2024.

ÁVILA, Bárbara Thaís; DE ALMEIDA NETO, José Oliveira; FELIPPE, Miguel Fernandes. Suscetibilidade morfométrica a inundações nas Sub-Bacias hidrográficas tributárias do Rio do Peixe, Zona da Mata de Minas Gerais. **Formação (Online)**, v. 1, n. 24, 2017.

BASTOS, Frederico H; MAIA, Rubson P; CORDEIRO, Abner M. N. **Geografia e Geomorfologia** . 1ª edição. Fortaleza - Ceará: Editora da Universidade Estadual do Ceará – EdUECE, 2019. Disponível em:<https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/432890/2/Liv>

BERGER A. R. Assessing Rapid Environmental Change Using Geoindicators. **Environment Geology**, Springer, Berlin, v. 1, n. 32, p. 35–44, 1997.

BERZ, Gerhard. Desastres de inundação: lições do passado—preocupações com o futuro. Em: **Anais da instituição de engenheiros civis-engenharia hídrica e marítima** . Thomas Telford Ltd, 2000. p. 3-8.

BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L.H.P.; ANTUNES, E.N. Estações hidrometeorológicas automáticas: recomendações técnicas para instalação. Florianópolis: **Epagri**, 2012, 43p. (Epagri. Documentos, 240).

BRAGA, Júlia Oliveira. **Alagamentos e inundações em áreas urbanas: estudo de caso na cidade de Santa Maria-DF**. 2016.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Defesa Civil. **Política Nacional de Defesa Civil**. Brasília, 2007.

BORSATO, Fabiano Hugo; MARTONI, Astrid Meira. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 26, n. 2, p. 273-285, 2004.

BOULOMYTIS, V. T. G.; FABBRO NETO, F. A proposal for the Juqueriquere River Basin sustainable development. In: **World Aqua Congress**, 5., 2011, New Delhi, India. Proceedings... New Delhi: Aqua Foundation, 2011. v. II, p. 453- 460.

CAPOANE, V., TIECHER, T., RASCHE ALVAREZ, J. W. R., PELLEGRINI, A., SCHAEFER, G. L., SANTOS, L. J. C., & SANTOS, D. R. dos. (2015). Influência da resolução do modelo digital de elevação na determinação do índice topográfico de umidade e na capacidade de predição dos teores carbono orgânico do solo. **Geo UERJ**, (27), 144–155. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2015.13452>

CÂMARA MUNICIPAL DE SANTA MARIA DE ITABIRA (CMSMI). **Cidade**. Santa Maria de Itabira, 2021.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P.; MARTINS, S. V. Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan. **Revista Árvore**, Nova Friburgo-RJ, 2006, v. 30, p. 241- 248.

CASTRO, Cleber Marques De & PEIXOTO, Maria Naíse & PIRES DO RIO, Gisela. (2005). Riscos Ambientais e Geografia: Conceituações, Abordagens e Escalas. Anuário do Instituto de Geociências. 28. 10.11137/2005\_2\_11-30.

CHRISTOFOLETTI, A . **Geomorfologia Fluvial**. Edgard Blucher, São Paulo, 1980. Acesso em: 22 de jul. 2024.

CALIJURI, Maria do Carmo e BUBEL, Anna Paola Michelano. Conceituação de microbacias. As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. Tradução . São Carlos: **RiMa**, 2006. Acesso em: 01 set. 2024.

CRUZ, Fábio Monteiro et al. Ondas de cheia no médio rio Doce: uma abordagem conceitual e estatística. In: **VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Porto Alegre: IBEAS.** 2015. p. 1-6.

COHEN, B. Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. **Technology in Society**, 2006.

DORR, J.V.N. II. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. **Professional Paper**, 641(4):1-110

DEFESA CIVIL DE SÃO BERNARDO DOS CAMPOS. São Paulo. 2011. Disponível em: <http://dcsbcsp.blogspot.com/2011/06/enchente-inundacao-ou-alagamento.html>. Acesso em 04 out. 2024.

ECKHARDT, Rafael Rodrigo. **Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado/RS.** 2008.

ENDO I., DELGADO C. E. R. OLIVEIRA M. M. F. de, ZAPPAROLI A. de C., CARLOS D. U., GALBIATTI H. F., CASTRO P. de T. A., SUITA M. T. de F., BARBOSA M. S. C., LANA C. E., MOURA L. G. B. de. 2019b. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. **Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero**, Ouro Preto, 482p.

ESTADO DE MINAS (Minas Gerais). Santa Maria de Itabira: temporal deixa rastro de destruição pela cidade. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, p. 1-1, 22 fev. 2021.

FARIAS, A., & MENDONÇA, F. de A. (2019). Modelagem e mapeamento de áreas de perigo de inundação urbana na cidade de Francisco Beltrão (Brasil). *Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana De Geografia Física E Ambiente*, 1(1), 73–91. <https://doi.org/10.21814/physisterrae.405>

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas.** Turrialba: CATIE, 1996. 90p.

FRANÇA, G. V. **Interpretação fotográfica de bacias e redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba.** 1968. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP

FRANÇA, L. **Hand model inundação.** GeoOne. Disponível em: <https://geoone.com.br/hand-model-inundacao/>. Acesso em: 03 set. 2024.

GRILO, Roseana Correa. **A precipitação pluvial e o escoamento superficial na cidade de Rio Claro/SP.** 1992. 103 f. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado,

Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro: SP, 1992.

GUERRA, A. J. T; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos** . 3ª edição. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 1995;

GUIMARÃES, Nelson Avelar; DA PENHA, Julierme Wagner. Mapeamento das áreas de risco de inundação no município de Muriaé-MG, com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE**, p. 3875-3882, 2009.

HARVEY, D. The condition of postmodernity: An enquiry into the origins of cultural change. **Blackwell**, 1990.

HOUGHTON, R. A. Global warming: The complete briefing. **Cambridge University Press**, 2003.

IBGE (Brasil). **Cidades**: Santa Maria de Itabira. Brasil, 2024.

JAKUBICKA, T; VOS, F; PHALKEY, R; MARX, M. GUHA-SAPIR, D. Health impacts of floods in Europe – Data gaps and information needs from a spatial perspective. MICRODIS Report. **Centre for Research on The Epidemiology of Disasters-CRED – School of Public Health**, Catholic University of Louvain. November, 2010.

LAIPELT, L.; de ANDRADE, B.C.C.; COLLISCHONN, W.; AMORIM, A.; PAIVA, R.C.D.; RUHOFF. A. 2024. **ANADEM**: A digital terrain model for South America” Submetido para publicação na *Remote Sensing*. Disponível para download em: <https://www.preprints.org/manuscript/202404.1305/v1>.

IBGE, Manual técnico de geomorfologia. **Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. – 2. ed. - Rio de Janeiro : IBGE, 2009. 182 p. – (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598 ; n. 5)

MapBiomias – Coleção 9 da série anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 02/02/2025 através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>

MARANDOLA JR., Eduardo e HOGAN, Daniel J. Natural hazards: o estudo geográfico dos riscos e perigos. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 7, n.2, jul./dez. 2004a.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M. Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. **Caminhos de Geografia**, v.6, n.19, p. 130-149, 2007.

MARCIANO, Vitória Régia Péres da Rocha et al. **O distrito pegmatítico de Santa Maria de Itabira, MG: mineralogia, geoquímica e zoneografia**. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARTINS, F.B. et al. Zoneamento Ambiental da sub – bacia hidrográfica do Arroio

Cadena, Santa Maria (RS). Estudo de caso. **Cerne**, Lavras, v.11, n.3, p.315-322, jul./set. 2005.

MCT/CGE - Ministério de Ciência e Tecnologia/Centro de Estudos e Gestão Estratégica. **Diretrizes estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico**. Brasília, 2002. <http://www.ana.gov.br>, 11 ago. 2024

MELCHIOR, C. **Comparativo de resultado de mediação de vazões pelos métodos: convencional e acústico**. Foz do Iguaçu, PR. Originalmente apresentada como dissertação de graduação. União Dinâmica de Faculdades Cataratas – UDC, 2006, P 72

MINELLA, Jean Paolo Gomes; MERTEN, Gustavo Henrique; RUHOFF, Anderson Luis. Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1455-1462, 2010;

MONTEIRO, C.A. de F. Clima. In **Geografia do Brasil: Grande Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE. v.4, TOMO 1, p-114-166. 1968.

NIMER, E. Circulação atmosférica do Brasil (Comentários) Contribuição ao estudo da Climatologia do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro: IBGE, setembro de 1966. p. 232 – 250.

NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., HODNETT, M. et al 2011a. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology** 404, 13–29.

NOBRE, A. D.; SILVEIRA, A. CUARTAS, L.A., 2011b. Aspectos físicos e geográficos das áreas ripárias no Brasil: análise preliminar da legislação. Ciência para o Código Florestal. São José dos Campos: Centro de Ciência para o Sistema Terrestre – INPE, 110 p. Relatório Científico.

PHILIPPI Jr., A.; BRUNA, G. C. Política e gestão ambiental. In: PHILIPPI JUNIOR, A., ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. (Orgs.). **Curso de gestão ambiental**. Barueri: Manole, 2004. cap. 18, p. 657- 711.

POMPÊO, César Augusto. Drenagem urbana sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, pág. 15-23, 2000.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Casa Civil. Secretaria Especial de Articulação e Monitoramento. Secretaria Adjunta VI - Recursos Hídricos. Nota Técnica nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR. **Atualização dos critérios e indicadores para a identificação dos municípios mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, enxurradas e inundações para serem priorizados nas ações da União em gestão de risco e de desastres naturais**. Referência: Processo 00042.000497/2023-74. Brasília, 2023.

SACHS, W. Desenvolvimento: A crítica de um conceito. **Record**, 2015.

SANTANA, D. P. Manejo integrado de Sub-Bacias Hidrográficas. **Embrapa Milho e Sorgo Sete Lagoas**, 2004. Acesso em 18 ago. de 2024;

SANTOS, A.; TARGA, M.; BATISTA, G.; DIAS, N. Análise morfométrica das sub bacias hidrográficas perdizes e fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p.195-211, 2012. Disponível em: <http://www.ambiagua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/945> Acesso em: 29 ago. 2024.

SBC ASSOCIATES LTD. Analytic Hierarchy Process, AHP . Copyright SCB Associates Ltd, 2016. Disponível em: <https://scbuk.com/ahp.html> Acesso em: 7 nov. 2024;

SCHUELER, T. R. The Importance of Imperviousness. **Watershed Protection Techniques**, 1994.

SILVA, G. C. da; ALMEIDA, F. P.; ALMEIDA, R. T. S.; MESQUITA, M.; JUNIOR, J. A. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho Rangel-Piauí, Brasil. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Goiânia, v.15, n.28, p. 244-258, 2018. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2018B/AGRAR/caracterizacao%20morfometrica.pdf> Acesso em: 29 ago. 2024.

SILVA, João Paulo Rodrigues Pacheco da. **Riscos e desastres ambientais causados por inundações em áreas urbanas: um estudo da paisagem sob a visão sistêmica**. 2009. 76 f. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2009.

SILVA NETO, João Cândido André. **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno**. Bacharel em Geografia. Mestre em Geografia pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Doutorando em Geografia pela Universidade Estadual Paulista, Campus Presidente Prudente, Bolsista CNPq, 2013.

SIRTOLI, Angelo Evaristo et al. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia agraria** , v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008;

SOUZA, Jorge Batista de. **Proposta Metodológica para Mapeamento de Fragilidade Ambiental: Estudo de Caso da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe, MG**. Orientador: Prof. Dr. José Flávio Morais Castro. 2021. 218 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, [S. l.], 2021.

VALE, J. R. B.; COSTA, L. S. da; PIMENTEL, M. A. S. Análise da morfometria e do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Mocajuba, zona costeira amazônica. **Geosul**, Florianópolis, v. 36, n. 78, p.537-557, jan./abr. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/72705> Acesso em: 29 ago. 2024.

VALERIANO, M. M. TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São Jose dos Campos: **INPE**, 2008;

VILLELA, S.M., MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, 1975, 245p.

TAVARES, A.B (et.al) Geoindicadores para a caracterização de estado de diferentes ambientes. **Estudos Geográficos**, Rio Claro. V 5. p 42-57. São Paulo, 2007.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente, 1977. 97 p.

TUCCI, Carlos EM; HESPAHOL, Ivanildo; CORDEIRO NETTO, Oscar de M. **Gestão da água no Brasil**. 2001.

TUCCI, Carlos EM; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. Ed. dos Autores, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas: impactos da urbanização**. Porto Alegre: Ed. ABRH/RHAMA, p87-124, 2007.

OLIVEIRA, Jorge Alberto Nunes Falcão de. **Delimitação de bacias hidrográficas utilizando o QGIS: aplicação na Bacia do Curu**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Fortaleza, Centro de Ciências Tecnológicas, Fortaleza, 2020.

OLIVEIRA, Ulisses; FILHO, Edilson; MAIA, Ana; ALBUQUERQUE, Cleverton; MENDONÇA, Priscila; XAVIER, Natália; DE SOUZA CIDRAL, Willian Richard; MENEZES, Wartyson; DE SOUZA SILVA, Izaias; JUNIOR, Carlos. (2022). **ANÁLISE COMPARATIVA E ESPACIALIZAÇÃO DO PARÂMETRO CN (CURVE NUMBER) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACOLOMI, CEARÁ, ENTRE OS ANOS DE 1990, 2005 E 2020**. 10.22533/at.ed.821222208