

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**Vulnerabilidade socioambiental a inundações: estudo de caso de uma
sub-bacia no sul de Minas Gerais**

Débora Luisa Silva Teixeira

Itajubá, 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Débora Luisa Silva Teixeira

**Vulnerabilidade socioambiental a inundações: estudo de caso de uma
sub-bacia no sul de Minas Gerais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para a para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientadora: Prof^a Dra. Nívea Adriana Dias Pons

Itajubá, 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Débora Luisa Silva Teixeira

**Vulnerabilidade socioambiental a inundações: estudo de caso de uma
sub-bacia no sul de Minas Gerais**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 11 de fevereiro de 2022, conferindo à autora o título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Nívea Adriana Dias Pons (orientadora)

Profa. Dra. Samara Calçado de Azevedo

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

Dr. Luiz Tadeu da Silva

Itajubá, 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida e por todas as graças concedidas.

À minha mãe Zélia, ao meu pai Benedito e à minha irmã Bianca, que sempre me incentivaram e me deram apoio em todos os momentos de minha vida.

À Profa. Nívea pela orientação, dedicação, ensinamentos e por ter estado disponível sempre que necessário ao longo de todo o mestrado.

Aos professores, membros da banca de defesa da dissertação, por suas contribuições para a melhoria desse trabalho.

À UNIFEI e aos meus professores, pelo comprometimento com a qualidade do ensino e por todo aprendizado e amadurecimento proporcionados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos pela amizade e companheirismo e a todos que de alguma forma colaboraram para a realização desse trabalho, meu muito obrigada.

“Quando o homem compreende a sua realidade, pode levantar hipóteses sobre o desafio dessa realidade e procurar soluções. Assim, pode transformá-la e o seu trabalho pode criar um mundo próprio, seu eu e as suas circunstâncias.”

Paulo Freire

RESUMO

Devido à combinação de chuvas intensas e/ou mais fracas por vários dias consecutivos em paisagens dominadas por planícies e fundos de vales estreitos, grandes áreas do sudeste e sul do país são naturalmente suscetíveis a inundações. A sub-bacia do Ribeirão José Pereira, localizada no sul de Minas Gerais, mais especificamente no município de Itajubá-MG, é uma das áreas que vem sofrendo com inundações, agravadas por intervenções no curso natural do ribeirão. Em um contexto de grande carência de informações a respeito da vulnerabilidade da população exposta ao risco, o presente trabalho tem como objetivo analisar esse aspecto através do desenvolvimento e espacialização de um índice de vulnerabilidade socioambiental para a sub-bacia estudada. Os procedimentos metodológicos consistiram em: revisão de literatura e levantamento de dados georreferenciados; elaboração dos mapas temáticos das variáveis com o auxílio de geoprocessamento; avaliação da influência dos fatores condicionantes de inundações na suscetibilidade a inundações, aplicando-se o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*); avaliação da influência dos indicadores sociais, econômicos e demográficos na vulnerabilidade social através do método AHP; agregação das variáveis e elaboração dos mapas finais; e análise dos resultados. O mapa final de vulnerabilidade socioambiental a inundações demonstrou que 87,46% da sub-bacia possui vulnerabilidade muito baixa/baixa, 10,09% vulnerabilidade média e 2,48% vulnerabilidade alta/muito alta. Os resultados mostraram uma concentração de áreas de alta vulnerabilidade no perímetro urbano, onde há alta taxa de impermeabilização do solo e os maiores índices de densidade demográfica. O estudo dos indicadores sociais da sub-bacia, por sua vez, mostrou uma tendência de áreas rurais com alta vulnerabilidade social, ao mesmo tempo que evidenciou as discrepâncias sociais existentes no perímetro urbano da sub-bacia. Entende-se, portanto, que o índice de vulnerabilidade socioambiental desenvolvido pode fornecer informações em nível local e regional das populações que necessitam de um olhar mais atento do poder público, seja por estarem em situação de vulnerabilidade socioeconômica, seja por apresentarem alto grau de exposição aos riscos de inundação.

Palavras-chave: desastres naturais; Ribeirão José Pereira; AHP; SIG.

ABSTRACT

Due to the combination of extreme precipitation and/or rainfall for consecutive days in landscapes dominated by plains and narrow valley bottoms, large areas of the Brazil southeast and south regions are naturally susceptible to flooding. The Ribeirão José Pereira sub-basin, located in the south of Minas Gerais, more specifically in the municipality of Itajubá-MG, is one of these areas, suffering from floods aggravated by interventions in the natural course of the stream. In a great lack information context about the vulnerability of the population exposed to risk, the present work aims to analyze this aspect through the development and spatialization of a socio-environmental vulnerability index for the sub-basin studied. The methodological procedures consisted of: literature review and georeferenced data collection; thematic maps elaboration of the variables, using geoprocessing; influence evaluation of flood conditioning factors on flood susceptibility, applying the AHP (Analytic Hierarchy Process) method; influence evaluation of social, economic and demographic indicators on social vulnerability, through the AHP method; variables aggregation and preparation of final maps; and results analysis. The final socio-environmental vulnerability map to floods showed that 87.46% of the sub-basin has very low/low vulnerability, 10.09% medium vulnerability and 2.48% high/very high vulnerability. The results showed concentration of high vulnerability areas in the urban perimeter, where there is a high percentage of soil sealing and the highest population density indices. The study of the sub-basin social indicators, in turn, showed a trend towards rural areas with high social vulnerability, while it evidenced the existing social differences in the urban perimeter of the sub-basin. It is understood, therefore, that the developed index can provide information at the local and regional level of the populations that need more attention from the public authorities, either because they are in a socioeconomic vulnerability situation, or because they present a high degree of exposure to flood risks.

Keywords: natural disasters; Ribeirão José Pereira; AHP; GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Danos humanos por inundação na região Sudeste, no período de 1991-2012	18
Figura 3.2 - Esquema diferenciando inundação, enchente e alagamento	18
Figura 4.1 - Gráfico de precipitação média mensal no município de Itajubá no período de 1966 a 2019	31
Figura 4.2 - Mapa de localização da área de estudo	32
Figura 4.3 - Mapa hipsométrico da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	33
Figura 4.4 - Mapa de declividade da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	34
Figura 4.5 - Mapa pedológico da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	35
Figura 4.6 - Mapa de unidades litoestratigráficas da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	37
Figura 4.7 - Comparação entre a ocupação humana na porção oeste da sub-bacia entre os anos 2005 e 2021.	38
Figura 4.8 - Zoneamento urbano e áreas especiais previstas no plano diretor do município de Itajubá na porção final da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	39
Figura 4.9 - Margem do Ribeirão José Pereira em pontos da área urbana: taludes marginais (a) e processo de solapamento em algumas partes desses taludes (b)	40
Figura 4.10 - Mapa de densidade demográfica por setor censitário da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	41
Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho	43
Figura 6.1- Mapa de distâncias do Ribeirão José Pereira	54
Figura 6.2 - Mapa do ITU da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	55
Figura 6.3 - Mapa de uso e cobertura do solo da sub-bacia do Ribeirão José Pereira	58
Figura 6.4 - Mapa de suscetibilidade a inundações da sub-bacia do Ribeirão José Pereira.	62
Figura 6.5 - Ampliação do mapa de suscetibilidade a inundações em áreas de interesse.	63
Figura 6.6 - Mapas das variáveis sociais envolvidas no IVS com seus valores normalizados.	65
Figura 6.7 - Mapa de vulnerabilidade social da sub-bacia do Ribeirão José Pereira.	67
Figura 6.8 - Distribuição espacial da densidade demográfica após normalização.	68

Figura 6.9 - Mapa de vulnerabilidade socioambiental a inundações da sub-bacia do Ribeirão José Pereira.....	69
Figura 6.10 - Detalhamento do IVSA em setores no perímetro urbano da sub-bacia: “A” a “D”.	71
Figura 6.11 - Detalhamento do IVSA em setores no perímetro urbano da sub-bacia: “E” a “H”	72
Figura 6.12 - Detalhamento do IVSA em setores na área rural da sub-bacia: “I” a “L”	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Condicionantes naturais e antrópicos utilizados em estudos de mapeamento de suscetibilidade a inundações.....	26
Tabela 3.2 - Escala de preferência entre dois parâmetros no AHP	29
Tabela 3.3 - Índices de Consistência Aleatória	30
Tabela 4.1 - Indicadores sociais, econômicos e demográficos da sub-bacia do ribeirão José Pereira	42
Tabela 5.1 - Variáveis adotadas no mapeamento da vulnerabilidade socioambiental	51
Tabela 5.2 - Funções fuzzy utilizadas na normalização dos indicadores	52
Tabela 6.1 - Matriz de Confusão	56
Tabela 6.2 - Métricas Precision, Recall e F-score detalhadas por classe	57
Tabela 6.3 - Matriz de comparação par a par das classes dos fatores condicionantes de inundações	60
Tabela 6.4 - Matriz de comparação par a par dos fatores condicionantes de inundações	61
Tabela 6.5 - Matriz de comparação par a par dos fatores envolvidos na vulnerabilidade social	66

ABREVIACÕES

AHP - Processo Hierárquico Analítico (do inglês *Analytic Hierarchy Process*)

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CEPED - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

hab - habitantes

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEXP - Índice de Exposição Populacional

ISI - Índice de Suscetibilidade a Inundações

ITU - Índice Topográfico de Umidade

IVS - Índice de Vulnerabilidade Social

IVSA - Índice de Vulnerabilidade Socioambiental

MDE - Modelo Digital de Elevação

MS - *Mean Shift*

OTB - *OrfeoToolbox*

SGB - CPRM - Serviço Geológico do Brasil

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SM - Salário-Mínimo

SVM - *Support Vector Machine*

WLC - *Weighted Linear Combination*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Geral.....	16
2.2	Específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Inundações	17
3.2	Vulnerabilidade socioambiental a inundações.....	19
3.2.1	Dimensão ambiental da vulnerabilidade a inundações.....	20
3.2.1.1	Condicionantes naturais	20
3.2.1.2	Condicionantes antrópicos	21
3.2.2	Dimensão social da vulnerabilidade a inundações	22
3.3	Metodologias para o mapeamento da vulnerabilidade socioambiental a inundações	24
3.3.1	Condicionantes adotados em zoneamento de suscetibilidade a inundações.....	25
3.3.2	Fatores socioeconômicos e demográficos utilizados na avaliação da vulnerabilidade social das populações expostas a riscos de inundações.....	27
3.3.3	Emprego do Processo Analítico Hierárquico em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica.....	28
4	ÁREA DE ESTUDO	31
4.1	Hipsometria e declividade.....	32
4.2	Pedologia	34
4.3	Litologia.....	36
4.4	Características da cobertura do solo e expansão urbana na sub-bacia.....	37
4.5	Caracterização socioeconômica e demográfica da sub-bacia	41
5	METODOLOGIA	43
5.1	Levantamento bibliográfico	43
5.2	Elaboração da base de dados georreferenciados	44

5.3	Elaboração dos mapas temáticos	45
5.3.1	Delimitação da sub-bacia hidrográfica	45
5.3.2	Distância do rio.....	45
5.3.3	Índice Topográfico de Umidade	46
5.3.4	Uso e cobertura do solo	46
5.3.5	Variáveis socioeconômicas e demográficas	50
5.4	Mapeamento da vulnerabilidade socioambiental a inundações	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
6.1	Dimensão ambiental	54
6.2	Dimensão social	64
6.3	Vulnerabilidade socioambiental	69
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
8	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Os desastres representam uma temática cada vez mais presente no cotidiano da população, independentemente de esta residir ou não em áreas de risco. Mesmo que em um primeiro momento o termo esteja associado a terremotos, tsunamis, erupções vulcânicas, ciclones e furacões, os desastres naturais contemplam, também, processos e fenômenos mais localizados tais como inundações, subsidências, erosão e escorregamentos (AMARAL; RIBEIRO, 2009).

No Brasil, desastres de natureza hidrometeorológica relacionados a eventos extremos foram os que mais causaram danos e mortes durante o período de 1991 a 2012. Segundo dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013), o desastre natural que afetou o maior número de pessoas de 1991 a 2012 foram as estiagens e secas, cerca de 51,31% do total dos registros de desastres, seguido das enxurradas (20,66%) e inundações (12,04%).

Devido à combinação de eventos pluviométricos intensos e frequentes em paisagens dominadas por planícies, fundos de vales estreitos e encostas íngremes, grandes áreas do sudeste e sul do país são naturalmente suscetíveis a deslizamentos de terra e inundações (AMARAL; RIBEIRO, 2009; MENDES et al., 2018; MENDONÇA; SILVA, 2020). O município de Itajubá (MG) é uma dessas áreas, tendo registrado mais de 70 eventos de cheia do Rio Sapucaí, o maior deles ocorrido em 1874 e o último grande evento em 2000 (PINHEIRO, 2005). Chuvas intensas ou as mais fracas, porém por vários dias consecutivos são responsáveis por deflagrar os eventos de enchentes, inundações e alagamentos ocorridos no município (SILVA et al., 2019).

O Ribeirão José Pereira, afluente do Rio Sapucaí, também vem sofrendo frequentes inundações, agravadas por intervenções em seu curso natural, como a retificação para permitir a expansão urbana, o estrangulamento por meio de uma longa galeria e a presença de pontes subdimensionadas ao volume do fluxo d'água de eventos de cheias, que atuam como pontos de estrangulamento da vazão (CARVALHO, 2012; CPRM, 2014).

Tal cenário pode se tornar ainda mais preocupante quando se leva em conta as mudanças climáticas e o fenômeno de chuvas extremas associado, que fará com que o número de eventos de desastres induzidos pela chuva aumente (ALVIOLI et al., 2018; CHEN et al., 2019; MARENGO et al., 2020). Somado a isso, o fenômeno de intensa urbanização e o panorama de grandes desigualdades sociais no Brasil têm reduzido as alternativas habitacionais da população de baixa renda que passou a ocupar áreas mais suscetíveis a desastres naturais, sem planejamento e infraestrutura adequados (LONDE et al., 2018; ROSA FILHO, 2012).

Desse modo, mesmo que à princípio os processos naturais ameacem igualmente qualquer pessoa, na prática, a magnitude dos impactos dos desastres está diretamente ligada aos fenômenos sociais, econômicos e demográficos, entre outros, que contribuem para aumentar a vulnerabilidade e exposição da população a esses eventos (HUMMEL et al., 2016; IBGE, 2018; MENDONÇA et al., 2016). Trabalhos recentes demonstram que, na maioria das vezes, as áreas mais afetadas são de baixo padrão socioeconômico, carentes de infraestrutura básica e/ou densamente povoadas (FREIRE et al., 2014; GUERRA, 2020; MALTA et al., 2017; MARQUES et al., 2017). Esses fatores intensificam os riscos de desastres, diminuindo a capacidade de resposta e a qualidade de vida de tal parcela da população (CUTTER, 1996; FREITAS; CUNHA, 2012).

Existe no Brasil uma grande carência de informações a respeito da vulnerabilidade da população exposta ao risco, dificultando a elaboração de planos de resposta ou de gerenciamento de risco eficazes na diminuição dos prejuízos causados por esses eventos (MARCHEZINI; FORINI, 2019; PRATES; AMORIM, 2017). Evidencia-se, portanto, a grande importância da identificação e da caracterização da população residente em áreas suscetíveis a eventos de desastres, a fim de fornecer informações geográficas fundamentais para subsidiar ações de redução de danos humanos, ambientais, sociais e econômicos (GUERRA, 2020; KOKS et al., 2015)

Diante desse contexto e conhecendo-se o processo de urbanização crescente verificado na bacia do Ribeirão José Pereira, com zonas de expansão previstas pelo poder público local através da Lei nº 3352/2019 (ITAJUBÁ, 2019; SANTOS et al., 2021), o presente trabalho visa mapear áreas quanto à vulnerabilidade socioambiental a inundações, considerando os fatores atuantes na sub-bacia do Ribeirão José Pereira, localizada no município Itajubá-MG. O mapeamento realizado terá como referência o ano de 2010, visto que os dados sociodemográficos mais recentes do Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) datam desse ano. Espera-se que a análise realizada seja capaz de auxiliar o poder público local no desenvolvimento de políticas públicas para aumentar a resiliência dos moradores da região e na implantação de obras e serviços para a redução de riscos a essa tipologia de desastre.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a vulnerabilidade socioambiental a inundações da sub-bacia do Ribeirão José Pereira, Itajubá (MG), com auxílio de geoprocessamento.

2.2 Específicos

- Identificar as variáveis demográficas, sociais, econômicas e ambientais que influenciam na vulnerabilidade socioambiental a inundações na sub-bacia do Ribeirão José Pereira;
- Avaliar a influência de cada uma dessas variáveis na vulnerabilidade através da utilização do Processo Hierárquico Analítico (AHP);
- Desenvolver e espacializar um índice de vulnerabilidade socioambiental a inundações para a sub-bacia do Ribeirão José Pereira.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico cujos principais tópicos compreendem uma revisão sobre as inundações e os fatores condicionantes de sua ocorrência, conceitos relacionados a desastres, além de metodologias utilizadas no mapeamento de áreas vulneráveis a essa tipologia de desastre.

3.1 Inundações

As inundações ocorrem quando as águas dos rios, ribeirões e córregos ultrapassam o leito de escoamento em virtude da falta de capacidade de transporte desses sistemas, ocupando áreas utilizadas para fins de moradia, transporte, lazer, indústria, entre outros (TUCCI, 2003). Tais eventos podem ser decorrentes do comportamento natural dos rios ou agravados pela ação antrópica, através do processo de impermeabilização das superfícies e da canalização dos rios (TUCCI, 2012).

As inundações têm sido uma grande preocupação em diversas regiões do mundo devido à grande quantidade de perdas sociais e econômicas, incluindo mortes (HOSSAIN; MENG, 2020). Há uma tendência, no entanto, do aumento dos riscos de inundação, em frequência e gravidade, devido aos impactos das mudanças globais no clima e o consequente aumento de eventos extremos de chuva, além da pressão sobre o uso do solo por meio da urbanização (DIHN et al., 2012; OUMA; TATEISHI, 2014).

No Brasil, a região Sudeste foi a mais afetada por inundações no período de 1991-2012, segundo dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013), registrando 34% do total de eventos do período, totalizando 1.615 ocorrências. Somente o Estado de Minas Gerais foi responsável por 1.050 (65%) dos registros oficiais, com cerca de 61% (521) dos municípios do Estado sendo atingidos por eventos de inundação.

Devido ao alto adensamento populacional e à heterogeneidade das condições socioeconômicas existentes, a região Sudeste apresenta-se também como a mais afetada, superando 6 milhões de pessoas atingidas por danos diretos ou indiretos de eventos de inundação entre 1991 e 2012 (CEPED, 2013). Como pode ser observado no gráfico da Figura 3.1, as inundações deixaram 76.439 pessoas desabrigadas (pessoas que necessitam de abrigo provido pelo poder público) e levaram a 177 mortes.

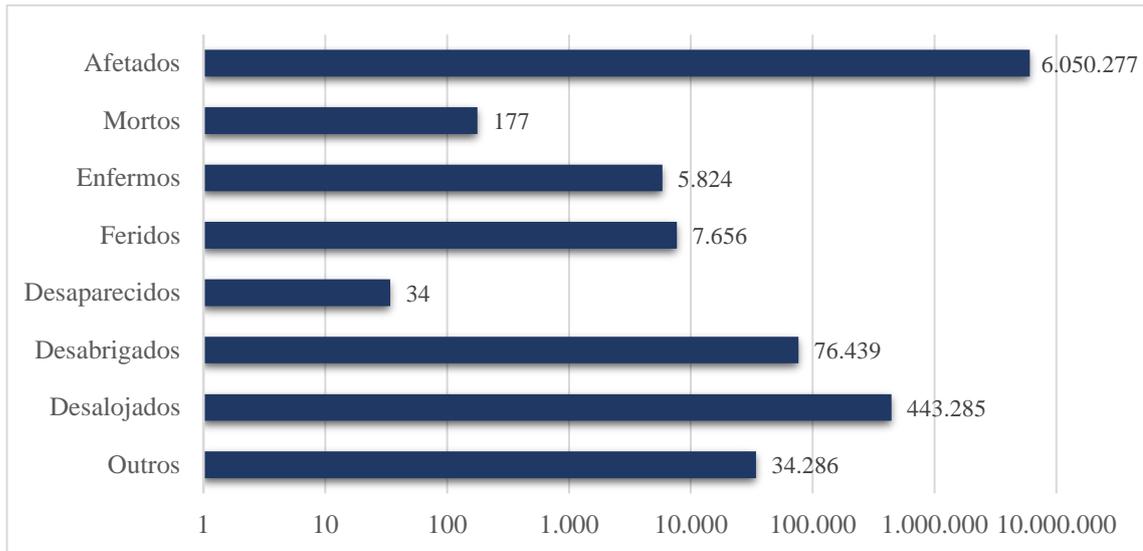


Figura 3.1 - Danos humanos por inundação na região Sudeste, no período de 1991-2012

Fonte: Brasil (2013)

Goerl e Kobiyama (2005) ressaltam, no entanto, que o termo inundação é geralmente associado a termos como enchentes, inundações graduais, inundações repentinas, inundações ribeirinhas, alagamentos, dentre outras, mas essas designações se referem a um processo similar, não representando um mesmo elemento conceitual. As enchentes ou cheias são definidas pela elevação do nível d'água no canal de drenagem devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar (AMARAL; RIBEIRO, 2009). O alagamento, por sua vez, é o acúmulo momentâneo de água no leito das ruas e nos perímetros urbanos devido a eventos de precipitações intensos, em cidades com sistemas de drenagem deficientes, como pode ser observado no esquema da Figura 3.2 (OLIVEIRA et al., 2021).

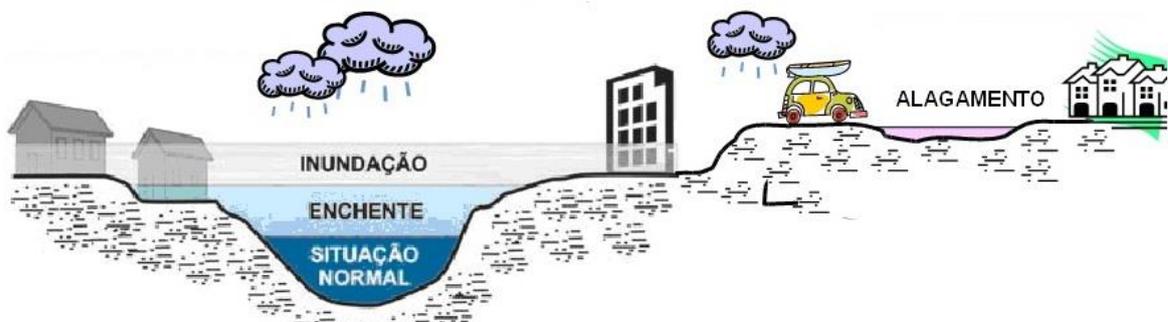


Figura 3.2 - Esquema diferenciando inundação, enchente e alagamento

Fonte: Defesa Civil de São Bernardo do Campo/SP, 2015

A tipologia de desastre que mais gera impactos na vida da população da área de estudo do presente trabalho é a inundação. Dessa forma, torna-se importante um melhor entendimento de seu processo e dos condicionantes que levam a sua ocorrência.

3.2 Vulnerabilidade socioambiental a inundações

Diversos autores definem a vulnerabilidade como um conjunto de processos e condições resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais (TINGSANCHALI, 2012; UN-ISDR 2004; VARNES, 1984).

Segundo Cutter (1996, 2011) o conceito está atrelado ao potencial para a perda, que engloba elementos de exposição ao risco (as circunstâncias que colocam as pessoas e as localidades em risco perante um determinado perigo) e de propensão (as circunstâncias que aumentam ou reduzem a capacidade da população, da infraestrutura ou dos sistemas físicos em responderem as ameaças ambientais e se recuperarem dos danos que elas causam).

Pelling (2003), por sua vez, considera três termos chaves na sua compreensão da vulnerabilidade, a saber: exposição (produto da localização física associada à condição de moradia e pressões naturais dos lugares); resistência (corresponde aos reflexos da economia e da saúde, de modo a indicar a capacidade de um indivíduo ou grupo de suportar os impactos dos riscos) e resiliência (capacidade de um indivíduo em lidar ou adaptar-se aos perigos).

Nas últimas décadas, vários estudos têm adotado, ainda, o conceito de vulnerabilidade socioambiental (ALVES, 2006; FREIRE et al., 2014; GUIMARÃES et al., 2014; MALTA et al., 2017; MALTA; COSTA, 2021; MENDONÇA, 2011) que pode ser definida como a coexistência, cumulatividade ou sobreposição espacial de situações de pobreza/privação social e de situações de exposição a risco e/ou degradação ambiental (ALVES, 2006). Tal conceito possibilita a identificação de situações geográficas distintas, visto que, principalmente no meio urbano, existem diferentes condições de exposição e de fragilidade de grupos sociais aos riscos (MENDONÇA, 2011; MENDONÇA et al., 2016)

No presente trabalho o conceito de vulnerabilidade socioambiental a inundações será construído por meio de duas dimensões da vulnerabilidade: a ambiental, relativa à suscetibilidade a inundações; e a social, que está relacionada aos fatores que aumentam ou reduzem a capacidade da população em se recuperar e responder a esses eventos. A definição de suscetibilidade adotada, foi a apresentada por Silva (2014), em que a suscetibilidade é entendida como sendo a disposição, a tendência ou a sensibilidade que uma determinada área geográfica tem em sofrer uma tipologia de desastre. Sendo assim, para que a suscetibilidade a

inundações de qualquer área seja avaliada, são necessárias análises detalhadas de fatores naturais e antrópicos do meio físico-biótico que condicionam sua ocorrência, fatores esses que serão descritos na seção 3.2.1. Já os fatores que influenciam na capacidade da população em enfrentar os eventos de desastres e o pós-desastre serão abordados na seção 3.2.2.

3.2.1 Dimensão ambiental da vulnerabilidade a inundações

A ocorrência de eventos de inundação está condicionada a uma combinação entre fatores naturais e antrópicos do ambiente. Os fatores naturais se referem às variáveis topográficas, hidrológicas e geológicas que permitem compreender a dinâmica de escoamento da água (TEHRANY et al., 2017). Já os condicionantes antrópicos são resultado de intervenções humanas diretas ou indiretas nas bacias hidrográficas, como processos de impermeabilização do solo, ocupação de planícies de inundação e construção de sistemas de drenagem deficientes (LEITE; ROCHA, 2016).

As propriedades físicas e bióticas da bacia são, portanto, elementos fundamentais na regulação de seus processos hidrológicos, visto que influenciam na taxa de infiltração, no volume de água produzido, na taxa de evaporação da bacia, entre outros (LOPES et al., 2018). Dessa forma, torna-se importante conhecer esses condicionantes e suas influências nos processos de inundação.

3.2.1.1 Condicionantes naturais

Segundo Amaral e Ribeiro (2009), entre os condicionantes naturais de inundações, destacam-se: formas do relevo; características da rede de drenagem da bacia hidrográfica; intensidade, quantidade, distribuição e frequência das chuvas; características do solo e o teor de umidade; e presença ou ausência da cobertura vegetal.

As formas de relevo constituem um importante fator no grau de severidade das inundações e na categorização de áreas propensas a esses eventos (WOODROW et al., 2016). Encostas íngremes dificultam o processo de infiltração da água, fazendo com que regiões de baixa elevação em vales encaixados recebam o escoamento superficial em um curto período de tempo, o que favorece inundações bruscas (TEHRANY et al., 2014). Vales abertos com extensas planícies e terraços fluviais, por sua vez, predisõem inundações mais lentas (graduais), devido ao menor gradiente de declividade das vertentes do entorno (AMARAL; RIBEIRO, 2009).

Já o tipo de solo exerce influência no grau de infiltração da água, impactando na geração do escoamento superficial e, conseqüentemente, no processo de inundação (COSBY et al., 1984; RAHMATI et al., 2016). A transferência de fluidos no perfil do solo ocorre através de sua rede de poros, e está diretamente relacionada a propriedades físicas como densidade, condutividade hidráulica, textura, tamanho de poros, composição mineral e conteúdo de matéria orgânica, entre outras (PLA et al., 2017; SOUZA et al., 2019). Essa transferência pode, ainda, ser regulada pelo grau de umidade no solo: quando o abastecimento de água ocorre em uma taxa que excede a capacidade de infiltração, ocorre a saturação de água no solo, e o excesso de volume não consegue ser drenado, ocupando a planície de inundação dos cursos d'água (HUANG et al., 2013; TUCCI, 2003).

A vegetação também apresenta importante papel nas características físicas e hidrológicas dos solos, refletindo, conseqüentemente, na dinâmica hídrica. A ausência de cobertura vegetal leva a uma redução tanto na quantidade de infiltração de água no solo quanto no armazenamento subterrâneo, não apenas influenciando o padrão e volume de vazão, mas também contribuindo para aumentar a erosão do solo e assoreamento nos cursos d'água (BONELL, 2005; OLIVEIRA et al., 2014).

3.2.1.2 Condicionantes antrópicos

Os condicionantes antrópicos, aqueles provocados pela ação humana e que impactam diretamente os cursos d'água, estão relacionados a: uso e ocupação irregular das planícies e margens dos cursos d'água; disposição irregular de lixo; intervenção antrópica nos cursos d'água; e intenso processo de erosão dos solos e de assoreamento dos cursos d'água (AMARAL; RIBEIRO, 2009).

Ainda que processos geológicos e hidrológicos façam parte da dinâmica natural da superfície terrestre, a combinação com a intensificação da ocupação urbana em áreas suscetíveis, a exemplos de planícies de inundação e encostas declivosas, resulta em sistemas vulneráveis a deslizamentos e inundações (SAITO et al., 2019). No caso das inundações, conforme a ocupação humana impermeabiliza o solo e acelera o escoamento através de condutos e canais, aumenta-se o volume de água que atinge ao mesmo tempo o sistema de drenagem, produzindo inundações com frequência maior do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava no ambiente natural (TUCCI, 2003; MOREIRA; OLIVEIRA, 2017).

Em um estudo na cidade de Pequim, na China, Yang et al. (2016) verificaram que devido às mudanças no uso do solo na região, a área inundada expandiu de 281 km² em 1991 para 1.070 km² em 2011 e houve um aumento de 90% da frequência de inundações com profundidades de submersão superiores a 2 m, evidenciando que a transição de um tipo de uso menos impermeável para outro impermeável pode afetar a propagação da inundação, levando a uma zona de inundação maior.

Outros tipos de cobertura também podem influenciar no processo de infiltração de água no solo. Em estudo sobre a influência de diferentes tipos de vegetação em bacias hidrográficas na Amazônia Oriental, Schuler (2003) observou redução da condutividade hidráulica e da porosidade do solo em condições de pastagem, em comparação com regiões de floresta, levando ao aumento do escoamento superficial. Um fator determinante na restrição da capacidade de infiltração em áreas de pastagem consiste no constante pisoteio dos animais que, além de compactar as camadas superficiais do solo, também pode causar o depósito de sedimentos em rios próximos às áreas de pasto (MINOSSO et al., 2017; SILVA, 2021).

Esse acúmulo de sedimentos na calha de rios (assoreamento) provoca alterações na capacidade de escoamento do leito, interferindo na vazão dos cursos d'água (NUNES et al., 2014). As retificações e as canalizações, por sua vez, também exercem interferência em aspectos hidrodinâmicos dos rios. Com a eliminação dos meandros existentes em alguns cursos d'água, os quais reduzem gradualmente a velocidade da água, ocorre a concentração do fluxo em pouco tempo, gerando inundações mais bruscas (AMARAL; RIBEIRO, 2009; PINTO, 2019).

O gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos nas cidades também é um fator que pode levar ao assoreamento dos cursos d'água e a impactos negativos na drenagem urbana (SILVA et al., 2020a). Muitas vezes disposto de maneira irregular, o lixo produzido e não coletado provoca efeitos indesejáveis como o seu deslocamento para rios e córregos, obstrução de bocas de lobo e galerias de águas pluviais, além de mau cheiro e proliferação de doenças, constituindo um grave problema para a saúde pública e reduzindo a capacidade de drenagem das bacias hidrográficas (ÁBALOS et al., 2012).

3.2.2 Dimensão social da vulnerabilidade a inundações

Embora seja necessário entender os sistemas e processos naturais que dão origem aos riscos, não se pode compreender completamente o impacto de tais eventos, a menos que se examine a forma como esses sistemas interagem com a população (CUTTER, 2011). Segundo

Freire et al. (2014), as características de vulnerabilidade de uma determinada população estão associadas às relações macro e microsociais que podem ampliar ou reduzir as suas defesas contra os perigos de natureza variada. Tais relações englobam a dinâmica do ordenamento territorial, o acesso aos recursos naturais, aos bens materiais, aos serviços de infraestrutura e outros serviços públicos (BLAIKIE et al., 1996; CONFALONIERI et al., 2009; PROAG, 2014). Especificamente, no contexto brasileiro, a pobreza e as disparidades sociais contribuem para intensificar a vulnerabilidade aos eventos hidrometeorológicos, como as inundações (FREIRE et al., 2014; HUMMEL et al., 2016).

Na literatura existente, uma série de fatores sociodemográficos e socioeconômicos são definidos como determinantes na vulnerabilidade social. Rufat et al. (2015) realizaram uma meta-análise de 67 estudos de caso de inundações (1997 a 2013) e identificaram que as características demográficas, o nível socioeconômico e a saúde são os principais fatores preponderantes na construção da vulnerabilidade social a inundações.

Entre as características demográficas destacam-se: idade (idosos e jovens), sexo, raça, migrantes recentes e famílias monoparentais. A idade influencia no caso dos mais vulneráveis e dependentes, tais como crianças, idosos e doentes (CUTTER et al., 2003; DATAR et al., 2013). Em eventos de desastre, o tempo necessário para evacuar famílias com crianças é superior, enquanto os idosos e doentes são mais vulneráveis por terem uma mobilidade limitada (ALVINO-BORBA et al., 2020; KOKS et al., 2015). Em relação aos migrantes, sobretudo os que chegaram ao país recentemente, a vulnerabilidade é acentuada pela falta de adaptação e as possíveis barreiras cultural e de linguagem (FEKETE, 2009; KOKS et al., 2015). Já as famílias monoparentais, frequentemente apresentam limitação financeira para terceirizar assistência aos dependentes e, por isso, precisam conciliar trabalho externo com o cuidado dos dependentes no pós-desastre (BLAIKIE et al., 1994; CUTTER et al., 2003).

Os indicadores de status socioeconômico mais comuns, por sua vez, englobam: renda familiar, pobreza, desemprego, alfabetização e desigualdade. A renda familiar, a pobreza e o desemprego são fatores importantes a serem considerados à medida que a capacidade da população para lidar com os danos através de precaução, mitigação e prevenção de desastres cresce com a melhoria da situação econômica (ALVINO-BORBA et al., 2020; BLAIKIE et al., 1994). Além disso, as populações mais pobres e marginalizadas não só vivem, muitas vezes, em zonas altamente expostas, com menos oportunidades de emprego e moradia, mas também são menos protegidas pelo poder público, recebendo assistência ineficiente para a mitigação e recuperação de desastres (GAMBA; RIBEIRO, 2012; RUFAT et al., 2015).

Por fim, a ligação da vulnerabilidade com a saúde está no fato de que em condições de vulnerabilidade, não somente são maiores os riscos de sofrer doenças, lesões e óbitos com os desastres, mas que seus efeitos vão para além dos imediatos, prolongando-se no tempo e perpetuando condições de vida e saúde precárias (ALDERMAN et al., 2012; FREIRE et al., 2014). Segundo Freitas et al. (2014), a longo prazo (entre meses e anos), os desastres podem gerar diversos impactos à saúde da população, como: transtornos psicossociais e comportamentais, doenças cardiovasculares, desnutrição e a intensificação de doenças crônicas, o que evidencia que as ações requeridas para redução de danos devem incluir não só o período dos impactos imediatos, mas também os períodos maiores, dada a importância de recuperação e reconstrução das condições de vida e saúde em situação melhor do que a anterior ao desastre.

Rufat et al. (2015) salientam, no entanto, que a influência das causas da vulnerabilidade social pode variar significativamente de acordo com o estágio do desastre e o cenário local, demonstrando a importância do contexto na compreensão dos precursores, processos e resultados da vulnerabilidade social. Dessa forma, entende-se que o estudo e, mais especificamente, o mapeamento da vulnerabilidade é instrumento essencial na identificação da população sob maior risco e, sobretudo, na adoção de medidas de adaptação ou proteção da população.

3.3 Metodologias para o mapeamento da vulnerabilidade socioambiental a inundações

Nas últimas décadas tem sido dada atenção significativa ao desenvolvimento de ferramentas com o intuito de mensurar a vulnerabilidade das comunidades a desastres naturais, principalmente indicadores que integrem as dimensões da vulnerabilidade, por apresentarem grande potencial como instrumento de políticas públicas e comunicação (BECCARI, 2016; CUTTTER; MORATH, 2013).

Diversos estudos, com diferentes metodologias, têm sido desenvolvidos ao redor do mundo com o objetivo de elucidar o cenário da vulnerabilidade das populações e auxiliar na gestão de riscos a inundações, a exemplo dos trabalhos de Balica et al. (2009), Bertilsson et al. (2019), Eini et al. (2020), Guerra (2020), Koks et al. (2015), Marques et al. (2017), Prates e Amorim (2017), Rezende et al. (2020) e Tapsell et al. (2002). No presente trabalho, o mapeamento da vulnerabilidade socioambiental a inundações foi realizado utilizando-se o Processo Hierárquico Analítico (AHP), produtos de Sensoriamento Remoto e técnicas e ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Segundo Marques et al. (2017), o emprego de AHP em ambiente SIG proporciona resultados satisfatórios na avaliação de padrões espaciais da distribuição das áreas de risco, bem como dos fatores ambientais e socioeconômicos preponderantes na vulnerabilidade socioambiental a inundações. A ampla utilização de ferramentas de SIG nessa tipologia de trabalho se deve também à possibilidade da análise e espacialização geográfica dessas variáveis de forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos e tempo (ZANATA et al., 2012) e, assim, facilitando a identificação das áreas que necessitam de atenção e de gestão específica (PRATES; AMORIM, 2017).

Nas próximas sessões serão abordados os principais condicionantes naturais e antrópicos e fatores socioeconômicos e demográficos utilizados na avaliação da vulnerabilidade socioambiental a inundações, bem como a fundamentação teórica da metodologia empregada no seu mapeamento.

3.3.1 Condicionantes adotados em zoneamento de suscetibilidade a inundações

Inúmeros estudos têm realizado o mapeamento de suscetibilidade a inundações a partir das características naturais e antrópicas de suas regiões de estudo, envolvendo características hidrológicas, geológicas, topográficas, pedológicas, relacionadas à cobertura do solo, entre outros. Na Tabela 3.1 podem ser observados alguns dos condicionantes utilizados em trabalhos nacionais e internacionais. Observa-se que variados estudos vêm utilizando condicionantes topográficos que apresentam forte influência nos processos de escoamento superficial e infiltração, tais como: declividade; altitude; curvatura; Índice Topográfico de Umidade (ITU); Índice de Potência de Escoamento (IPE); Índice de Transporte de Sedimento (ITS) e Índice de Rugosidade do Terreno (IRT).

A declividade e as formas de relevo são fatores que tem efeito direto no escoamento superficial e infiltração, além de ter um papel decisivo na erosão do solo (AMARAL; RIBEIRO, 2009; CHAVES et al., 2021). Entre os índices topográfico-hidrológicos, o Índice Topográfico de Umidade (ITU), do inglês *Topographic Wetness Index*, é o mais comumente utilizado e descreve a tendência de uma célula em acumular água (MATTIVI et al., 2019; TEHRANY et al., 2019). Segundo Moore (1991), o ITU é definido como uma função logarítmica do quociente entre área de contribuição e a declividade, conforme apresentado na Equação 3.1, em que A_s é a área de contribuição a montante de uma determinada célula e B é a declividade dessa célula (expressa em radianos).

$$ITU = \ln\left(\frac{A_s}{\tan B}\right) \quad (3.1)$$

Tabela 3.1 - Condicionantes naturais e antrópicos utilizados em estudos de mapeamento de suscetibilidade a inundações

Condicionantes	Área de estudo	Autores
Declividade; IPE; ITU; Elevação; Curvatura, Distância do rio; Geologia; Precipitação; Uso e cobertura do solo; e tipo de solo.	Terengganu, estado federado da Malásia	Tehrany et al. (2014)
Altitude; Declividade; Curvatura; ITU; IPE; Índice de escoamento superficial; e Distância do rio	Região de Teeb, Iraque	Al-Abadi et al. (2016)
Elevação; Declividade; Uso e Ocupação do Solo; Hidrografia; Isoietas Climáticas; Geologia; e Tipo de Solo	Município de Nova Lima (MG), Brasil	Ramos et al. (2018)
Intensidade de chuva; Densidade de drenagem; Declividade; Elevação; Uso do solo; e permeabilidade do solo	Província de Sukothai, Tailândia	Seejata et al. (2018)
Elevação; Índice de escoamento superficial; Declividade; Densidade de drenagem; IPE; ITU; IRT; ITS; Distância do rio; Litologia; NDVI; Solo; Precipitação; e Cobertura do solo.	Bacia do rio Topl'a, Eslováquia	Ali et al. (2020)
Acumulação de fluxo; Precipitação anual; Declividade; Escoamento superficial; Uso e cobertura do solo; Elevação, Geologia, Tipo de solo, Distância da rede de drenagem; e Densidade de drenagem	Província de Riyadh, Arábia Saudita	Mahmoud e Gan (2019)
Elevação; Declividade; Uso do solo; Distância dos rios; Tipo de solo; NDVI; Curvatura; ITU; IPE; e ITS	Bacia do rio Bengalas, Nova Friburgo (RJ), Brasil	Freiman e Carvalho (2020)
Uso do solo; Declividade; Tipo de solo; Geologia; Geomorfologia; e Distância da hidrografia	Município de Dona Francisca (RS), Brasil	Fantinel e Benedetti (2021)

O entendimento detalhado do uso e cobertura do solo, bem como propriedades do solo, são também fundamentais no mapeamento de áreas de suscetibilidade a desastres naturais (CHAVES et al., 2021), fazendo com que condicionantes naturais e antrópicos relacionados ao solo sejam frequentemente incorporados nessa tipologia de estudo. Áreas vegetadas favorecem o processo de infiltração da água, enquanto áreas urbanas são tipicamente compostas por superfícies impermeabilizantes e solo compactado, tornando-as mais suscetíveis a inundações (MOJADDADI et al., 2017).

Um outro condicionante bastante utilizado nos estudos levantados é a distância de rios ou hidrografia. Uma vez que as inundações ocorrem ao longo dos canais dos cursos d'água, a

distância dos rios representa um condicionante geomorfológico no mapeamento de suscetibilidades (TIEN BUI et al., 2016). Quanto mais distante do rio, menor a possibilidade de um ambiente em sofrer com eventos de inundações (FREIMAN; CARVALHO, 2020).

Dados de precipitação apresentam igual importância nesses estudos, visto que chuvas intensas e/ou de longa duração favorecem a saturação dos solos, o que aumenta o escoamento superficial e a concentração de água nas áreas de várzea (AMARAL; RIBEIRO, 2009). O escoamento das águas em eventos de precipitação está, ainda, diretamente relacionado a características da bacia hidrográfica, como a densidade de drenagem, que influencia diretamente na velocidade com que a água atinge o canal principal, influenciando a ocorrência de inundações à jusante (SOUZA, 2005).

3.3.2 Fatores socioeconômicos e demográficos utilizados na avaliação da vulnerabilidade social das populações expostas a riscos de inundações

Além de fatores ambientais, tem crescido também a utilização de variáveis socioeconômicas na avaliação da vulnerabilidade das populações a inundações. Marques et al. (2017), por exemplo, realizaram uma análise espacial da vulnerabilidade socioambiental no município de Campinas-SP. Os autores integraram variáveis do ambiente (ex. hipsometria, declividade, uso e cobertura da terra e tipo de solo) com parâmetros extraídos do Censo Demográfico realizado em 2010 do IBGE (ex. densidade demográfica, soma da proporção da população com mais de 65 anos e menos de 12 anos, porcentagem de pessoas analfabetas acima de 12 anos e soma da proporção dos responsáveis sem rendimento e com rendimento de até 1 salário-mínimo).

Rezende et al. (2020), por sua vez, mapearam o risco de inundações na Bacia do Canal do Mangue, cidade do Rio de Janeiro (RJ), a partir de um índice de capacidade de recuperação socioeconômica, aliando o estudo de fatores como altura e velocidade da inundação a indicadores como altura média das construções, renda média (US\$) da população e parcelas de pessoas vulneráveis (idades menores de 15 anos e maiores de 60 anos). Já Eini et al. (2020) associaram critérios econômicos (ex. densidade de urbanização e qualidade das edificações) e sociais (ex. idade (<20 e >65 anos), população do sexo feminino, educação e emprego) a fatores como declividade, distância dos rios e precipitação em uma análise de vulnerabilidade social a inundações urbanas na cidade de Kermanshah, no Irã.

Outros indicadores utilizados em trabalhos relacionados à vulnerabilidade social e resiliência a desastres podem ser visualizados nos trabalhos de Rufat et al. (2015) e Beccari

(2016). Segundo Marchezini e Forini (2019), o estudo de variáveis como trabalho, renda, educação e condições de moradia são essenciais na análise da resiliência das populações expostas a esses riscos. O entendimento desses fatores é, ainda, fundamental para o planejamento de políticas públicas que priorizem a qualidade de vida em detrimento da reprodução de condições de desigualdade e de vulnerabilidade.

3.3.3 Emprego do Processo Analítico Hierárquico em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica

O Processo Analítico Hierárquico (AHP) vem sendo bastante utilizado em mapeamentos de áreas suscetíveis (FREIMAN; CARVALHO, 2020; GHOSH; KAR, 2018; MAHMOUD; GAN; 2018; SEEJATA et al., 2018; RAMOS et al., 2018) e vulneráveis a inundações (EINI et al., 2020; GUERRA, 2020; MALTA et al., 2017; MALTA; COSTA, 2021; MARQUES et al., 2017). A ampla utilização deve-se ao fato de a ferramenta simplificar e facilitar a atribuição de pesos às variáveis ambientais e sociais, através da comparação entre o grau de influência desses na construção da suscetibilidade e vulnerabilidade a inundações (GOSH; KAR, 2018; MALTA; COSTA, 2021).

O AHP, desenvolvido por Saaty na década de 1970, compreende a criação de uma hierarquia de decisão, composta por níveis ou classes de importância que permitem uma visão global das relações inerentes ao processo (PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012). Saaty (1990) propõe, no método AHP, a utilização de uma matriz de comparação par a par $A = [a_{ij}]_{n \times n}$, para a definição dos pesos dos fatores, em que n é o número de fatores que influenciam na tomada de decisão. A comparação entre dois fatores é realizada utilizando-se a escala de importância relativa entre duas alternativas, que varia de 1 a 9, conforme a Tabela 3.2.

Uma particularidade importante na matriz de comparações paritárias proposta por Saaty (1990) é que ela possui um tipo de simetria em relação a sua diagonal principal, de forma que: ambos os elementos tratam do julgamento entre os mesmos critérios, porém, um julgamento é o inverso do outro, indicando $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Isso significa que se o valor $a_{ij} = 5$, tem-se que o critério i é 5 vezes mais importante que o critério j ou que o critério i possui importância essencial ou forte quando comparado ao critério j . Já o elemento simétrico $a_{ji} = 1/5$ indicará que o critério j possui um quinto da importância do critério i ou, da mesma forma, que o critério i possui importância essencial ou forte quando comparado ao critério j .

Tabela 3.2 - Escala de preferência entre dois parâmetros no AHP

Escala numérica	Escala verbal
1	Mesma importância
3	Importância moderada de um sobre o outro
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2, 4, 6, 8	Valores intermediários

Fonte: Ghosh e Kar (2018)

Os cálculos são realizados dividindo-se o valor a_{ij} pela soma de cada coluna correspondente (DANUMAH et al. 2016; RIMBA et al. 2017). No final, soma-se cada linha e divide-se a soma pelo número de critérios avaliados no sistema e, assim, esses valores w (que variam de 0 a 1 e possuem soma igual a 1) podem ser usados como pesos no cálculo da suscetibilidade a inundações em uma determinada área de estudo (GHOSH; KAR, 2018).

A fim de se avaliar se a matriz de julgamentos é consistente, procede-se ao cálculo do Grau de Consistência, conforme a Equação 3.2 (SAATY, 1987; DANUMAH et al., 2016; GHOSH; KAR, 2018):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.2)$$

onde:

CI é o Índice de Consistência, dado pela Equação 3.3; e

RI é o Índice de Consistência Aleatória, valores fixos usados como referência e calculados em laboratório, apresentados na Tabela 3.3, em função do número de fatores estudados (n).

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (3.3)$$

onde:

$\lambda_{m\acute{a}x}$ é o máximo autovalor, dado por $\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \left(\frac{w'_1}{w_1} + \frac{w'_2}{w_2} + \dots + \frac{w'_n}{w_n} \right)$ sendo $w' = a \times w$; onde a é o valor atribuído para cada fator na matriz de comparação par a par.

Segundo Saaty (1980), valores de CR inferiores a 0,1 indicam que não houve inconsistência nos valores atribuídos aos julgamentos, e valores superiores indicam que os julgamentos realizados precisam ser reavaliados.

Tabela 3.3 - Índices de Consistência Aleatória

n	RI	n	RI
1	0,00	6	1,24
2	0,00	7	1,32
3	0,58	8	1,41
4	0,90	9	1,45
5	1,12	10	1,49

Fonte: Saaty (1987)

Por fim, os critérios são agregados por meio de uma combinação linear ponderada, conhecida no inglês como *Weighted Linear Combination* (WLC), em que eles são associados aos seus respectivos pesos, obtendo-se um resultado ponderado no processo de tomada de decisão (BARZEHKAR et al., 2019; MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Essa combinação ponderada é dada pela Equação 3.4.

$$S = \sum_i w_i x_i \quad (3.4)$$

onde:

S é valor final do *score*;

w_i é o peso normalizado do fator i ; e

x_i é o valor normalizado do fator i .

4 ÁREA DE ESTUDO

O município de Itajubá se localiza ao sul do Estado de Minas Gerais, apresentando uma área de 294,84 km² e população estimada de 97.334 habitantes (IBGE, 2020). Assim como em diversas regiões do país, teve sua ocupação iniciada às margens dos rios, principalmente em razão da topografia local, que é caracterizada como ondulada-montanhosa (FÉLIX et al., 2019).

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima de Itajubá é o Cwa, isto é, clima temperado úmido com inverno seco e verão quente (REBOITA et al., 2013, 2016). A temperatura média do mês mais quente é superior a 22° C e o total médio anual de chuvas é de aproximadamente 1375 mm, sendo que cerca de 80% desse valor ocorre entre os meses de outubro a março (ANA, 2019; REBOITA et al., 2016). Como pode ser observado através da Figura 4.1, há predominância de índices pluviométricos superiores a 150 mm nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, período no qual é comum a ocorrência de inundações nos vales adjacentes aos rios, enquanto o período mais seco se estende de julho a agosto.

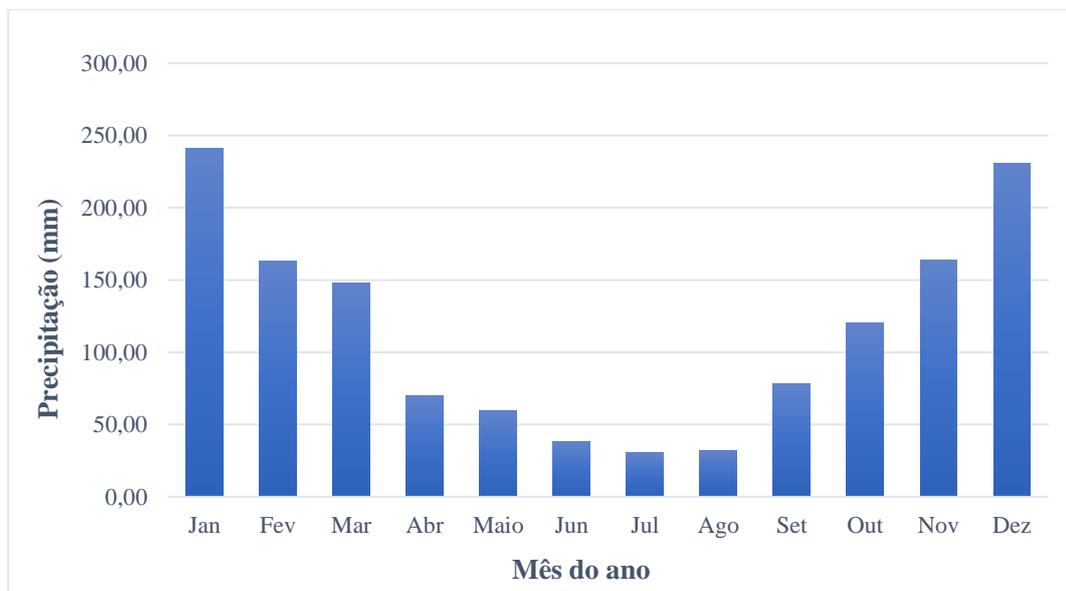


Figura 4.1 - Gráfico de precipitação média mensal no município de Itajubá no período de 1966 a 2019

Fonte: ANA (2019)

A sub-bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira, área de estudo do presente trabalho, está localizada integralmente no município de Itajubá, entre as coordenadas 45° 20' 58'' - 45° 27' 37'' W e 22° 23' 18'' - 22° 27' 01'' S (Figura 4.2). Apresenta uma área de 39,54 km² e é delimitada ao sul pela Serra da Pedra Amarela, a leste, pela Serra da Água Limpa, a norte, pelas serras do Juru e dos Toledos, e a oeste por pequenos divisores que a separam da bacia do rio Sapucaí (FLAUZINO, 2012).

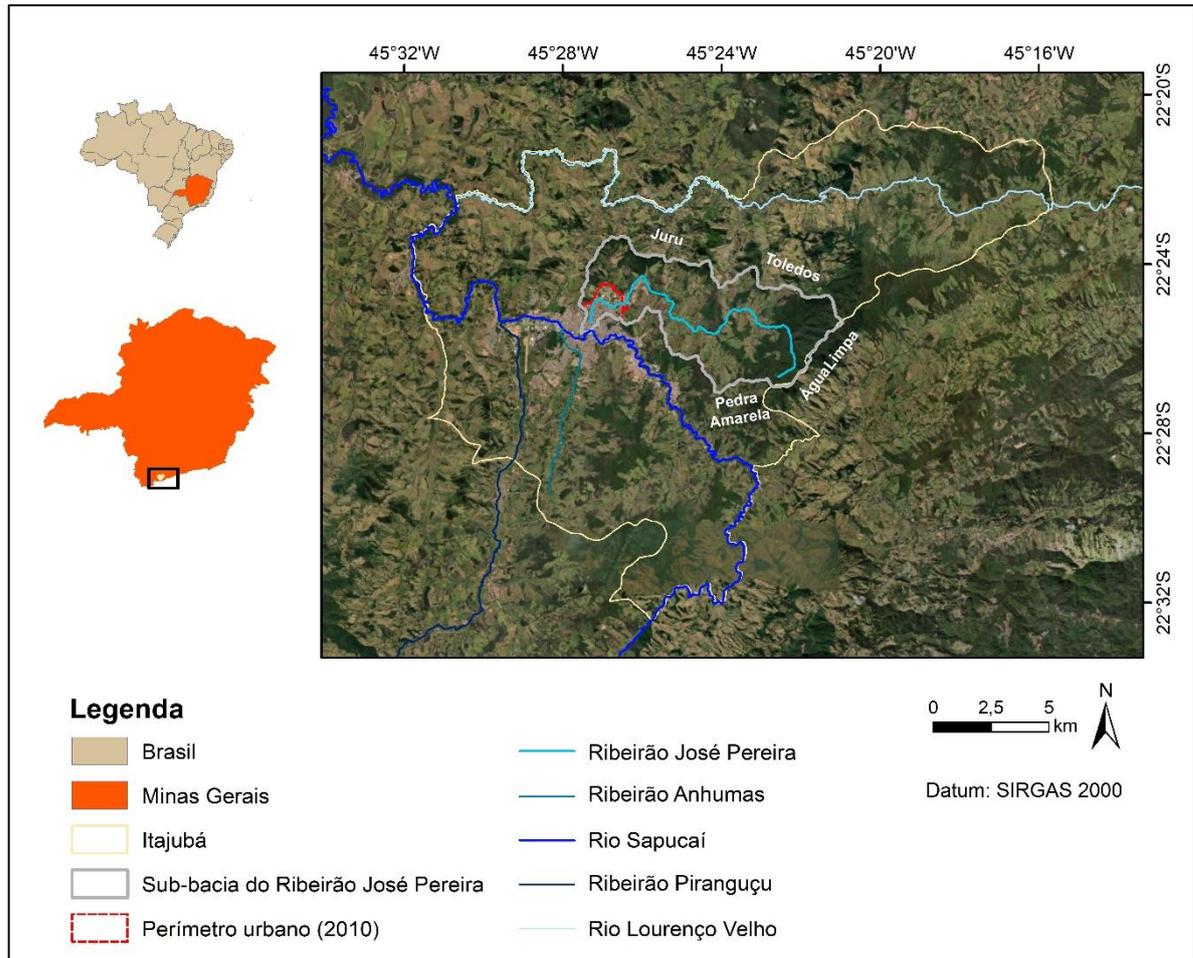


Figura 4.2 - Mapa de localização da área de estudo

O Ribeirão José Pereira nasce na Reserva Biológica Municipal Serra dos Toledos, atravessa os bairros urbanos Cruzeiro, Pinheirinho, BPS e Centro, desaguando no rio Sapucaí na área comercial de Itajubá. A sub-bacia apresenta três contextos: o rural, representado por propriedades que utilizam suas águas para irrigação, dessedentação animal e lançamento de efluentes; o urbano, caracterizado pela ocupação na planície de inundação do ribeirão e por importantes intervenções antrópicas em seu curso natural, como por exemplo, a retificação, com a finalidade de permitir a expansão urbana da cidade de Itajubá (CARVALHO, 2012); e um importante contexto de conservação ambiental, representado pela Reserva Biológica Municipal Serra dos Toledos, uma Unidade de Conservação de Proteção Integral.

4.1 Hipsometria e declividade

A altitude da sub-bacia varia entre 845 e 1.767 m, sendo que a região leste possui as maiores altitudes, onde se encontram a Serra da Água Limpa e a Serra dos Toledos. Na porção oeste, por sua vez, ocorrem as menores altitudes, entre 845 e 1.100 m, onde está situado o

núcleo urbano (PONS et al., 2018). Pode-se observar pela Figura 4.3, que o Ribeirão José Pereira se encontra em altitudes inferiores a 900 m no perímetro urbano, enquanto para leste, as elevações podem chegar a 1700 metros, gerando um desnível entre a cabeceira e a foz de até 800 metros.

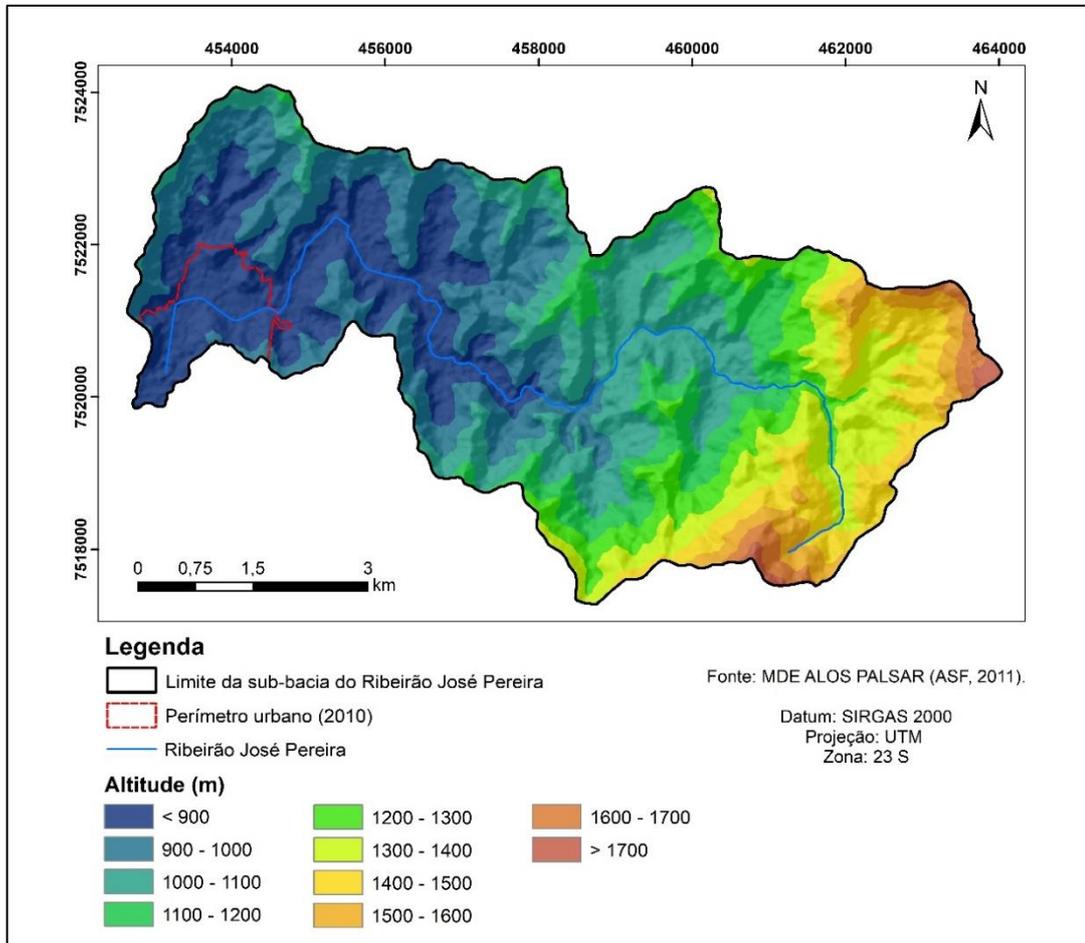


Figura 4.3 - Mapa hipsométrico da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Em relação à declividade, verifica-se pelo mapa da Figura 4.4, que as encostas com declive entre 20 e 45%, que caracterizam relevo forte ondulado segundo a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1979), ocupam 48,84% da área da sub-bacia. No perímetro urbano há predominância de relevo com declividades de até 20%. Já as encostas com inclinações superiores a 70% (relevo escarpado), ocorrem, em geral, na porção sudeste da sub-bacia.

Áreas mais planas podem sofrer influência direta da dinâmica dos cursos d'água, podendo englobar terraços fluviais e planícies de inundação e áreas em topos de morro aplainados (DANTAS, 2010). Já as áreas com inclinação superior a 30° (~51%) são

consideradas de uso restrito pelo Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), sendo mais propensas ao desenvolvimento de processos geodinâmicos diversos. A mesma legislação ainda define as encostas com declividade superior a 45°, equivalente a 100%, na linha de maior declive, como Áreas de Preservação Permanente (BRASIL, 2012). A declividade se destaca, portanto, como um fator para a aprovação de ocupação de áreas urbanas, devendo ser analisados em escala compatível para a tomada de decisão em nível local ou pontual (SOUZA; SOBREIRA, 2015).

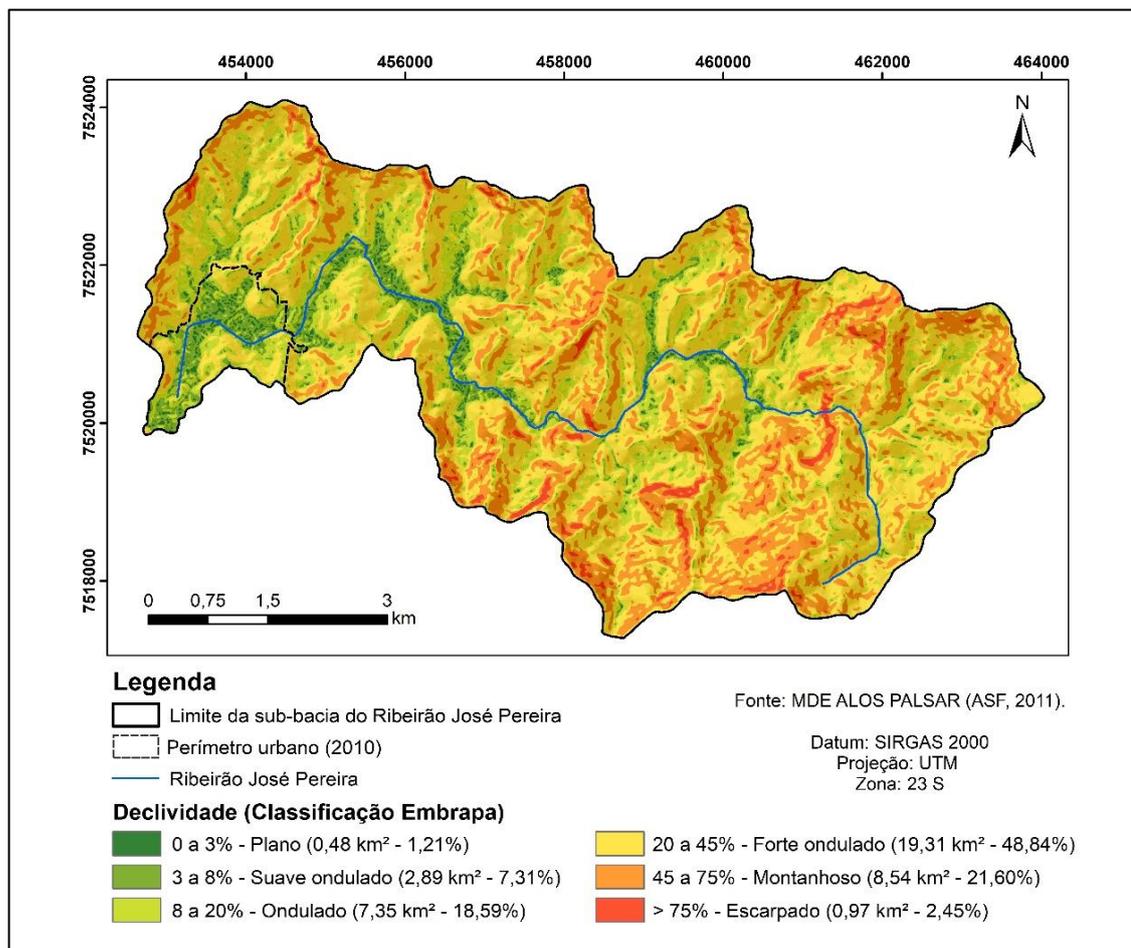


Figura 4.4 - Mapa de declividade da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

4.2 Pedologia

Segundo o mapeamento pedológico realizado por Lima (2012), a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira possui seis diferentes tipos de solo, distribuídos em relevos distintos. Como pode ser observado no mapa de solos (Figura 4.5), os Argissolos constituem a classe de solo que ocupa a maior área na sub-bacia (55,20%), predominantemente nas subordens de Vermelho e Vermelho-Amarelo e ocupando o relevo ondulado e forte ondulado. A

profundidade efetiva média encontrada por Lima (2012) foi de 1,6 m. Argissolos Vermelho-Amarelos de textura argilosa ou média/argilosa podem ser classificados como moderadamente a bem drenados, sendo que em solos de textura argilosa, a água é drenada com mais facilidade, porém não rapidamente (IBGE, 2007).

Os Cambissolos Háplicos estão presentes em 26,31% da área, predominando no relevo montanhoso, principalmente topos de encosta, onde os processos de intensa erosão não permitem o aprofundamento e envelhecimento do perfil, o que explica a profundidade efetiva média de 1 m, e horizonte B incipiente com espessura média de apenas 30 cm. A textura encontrada foi média a argilosa e a fertilidade natural figura os solos como distróficos e eutróficos.

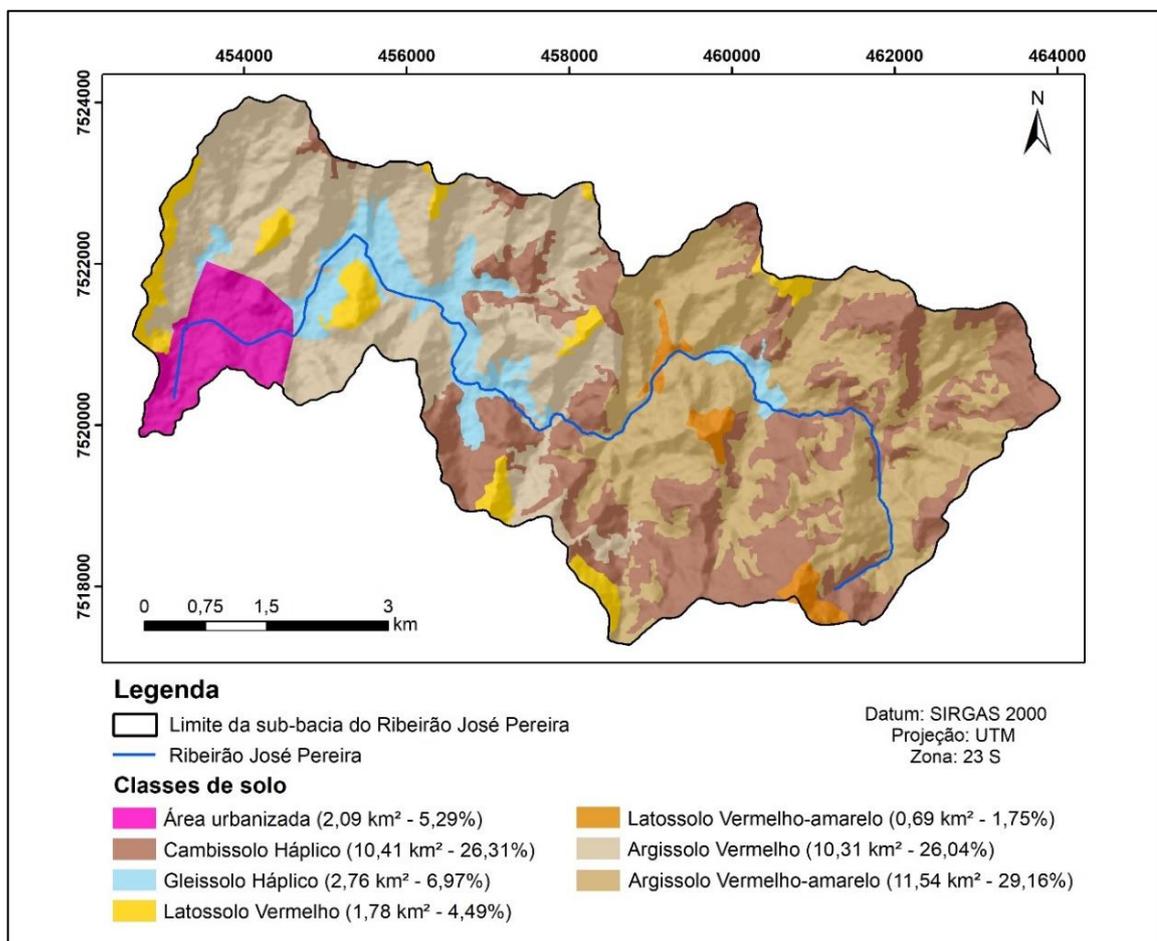


Figura 4.5 - Mapa pedológico da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Fonte: Adaptado de Lima (2012)

Os Gleissolos Háplicos ocupam 6,97% da sub-bacia, principalmente áreas baixas, onde se formam zonas de acúmulo de água, condicionando um ambiente hidromórfico. Além disso, essa classe de solos também está presente em vales suspensos da área de estudo. Sob o ponto

de vista geotécnico, são solos saturados que ocorrem em relevo plano e, em vários casos, sujeitos a alagamentos em épocas de precipitação mais intensa (ANTUNES et al., 2013).

Segundo Lima (2012), na sub-bacia os perfis de Gleissolos estão situados em drenagem deficiente, em presença de lençol freático próximo à superfície, em média a 70 cm. O horizonte glei possui baixa a média fertilidade, portanto, distróficos, estrutura maciça, textura média, sendo a classe de solo com maior porcentagem de areia e menor de argila. No geral, as cores de fundo são cinzentas ou acinzentadas e com presença de mosqueados.

Os Latossolos predominaram no relevo plano-ondulado, principalmente nos topos de morros, ocupando 6,24% da área. Em geral, apresentam baixa fertilidade, distróficos e com profundidade efetiva média de 2 m, constituindo a classe com estágio de intemperismo mais avançado na sub-bacia. Apresentam horizonte latossólico com estrutura granular e algumas subangulares, de grau moderado a forte, textura média no horizonte superficial e argilosa nos demais. Latossolos vermelhos de textura média e argilosa encontram-se nas classes de solo fortemente e acentuadamente drenado, respectivamente, sendo solos bem permeáveis nos quais a água é removida rapidamente (IBGE, 2007).

4.3 Litologia

De acordo com o levantamento geológico elaborado por Trouw et al. (2008) e disponibilizado pelo Serviço Geológico de Brasil (SGB - CPRM), a sub-bacia do Ribeirão José Pereira está localizada sobre quatro unidades litoestratigráficas, apresentadas na Figura 4.6.

Os depósitos aluvionares são, em especial, sedimentos inconsolidados aluvionares, especialmente bem desenvolvidos nas bacias de rios, além de depósitos de tálus adjacentes às escarpas das serras e de colúvios que cobrem grandes áreas de embasamento. Já o granito da Serra dos Coelhoos que ocorre em 15,51% da área da bacia, principalmente na região da Serra da Água Limpa, constitui um corpo com dimensões quilométricas, alongado na direção nordeste-sudoeste, encaixado em gnaisses de outras unidades do Complexo Varginha-Guaxupé (TROUW et al., 2008).

No Complexo Varginha-Guaxupé, por sua vez, que ocupa quase 76% da sub-bacia, ocorrem gnaisses neoproterozóicos, de origem ígnea e sedimentar. Além disso, apresenta-se em duas subdivisões: Unidades Ortognáissica Migmatítica Intermediária e Paragnáissica Migmatítica Superior. A primeira é composta por Hornblenda biotita ortognaisses e Biotita ortognaisse, de composição granodiorítica a tonalítica. A segunda apresenta em sua

composição: biotita, quartzo, microclina, plagioclásio, granada e silimanita (TROUW et al., 2008).

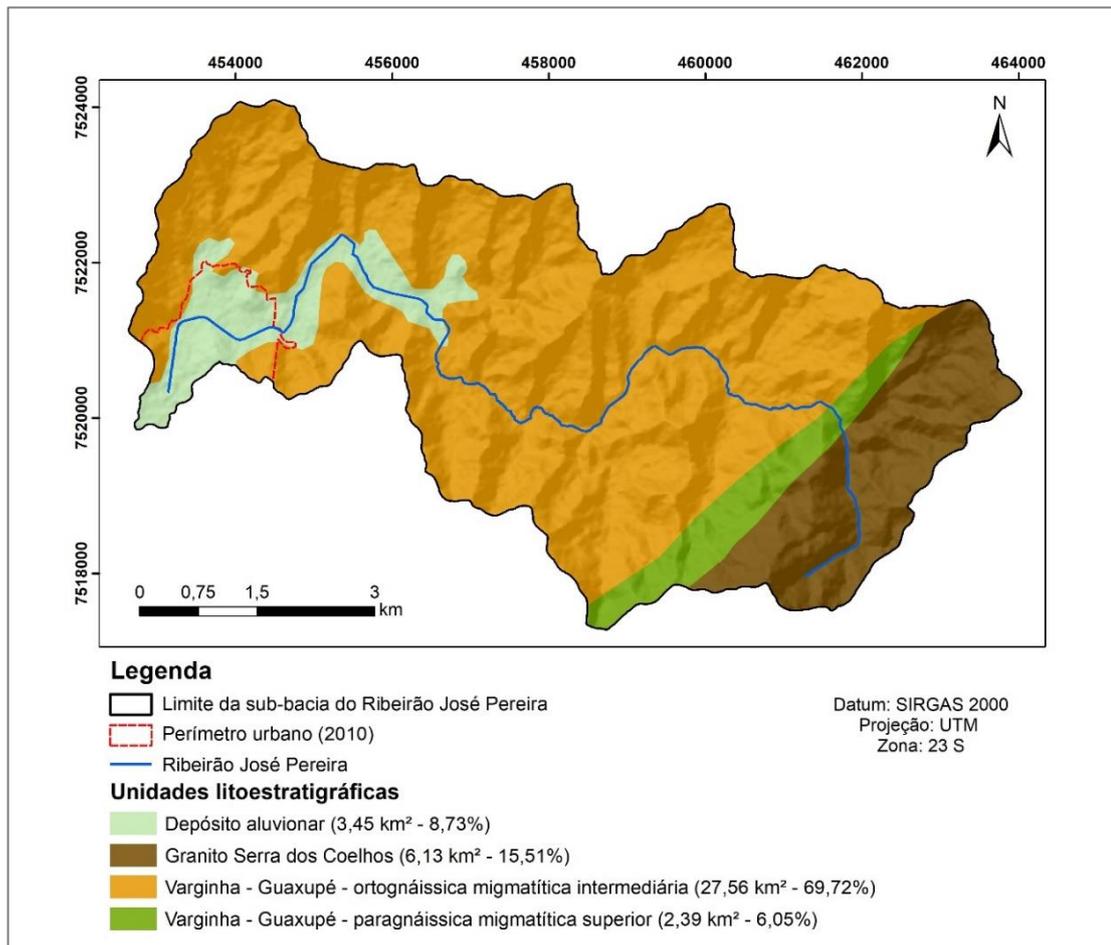


Figura 4.6 - Mapa de unidades litoestratigráficas da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Fonte: Adaptado de Trouw et al. (2008)

4.4 Características da cobertura do solo e expansão urbana na sub-bacia

A sub-bacia apresenta vegetação correspondente às características do domínio da Mata Atlântica, abrangendo um importante remanescente florestal do bioma, a Reserva Biológica Municipal Serra dos Toledo (FLAUZINO et al., 2016; IBGE, 2020). Entretanto, devido às pressões antrópicas sobre a vegetação, observa-se um intenso desmatamento dos ecossistemas naturais, com supressão da vegetação nativa para dar origem às áreas de pastagens, culturas e silviculturas, além da expansão das áreas urbanas e da malha viária (REIS et al., 2016).

Segundo Flauzino et al. (2016), a ocupação da sub-bacia ocorre de forma desordenada, criando um mosaico de diferentes cenários, representados pela urbanização nas menores altitudes e intensivo uso pecuário nas porções média e alta. Essa forma de ocupação, associada

às características topográficas do relevo forte ondulado e à suscetibilidade natural dos solos, favoreceram a instalação de processos erosivos, levando à degradação ambiental da região.

Em um estudo sobre o uso conflitivo do solo em Áreas de Preservação Permanente na sub-bacia, Santos et al. (2021) constataram um aumento de 72,79% de áreas com uso conflitivo do solo no período de 2011 a 2020. Foram identificados, ainda, o loteamento de novas áreas e o crescimento do perímetro urbano na direção leste da sub-bacia.

Algumas características dessa expansão ocorrida na sub-bacia podem ser identificadas na Figura 4.7, onde tem-se uma comparação entre imagens de satélite do ano de 2005 e 2021, disponíveis na plataforma *Google Earth Pro*. O destaque em amarelo na imagem do ano de 2021 refere-se ao loteamento de novas áreas a noroeste da sub-bacia, demonstrando uma tendência de crescimento urbano para os anos futuros. Já o vermelho, evidencia a expansão do perímetro urbano em direção ao leste da sub-bacia, em decorrência da instalação do novo centro administrativo do município. Segundo Santos et al. (2021), essa expansão foi intensificada com a construção do Parque Municipal de Itajubá em meados de 2016 e de novas infraestruturas de lazer.

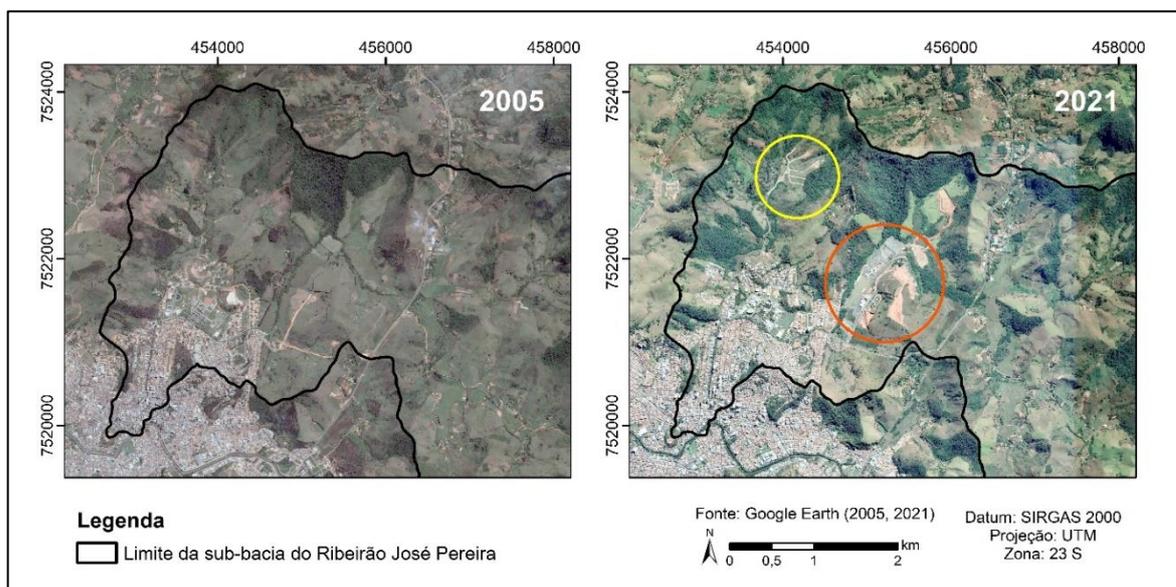


Figura 4.7 - Comparação entre a ocupação humana na porção oeste da sub-bacia entre os anos 2005 e 2021

Essas áreas de expansão estão contempladas no Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do Município de Itajubá, Lei nº 3352 de 17 de dezembro de 2019. A lei prevê uma grande área passível de expansão urbana a oeste da sub-bacia, dentro do perímetro urbano do município, como pode ser verificado na Figura 4.8. As áreas já urbanizadas são consideradas, no entanto, como Zona de Adensamento Restrito, não passíveis de adensamento em virtude de

restrições ambientais e condições desfavoráveis de infraestruturas e características do uso do solo (ITAJUBÁ, 2019).

O Parque Municipal de Itajubá e a sede administrativa do município estão inseridos em uma Área de Interesse Tecnológico que, segundo o plano diretor, é destinada, prioritariamente, à ampliação do parque universitário, centros de pesquisa e desenvolvimento, indústrias e centros de serviços de alta tecnologia e mão-de-obra especializada, entre outros.

Algumas áreas do perímetro urbano, por sua vez, estão inseridas em Área de Controle de Riscos de Inundação que, de acordo com a Lei, compreende a área inundada pela última grande cheia do Rio Sapucaí. Nessa área objetiva-se o controle do parcelamento, ocupação e uso do solo no sentido da proteção contra desastres hidrometeorológicos, sendo o uso residencial objeto de medidas prioritárias de proteção (ITAJUBÁ, 2019).

A sub-bacia apresenta, ainda, Áreas de Especial Interesse Ambiental, especialmente importantes para a preservação de recursos hídricos e ecossistemas, em virtude de concentrarem remanescentes florestais expressivos, mata em regeneração ou por se situarem em cota superior a 950,00 m acima do nível do mar (ITAJUBÁ, 2019).

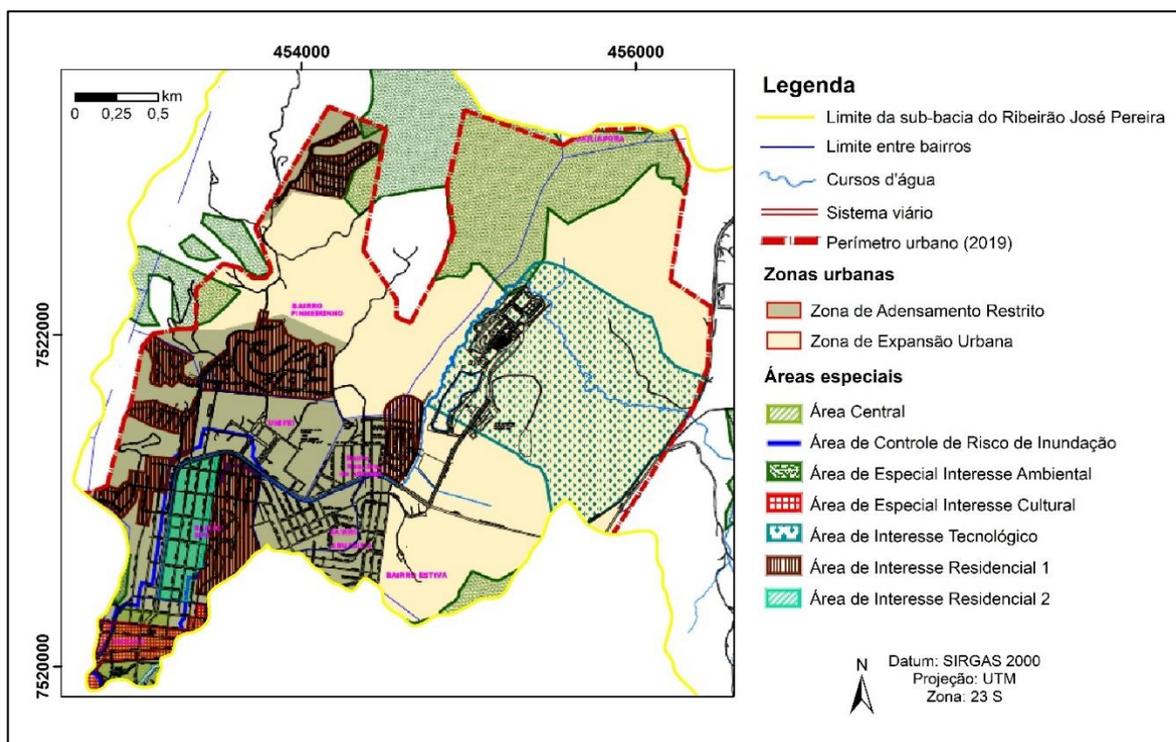


Figura 4.8 - Zoneamento urbano e áreas especiais previstas no plano diretor do município de Itajubá na porção final da sub-bacia do Ribeirão José Pereira. Fonte: Adaptado de Itajubá (2019)

Percebe-se, portanto, um grande incentivo ao crescimento no perímetro inserido na sub-bacia. Barbosa et al. (2015) afirmam que um dos motivos do crescimento populacional no

município, no geral, é o atrativo do grande número de indústrias e instituições de ensino superior. Segundo os autores, esses fatores fazem com que a população busque novos terrenos para construção de moradias, havendo a ocupação de zonas pertencentes à calha secundária do Rio Sapucaí e dos Ribeirões José Pereira e Anhumas.

A construção de moradias em zonas inadequadas para a ocupação humana, associada a chuvas intensas ou mais fracas e prolongadas na sub-bacia, tem levado a eventos de inundação que impactam fortemente a vida da população que reside e que transita na região. Um desses eventos ocorreu em 24 de janeiro de 2017, em que foram registrados alagamentos na área central da cidade de Itajubá e inundação no bairro Pinheirinho. Segundo Silva et al. (2019), a estação meteorológica da Universidade Federal de Itajubá, inserida na sub-bacia, registrou aproximadamente 57 mm de chuva um dia antes do evento que foi deflagrado no dia 24, devido a uma tempestade ocorrida na Serra dos Toledos, no extremo leste da sub-bacia. Os autores afirmam, ainda, que devido ao desnível nas altitudes entre a serra e a região do ribeirão, houve escoamento da água precipitada para o ribeirão e, somado a isso, o solo possivelmente já se encontrava encharcado em virtude das chuvas ocorridas ao longo do mês de janeiro.

Além disso, segundo o relatório do SGB - CPRM (CPRM, 2014), ao longo da extensão do Ribeirão José Pereira pôde ser verificada a presença de pontes subdimensionadas ao volume do fluxo d'água em eventos de cheias, atuando como pontos de estrangulamento a vazão. O relatório também aponta a existência de taludes marginais com cerca de 1,50 metros de amplitude (Figura 4.9a) que em alguns pontos estão em processo de solapamento, evidenciado por trincas e abatimento de parte das calçadas (Figura 4.9b). Todos esses fatores levam a planície fluvial do Ribeirão a ser categorizada como área de alto risco de enchentes, com uma estimativa de 240 imóveis e 960 pessoas expostas a esses eventos (CPRM, 2014).



Figura 4.9 - Margem do Ribeirão José Pereira em pontos da área urbana: taludes marginais (a) e processo de solapamento em algumas partes desses taludes (b). Fonte: CPRM (2014)

4.5 Caracterização socioeconômica e demográfica da sub-bacia

A sub-bacia do Ribeirão José Pereira apresenta densidade demográfica de aproximadamente 249,24 hab/km² (IBGE, 2011a). Como pode ser observado na Figura 4.10, que traz a distribuição espacial dos habitantes por quilômetro quadrado em toda sub-bacia no ano de 2010, existem setores censitários inseridos no perímetro urbano que ultrapassam os 10.000 hab/km² e, por outro lado, na porção rural podem ser observados setores cuja densidade demográfica não chegam a 100 hab/km².

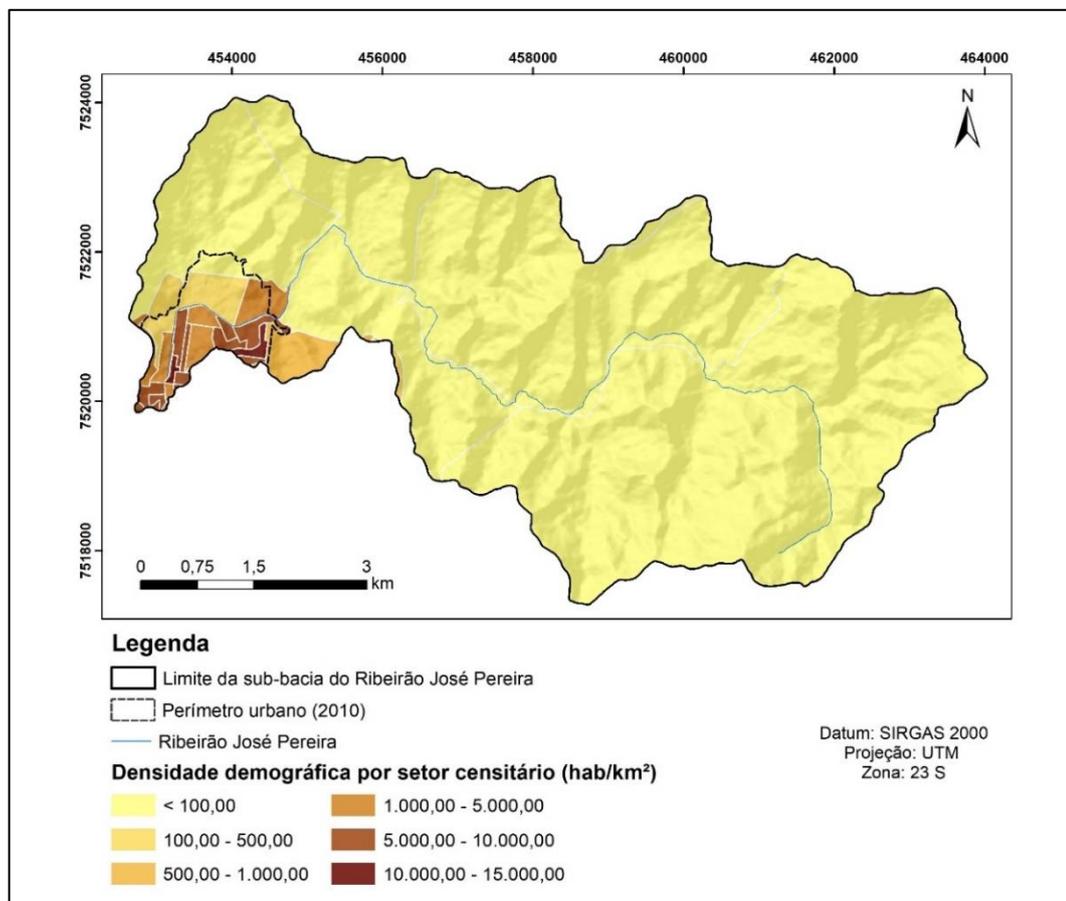


Figura 4.10 - Mapa de densidade demográfica por setor censitário da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Fonte: IBGE (2011a)

Os dados dispostos na Tabela 4.1 corroboram essa alta concentração da população no perímetro urbano, visto que a população rural da sub-bacia, em 2010, era de apenas 959 habitantes, 9,73% da população total permanente da sub-bacia. É importante salientar que esses dados são dados aproximados, visto que alguns setores censitários não estão totalmente inseridos no limite da sub-bacia hidrográfica, tendo sido realizados cálculos para adequar esses valores à área de estudo. Em relação aos dados econômicos da população, em 35,44% dos

domicílios particulares permanentes da sub-bacia, o valor da renda mensal dos moradores era de até 1 salário-mínimo (SM), ou os moradores encontravam-se sem rendimento mensal. Em contrapartida, 15,65% dos domicílios apresentavam rendimento nominal mensal per capita superior a 5 SM.

No que se refere à situação do saneamento básico da sub-bacia, mais de 85% dos domicílios apresentavam abastecimento de água por rede geral de distribuição ou banheiro de uso exclusivo dos moradores e esgotamento via rede geral de esgoto ou pluvial. Segundo os dados do Censo (IBGE, 2011a), 5,70% dos domicílios faziam uso de poços, nascentes ou cisternas para obtenção de água; em 5,94 % dos domicílios, o esgoto era destinado a fossas sépticas, rudimentares ou valas e, em 7,35%, o efluente doméstico era lançado em rios ou lagos. O restante dos domicílios utilizava de outro tipo de fonte de água ou esgotamento sanitário.

Tabela 4.1 - Indicadores sociais, econômicos e demográficos da sub-bacia do ribeirão José Pereira.

Indicadores sociais, econômicos e demográficos do Censo 2010	
Habitantes em domicílios permanentes	9855
População urbana (hab)	8896
População rural (hab)	959
Grau de alfabetização da população com mais de 5 anos (%)	92,64
População de crianças (<12 anos) e idosos (> 60 anos) (%)	29,04
População masculina (%)	48,58
População feminina (%)	51,42
Domicílios particulares permanentes com rendimento nominal mensal per capita de até 1 SM ou sem rendimento (%)	35,44
Domicílios particulares permanentes com abastecimento de água por rede geral de distribuição (%)	89,45
Domicílios particulares permanentes com banheiro de uso exclusivo dos moradores e esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial (%)	86,40
Domicílios particulares permanentes onde existe arborização (%)	44,94

Fonte: IBGE (2011a).

Por último, 44,94% dos domicílios apresentavam arborização ao longo da calçada/passeio e/ou em canteiro, taxa inferior à observada no município como um todo, que é de 50,10% (IBGE, 2011a). Acima do valor estético, a vegetação urbana quando adequadamente implantada, exerce funções importantes, cujos benefícios estão relacionados à melhoria do conforto térmico, à atenuação da luminosidade, à proteção contra ventos, ao controle das poluições acústica e atmosférica, ao abrigo para a fauna, além de promover bem-estar físico e psíquico à população (DANTAS; SOUZA, 2004; COSTA; FERREIRA, 2009).

5 METODOLOGIA

Para o alcance dos objetivos propostos foram necessárias diferentes etapas de trabalho, organizadas e executadas de forma sistematizada. Dentre essas etapas, o levantamento bibliográfico e a elaboração da base de dados georreferenciados e dos mapas temáticos foram atividades indispensáveis, pois subsidiaram as análises propostas. A Figura 5.1 apresenta o fluxograma das etapas adotadas na metodologia deste trabalho.

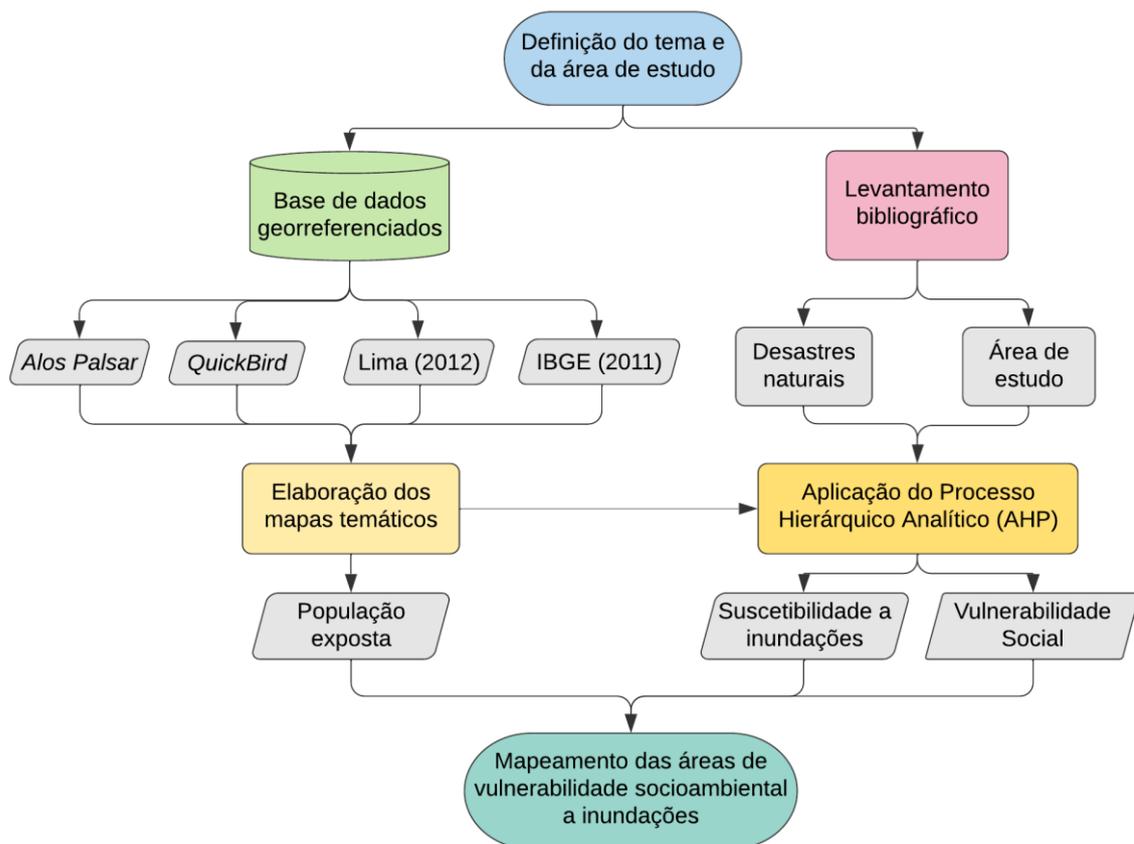


Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho

5.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico compreendeu a realização de pesquisas para fundamentação do referencial teórico e metodológico utilizado para o desenvolvimento do trabalho. Foram realizadas buscas e leituras de artigos nacionais e internacionais, dissertações e teses referentes a inundações no âmbito mundial e, especialmente, trabalhos desenvolvidos em Itajubá-MG e na sub-bacia hidrográfica em estudo. Além disso, foi realizado um levantamento das características físicas e socioeconômicas da sub-bacia do Ribeirão José Pereira e do seu processo histórico de ocupação e expansão urbana.

Dessa forma, buscou-se entender como os elementos ambientais e sociais estão relacionados com a dinâmica local dos desastres, no que diz respeito aos seus papéis no desencadeamento dos eventos de inundação e na construção da vulnerabilidade da população. Com base nesse levantamento bibliográfico e na caracterização socioeconômica e demográfica da sub-bacia do Ribeirão José Pereira, foram adotadas quatro variáveis do meio físico-biótico para o mapeamento da suscetibilidade a inundações (Distância do rio; Índice Topográfico de Umidade; Pedologia; e Uso e cobertura do solo), além de sete indicadores relacionados à vulnerabilidade da população, extraídos do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011a), detalhados na seção 5.4.

5.2 Elaboração da base de dados georreferenciados

A base de dados georreferenciados foi elaborada com o suporte do software de geoprocessamento ArcGIS® 10.2, e contou com os principais indicadores físico-territoriais e socioeconômicos do município de Itajubá. Para a constituição da base foram necessários:

- a) composição colorida no espectro visível R(3)G(2)B(1) de imagem de alta resolução (50 cm) do satélite *QuickBird* datada de 21 de maio de 2011;
- b) mapa pedológico da bacia do Ribeirão José Pereira desenvolvido por Lima (2012);
- c) Modelo Digital de Elevação - MDE com resolução de 12,5 m obtido pelo radar *Phased Array L-band SAR - PALSAR* do satélite *Advanced Land Observing Satellite - ALOS* e disponibilizado pelo *Alaska Satellite Facility* (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) (ASF, 2011)
- d) malhas digitais de limites municipal e estadual de Minas Gerais do ano de 2017, disponibilizadas pelo IBGE;
- e) malha digital dos setores censitários do município de Itajubá, elaborado e disponibilizado pelo IBGE (2011b); e
- f) dados agregados por setor censitário do Censo Demográfico de 2010 em formato *.xls* (IBGE, 2011a).

Vale ressaltar que no presente trabalho foi realizada, a partir de rotinas implementadas no módulo *Data Management Tools* do ArcGIS 10.2, a conversão do datum/projeção de origem de cada arquivo vetorial ou *raster* obtido para SIRGAS 2000/UTM 23S, datum/projeção adequados para a área de estudo.

5.3 Elaboração dos mapas temáticos

5.3.1 Delimitação da sub-bacia hidrográfica

A partir da inserção do MDE no ArcGIS® 10.2, utilizou-se o comando *Fill* para detectar e preencher as depressões espúrias do modelo. Calculou-se, então, a direção de fluxo da água (*Flow Direction*) e, em seguida, o fluxo acumulado de água em cada pixel (*Flow Accumulation*). Feito isto, utilizou-se a função *Conditional* na ferramenta *Raster Calculator* com a finalidade de extrair a rede de drenagem, mostrando somente os pixels com valores de fluxo acumulado maior do que 500 (*Flow Accumulation > 500*).

O limiar de 500 foi escolhido após o teste com diversos outros valores (50; 100; 200; 400; 500; 600; 800 e 1000). Este valor proporcionou uma melhor visualização da rede de drenagem, tendo em vista a escala e objetivos do estudo, além de ter possibilitado o posicionamento adequado do ponto de exutório da sub-bacia.

Após a demarcação do ponto de exutório, utilizou-se a ferramenta *Watershed* na delimitação da bacia hidrográfica, fornecendo-lhe o ponto específico de exutório (*pour point*). Finalmente, o arquivo *raster* gerado pela função *Watershed* foi convertido para *shapefile* pela ferramenta *Raster to Polygon* com a opção *Simplify Polygons* ativada, e o novo arquivo foi suavizado pela ferramenta *Smooth Polygon* usando o *Bezier Interpolation* como algoritmo de suavização.

5.3.2 Distância do rio

O mapa de distâncias do Ribeirão José Pereira foi obtido através da ferramenta *Euclidean Distance* do ArcGIS 10.2, cujo algoritmo calcula distâncias a partir do centro da célula de origem até o centro de cada uma das células vizinhas através da aplicação do teorema de Pitágoras, onde a distância é a hipotenusa (ESRI, 2014a).

O dado de entrada na ferramenta foi o arquivo vetorial do curso d'água, vetorizado em tela, tendo como referência a imagem de satélite utilizada no estudo. Vale salientar que o vetor do Ribeirão José Pereira não atinge o exutório da bacia, que compreende o ponto de deságue no Rio Sapucaí. Segundo Carvalho (2012), o rio foi canalizado no trecho final, por meio de uma longa galeria, nas proximidades do centro comercial do município de Itajubá e, além disso, não recebe contribuição de nenhum efluente importante.

5.3.3 Índice Topográfico de Umidade

Para o mapeamento do Índice Topográfico de Umidade da sub-bacia estudada foi utilizado o MDE no ambiente do software livre SAGA GIS v2.3.2 (CONRAD et al., 2015) que apresenta uma ampla base em relação aos algoritmos de direção de fluxo (OLIVEIRA et al., 2016).

O procedimento baseou-se nas etapas recomendadas por Mattivi et al. (2019), iniciando-se com o pré-processamento do MDE, através da ferramenta *Fill Sinks* (Wang & Liu), a fim de preencher as depressões do MDE e fornecer um produto de saída sem depressões que pode ser usado como entrada no cálculo do mapa de fluxo acumulado. Em seguida, a ferramenta utilizada para a extração do fluxo acumulado foi a *Flow Accumulation (Top-Down)*, optando-se pelo algoritmo *Multiple Flow Direction*, desenvolvido por Quinn et al. (1991). Este algoritmo permite que a área de aclave acumulado de qualquer célula seja distribuída entre todos os sentidos de vertente, com orientações cardeais e diagonais, sendo capaz de contribuir para jusante em até oito direções de fluxo (MORAES et al., 2014; QUINN et al., 1991).

O mapa de acúmulo do fluxo corresponde à área de captação total, possibilitando o cálculo da área de contribuição específica (A_s) através da ferramenta *Flow Width and Specific Catchment Area*. Como entrada, utilizou-se o MDE preenchido e o fluxo acumulado, gerados anteriormente, obtendo-se como produto a largura do fluxo e a A_s , necessários para a extração do ITU. Para esse processo de extração também se fez necessário o cálculo de declividade em radianos, realizado através da ferramenta *Slope, Aspect, Curvature*, utilizando-se como entrada o MDE bruto, sem o preenchimento das depressões.

A última etapa correspondeu à geração do ITU por meio da ferramenta *Topographic Wetness Index*. Esta ferramenta requer como entradas os mapas de inclinação e de A_s , aplicando a equação 3.1 e gerando, finalmente, o mapa de ITU da área de estudo.

5.3.4 Uso e cobertura do solo

Para a obtenção das características de uso e cobertura do solo da área de estudo foi realizada uma classificação orientada a objeto no ambiente software livre QGIS 3.16.4, através de ferramentas do complemento *Orfeo ToolBox* (OTB) 7.4.0, envolvendo as seguintes etapas: segmentação; caracterização das classes, amostragem e extração de atributos; treinamento; classificação; avaliação da classificação e pós-classificação.

- **Segmentação**

A segmentação tem como objetivo fragmentar a imagem em grupos de pixels (objetos) com semelhança espectral e que apresentem características similares, tais como cor, textura ou forma, formando alvos com significado claro para o analista, como vias urbanas, telhados de residências, corpos d'água, topo de árvores, entre outros (DEZSÖ et al., 2012; ZANOTTA et al., 2019).

O processo de segmentação foi realizado através da ferramenta *Segmentation* do OTB, adotando-se o algoritmo *Mean Shift* (MS), no qual três parâmetros principais precisaram ser definidos (CHEHATA et al., 2014; MING et al., 2012; ZOLLINI et al., 2020):

- ✓ raio espacial (h_s), expresso em unidade de pixel, que afeta a conectividade dos elementos e a suavidade dos segmentos gerados. Ele controla a distância (número de pixels) que é considerada ao agrupar pixels em um único segmento;
- ✓ raio de alcance (h_r), expresso em unidade radiométrica, que influencia o número de segmentos a serem gerados. Está relacionado ao grau de variabilidade espectral (distância nas n-dimensões do espaço espectral) permitido em um segmento de imagem;
- ✓ tamanho mínimo da região (M), expresso em unidade de pixel, que afeta o ruído; quanto menor for o valor de M , maior será a quantidade de pequenos objetos.

O algoritmo MS segmenta a imagem agrupando todos os pixels que estão mais próximos do que o h_s no domínio espacial e do que o h_r no domínio espectral e, em seguida, conecta os pontos de convergência correspondentes (MING et al., 2012), gerando um arquivo vetorial com todos os segmentos. Para a segmentação da imagem de satélite que encobre a área de estudo, os parâmetros utilizados foram: $h_s = 5$; $h_r = 15$; $M = 150$. Tais parâmetros foram os que obtiveram os resultados mais adequados para a área de estudo, considerando o tempo de processamento e o detalhamento necessário dos objetos, tendo em vista o objetivo do trabalho.

- **Extração de atributos**

Após a segmentação, foi realizada a extração dos atributos espectrais dos segmentos gerados, através da ferramenta de estatísticas zonais *ZonalStatistics* do OTB, que calcula para cada zona (segmento): média, mínimo, máximo e desvio padrão. Neste caso, estas estatísticas foram calculadas para os valores de reflectância das bandas espectrais do vermelho(R); verde(G); e azul(B) da composição colorida do *QuickBird*.

Em seguida, procedeu-se a interpretação visual da imagem para definir quais classes temáticas seriam importantes na caracterização do território, tendo como enfoque o papel do tipo de uso e cobertura na suscetibilidade a inundações. Dessa forma, foi criada uma camada

vetorial (pontos) de amostragem envolvendo as seguintes classes: área impermeabilizada (área edificada e rodovias); solo exposto; água; vegetação; pastagem; nuvem e sombra. Essa camada vetorial de pontos com classes de uso e cobertura do solo definidos foi utilizada para, através de ferramenta de intersecção de camadas vetoriais, extrair os atributos espectrais dos segmentos.

No entanto, segundo Zanotta et al. (2019), a exatidão de uma classificação medida no conjunto de amostras de treinamento não é um bom indicador da exatidão que será obtida quando o classificador for aplicado a novos dados. Dessa forma, dos polígonos (segmentos) selecionados, 70% foram destinados ao treinamento do classificador e 30% para a sua validação, conforme os trabalhos de Abdi (2020) e Diniz et al. (2020). Essa divisão foi realizada através da ferramenta “Seleção aleatória dentro de subconjuntos” do QGIS, que seleciona aleatoriamente, feições de uma camada com base em uma porcentagem e uma categoria (campo) definidos pelo usuário (QGIS, 2020).

- **Treinamento e classificação**

O modelo para a classificação foi gerado através da ferramenta *TrainVectorClassifier* do OTB, adotando-se o classificador *Support Vector Machine* (SVM). Os algoritmos de aprendizagem de máquina SVM têm como objetivo a determinação de limites de decisão que produzam uma separação ótima entre classes por meio da minimização dos erros (KUMAR et al., 2015; ZHANG et al., 2016). Os atributos utilizados para o treinamento foram os valores médios (*mean*) e de desvio padrão (*stdev*) das reflectâncias de cada banda espectral.

A ferramenta utilizada no treinamento gera um modelo que foi utilizado, por fim, na classificação dos segmentos gerados anteriormente, resultando num arquivo vetorial da caracterização do uso e cobertura do solo da sub-bacia estudada.

- **Avaliação da classificação**

A ferramenta de treinamento fornece, ainda, a matriz de confusão, produzida com base nas amostras indicadas para validação. Também gera um *log* que, dentre as informações inerentes ao processamento, também indica o classificador utilizado, uma cópia da matriz de confusão e as métricas de acurácia: *Precision*, *Recall*, *F-score* e o índice *Kappa*.

As matrizes de confusão apresentam o desempenho do classificador por classe, através dos valores reais obtidos das amostras, em função dos valores preditos. Essa análise pode fornecer comparação mais eficientes do que apenas considerar o índice de exatidão global (JENSEN, 1986). De acordo com Wang et al. (2020), uma matriz de confusão apresenta quatro categorias de resultados: Verdadeiro Positivo (VP), Falso Positivo (FP), Falso Negativo (FN) e

Verdadeiro Negativo (VN). Um resultado VP na matriz indica o número de amostras corretamente classificadas, já um FP demonstra o número de previsões incorretamente classificadas. Um VN, por sua vez, indica o número de previsões corretamente presumidas como negativo. Logo um FN representa o número de previsões incorretamente classificadas como negativas, ou seja, aquelas que deixaram de ser classificadas (KOK et al., 2020).

A métrica *Precision* (precisão) é o quociente das amostras classificadas corretamente em uma classe (VP) pelo total de previsões positivas (VP + FP). Já a métrica *Recall* (revocação) é o quociente das amostras classificadas corretamente (VP) pelo número de amostras referências da classe (VP + FN) (SOKOLOVA et al., 2006).

O *F-score*, dado pela Equação 5.1, é um valor médio harmônico do valor de *Recall* e o valor de *Precision* obtidos, determinando o quanto o modelo de classificação consegue prever corretamente os valores positivos (KOK et al., 2020; OZBAY; ALATAS, 2019).

$$F - score = 2 * \frac{(Recall * Precision)}{(Recall + Precision)} \quad (5.1)$$

Por último, tem-se o índice *Kappa* que descreve e testa o grau de concordância e precisão na classificação, utilizando todos os elementos da matriz de erros em seu cálculo (COHEN, 1960) e pode ser classificado quanto à qualidade da classificação em: ruim (valores entre 0 e 0,2); razoável (0,2 a 0,4); boa (0,4 a 0,6); muito boa (0,6 a 0,8); e excelente (0,8 a 1,0) (LANDIS; KOCH, 1977).

- **Pós-classificação**

Como a imagem de satélite disponível para o estudo apresentava nuvens e sombras, os segmentos referentes a essas classes foram reclassificados com base em imagens de satélite georreferenciadas dos anos de 2010 e 2011, disponíveis no software *Google Earth Pro*, a fim de eliminar classes sem relevância para o mapeamento de suscetibilidade a inundações da sub-bacia. Além disso, algumas confusões resultantes da classificação, como áreas impermeabilizadas classificadas como nuvem, ou solo exposto classificadas como áreas impermeabilizadas, foram corrigidas através da edição da tabela de atributos do arquivo vetorial resultante.

5.3.5 Variáveis socioeconômicas e demográficas

Para o estudo social da sub-bacia do Ribeirão José Pereira foram utilizados os dados do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011a). Os dados relativos a condições socioeconômicas e demográficas foram obtidos através das tabelas em formato .xls, contendo os resultados agregados por setor censitário em todo o Estado de Minas Gerais e disponibilizados na área de downloads do site do IBGE, seção “Estatísticas”.

A malha digital em formato vetorial dos setores censitários do município de Itajubá, por sua vez, foi obtida na seção “Geociências”. A espacialização dos resultados agregados por setor censitário (variáveis socioeconômicas e demográficas) em ambiente SIG foi realizada empregando-se o recurso *Join* do ArcGIS 10.2, que permite a união de tabelas através de valores de um campo que podem ser encontrados em ambas. No caso do presente trabalho, essa união foi realizada através dos códigos IBGE de cada setor censitário, fator comum da tabela de atributos do arquivo *shapefile* e das tabelas em formato .xls, contendo o levantamento das variáveis socioeconômicas.

5.4 Mapeamento da vulnerabilidade socioambiental a inundações

O mapeamento da vulnerabilidade socioambiental a inundações da sub-bacia do Ribeirão José Pereira, proposto no presente trabalho, envolveu o estudo de três aspectos: a identificação das áreas suscetíveis; a avaliação da exposição e a caracterização da condição de vulnerabilidade social da população.

Esse mapeamento foi realizado através de um índice de vulnerabilidade socioambiental (*IVSA*), no qual foram considerados valores de influência distintos para esses três aspectos, adaptados do trabalho de Marques et al. (2017), conforme a Equação 5.2. Para dimensão ambiental considerou-se influência de 50% no índice final. A influência da dimensão social, porém, foi dividida igualmente entre a vulnerabilidade social (25%) e a exposição da população (25%).

$$IVSA = 0,50 \times ISI + 0,25 \times IVS + 0,25 \times IEXP \quad (5.2)$$

Para o estudo da suscetibilidade (*ISI*) foram adotados quatro fatores condicionantes de inundações. Já o índice de vulnerabilidade social (*IVS*) foi constituído por seis parâmetros extraídos do Censo Demográfico de 2010, considerando os setores censitários como unidade de área para o mapeamento desse índice. Foi abrangido, ainda, o grau de exposição (*IEXP*) da

população operacionalizado pelo cálculo da densidade demográfica (hab/km²) por setor censitário. Todas as variáveis adotadas para o mapeamento da vulnerabilidade socioambiental podem ser visualizadas na Tabela 5.1. A metodologia proposta abrangeu, ainda, o estabelecimento de uma hierarquia nominal para os índices, sendo elas: muito baixa (valores de ISI/IEXP/IVS/IVSA entre 0,00 e 0,19); baixo (0,20 a 0,39); médio (0,40 a 0,59); alto (0,60 a 0,79) e muito alto (0,80 a 1,00).

É importante salientar que o SM na época era de R\$ 510,00 (US\$ 286,67 na cotação de janeiro de 2010). Além disso, segundo o IBGE (2011c), o domicílio cujo responsável era uma mulher, consistia naquele no qual uma pessoa do sexo feminino, de 10 anos ou mais de idade, era reconhecida pelos moradores como responsável pela unidade domiciliar. Foi considerado um domicílio alugado quando o aluguel era pago por um ou mais moradores ou aquele em que o empregador (de qualquer um dos moradores) pagava, como parte integrante do salário, uma parcela em dinheiro para o pagamento do aluguel. O domicílio permanente, por sua vez, foi identificado como aquele construído para servir, exclusivamente, à habitação e, na data de referência, tinha a finalidade de servir de moradia a uma ou mais pessoas, não englobando os domicílios coletivos, como hotéis, pensões, orfanatos, hospitais, asilos e alojamento de trabalhadores ou de estudantes (IBGE, 2011c).

Tabela 5.1 - Variáveis adotadas no mapeamento da vulnerabilidade socioambiental

Dimensão	Variável/Indicador
Suscetibilidade a inundações	Distância do rio
	Índice Topográfico de Umidade (ITU)
	Pedologia
	Uso e cobertura do solo
Exposição	Densidade demográfica (hab/km ²)
Social	Domicílios com rendimento mensal per capita inferior a 1 salário-mínimo (SM) ou sem rendimento (%)
	Domicílios com responsáveis do sexo feminino (%)
	Domicílios particulares permanentes alugados (%)
	População de crianças (<12 anos) e idosos (>60 anos) (%)
	Domicílios com abastecimento geral de água por rede geral de distribuição (%)
	Domicílios com banheiro de uso exclusivo dos moradores e esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial (%)

No mapeamento da suscetibilidade a inundações, as variáveis adotadas foram comparadas em uma matriz par a par, de acordo com a metodologia AHP, gerando-se um peso

de 0 a 1 para cada um, a fim de se ponderar a influência desses condicionantes na ocorrência de inundações. Os valores de entrada da matriz par a par variaram de 1 a 9 para os condicionantes e suas classes de variáveis, sendo que pesos maiores indicam maior predisposição da classe à ocorrência de inundações.

Após atribuídos os pesos, os fatores condicionantes foram agregados de acordo com a técnica *Weighted Linear Combination* (WLC), utilizando-se a ferramenta *Weighted Sum*, no ArcGIS 10.2. Esta ferramenta permite a sobreposição de cada *raster* multiplicado por seu respectivo peso, gerando a soma ponderada de cada pixel na imagem final (ESRI, 2014b). Em seguida, a soma resultante foi normalizada em uma escala de 0 a 1, por meio de uma função *fuzzy linear*, utilizando-se a ferramenta *Fuzzy Membership* no software ArcGIS 10.2. Esse tipo de função transforma valores de entrada linearmente em uma escala de 0 a 1, onde 0 é atribuído ao menor valor de entrada e 1 ao maior valor de entrada. Todos os valores intermediários recebem algum valor de pertinência com base em uma escala linear, onde uma possibilidade mais alta, ou mais próxima de 1, é atribuída aos valores de entrada mais altos (ESRI, 2014c). Obteve-se, assim, o *ISI* da sub-bacia estudada, com valores próximos a 1 indicando uma alta suscetibilidade a inundações.

Já as variáveis envolvidas na dimensão socioeconômica e demográfica, por apresentarem valores com amplitude e unidades de medida diferentes, foram normalizadas em uma escala de 0 a 1 por meio de diferentes funções *fuzzy* disponíveis na ferramenta *Fuzzy Membership*, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Funções *fuzzy* utilizadas na normalização dos indicadores

Indicador	Função <i>fuzzy</i>
Densidade demográfica	<i>Linear</i>
Domicílios com rendimento mensal per capita inferior a 1 salário-mínimo (SM) ou sem rendimento	<i>Linear</i>
Domicílios com responsáveis do sexo feminino	<i>Linear</i>
Domicílios particulares permanentes alugados	<i>Linear</i>
População de crianças (<12 anos) e idosos (>60 anos)	<i>Linear</i>
Domicílios com abastecimento geral de água por rede geral de distribuição	<i>Small</i>
Domicílios com banheiro de uso exclusivo dos moradores e esgotamento sanitário via rede geral de esgoto ou pluvial	<i>Small</i>

A função *fuzzy linear* foi utilizada para indicadores cujos valores mais altos implicariam em um maior valor de exposição/vulnerabilidade social (próximo de 1) e valores mais baixos

implicariam em um *IEXP* ou um *IVS* próximo de 0, como é o caso da densidade demográfica e da porcentagem de domicílios com rendimento mensal per capita inferior a 1 SM ou sem rendimento. Já a função *fuzzy small* é comumente utilizada quando é mais provável que um pequeno valor possa influenciar em um dado evento (ESRI, 2014c; SÖNMEZ; BIZIMANA, 2020). Isso ocorre, neste caso, com os indicadores relacionados à infraestrutura de saneamento básico dos domicílios, pois quanto menor a porcentagem de domicílios atendidos em um setor censitário, maior será a vulnerabilidade social do mesmo. O *IEXP* foi obtido, então, pela normalização do indicador densidade demográfica, enquanto, o *IVS* foi obtido após a combinação ponderada das outras seis variáveis, utilizando-se os pesos de 0 a 1 obtidos pela metodologia AHP na ferramenta *Weighted Sum* do ArcGIS 10.2.

Por fim, a ferramenta *Weighted Sum* foi utilizada no cálculo final do *IVSA* atribuindo-se as influências definidas pela Equação 5.2. Após normalização por função *fuzzy linear*, os valores finais foram distribuídos nos intervalos e classes adotados no trabalho, onde valores próximos a 0 indicam muito baixa vulnerabilidade socioambiental a inundações e próximos a 1, muito alta vulnerabilidade.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Na primeira subseção serão analisados os resultados referentes à dimensão ambiental (ISI), enquanto na segunda serão discutidos os resultados relacionados à dimensão social (IVS e IEXP) da vulnerabilidade. Por fim, uma terceira subseção irá trazer as discussões acerca do resultado principal do trabalho, o mapeamento de vulnerabilidade socioambiental.

6.1 Dimensão ambiental

No mapeamento da suscetibilidade a inundações, primeiramente foram gerados os mapas dos fatores condicionantes: distância do curso d'água, ITU, solos e uso e cobertura do solo. No que se refere ao mapa de distâncias do Ribeirão (Figura 6.1), pode-se perceber que grande parte da área do perímetro urbano se encontrava a menos de 500 metros do curso d'água.

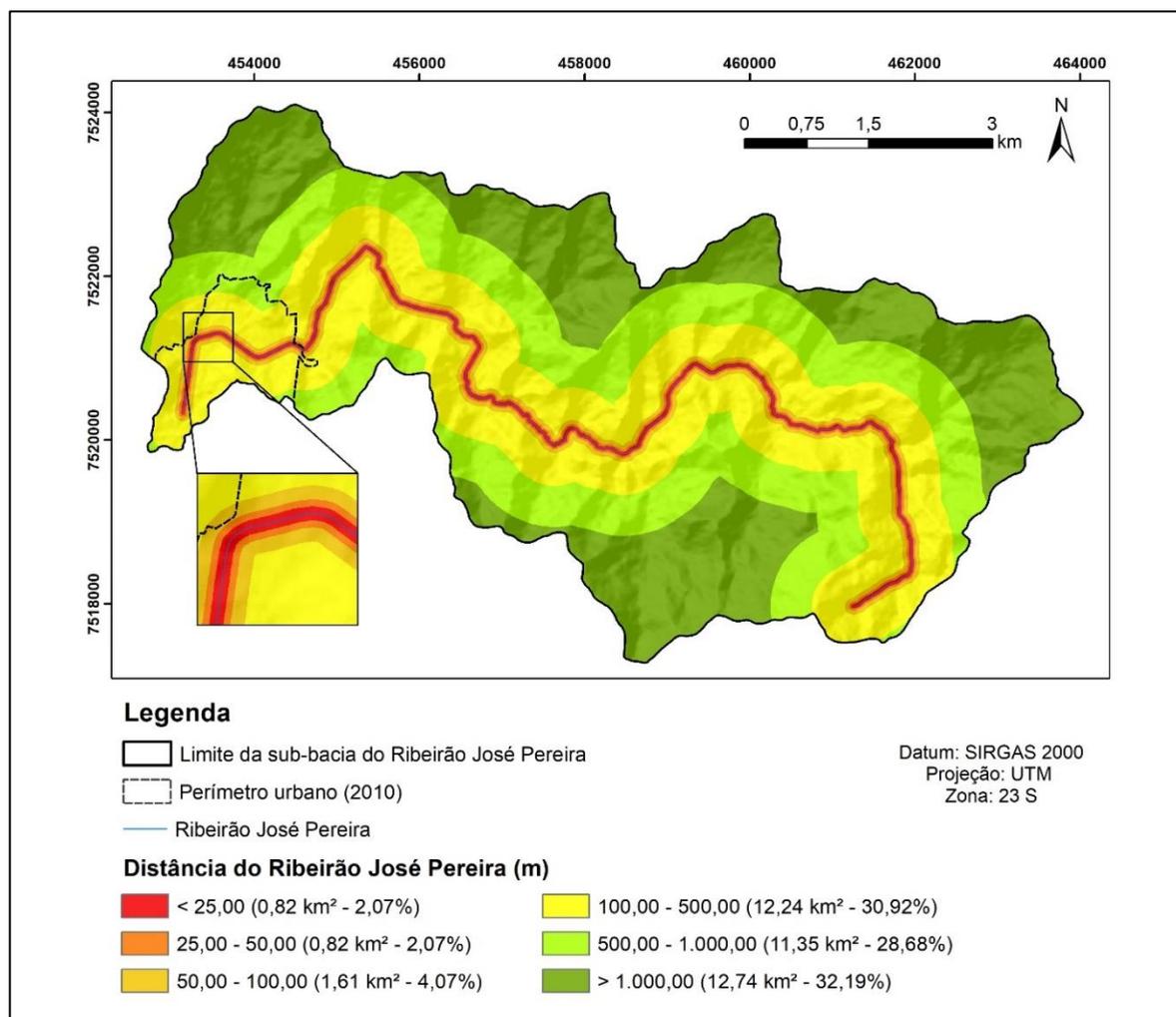


Figura 6.1- Mapa de distâncias do Ribeirão José Pereira

As inundações são mais frequentes nas áreas próximas aos rios, sendo um fator importante nos riscos de inundação e no contexto da segurança dos domicílios e moradores (GHOSH; KAR, 2018) e na área de estudo do presente trabalho, as distâncias inferiores a 100 m do curso d'água correspondem a 4,07% da área da sub-bacia.

Já o mapa da distribuição espacial do ITU na sub-bacia, obtido através das etapas metodológicas recomendadas por Mattivi et al. (2019) com o auxílio do software SAGA GIS v2.3.2, é apresentado na Figura 6.2. Como pode-se observar, a planície de inundação do Ribeirão José Pereira apresentou os maiores valores do índice, demonstrando que corresponde a uma área onde há acúmulo do fluxo de água.

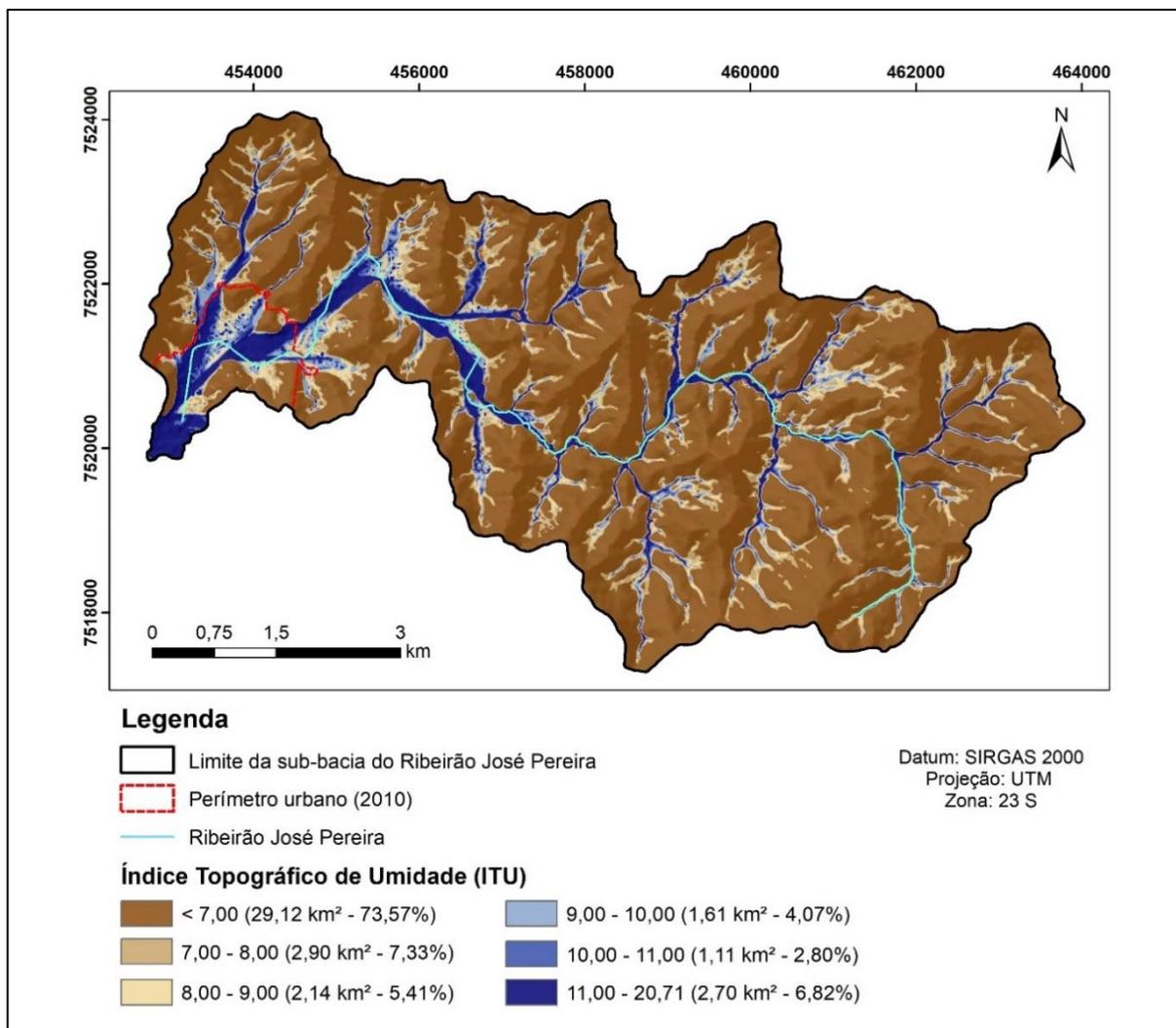


Figura 6.2 - Mapa do ITU da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Os valores mais elevados de ITU são áreas naturalmente alagáveis e podem ser ocupadas pelo rio em período de cheias, portanto, são consideradas como áreas de risco e não deveriam

ser permitidas ocupações humanas (JANCEWICZ et al., 2019; SILVA; BARBOSA, 2018). Na sub-bacia estudada, essas áreas representam mais de 6,00% do território e, em grande parte, são ocupadas pela população.

Em relação aos solos presentes na sub-bacia, o mapa temático, com os dados provenientes do mapeamento pedológico realizado por Lima (2012), foi apresentado na seção 4.2, juntamente das informações sobre as principais características desses tipos solos.

Em relação ao uso e cobertura do solo, a classificação orientada a objeto da imagem do satélite *QuickBird*, datada de 21 de maio de 2011, através do complemento OTB do QGIS resultou nas métricas apresentadas nas tabelas 6.1 e 6.2, que trazem, respectivamente, a matriz de confusão e a acurácia detalhada por classe.

No total, foram destinadas 226 amostras para a validação do classificador, enquanto outras 527 amostras foram utilizadas no treinamento do modelo, que utilizou o algoritmo SVM. Colunas da matriz referem-se à verdade terrestre, enquanto as linhas representam a interpretação de imagens. Valores em negrito da diagonal principal da matriz correspondem ao número de pixels que foram corretamente classificados.

O índice Kappa obtido foi de 0,8877, enquadrando a classificação como excelente, de acordo com a qualidade da classificação proposta por Landis e Koch (1977).

Tabela 6.1 - Matriz de Confusão

		Verdade terrestre							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
Classificação	(1) Área impermeabilizada	36	3	0	0	1	0	1	41
	(2) Solo exposto	10	41	0	0	0	0	0	51
	(3) Água	0	1	9	0	0	0	0	10
	(4) Vegetação	0	0	0	40	0	1	0	41
	(5) Nuvem	0	0	0	0	28	0	0	28
	(6) Sombra	0	0	0	3	0	10	0	13
	(7) Pastagem	0	0	0	1	0	0	41	42
Total		46	45	9	44	29	11	42	226

O *F-score*, que incorpora as métricas *Precision* e *Recall*, demonstrou bom desempenho para todas as classes, principalmente para a classe de Vegetação e Pastagem. A classe de área impermeabilizada, por sua vez, foi a que apresentou maiores problemas com confusão, visto que 10 de suas amostras de validação foram classificadas pelo modelo como solo exposto, resultando em um *Recall* de 0,7826.

Tabela 6.2 - Métricas Precision, Recall e F-score detalhadas por classe

Classes	Precision	Recall	F-score
(1) Área impermeabilizada	0,8780	0,7826	0,8276
(2) Solo exposto	0,8039	0,9111	0,8542
(3) Água	0,9000	1,0000	0,9474
(4) Vegetação	0,9756	0,9091	0,9412
(5) Nuvem	1,0000	0,9655	0,9825
(6) Sombra	0,7696	0,9655	0,8563
(7) Pastagem	0,9762	0,9762	0,9762

No entanto, esses problemas foram contornados pela correção dos segmentos classificados incorretamente, através da edição na tabela de atributos do arquivo vetorial resultante. Além disso, como pode-se observar na imagem do *QuickBird* apresentada na Figura 6.3, a sub-bacia possuía uma pequena cobertura de nuvens no momento de passagem do satélite. Dessa forma, para identificar as classes de uso do solo das áreas encobertas pelas nuvens, imagens de satélite dos anos de 2010 e 2011 disponíveis na plataforma *Google Earth Pro* foram georreferenciadas e interpretadas em ambiente SIG, levando, então, ao mapa da Figura 6.3.

A classe com maior extensão na sub-bacia foi a vegetação, representando 49,38% do total da área, em virtude, principalmente, da presença da Reserva Biológica Municipal Serra dos Toledos na região. Em seguida, tem-se a pastagem, com 44,22% de cobertura da área de estudo, respectivamente. Segundo Flauzino et al. (2016), não foram verificadas práticas de manejo conservacionista, como terraços, cordões de isolamento e rotação de pastejo na sub-bacia. Além disso, foi observado o uso intensivo de queimadas para limpeza dos pastos, demonstrando o alto índice de degradação sofrido na região.

A classe de área impermeabilizada é a terceira forma de uso mais presente na bacia, correspondendo a 4,64% da área, e envolvendo parte da cidade de Itajubá, edificações ao longo da sub-bacia e as estradas asfaltadas. Essa porcentagem vem crescendo nos últimos anos, visto que a sub-bacia do Ribeirão José Pereira se encontra em constante processo de expansão urbana, devido à ocorrência de loteamentos, áreas de empréstimo, aberturas de vias e construção de residências (FLAUZINO, 2012).

Como quarta classe de maior cobertura, tem-se a classe de solo exposto, que cobre uma área de 1,64% na sub-bacia, correspondendo a loteamentos, estradas de terra, áreas de empréstimo e sem cobertura vegetal. Por último, aparece a classe de águas, com 0,12%, representando corpos d'água nas áreas urbanas e rurais e alguns trechos do Ribeirão José Pereira que puderam ser identificados na imagem de satélite.

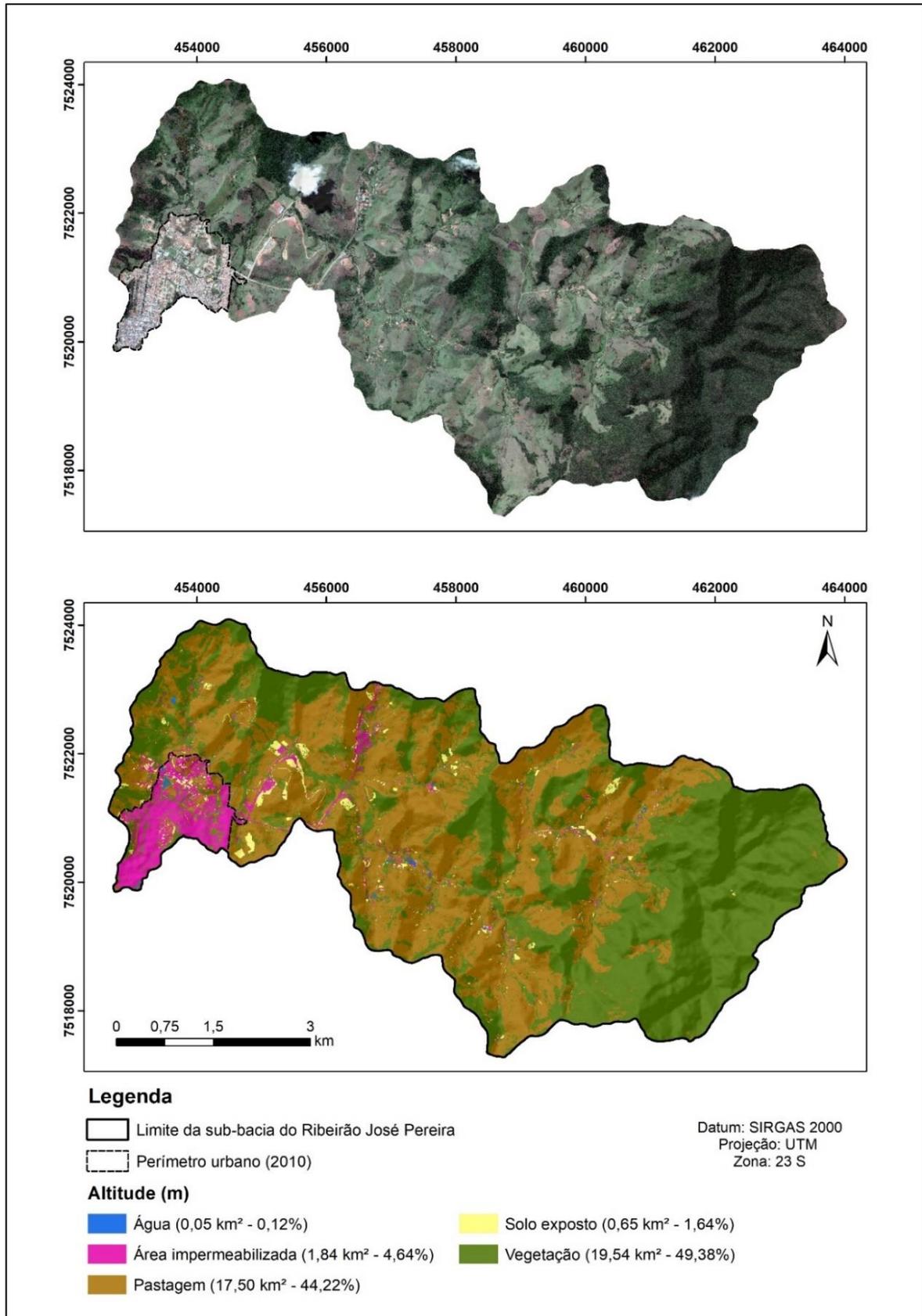


Figura 6.3 - Mapa de uso e cobertura do solo da sub-bacia do Ribeirão José Pereira. Fonte: Imagem do satélite *QuickBird* do dia 21 de maio de 2011.

Com os mapas temáticos finalizados, as classes de cada condicionante foram comparadas em uma matriz par a par e um valor de importância relativa foi atribuído ao relacionamento entre estas classes, com base na escala de Saaty (1980) apresentada na seção 3.2, que expressa a intensidade com que uma classe predomina sobre a outra em relação à predisposição de ocorrência de um evento, no caso as inundações. Como pode ser observado na Tabela 6.3, que apresenta a matriz de comparação para todas as variáveis, todos os julgamentos obtiveram Razão de Consistência inferior a 0,10, indicando que não houve inconsistências, ou seja, que as comparações realizadas foram coerentes.

Quanto às distâncias do Ribeirão José Pereira, as menores distâncias receberam os maiores pesos, visto que os eventos de inundação ocorrem nas proximidades do curso d'água. Em contrapartida, à medida que essa distância aumenta, a inclinação e a elevação tornam-se maiores, diminuindo a suscetibilidade a inundações (DAS, 2018).

Em relação ao ITU, valores altos representam planícies com baixo gradiente de declive e com solo úmido, enquanto valores baixos representam terras altas com alto gradiente de declive (LAPPAS; KALLIORAS, 2019; MOJADDADI et al., 2017). Dessa forma, quanto maior o valor do índice, maior foi o peso adotado e maior será a suscetibilidade a inundações.

O tipo de solo e de uso e cobertura do solo foram ponderados, por sua vez, em relação à capacidade de infiltração e drenagem. As áreas impermeabilizadas tendem a acumular mais água em superfície do que em solos com cobertura florestal (solos pouco compactados) (MAGALHÃES et al., 2011) e, por essa razão, apresentaram os maiores pesos em ambos os condicionantes.

O tipo de solo que recebeu o segundo maior peso foi o gleissolo, visto que são solos característicos de áreas de várzea, planícies aluvionares mal ou muito mal drenadas, onde o lençol freático fica elevado durante grande parte do ano (ANTUNES et al., 2013). Os argissolos, por sua vez, são solos de profundidade variável, que variam de forte a imperfeitamente drenados (EMBRAPA, 2018) e, por essa razão, receberam o terceiro maior peso. Os latossolos, devido a sua alta taxa de infiltração e alta capacidade de drenagem (SARTORI et al., 2005) receberam o quarto maior peso. Os cambissolos estão presentes predominantemente em relevos mais declivosos na sub-bacia e, segundo Antunes et al. (2013), nessas circunstâncias sua ocorrência é indicativa de áreas potenciais de movimentos de massa. Dessa forma, essa classe de solo recebeu o menor peso em relação à suscetibilidade a inundações.

Em relação ao uso e cobertura do solo, além da área impermeabilizada, as classes de solo exposto e pastagem também receberam pesos mais altos. No geral, a perda de cobertura vegetal para o uso agrícola e urbano tem produzido como consequência o aumento da

frequência de inundações devido à falta de interceptação da precipitação e aumento do escoamento superficial (FRANCO; DAL SANTO, 2015; RAVAZZANI et al., 2014).

Tabela 6.3 - Matriz de comparação par a par das classes dos fatores condicionantes de inundações

Classes das variáveis								
Distância do curso d'água	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	w (pesos)	
(1) < 25,00	1	2	4	5	7	9	0,413	
(2) 25,00 - 50,00	1/2	1	3	4	6	8	0,332	
(3) 50,00 - 100,00	1/4	1/3	1	3	5	7	0,141	
(4) 100,00 - 500,00	1/5	1/4	1/3	1	1	1	0,041	
(5) 500,00 - 1000,00	1/7	1/6	1/5	1	1	1	0,037	
(6) > 1000,00	1/9	1/8	1/7	1	1	1	0,035	
<i>Razão de consistência = 0,0630</i>								
ITU	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	w (pesos)	
(1) < 7,00	1	1/2	1/3	1/4	1/7	1/9	0,033	
(2) 7,00 - 8,00	2	1	1/2	1/3	1/5	1/7	0,058	
(3) 8,00 - 9,00	3	2	1	1/2	1/3	1/5	0,098	
(4) 9,00 - 10,00	4	3	2	1	1/2	1/4	0,150	
(5) 10,00 - 11,00	7	5	3	3	1	1/3	0,256	
(6) 11,00 - 20,71	9	7	5	4	3	1	0,405	
<i>Razão de consistência = 0,0257</i>								
Solo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	w (pesos)
(1) Área urbanizada	1	7	2	5	5	4	4	0,339
(2) Cambissolo Háplico	1/7	1	1/6	1/2	1/2	1/3	1/3	0,036
(3) Gleissolo Háplico	1/2	6	1	4	4	3	3	0,260
(4) Latossolo Vermelho	1/5	2	1/4	1	1	1/2	1/2	0,066
(5) Latossolo Vermelho-Amarelo	1/5	2	1/4	1	1	1/2	1/2	0,066
(6) Argissolo Vermelho	1/4	3	1/3	2	2	1	1	0,116
(7) Argissolo Vermelho-Amarelo	1/4	3	1/3	2	2	1	1	0,116
<i>Razão de consistência = 0,0139</i>								
Uso e cobertura do solo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	w (pesos)		
(1) Área impermeabilizada	1	2	3	5	7	0,382		
(2) Solo exposto	1/2	1	2	4	6	0,286		
(3) Pastagem	1/3	1/2	1	3	5	0,209		
(4) Vegetação	1/5	1/4	1/3	1	2	0,080		
(5) Água	1/7	1/6	1/5	1/2	1	0,043		
<i>Razão de consistência = 0,0300</i>								

Na sequência, os fatores condicionantes também foram comparados em uma matriz par a par, a fim de se hierarquizar a influência destes na ocorrência de inundações. O julgamento realizado pode ser visualizado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Matriz de comparação par a par dos fatores condicionantes de inundações

Fator condicionante	(1)	(2)	(3)	(4)	w (pesos)
(1) Uso e cobertura do solo (UCS)	1	2	2	3	0,387
(2) Distância do curso d'água (DIST)	1/2	1	2	3	0,315
(3) ITU	1/2	1/2	1	2	0,194
(4) Solos (S)	1/3	1/3	1/2	1	0,105
<i>Razão de consistência = 0,0309</i>					

Considerando-se que na sub-bacia do Ribeirão José Pereira a maior ocorrência de eventos de inundação se dá nas áreas de várzea do ribeirão localizadas na área urbana, os maiores pesos foram atribuídos para o uso e cobertura do solo e para a distância do curso d'água. O ITU recebeu o terceiro maior peso, tendo em vista que mesmo que o índice esteja diretamente relacionado com a quantidade de fluxo a se acumular em qualquer ponto da área de uma bacia, a cobertura do solo pode ser determinante na geração de escoamento superficial. Da mesma forma, o manejo e a ação antrópica sobre o solo também influenciam na sua taxa de infiltração (SCHULER, 2003), levando o fator solo a ter um peso menor que os outros três condicionantes.

Dessa forma, o índice de suscetibilidade a inundações na sub-bacia do Ribeirão José Pereira pode ser calculado pela Equação 6.1:

$$ISI = 0,387 * UCS + 0,315 * DIST + 0,194 * ITU + 0,105 * S \quad (6.1)$$

Após a atribuição dos pesos, os fatores foram agregados utilizando-se a ferramenta *Weighted Sum* do ArcGIS 10.2. Esta soma foi, então, normalizada na escala de 0 a 1 e disposta nos intervalos estabelecidos. O mapa final da distribuição do ISI na área de estudo pode ser visualizado na Figura 6.4.

Como pode-se observar, as áreas com ISI médio a muito alto (3,76 km² - 9,53%) se concentraram principalmente na área de várzea do Ribeirão José Pereira. Mais de 90,00% da sub-bacia (áreas em verde) não apresentava riscos de inundação, compreendendo áreas mais afastadas do curso d'água, com menor taxa de impermeabilização e com topografia que não favorece o acúmulo do fluxo de água.

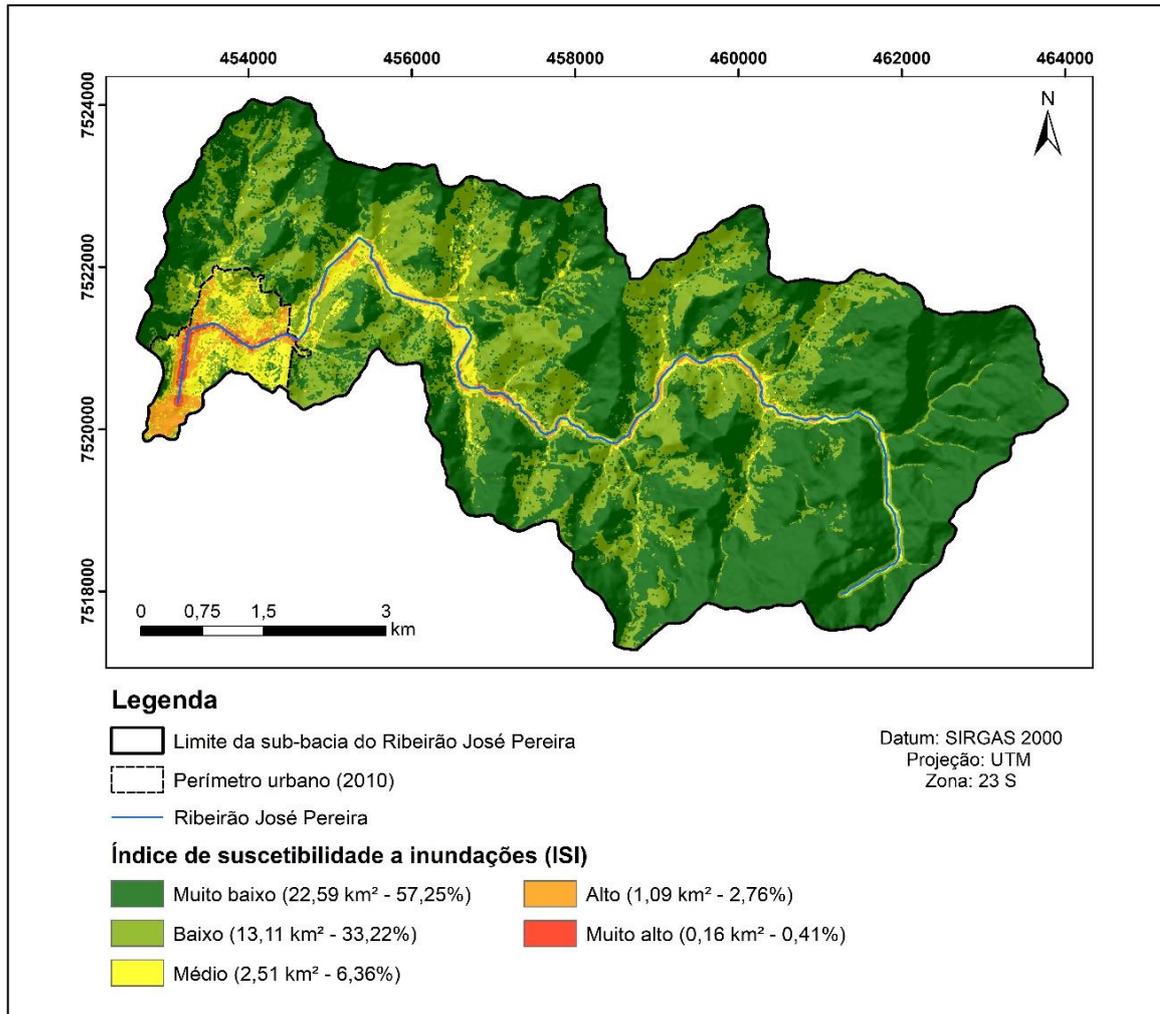


Figura 6.4 - Mapa de suscetibilidade a inundações da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Em relação à distância do curso d'água, as áreas de muito alto ISI envolvem regiões distantes até 64 m do ribeirão, enquanto nas regiões de alta suscetibilidade, essa distância em média é de 112 m. Essas áreas podem ser melhor observadas pela Figura 6.5, que apresenta uma ampliação do mapeamento para regiões de interesse. As áreas de alta e muito alta suscetibilidade correspondem também a áreas com ITU médio de 12,45, existindo regiões que podem atingir valores de até 20,22, o que é coerente, tendo em vista que os valores do índice são maiores em áreas de várzea e de grande potencial de geração de escoamento superficial (ADAM; DAVID, 2011; DAS, 2020).

Em relação aos tipos de solo, no geral as classes de médio a muito alto ISI possuem maior ocorrência na área urbana. Fora do perímetro urbano, essas áreas, que podem ser visualizadas com maior detalhe no enquadramento B do mapa da Figura 6.5, são ocupadas, em sua maioria, pela classe de solos gleissolo. O gleissolo encontrado na região se caracteriza pelo caráter hidromórfico (excesso de umidade), devido à disposição no relevo (planície com baixa

declividade), má condição de drenagem e pela presença de lençol freático em profundidades variando de 60 a 130 cm (LIMA, 2012), o que implica em um solo suscetível a inundações.

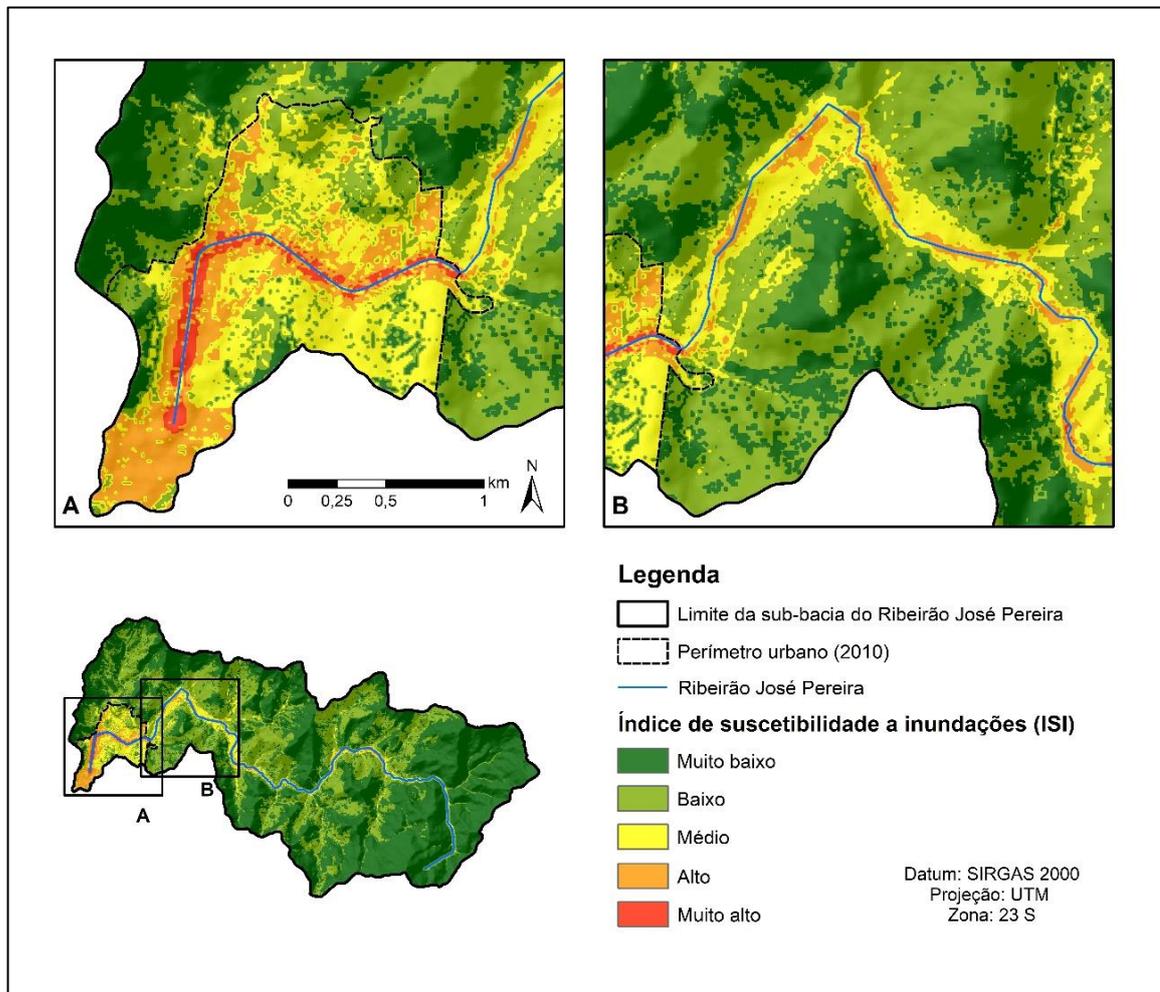


Figura 6.5 - Ampliação do mapa de suscetibilidade a inundações em áreas de interesse

No que se refere ao uso e cobertura do solo, as classes de alto e muito alto ISI compreendem, principalmente, áreas impermeabilizadas, enquanto as classes médio e baixo ocorrem, em sua maioria, em áreas de pastagem. Já as áreas menos suscetíveis são ocupadas sobretudo pela cobertura vegetal, o que faz sentido, dado que, segundo Parsian et al. (2021) e Rodrigues et al. (2015), a vegetação atua na interceptação da água das chuvas, diminuindo a água que chega ao solo.

Através do mapa do enquadramento A da Figura 6.5, pode ser observada, ainda, uma região na extremidade da sub-bacia que apresenta alta suscetibilidade a inundações, nas proximidades de onde o ribeirão é estrangulado por uma galeria até desaguar no Rio Sapucaí. Essa região, bastante impermeabilizada, possui grande potencial em sofrer com inundações em

razão de que em época de cheia do Rio Sapucaí, este atua como barramento à vazão do Ribeirão José Pereira, causando uma enchente de retrofluxo (CPRM, 2014).

6.2 Dimensão social

No mapeamento da vulnerabilidade social (IVS), os indicadores sociais selecionados do Censo Demográfico de 2010 primeiramente foram normalizados numa escala de 0 a 1 por diferentes funções *fuzzy* disponíveis na ferramenta *Fuzzy Membership* do ArcGIS 10.2. O resultado da normalização, considerando como esses fatores influenciam na vulnerabilidade social, pode ser visualizado na Figura 6.6.

Em relação à renda domiciliar, pode-se observar que os setores de maior preocupação se encontram na zona rural da sub-bacia, onde, em média, 75,13% dos domicílios apresentavam, em 2010, renda per capita inferior a 1 SM ou não possuíam rendimento. Dentro do perímetro urbano, essa média cai para 29,01%, sendo que o valor máximo observado foi de 54,89% (região em laranja). No perímetro urbano, tem-se, também, que em média 34,12% dos domicílios particulares permanentes (o que não inclui alojamento de trabalhadores ou de estudantes) eram alugados. Alguns setores atingiram, no entanto, um total de 57,86% domicílios alugados, enquanto na área rural o máximo encontrado foi de 9,17%.

No que se refere aos responsáveis pelo domicílio, existiam setores na área urbana que apresentavam 62,96% dos domicílios com responsável do sexo feminino. Em contrapartida, fora do perímetro urbano a porcentagem máxima encontrada foi de 33,01%. A população mais vulnerável (crianças e idosos), por sua vez, corresponde, em média, a 30% da população dos setores censitários da área de estudo, com regiões podendo alcançar 39,34% (setores em vermelho).

Quanto à infraestrutura de saneamento básico na sub-bacia, pode-se observar que as áreas rural e urbana apresentavam condições contrastantes. Na área urbana, em média 95,84% dos domicílios possuíam abastecimento de água por rede geral de distribuição, enquanto nos setores rurais essa média diminuía para 33,33%. Em média, 97,32% dos domicílios dentro do perímetro urbano dispunham de banheiro de uso exclusivo dos moradores e esgotamento sanitário via rede pluvial de esgoto, enquanto na área rural essa média decaía para 21,45%. Nesse caso, os valores normalizados próximos a 0 estão associados à baixa vulnerabilidade social (atendimento próximo a 100%), enquanto os próximos de 1 à alta vulnerabilidade socioambiental (atendimento próximo a 0%).

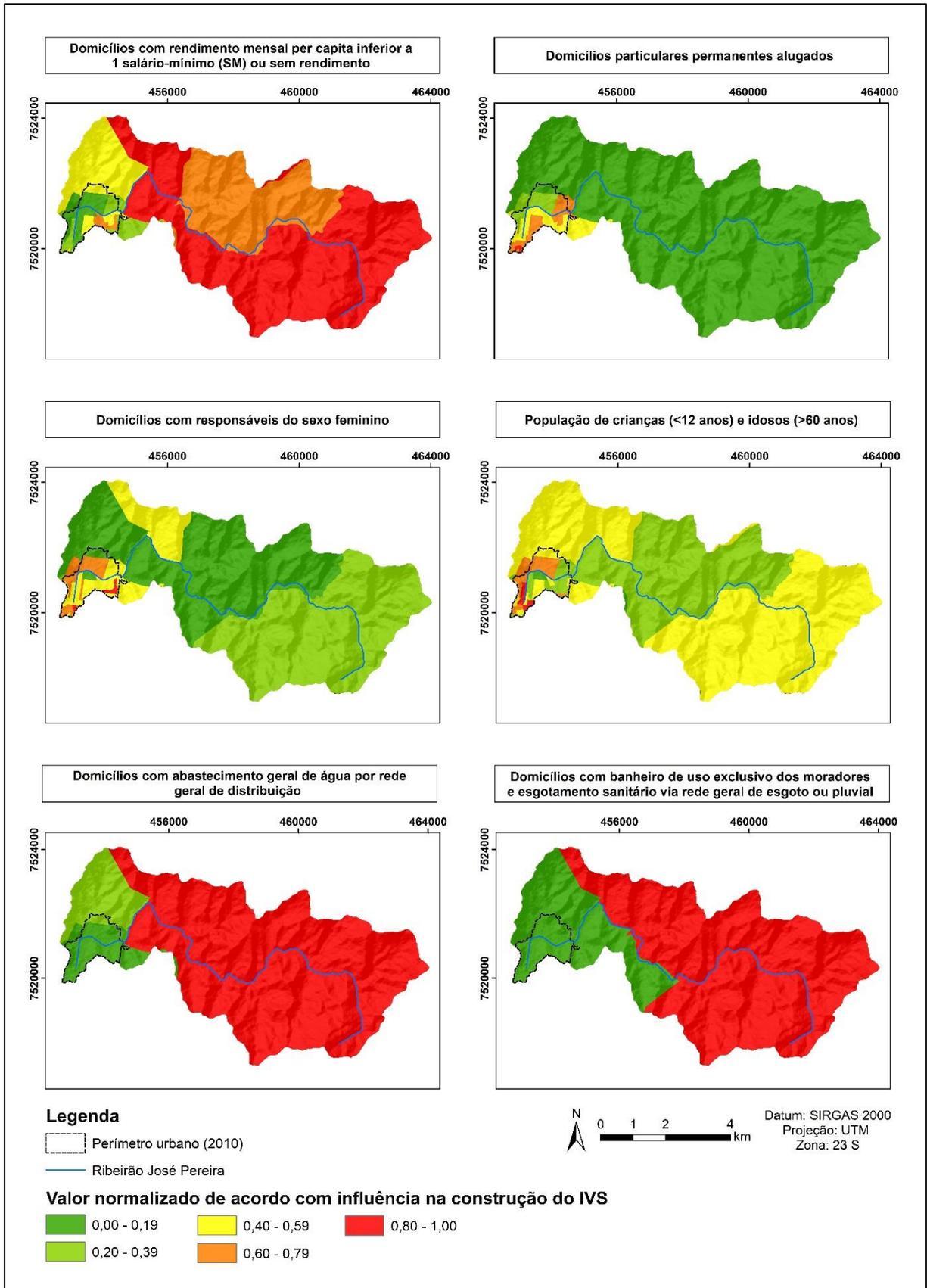


Figura 6.6 - Mapas das variáveis sociais envolvidas no IVS com seus valores normalizados

Com base na análise dos mapas e no levantamento bibliográfico realizado, esses indicadores foram comparados em uma matriz par a par, a fim de se hierarquizar a influência destes na vulnerabilidade social da população. O julgamento realizado pode ser visualizado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Matriz de comparação par a par dos fatores envolvidos na vulnerabilidade social

Indicadores	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	w (pesos)
(1) Renda mensal per capita de até 1SM ou sem rendimento	1	2	2	3	4	4	0,345
(2) Domicílios particulares permanentes alugados	1/2	1	2	2	3	3	0,233
(3) Responsável do sexo feminino	1/2	1/2	1	1	2	2	0,139
(4) População de idosos e crianças	1/3	1/2	1	1	2	2	0,139
(5) Abastecimento de água por rede geral	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1	0,073
(6) Banheiro exclusivo e esgotamento via rede geral	1/4	1/3	1/2	1/2	3	1	0,073
<i>Razão de consistência = 0,008</i>							

A renda é um dos aspectos fundamentais para a manutenção da família e da moradia, elementos importantes para a resiliência em desastres, tendo em vista que a capacidade da sociedade para o enfrentamento dos danos através da prevenção de desastres geralmente aumenta com a melhoria financeira (ALVINO-BORBA et al., 2020; MARCHEZINI; FORINI, 2019). Dessa forma, o fator relacionado à renda recebeu o maior peso.

O indicador relacionado à condição de ocupação do domicílio recebeu o segundo maior peso. Alguns estudos no Brasil têm apontado as dificuldades de realocação em situação de inundação, justificativas pela falta de lugar para morar, falta de dinheiro ou ausência de um lugar equivalente para morar (ABREU; ZANELLA, 2015; SILVA et al., 2020b). Após eventos de inundações, depois que as famílias passaram por prejuízos financeiros muito grandes, elas podem necessitar de auxílio do poder público para o pagamento do aluguel de suas casas e para a recuperação pós desastre. No entanto, conforme relatado por Araújo (2019), o poder público muitas vezes é ineficiente e omissivo na garantia do direito constitucional à moradia digna para a população, aumentando sua vulnerabilidade.

A falta de habitação adequada e condições de baixa renda levam, por sua vez, determinados grupos populacionais, como mulheres, crianças e idosos, a serem mais vulneráveis aos desastres naturais (FREITAS et al., 2012). Dessa forma, os indicadores relacionados à população de crianças e idosos e a presença da mulher como responsável pela unidade domiciliar receberam o terceiro maior peso.

Por último, encontram-se as variáveis relacionadas ao saneamento básico. Em períodos de fortes precipitações, problemas na distribuição de água potável, o acúmulo de resíduos e presença de esgotos abertos, resultantes da falta de saneamento e da urbanização desordenada, acabam favorecendo a reprodução de vetores e hospedeiros (BARCELLOS; SABROZA, 2001; PORTELA et al., 2020).

Após a atribuição dos pesos, os fatores foram agregados utilizando-se a ferramenta *Weighted Sum* do ArcGIS 10.2. Esta soma foi, então, normalizada na escala de 0 a 1 e disposta nos intervalos estabelecidos. O mapa final da distribuição do IVS na área de estudo pode ser visualizado na Figura 6.7.

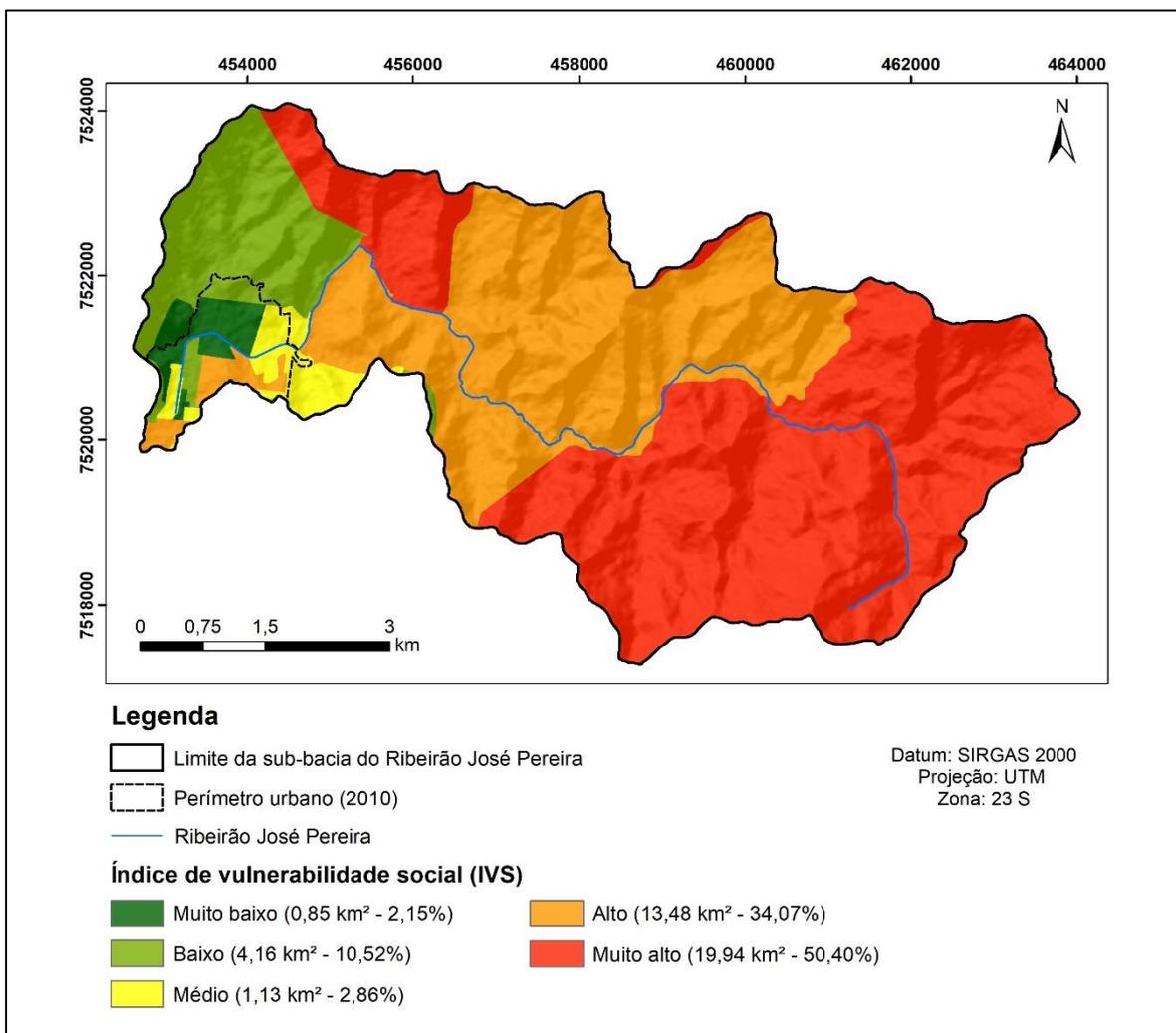


Figura 6.7 - Mapa de vulnerabilidade social da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Como pode-se observar, as áreas com IVS muito alto (50,40%) se concentram na zona rural da sub-bacia, nos quais os setores censitários apresentavam, em 2010, 74,76% a 80,34% dos domicílios sem rendimento ou com rendimento mensal per capita de até 1SM e péssimos

índices relacionados à infraestrutura de saneamento básico, com menos de 50% dos domicílios atendidos. Em contrapartida, em setores com IVS muito baixo (2,15%) as infraestruturas de saneamento básico atendem a mais de 98% dos domicílios e menos de 14% dos domicílios possuem rendimento mensal per capita inferior a 1 SM ou não possuem renda mensal.

A dimensão social do índice de vulnerabilidade socioambiental proposto no presente trabalho abrange, ainda, a exposição da população ao risco de inundações, instrumentalizada pela densidade demográfica. Para a inclusão dessa variável, a densidade demográfica também foi normalizada através de uma função *fuzzy* no ambiente do ArcGIS 10.2 e o resultado é apresentado na Figura 6.8.

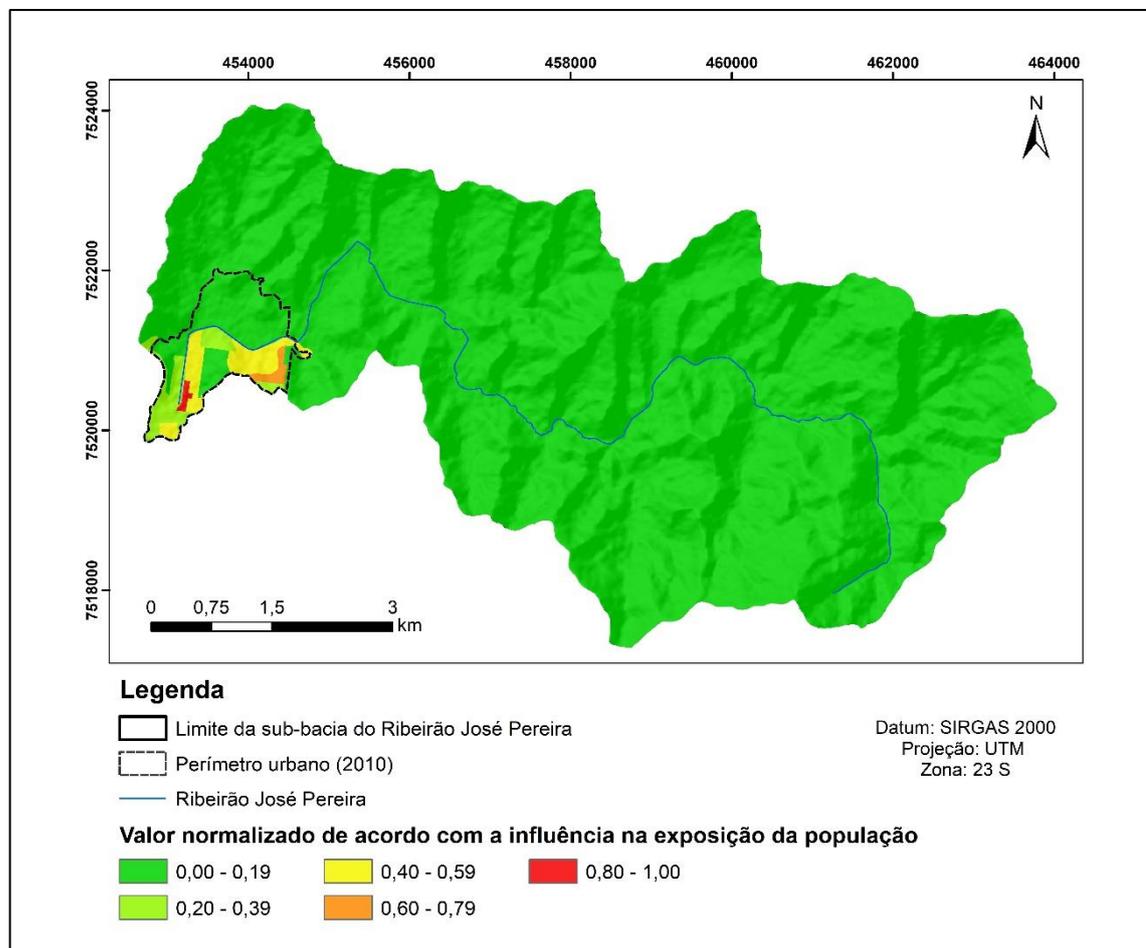


Figura 6.8 - Distribuição espacial da densidade demográfica após normalização

Existiam, em 2010, setores censitários na porção rural que não ultrapassavam 100 hab/km² (todos os setores em verde escuro). Em contrapartida, o setor representado em vermelho no mapa apresentava densidade demográfica próxima a 15.000 hab/km². Segundo Jacobi et al. (2013) e Koks et al. (2015), a elevada densidade demográfica implica numa maior

exposição de pessoas e bens ao risco de inundações, ampliando os impactos negativos sobre a população e o meio ambiente.

6.3 Vulnerabilidade socioambiental

Após o estudo das dimensões ambiental e social da sub-bacia, os mapas resultantes foram agregados em ambiente SIG, utilizando-se os pesos definidos pela Equação 5.2, que considera 50% de influência para a suscetibilidade a inundações, 25% de influência para a vulnerabilidade social e 25% para a exposição da população. O mapa final da distribuição do IVSA na área de estudo pode ser visualizado na Figura 6.9.

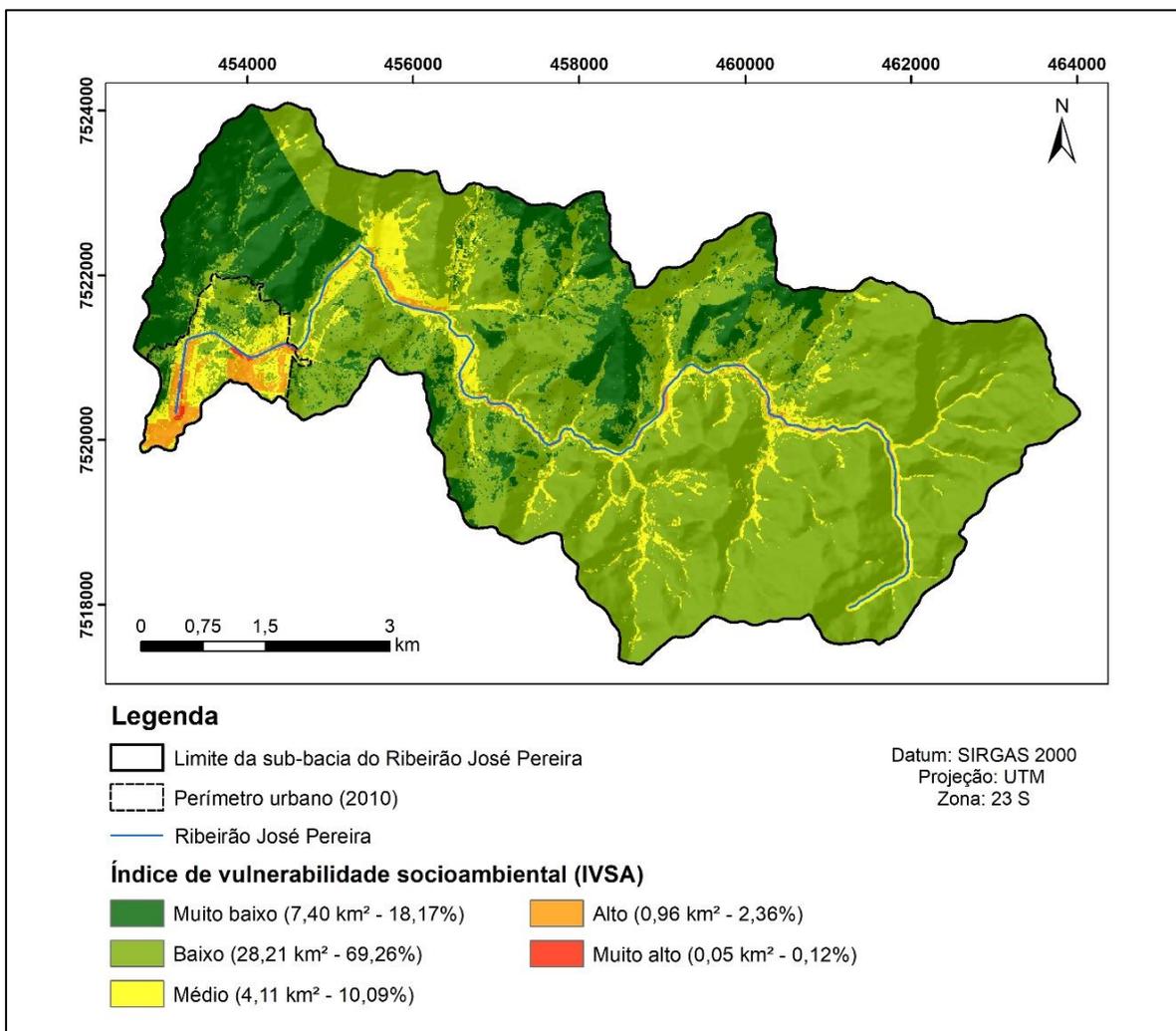


Figura 6.9 - Mapa de vulnerabilidade socioambiental a inundações da sub-bacia do Ribeirão José Pereira

Como pode-se observar, a classe de baixa vulnerabilidade socioambiental prevalece, principalmente fora do perímetro urbano, devido às características ambientais (relevo mais

ondulado e montanhoso) e a baixa densidade demográfica. Já as áreas de alto e muito alto IVSA, que representam 2,48% da sub-bacia, estão reunidas, majoritariamente, na área urbana, onde existe uma maior população exposta ao risco e maiores índices de suscetibilidade a inundações.

A fim de proporcionar uma discussão mais aprofundada dos fatores que levaram uma região a ter um baixo ou alto IVSA, alguns setores censitários foram destacados, como pode ser observado nas figuras 6.10 a 6.12. Foi realizado, ainda, o detalhamento de todos os índices, como o ISI médio e seu desvio padrão e os dados sociais.

O setor “A”, que possui áreas de médio a alto IVSA, está localizado nas margens do Ribeirão José Pereira e apenas 2,65% dos domicílios nele situados apresentavam rendimento mensal per capita inferior a 1SM ou não apresentavam rendimento. No entanto, este setor possui alta taxa de impermeabilização, topografia plana típica de várzea de rio e a maior densidade demográfica da sub-bacia, corroborando para um alto/muito alto IVSA. A região é caracterizada, também, por uma ocupação mais vertical e apesar de toda essa população sofrer com transtornos gerados por eventos de inundação, como dificuldades de mobilidade e possibilidade de contaminação por doenças de veiculação hídrica, segundo Rezende et al. (2019), o andar térreo é o que está mais exposto aos riscos de inundações e aos danos que podem ser causados. Nesse contexto, a indisponibilidade de indicadores relacionados à estrutura das edificações prejudica uma melhor quantificação da população com maior exposição aos riscos de inundações.

A realidade dessa região da sub-bacia (bairro BPS), bem como o panorama encontrado no bairro Pinheirinho, representado por setores com baixa taxa de domicílios sem rendimento mensal per capita é, no entanto, diferente da observada nos setores “C” e “D”, que também apresentam alta densidade populacional, e nos quais a situação socioeconômica da população é mais crítica. Nessa região, inserida no bairro Cruzeiro, mais de 40% dos domicílios apresentavam renda mensal per capita de até 1SM ou não apresentavam rendimento.

A baixa renda é um grande fator de vulnerabilidade, visto que, como verificado após alguns eventos de desastres, é comum que o valor de auxílio-moradia fornecido pelo poder público seja insuficiente para cobrir os custos e os atingidos não tenham renda complementar para arcar com os custos de energia, água, alimentação e transporte (MARCHEZINI; FORINI, 2019; SILVA et al., 2020b). Nesse sentido, Souza (2011) aponta que a existência de medidas de proteção e de políticas públicas de assistência social e recuperação socioeconômica de áreas atingidas atuam como colaboradores no enfrentamento dos desafios do cenário pós-desastre.

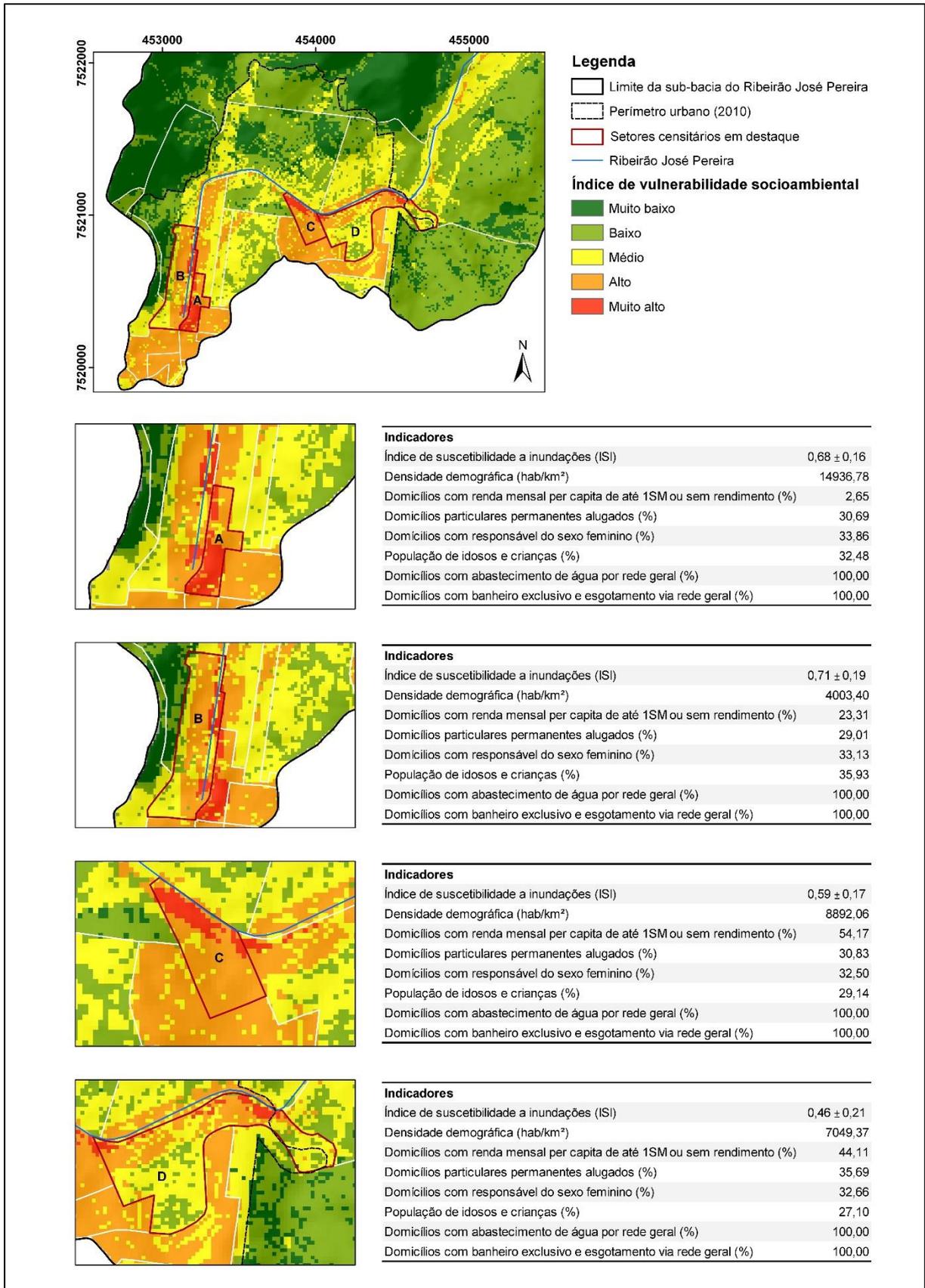


Figura 6.10 - Detalhamento do IVSA em setores no perímetro urbano da sub-bacia: “A” a “D”

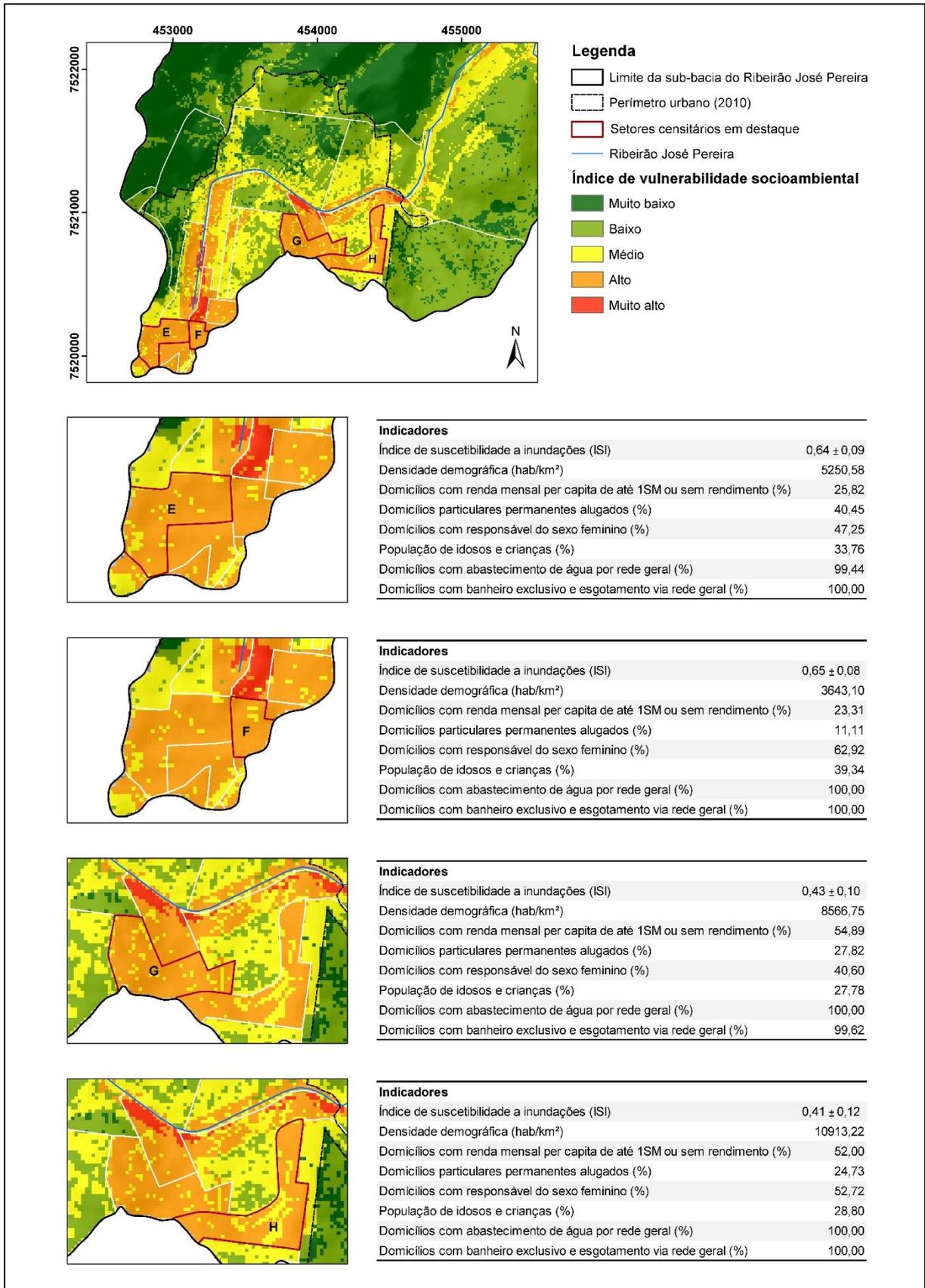


Figura 6.11 - Detalhamento do IVSA em setores no perímetro urbano da sub-bacia: “E” a “H”

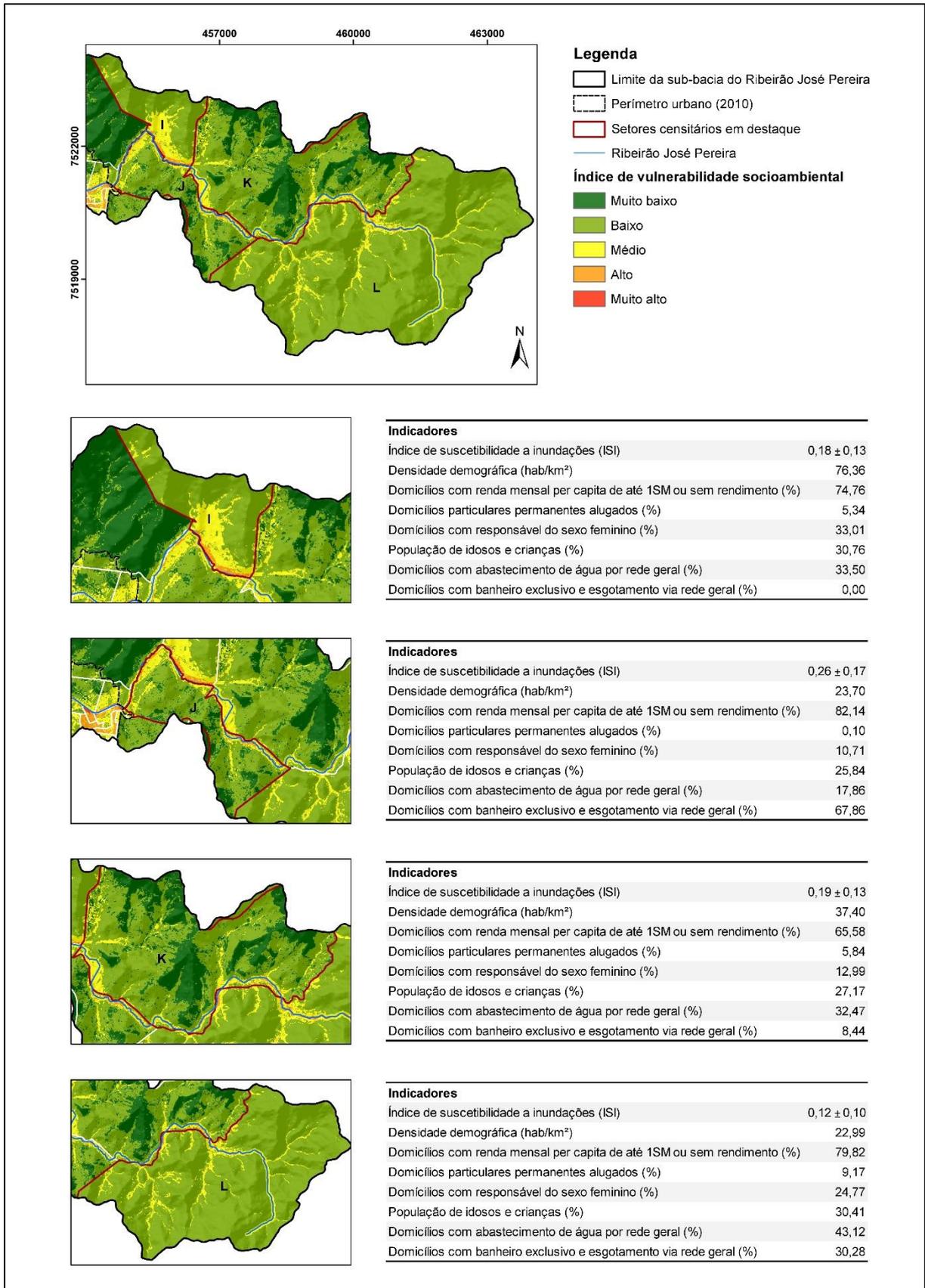


Figura 6.12 - Detalhamento do IVSA em setores na área rural da sub-bacia: “I” a “L”

Em relação aos setores destacados na Figura 6.11 (setores “E” a “H”), observa-se maiores taxas de domicílios com responsável do sexo feminino. Neumayer e Plümper (2007) relatam a diferença no impacto dos desastres naturais na expectativa de vida de mulheres em comparação aos homens, não só por diferentes exposições físicas ou diferenças fisiológicas e biológicas, mas também pelos padrões de discriminação e desigualdade de gênero. Apontaram, ainda, que, em geral, quanto mais grave um desastre natural, mais mulheres falecem e que a média de idade das mulheres mortas é inferior à dos homens. Dessa forma, quando uma mulher responsável por um domicílio é severamente afetada por um evento de desastre, seja em sua saúde física e/ou mental ou situação econômica, a unidade domiciliar pode tornar-se mais frágil e apresentar maiores dificuldades na fase de recuperação pós-desastre.

Os setores “E” e “F”, assim como os demais setores localizados nessa extremidade da sub-bacia (correspondente a uma parte do centro de Itajubá), e classificados, predominantemente, com alto IVSA, apresentam aproximadamente um quarto dos domicílios sem rendimento ou com rendimento mensal per capita de até 1SM. Essas áreas necessitam também de atenção do poder público, principalmente por estarem localizadas em áreas que podem receber o fluxo excedente de água não comportado na galeria em eventos de cheia, levando a alagamentos e possíveis transtornos à população.

O setor “F” apresenta, ainda, a maior taxa da população de crianças e idosos. No geral, o grupo etário infantil é o mais afetado por desastres naturais, representando, em média, 30 a 50% da população acometida por esses eventos (MOSS et al., 2006). Uma das razões para essa porcentagem é que quanto mais jovem e imatura for a criança, menor sua percepção de risco e maior sua vulnerabilidade e, conseqüentemente, mais dependente ela é de terceiros (BRASIL, 2002). Em relação ao idoso, as doenças e limitações funcionais ampliam ainda mais sua vulnerabilidade em situações de desastres, dado que o comprometimento de variáveis como percepção de risco, estado de alerta, atenção, agilidade e mobilidade dificultam ou impedem as respostas nessas situações (BODSTEIN et al., 2014).

Já os setores “G” e “H”, inseridos nos bairros Cruzeiro e Estiva, respectivamente, apresentam áreas classificadas com alta vulnerabilidade socioambiental devido ao alto adensamento populacional e à taxa de domicílios em vulnerabilidade econômica. Apesar da presença de média suscetibilidade a inundações, as áreas mais baixas desses setores podem sofrer principalmente com acúmulo momentâneo de águas em determinados locais por deficiência no sistema de drenagem, causando transtornos à população. Nessa região, os aspectos sociais tiveram grande participação na classificação da vulnerabilidade, comportamento igualmente observado em outros estudos que buscaram analisar a

vulnerabilidade socioambiental a partir da integração de dados físicos e socioespaciais, como os trabalhos de Marques et al. (2017) em Campinas (SP) e Freitas et al. (2015) em Santos (SP).

Por fim, tem-se as regiões fora do perímetro urbano, representadas pelos setores “I” a “L”. Nesses setores, apenas a região mais próxima do ribeirão apresentou áreas com médio a alto índice de suscetibilidade a inundações, o que é razoável, tendo em vista que essa região possui menor taxa de impermeabilização e que existe um desnível entre a Serra dos Toledos (lesta da sub-bacia) e a planície do Ribeirão, o que contribui para que o fluxo de água se acumule na área urbana da sub-bacia em eventos de chuva extrema. Devido aos baixos valores de ISI e à baixa exposição populacional nessas áreas, que podem ser verificadas nas tabelas da Figura 6.12, essa região não apresentou IVSA muito alto.

No entanto, é de grande importância que o poder público esteja atento a essas populações, principalmente as que moram nas margens dos rios ou aquelas que residem em terrenos mais íngremes, em razão das características socioeconômicas e de infraestrutura desses domicílios. Além desses setores censitários apresentarem taxas de mais de 65,00% dos domicílios com rendimento mensal per capita de até 1SM ou sem rendimento, ocorrem também baixas taxas de atendimento de infraestrutura básica de saneamento básico. Eventos de natureza hidrológica trazem efeitos que podem comprometer os serviços de saneamento ambiental, a quantidade e a qualidade da água, o solo e oferta de alimentos, bem como alterações nos ciclos de vetores, hospedeiros e reservatórios de doenças (FREITAS et al., 2014). Em regiões rurais nas quais faz-se uso de foça séptica, valas ou lançamento em rios e lagos para destinação do efluente doméstico ou uso de poços, nascentes ou cisternas para obtenção de água, eventos de inundação e alagamentos configuram situações de risco de contaminação da água e proliferação de doenças.

É importante ressaltar, ainda, que Santos et al. (2021) verificaram um aumento da taxa de construções em algumas áreas dos setores “I” e “J” entre os anos de 2011 e 2020, e essa expansão tem se acentuado desde a construção do Parque Municipal de Itajubá, em meados do ano de 2016. Dessa forma, como o IVSA mapeado no presente trabalho teve como base os dados do último Censo Demográfico realizado no ano de 2010, e o uso e cobertura do solo é referente ao ano de 2011, é de extrema importância que futuramente a metodologia seja replicada com dados mais atualizados, a fim de se avaliar o impacto da expansão urbana nesses setores, quanto à vulnerabilidade socioambiental a inundações das populações ali residentes.

Assim sendo, o IVSA proposto e a análise detalhada dos setores destacados possibilitaram apontar as nuances da vulnerabilidade socioambiental a inundações na sub-bacia estudada e pode ser atualizado à medida que novos dados sejam disponibilizados. Segundo

Guerra (2020), em países caracterizados por desigualdades sociais, como o Brasil, é pertinente a utilização de estudos fundamentados nos conceitos de vulnerabilidade socioambiental na abordagem das situações de risco ambiental. A construção de metodologias baseadas nesta conceituação é tão importante quanto a identificação das áreas de risco ambiental, e ambas devem ser utilizadas de modo integrado.

Cabe aqui também ressaltar o fato de que outras variáveis poderiam ser utilizadas no mapeamento da vulnerabilidade a inundações, tais como: estrutura das edificações; altura das edificações em relação ao nível das ruas; tipo de pavimentação; tipo de vegetação; infraestrutura de saúde para atendimento da população, entre outros. A seleção dos indicadores é, no entanto, um processo complexo, que depende do acesso aos dados, e que deve proporcionar uma abordagem integrada da vulnerabilidade e, ao mesmo tempo, simplificar a realidade da área de estudo, a fim de possibilitar a real compreensão do fenômeno estudado (BIRKMANN et al., 2013; HAGGETT; CHORLEY, 1974)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do estudo da vulnerabilidade socioambiental da sub-bacia do Ribeirão José Pereira, localizada no município de Itajubá, foi possível observar as áreas que se apresentam mais e menos vulneráveis a inundações, o que permitiu entender como os tipos de uso do solo e as condições sociais, econômicas e demográficas influenciam nesse fenômeno.

O mapeamento da dimensão ambiental foi capaz de identificar as áreas mais suscetíveis aos eventos de inundação, que correspondem a cerca de 3,17% da sub-bacia, e aquelas que sofrem com acúmulo de água em eventos extremos de chuva. Os fatores condicionantes empregados na metodologia avaliaram adequadamente a influência dos aspectos ambientais associados ao risco potencial de inundação, em concordância com algumas áreas de ocorrência de pontos críticos de enchentes identificadas no relatório do SGB - CPRM (CPRM, 2014).

A espacialização da vulnerabilidade social, por sua vez, mostrou uma tendência de áreas rurais com alta vulnerabilidade, ao mesmo tempo que evidenciou as discrepâncias sociais existentes dentro do perímetro urbano da sub-bacia que podem ser constatadas pelos diversos padrões de urbanização presentes na região e pelas porcentagens de domicílios economicamente vulneráveis em cada setor, com destaque negativo para os bairros Cruzeiro e Estiva.

Dessa forma, a proposta metodológica possibilitou, a partir dos principais indicadores de vulnerabilidade social provenientes do Censo Demográfico do IBGE e de dados ambientais de fácil acesso, a criação de um índice de vulnerabilidade socioambiental que forneça informações em nível local e regional das populações que necessitam de um olhar mais atento do poder público, seja por estarem em situação de vulnerabilidade socioeconômica, seja por apresentarem alto grau de exposição ao risco de inundações. Como resultado, cerca de 12% da sub-bacia apresentou médio a muito alto IVSA, com áreas concentradas no perímetro urbano, onde há alta taxa de impermeabilização do solo e os maiores índices de densidade demográfica.

Compreende-se que esses resultados podem subsidiar o desenvolvimento e implementação de políticas públicas a fim de tornar essas populações mais resilientes frente aos desastres naturais. Essas ações, além de estarem alinhadas com a garantia da qualidade de vida da população, são também agenda política da Organização das Nações Unidas - ONU, através dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS. No ODS 13, por exemplo, há um apelo para a necessidade de reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e promover capacitação para o planejamento relacionado à mudança do clima e à

gestão eficaz, nos países menos desenvolvidos, inclusive com foco em mulheres, jovens, comunidades locais e marginalizadas.

É importante ressaltar, ainda, a necessidade de que esse mapeamento seja atualizado após a publicação dos dados do Censo Demográfico 2022 do IBGE, a fim de avaliar a evolução do IVSA na sub-bacia, em razão de sua constante expansão urbana. Nesse sentido, imagens gratuitas do satélite CBERS-04A, operado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e com resolução espacial que pode chegar a 2m, podem ser utilizadas, visando facilitar a replicação da metodologia e a adaptação para regiões de estudo além da sub-bacia do Ribeirão José Pereira.

Ademais, o conhecimento de áreas suscetíveis a processos cuja dinâmica pode levar a desastres naturais é de extrema importância, pois contribui para o planejamento do uso e ocupação do solo, controle da expansão urbana e avaliação de cenários potenciais de risco, podendo embasar medidas de restrição de ocupação de determinadas áreas suscetíveis ou o desenvolvimento de ações voltadas à redução de riscos em áreas já ocupadas. A sub-bacia do Ribeirão José Pereira, em específico, carece de um melhor planejamento de sua expansão urbana, para que o aumento da impermeabilização do solo não agrave os riscos de inundações e alagamentos, bastante presentes na região, e não intensifique as condições de vulnerabilidade de parte da população.

8 REFERÊNCIAS

ÁBALOS, F.; SULIMAM, F.; MOSSERI, I.; OTA, N.; FARINA, R. Gestão de Resíduos Sólidos e Impactos sobre a Drenagem Urbana. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ABDI, A. M. Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data. **GIScience & Remote Sensing**, v. 57, n. 1, p. 1-20, 2020.

ABREU, N. J. A.; ZANELLA, M. E. Percepção de riscos de inundações: estudo de caso no bairro Guabiraba, Maranguape - Ceará. **Okara: Geografia em debate**, v. 9, n. 1, p. 90-107, 2015.

ADAM, T. N.; DAVID, M. C. Relationships between Arctic shrub dynamics and topographically derived hydrologic characteristics. **Environmental Research Letters**, v. 6, 045506, 2011.

AL-ABADI, A. M.; SHAHID, S.; AL-ALI, A. K. A GIS-based integration of catastrophe theory and analytical hierarchy process for mapping flood susceptibility: a case study of teeb area, southern Iraq. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 8, p. 687, 2016.

ALDERMAN, K.; TURNER, L. R.; TONG, S. Floods and human health: a systematic review. **Environment International**, v. 47, p. 37-47, 2012.

ALI, S. A.; PARVIN, F.; PHAM, Q. B.; VOJTEK, M.; VOJTEKOVÁ, J.; COSTACHE, R.; LINH, N. T. T.; NGUYEN, H. Q.; AHMAD, A.; GHORBANI, M. A. GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression: a case of topľa basin, slovakia. **Ecological Indicators**, v. 117, 106620, 2020.

ALVES, H. P. F. Vulnerabilidade socioambiental na metrópole paulistana: uma análise sociodemográfica das situações de sobreposição espacial de problemas e riscos sociais e ambientais. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 23, n. 1, p. 43-59, 2006.

ALVINO-BORBA, A.; GUERRA, P. M.; MOREIRA, L. A. G.; SACTH, H. M.; ALMEIDA, J. A.; MATA-LIMA, H. Desastres naturais no Brasil e no mundo: uma análise holística com ênfase nos impactos dos eventos hidrológicos e meteorológicos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 73718-73740, 2020.

ALVIOLI, M.; MELILLO, M.; GUZZETTI, F.; ROSSI, M.; PALAZZI, E.; von HARDENBERG, J.; BRUNETTI, M.T.; PERUCCACCI, S. Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy. **Science of The Total Environment**, v. 630, p. 1528-1543, 2018.

AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Inundação e Enchentes. *In*: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). **Desastres Naturais**: conhecer para prevenir. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. cap. 3. p. 39-52.

ANA. Agência Nacional de Águas. Dados de série histórica: estação pluviométrica 02245083. HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas. 2019. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 11 mar. 2021.

ANTUNES, F. dos S.; CAMPOS, T. M. P. de; POLIVANOV, H.; CALDERANO, S. B.; ANDRADE, A. G. de. Desenvolvimento de classes e unidades geo-pedológicas a partir da interação entre a pedologia e a geotecnia. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, n. 127, p. 61-79, 2013.

ARAÚJO, J. P. Remoções por Risco e Responsabilidade Civil dos Poderes Públicos. **Cadernos da Defensoria Pública do Estado de São Paulo**, v. 4, n. 25, p. 35-44, 2019.

ASF. Alaska Satellite Facility. **ASF Data Search**: Hi-Res Terrain Correctd. 2011. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acesso em: 28 out. 2020.

BALICA, S. F.; DOUBEN, N.; WRIGHT, N. G. Flood Vulnerability Indices at Varying Spatial Scales. **Water Science & Technology**, v. 60, n. 10, p. 2571-2580, 2009.

BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, G. M.; OLIVEIRA, T. J. Histórico de enchentes em Itajubá/MG. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 9, n. 4, p. 125-140, 2015.

BARCELLOS, C.; SABROZA, P.C. The place behind the case: leptospirosis risks and associated environmental conditions in a flood-related outbreak in Rio de Janeiro. **Cadernos de Saúde Pública**, v.17, p. 59-67, 2001.

BARZEHKAR, M.; DINAN, N. M.; MAZAHERI, S.; TAYEBI, R. M.; BRODIE, G. I. Landfill site selection using GIS-based multi-criteria evaluation (case study: SaharKhiz Region located in Gilan Province in Iran). **SN Applied Sciences**, v.1, n. 9, p. 1082, 2019.

BECCARI, B. A Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators. **Plos Currents**, Mar. 14, p. 1-43, 2016.

BERTILSSON, L.; WIKLUND, K.; TEBALDI, I. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G. Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. **Journal Of Hydrology**, v. 573, p. 970-982, 2019.

BIRKMANN, J.; BIRKMANN, J.; CARDONA, O. D.; CARREÑO, M. L.; BARBAT, A. H.; PELLING, M.; SCHNEIDERBAUER, S.; KIENBERGER, S.; KEILER, M.; ALEXANDER, D.; ZEIL, P.; WELLE, T. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. **Natural hazards**, v. 67, n. 2, p. 193-211, 2013.

BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I.; WISNER, B. **At risk**: natural hazards, people's vulnerability, and disasters. London: Routledge, 1994.

BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I.; WISNER, B. **Vulnerabilidad: El entorno social, político y económico de los desastres**. Lima: La Red, 1996.

BODSTEIN, A.; LIMA, V. V. A.; BARROS, A. M. A. A vulnerabilidade do idoso em situações de desastres: necessidade de uma política de resiliência eficaz. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 2, p. 157-174, 2014.

BONELL, M. Runoff generation in tropical forests. *In*: BONELL, M.; BRUIJNZEEL, L. A. (eds.). **Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 314-406.

BRASIL. **Lei 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2012, 34 p.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Banco de dados e registros de desastres: sistema integrado de informações sobre desastres - S2ID**. 2013.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Redução das vulnerabilidades aos desastres e acidentes na infância**. 2002. Disponível em: <http://www.defesacivil.mg.gov.br/images/documentos/Defesa%20Civil/manuais/Vulnerabilidades-aos-desastres-na-infancia.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2021.

CARVALHO, P. S. R. **Estudo da propagação de ondas de cheias no Ribeirão José Pereira, em Itajubá, utilizando HEC-RAS**. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

CHAVES, H. L. O.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S.; ALMEIDA, T.; CICERELLI, R. E. Mapeamento de suscetibilidade à inundação utilizando o método da razão de frequência aplicado à bacia do Riacho Fundo - Distrito Federal. **Gesta**, v. 9, n. 1, p. 148-166, 2021.

CHEHATA, N.; ORNY, C.; BOUKIR, S.; GUYON, D.; WIGNERON, J. P. Object-based change detection in wind storm-damaged forest using high-resolution multispectral images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n.13, p. 4758-4777, 2014.

CHEN, C. -W.; TUNG, Y. -S.; LIOU, J. -J.; LI, H. -C.; CHENG, C.-T.; CHEN, Y.-M.; OGUCHI, T. Assessing landslide characteristics in a changing climate in northern Taiwan. **Catena**, v. 175, p. 263-277, 2019.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 10, n. 1, p. 37-46, 1960.

CONFALONIERI, U. E. C; MARINHO, D. P.; RODRIGUEZ, R. E. Public health vulnerability to climate change in Brazil. **Climate Research**, v. 40, p. 175-186, 2009.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, p. 1991-2007, 2015.

COSBY, B. J.; HORNBERGER, G. M.; CLAPP, R. B.; GINN, T. R. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p. 682-690, 1984.

COSTA, R. G. S.; FERREIRA, C. C. M. Análise do Índice de Áreas Verdes (IAV) na área central da cidade de Juiz de Fora, MG. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 4, n. 1, p. 39-57, 2009.

CPRM. **Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa**. 2014. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19291/>. Acesso em: 01 dez. 2021.

CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, n. 93, p. 59-69, 2011.

CUTTER, S. L. Vulnerability to environmental hazards. **Progress In Human Geography**, v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996.

CUTTER, S. L.; MORATH, D. P. The evolution of the Social Vulnerability Index (SoVI). In: BIRKMAN, J. (ed.). **Measuring vulnerability to natural hazards**. 2. ed. Bonn: United Nations University Press, 2013. p. 304-321.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social Vulnerability to Environmental Hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 1, p. 242-261, 2003.

DANTAS, I. C.; SOUZA, C. M. C. Arborização urbana na cidade de Campina Grande – PB: inventário e suas espécies. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 4, n. 2, p. 1-18, 2004.

DANTAS, M. E. Biblioteca de relevo do território brasileiro. In: MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. (org.). **Geodiversidade do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010. Apêndice II. 136 p.

DANUMAH, J. H.; ODAI, S. N.; SALEY, B. M.; SZARZYNSKI, J.; THIEL, M.; KWAKU, A.; KOUAME, F. K.; AKPA, L. Y. Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (cote d'ivoire). **Geoenvironmental Disasters**, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2016.

DAS, S. Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 100379, 2020.

DAS, S. Geographic information system and AHP-based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. **Arab. J. Geosci.**, v. 11, n. 19, p. 576, 2018.

DATAR, A.; LIU, J.; LINNEMAYR, A.; STECHER, C. The impact of natural disasters on child health and investments in rural India. **Social Science & Medicine**, 76, 83-91, 2013.

DEFESA CIVIL DE SÃO BERNARDO DO CAMPO. #FiqueAlertaSBC. 2015. Disponível em: <https://www.facebook.com/prefsbc/photos/a.744421252275421/887113018006243>. Acesso em: 02 ago. 2021.

DEZSÖ, B.; FEKETE, I.; GERA, D.; GIACHETTA, R.; LÁSZLÓ, I. Object-Based Image Analysis in Remote Sensing Applications Using Various Segmentation Techniques. **Annales Univ. Sci. Budapest., Sec. Comp.**, v. 37, p. 103-120, 2012.

DIHN, Q.; BALICA, S.; POPESCU, I.; JONOSKI, A. Climate change impact on flood hazard, vulnerability and risk of the Long Xuyen Quadrangle in the Mekong Delta. **International Journal of River Basin Management**, v. 10, p. 103-120, 2012.

DINIZ, J. M. F. S.; MACIEL, D. A.; GAMA, F. F.; ADAMI, M. Avaliação do SENTINEL-2, NDVI e MLME para mapeamento do uso e cobertura da terra. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 2, p. 381-391, 2020.

EINI, M.; KABOLI, H. S.; RASHIDIAN, M.; HEDAYAT, H. Hazard and vulnerability in urban flood risk mapping: machine learning techniques and considering the role of urban districts. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, v. 50, p. 101687, 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10.** Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro: 1979. 83p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **Understanding Euclidean Distance**. 2014a. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>. Acesso em: 15 dez. 2021.

ESRI. **How fuzzy membership works**. 2014 c. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-membership-works.htm>. Acesso em: 18 dez. 2021.

ESRI. **How Weighted Sum works**. 2014b. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-weighted-sum-works.htm>. Acesso em: 18 dez. 2021.

FANTINEL, R. A.; BENEDETTI, A. C. P. Análise da susceptibilidade à ocorrência de inundações por meio do uso de média ponderada e geoprocessamento em Dona Francisca -RS. **Tecno-Lógica**, v. 25, n. 1, p. 47-58, 2021.

FEKETE, A. Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 9, p. 393-403, 2009.

FELIX, R. R. O. M.; ALVES, V.; LIMA, J. P. Gestão do uso do solo no entorno do Rio Sapucaí em Itajubá (MG). **urbe, Revista Brasileira de Gestão Urbana**. v. 11, e20170180, 2019.

FLAUZINO, B. K. **Degradação do solo pela erosão hídrica e capacidade de uso em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

FLAUZINO, B. K.; MELLONI, E. G. P.; PONS, N. A. D.; LIMA, O. de. Mapeamento da capacidade de uso da terra como contribuição ao planejamento de uso do solo em sub-bacia hidrográfica piloto no Sul de Minas Gerais. **Geociências: Unesp**, v. 35, n. 02, p. 277-287, 2016.

FRANCO, A. C. V.; DAL SANTO, M. A. Contribuição da morfometria para o estudo das inundações na sub-bacia do rio Luís Alves/SC. **Mercator**, v. 14, p. 151-167, 2015.

FREIMAN, F. P.; CARVALHO, C. O. Modelagem espacial de áreas suscetíveis a inundações baseada em um modelo multicritério híbrido e Sistema de Informação Geográfica: um estudo de caso aplicado a bacia do rio bengalas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, 1145, 2020.

FREIRE, N. C. F.; BONFIM, C. V.; NATENZON, C. E. Vulnerabilidade socioambiental, inundações e repercussões na Saúde em regiões periféricas: o caso de Alagoas, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, p. 3755-3762, 2014.

FREITAS, C. M.; CARVALHO, M. L.; XIMENES, E. F.; ARRAES, E. F.; GOMES, J. O. Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência – lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na região Serrana, Brasil. **Cien. Saúde Colet.**, v. 06, n. 17, p. 3689-3696, 2012.

FREITAS, C. M.; SILVA, D. R. X.; SENA, A. R. M.; SILVA, E. L.; SALES, L. Belino F.; CARVALHO, M. L.; MAZOTO, M. L.; BARCELLOS, C.; COSTA, A. M.; OLIVEIRA, M. L. C.; CORVALÁN, C. Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, p. 3645-3656, 2014.

FREITAS, M. I. C.; CUNHA, L. Modelagem de Dados Socioambientais Visando 78 Estudos de Vulnerabilidade: o Caso de 17 Conselhos do Centro de Portugal. **Geonorte**, v. 1, p. 816–829, 2012.

FREITAS, M. I. C.; ROSSETTI, L. A. F. G.; OLIVEIRA, R. B. N. Risk Mapping in urban áreas: methodological essay for sample área of Santos, São Paulo - Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 67/5, edição especial 27º ICC, p. 953-962, 2015.

GAMBA, C.; RIBEIRO, W.C. Indicador e avaliação da vulnerabilidade socioambiental no município de São Paulo. **GEOUSP Espaço e tempo**, n. 31, p. 19-31. 2012.

GHOSH, A.; KAR, S. K. Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) for flood risk assessment. **Natural Hazards**, v. 94, n. 1, p. 369-369, 2018.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16., 2005, João Pessoa. **Anais [...]** Porto Alegre: ABRH, 2005.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**: imagem de satélite de alta resolução. Escala 1:50000. 2005.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**: imagem de satélite de alta resolução. Escala 1:50000. 2021.

GUERRA, F. C. **Mapeamento das áreas de vulnerabilidades socioambientais aos riscos hidrológicos: inundações em Bragança Paulista - SP**. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2020.

GUIMARÃES, R. M.; MAZOTO, M. L.; MARTINS, R. N.; CARMO, C. N.; ASMUS, C. I. F. Construção e validação de um índice de vulnerabilidade socioambiental para a vigilância e gestão de desastres naturais no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 10, p. 4157-4165, 2014.

HAGGETT, P; CHORLEY, R. J. Modelos, Paradigmas e a Nova Geografia. In: CHORLEY, R. J; HAGGETT. P. (org.). **Modelos integrados em Geografia**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1974. p. 1-20.

HOSSAIN, M. K.; MENG, Q. A thematic mapping method to assess and analyze potential urban hazards and risks caused by flooding, Computers, **Environment and Urban Systems**, v. 79, p. 101417, 2020.

HUANG, J.; WU, P.; ZHAO, X. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. **Catena**, v. 104, p. 93-102, 2013.

HUMMELL, B. M. L.; CUTTER, S. L.; EMRICH, C. T. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. **Int J. Disaster Risk Sci** v. 7, n. 2, p. 111-122, 2016.

IBGE. **Base de informações do Censo Demográfico 2010**: Resultados do Universo por setor censitário. Rio de Janeiro: IBGE, 2011c. 237 p. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/base_de_informacoess_por_setor_censitario_universo_censo_2010.pdf. Acesso em: 27 abr. 2021.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acesso em: 15 abr. 2021.

IBGE. **IBGE Cidades**: Panorama de Itajubá. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/itajuba/panorama>. Acesso em: 10 abr. 2020.

IBGE. **Malha de setores censitários**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/todos-os-produtos-geociencias.html>. Acesso em: 16 abr. 2021

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Manuais técnicos em geociências, nº 4, 2a ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p.

IBGE. **População em Áreas de Risco no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

ITAJUBÁ. **Lei Municipal nº 3352, de 17 de dezembro de 2019**. Aprova o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do Município de Itajubá e dá outras providências. Itajubá: Câmara Municipal, 2019. Disponível em: <http://www.itajuba.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/01/Lei-3352.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2021.

JACOBI, P.R.; SCHULT, S.I.M.; BOHN, N. Ação e reação. Intervenções urbanas e a atuação das instituições no pós-desastre em Blumenau (Brasil). **Eure**, 39, 243-261, 2013.

JANCEWICZ, K.; MIGOŃ, P.; KASPRZAK, M. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index. **Sci. Total Environ.**, v. 656, p. 1046-1062, 2019.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing**. New Jersey: Prentice Hall, 1986.

KOK, S. H.; AZWEEN, A.; JHANJHI, N. Z. Evaluation metric for crypto-ransomware detection using machine learning. **Journal of Information Security and Applications**, v. 55, p. 102646, 2020.

KOKS, E.E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T.G.; BOTZEN, W.J.W. Combining Hazard, Exposure and Social Vulnerability to Provide Lessons for flood Risk Management. **Environmental Science & Policy**, v. 47, p. 42-52, 2015.

KUMAR, P.; GUPTA, D. K.; MISHRA, V. N.; PRASAD, R. Comparison of support vector machine, artificial neural network, and spectral angle mapper algorithms for crop classification using LISS IV data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, p. 1604-1617, 2015.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LAPPAS, I.; KALLIORAS, A. Flood Susceptibility Assessment through GIS-Based Multi-Criteria Approach and Analytical Hierarchy Process (AHP) in a River Basin in Central Greece. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 6, n. 3, p. 738-751, 2019.

LEITE, M. E.; ROCHA, A. M. Mapeamento da susceptibilidade à inundação em áreas urbanas: o caso da cidade de Montes Claros-MG. **Geosul**, v. 31, n. 62, p. 125-150, 2016.

LIMA, O. **Distribuição de solos em catenas e mapeamento pedológico de sub-bacia hidrográfica piloto na região de Itajubá-MG**. 2012, 139 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

LONDE, L. R.; MOURA, L. G., COUTINHO, M. P.; MARCHEZINI, V.; SORIANO, E. Vulnerabilização, saúde e desastres socioambientais no litoral de São Paulo: desafios para o desenvolvimento sustentável. **Ambiente & Sociedade**, v. 21, e01022, 2018.

LOPES, I. C. P.; CAMPOS, J. A.; FRAGA, M. S.; AIRES, U. R. V.; SILVA, D. D. da. Caracterização morfométricas da bacia hidrográfica do rio Caratinga, sub bacia do Rio Doce, MG. In: Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, 3., 2018, Juiz de Fora. **Anais [...]**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018. p. 1-8.

MAGALHÃES, I. A. L.; THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V.; SANTOS, A. R. dos. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, v. 8, n. 2, p. 63-70, 2011.

MAHMOUD, S.H.; GAN, T.Y. Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 216–229, 2018.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria decision analysis in geographic information science**. New York: Springer, 2015.

MALTA, F. S.; COSTA, E. M. Socio-Environmental Vulnerability Index: an application to Rio de Janeiro-Brazil. **International Journal of Public Health**, v. 66, p. 1-11, 2021.

MALTA, F. S.; COSTA, E. M.; MAGRINI, A. Índice de vulnerabilidade socioambiental: uma proposta metodológica utilizando o caso do Rio de Janeiro, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 12, p. 3933-3944, 2017.

MARCHEZINI, V.; FORINI, H. A. Dimensões sociais da resiliência a desastres. **Redes**, v. 24, n. 2, p. 9-28, 2019.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS, A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of The New York Academy of Sciences**, v. 1472, n. 1, p. 5-20, 2020.

MARQUES, M. L.; SILVA, M. C.; CAMARGO, D. M. Análise espacial da vulnerabilidade socioambiental no município de Campinas, SP, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 9, n. 69, p. 1711-1723, 2017.

MATTIVI, P.; FRANCI, F.; LAMBERTINI, A.; BITELLI, G. TWI computation: a comparison of different open source giss. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, v. 4, n. 6, p. 1-12, 2019.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M. de; TOMASELLA, J.; MORAES, M. A. E. de; SCOFIELD, G. B. Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 1, p. 15-30, 2018.

MENDONÇA, F. Riscos, vulnerabilidades e resiliência socioambientais urbanas: Inovações na análise geográfica. **Revista da ANPEGE**, v. 7, p. 99-109, 2011.

MENDONÇA, F.; BUFFON, E. M.; CASTELHANO, F. J.; SITEO, G. Resiliência socioambiental-espacial urbana a inundações: possibilidades e limites no bairro Cajuru em Curitiba (PR). **Revista da ANPEGE**, v. 12, n. 19, p. 279-298, 2016.

MENDONÇA, M. B.; SILVA, D. R. Integration of census data based vulnerability in landslide risk mapping - The case of Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brazil. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 50, 101884, 2020.

MING, D. Semivariogram-based spatial bandwidth selection for remote sensing image segmentation with mean-shift algorithm. **IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.**, v. 9, n.5, p. 813–817, 2012.

MINOSSO, J.; ANTONELI, V.; FREITAS, A. R. de. Variabilidade sazonal da infiltração de água no solo em diferentes tipos de uso na região sudeste do Paraná. **Geographia Meridionalis**, v. 03, n. 01, p. 86-103, 2017.

MOJADDADI, H.; PRADHAN, B.; NAMPAK, H.; AHMAD, N.; GHAZALI, A. H. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1080-1102, 2017.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R.; LADSON, A. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrol. Process**, v. 5, n.1, p. 3–30, 1991.

MORAES, I. C.; CONCEIÇÃO, F. T.; CUNHA, C. M. L.; MORUZZI, R. B. Comparação de metodologias na definição de fluxos acumulados a partir de modelos digitais de elevação do terreno aplicado a suscetibilidade de inundações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 223-235, 2014.

MOREIRA, L. P.; OLIVEIRA, A. G. Uso de geoprocessamento para análise da influência da urbanização no escoamento superficial da bacia hidrográfica do Rio das Pedras, Salvador-BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18., 2017, Santos. **Anais [...]**. Santos: INPE, 2017. p. 7859-7866.

MOSS, W. J.; RAMAKRISHNAN, M.; STORMS, D.; HENDERSON SIEGLE, A.; WEISS, W. M.; LEJNEV, I.; MUHE, L. Child health in complex emergencies. **Bulletin of the World Health Organization**, v. 84, p. 58-64, 2006.

NEUMAYER, E.; PLÜMPER, T. The Gendered Nature of Natural Disasters: The Impact of Catastrophic Events on the Gender Gap in Life Expectancy, 1981–2002. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 97, n. 3, p. 551-66, 2007.

NUNES, H.K.B.; GOMES, M.L.; PAULA, J. A. Assoreamento e formação de bancos de areia no leito do Rio Parnaíba, na zona urbana de Teresina-Piauí. **Geonorte**, v. 40, n. 1, p. 156-160, 2014.

OLIVEIRA, A. H.; KLINKE NETO, G.; PEREIRA, S. Y. Análise do relevo para o mapeamento de áreas favoráveis ao processo de infiltração. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 19., 2016, Campinas. **Anais [...]**. ABAS, 2016. p. 1-9.

OLIVEIRA, A. S.; SILVA, A. M. DA; MELLO, C. R. DE; ALVES, G. J. Stream flow regime of springs in the Mantiqueira Mountain Range region, Minas Gerais State. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 343-349, 2014.

OLIVEIRA, L. S.; FERREIRA, B. C.; ESTEVAM, A. L. D. Enchentes na cidade de Salvador, Bahia (Brasil): estudos geográficos nos rios urbanos Lucaia e Camarajipe. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 10551-10571, 2021.

OUMA, Y.; TATEISHI, R. Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. **Water**, v. 6, n. 6, p. 1515-1545, 2014.

OZBAY, F. A.; ALATAS, B. A novel approach for detection of fake news on social media using metaheuristic optimization algorithms. **Elektronika ir Elektrotechnika**, v. 25, n. 4, p. 62–67, 2019.

PARSIAN, S.; AMANI, M.; MOGHIMI, A.; GHORBANIAN, A.; MAHDAVI, S. Flood Hazard Mapping Using Fuzzy Logic, Analytical Hierarchy Process, and Multi-Source Geospatial Datasets. **Remote Sensing**, v. 13, 4761, 2021.

PELLING, M. **The vulnerability of cities: natural disaster and social resilience**. London: Earthscan, 2003.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade - MG. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 23, p. 4-26, 2012.

PINHEIRO, M. V. **Avaliação Técnica e histórica das Enchentes em Itajubá**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

PINTO, M. S. N.; CORREA, G. A. G.; NETO, E. G. Renaturalização de rios urbanos com o uso de técnicas de engenharia natural: estudo de caso no rio Bacacheri, município de Curitiba. In: Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2., 2019, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: UFPR, 2019.

PLA, C.; CUEZVA, S.; MARTINEZ-MARTINEZ, J.; FERNANDEZ-CORTES, A.; GARCIA-ANTON, E.; FUSI, N.; CROSTA, G. B.; CUEVAS-GONZALEZ, J.; CAÑAVERAS, J. C., SANCHEZ-MORAL, S. Role of soil pore structure in water infiltration

and CO₂ exchange between the atmosphere and underground air in the vadose zone: a combined laboratory and field approach. **Catena**, v. 149, p. 402–416, 2017.

PONS, N. A.; PEREIRA, I. Z. Estudo da qualidade ambiental de APP de nascentes da bacia do Ribeirão José Pereira, com o auxílio do Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 7, n.1, p. 120-132, 2018.

PORTELA, F. C.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Panorama brasileiro da relação entre leptospirose e inundações. **Geosul**, v. 35, n. 75, p. 711-734, 2020.

PRATES, T. B.; AMORIM, R. R. Vulnerabilidade Socioambiental das Áreas Sujeitas às Inundações no Município de São João Da Barra, RJ, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia USP**, p. 164-171, 2017.

PROAG, V. The Concept of Vulnerability and Resilience. **Procedia Economics And Finance**, v. 18, p. 369-376, 2014.

QGIS. **QGIS 3.16 User Guide**: vector selection. 2020. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectorselection.html#qgisrandomselectionwithinsubsets. Acesso em: 12 dez. 2021.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 59-79, 1991.

RAHMATI, O.; POURGHASEMI, H. R.; ZEINIVAND, H. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. **Geocarto Internayional**, v. 31, n. 1, p. 42-70, 2016.

RAMOS, J. R. L.; ELMIRO, M. A. T.; NERO, M. A.; TEMBA, P. C.; ROSA, G. Lógica *fuzzy* associada ao risco de inundação no município de Nova Lima/MG. **Geografias**, v. 26, n. 2, p. 125-144, 2018.

RAVAZZANI, G.; GIANOLI, P.; MEUCCI, S.; MANCINI, M. Assessing downstream impacts of detention basins in urbanized river basins using a distributed Hydrological model. **Water Resources Management**, v. 28, p. 1033–1044, 2014.

REBOITA, M. S.; CORRÊA, M. P.; RODRIGUES, M.; SILVA, J. P. R. Um balanço do curso de ciências atmosféricas no sul de Minas Gerais: ensino, pesquisa, extensão e benefícios à sociedade. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 07, p. 2312-2324, 2016.

REBOITA, M. S.; SOUZA, D. C.; RAMALHO, V. Water Balance and Aridity Index in Itajubá. In: Simpósio Internacional de Climatologia, 5., 2013, Florianópolis. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBMet, 2013.

REIS, J. B. C. dos; PONS, N. A. D.; LOPES, E. S. S. Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) por regressão polinomial. **Geociências: Unesp**, v. 35, n. 1, p. 134-148, 2016.

REZENDE, O. M.; FRANCO, A. B. R. C.; OLIVEIRA, A. K. B.; MIRANDA, F. M.; JACOB, A. C. P.; SOUSA, M. M.; MIGUEZ, M. G. Mapping the flood risk to Socioeconomic Recovery Capacity through a multicriteria index. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120251, 2020.

RIMBA, A.; SETIAWATI, M.; SAMBAH, A.; MIURA, F. Physical Flood Vulnerability Mapping Applying Geospatial Techniques in Okazaki City, Aichi Prefecture, Japan. **Urban Science**, v. 1, n. 1, p. 7, 2017.

RODRIGUES, V. A.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; TARJUELO, J. M.; SARTORI, M. M. P.; CANALES, A. R. Avaliação do escoamento e interceptação da água das chuvas. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 01-13, 2015.

ROSA FILHO, A. Os deslizamentos de encostas nas favelas em áreas de risco da "suíça brasileira". **ACTA Geográfica**, v. 6, p. 23-34, 2012.

RUFAT, S.; TATE, E.; BURTON, C. G.; MAROOF, A. S. Social vulnerability to floods: review of case studies and implications for measurement. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 14, p. 470-486, 2015.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n 3-5, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1980. 287 p.

SAITO, S. M.; DIAS, M. C. A.; ALVALÁ, R. C. dos S.; STENNER, C.; FRANCO, C.; RIBEIRO, J. V. M.; SOUZA, P. A. de; SANTANA, R. A. S. M. População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. 1-25, 2019.

SANTOS, K. B.; SOUZA, I. E. M. de; TEIXEIRA, D. L. S.; PONS, N. A. D.; AZEVEDO, S. C. de; MARTINS, M. V. L. Uso conflitivo do solo em Áreas de Preservação Permanente da sub-bacia do Ribeirão José Pereira, Itajubá/MG. In: Congresso Luso-Brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável, 9., 2021, Digital. **Anais [...]**. São Paulo: Unesp, 2021. p. 1251.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SCHULER, A. E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. 2003. 119 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SEEJATA, K.; YODYING, A.; WONGTHADAM, T.; MAHAVIK, N.; TANTANEE, S. Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province. **Procedia Engineering**, v. 212, p. 340-347, 2018.

SILVA, J. L. O.; CARVALHO, E. N.; NOGUEIRA, B. S.; LIMA, A. L. R. S. R.; MATOS, F. R.; LEAL, D. O.; VARJÃO, F. L. de M.; ANDRADE, M. R. Drenagem urbana: saneamento básico e controle de enchentes. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 2472-2477, 2020a.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; MATTOS, E. V.; LEMES, M. C. R. Estudo de um caso de transbordamento do Ribeirão José Pereira em Itajubá - Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, n. 3, p. 623-639, 2019.

SILVA, L. O.; BARBOSA, K. V. Análise espacial da suscetibilidade à inundação na Sub-Bacia Muriaé 2, Campos dos Goytacazes (RJ). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 8, p. 127-138, 2018.

SILVA, L. T. da. **Vulnerabilidade ao escorregamento de terras Estudo de caso: Bacia do Rio Bengalas, 2011**. 2014. 248 f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) - Universidade de Évora, Évora -Portugal, 2014.

SILVA, P.L.F. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente (Brasil)**, v.3, n.2, p. 24-33, 2021.

SILVA, S. L. A.; MARTINS, M. H. M.; E SPINK, M. J. P. Percepção e hierarquia de riscos de inundação recorrente em área urbana regularizada: uma análise discursiva. **Saúde em Debate**, v. 44, p. 202-213, 2020b.

SOKOLOVA, M.; JAPKOWICZ, N.; SZPAKOWICZ, S. Beyond Accuracy, F-Score and ROC: A Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation. In: SATTAR, A.; KANG, B. (eds). **AI 2006: Advances in Artificial Intelligence**. Berlin: Springer, 2006.

SÖNMEZ, O.; BIZIMANA, H. Flood hazard risk evaluation using fuzzy logic and weightage-based combination methods in geographic information system. **Scientia Iranica**, v. 27, n.2, p. 517-528, 2020.

SOUZA, C. R. G. Suscetibilidade Morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 1, p. 45-61, 2005.

SOUZA, J. S.; ALMEIDA, I. K. de; CARVALHO, G. A.; ALVES SOBRINHO, T.; BACCHI, C. G. V. Influence of soil properties and environmental characteristics in water infiltration in urban areas. **Geociências: Unesp**, v. 38, n. 4, p. 1029-1038, 2019.

SOUZA, L. A. de; SOBREIRA, F. G. Procedimentos para elaboração de cartas geotécnicas no planejamento urbano. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 67, p. 141-156, 2015.

SOUZA, M. T. S. Resiliência e desastres naturais. **Ciência e Cultura**, v. 63, p. 4-5, 2011.

TAPSELL, S. M.; PENNING-ROUSELL, E. C.; TUNSTALL, S. M.; WILSON, T. L. Vulnerability to flooding: health and social dimensions. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 360, n. 1796, p. 1511-1525, 2002.

TEHRANY, M. S.; JONES, S.; SHABANI, F. Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. **Catena**, v. 175, p. 174-192, 2019.

TEHRANY, M. S.; PRADHAN, B.; JEBUR, M. N. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 332- 343, 2014.

TEHRANY, M. S.; SHABANI, F.; NEAMAH JEBUR, M.; HONG, H.; CHEN, W.; XIE, X. GIS based spatial prediction of flood prone areas using standalone frequency ratio, logistic regression, weight of evidence and their ensemble techniques. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1538-1561, 2017.

TIEN BUI, D.; PRADHAN, B.; NAMPAK, H.; BUI, Q. T.; TRAN, Q. A.; NGUYEN, Q. P. Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. **Journal of Hydrology**, n. 540, p. 317-330, 2016.

TINGSANCHALI, T. Urban flood disaster management. **Procedia Engineering**, v. 32, p. 25-37, 2012.

TROUW, R.A.J.; NUNES, R.P.M.; CASTRO, E.M.O.; TROUW, C.C.; MATOS, G.C. **Nota Explicativa das Folhas Varginha (SF.23-V-D-VI) e Itajubá (SF.23-Y-B-III)**. Programa Geologia do Brasil. CPRM. Minas Gerais, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da Drenagem Urbana**. Brasília: Cepal. Escritório no Brasil/Ipea, 2012.

TUCCI, C.E.M. Inundações e drenagem urbana. *In*: TUCCI, C. E. M; BERTON, J.C. (Org). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

UN-ISDR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives**. Geneva: ISDR, 2004.

VARNES, D. J. **Landslide Hazard Zonation: Review of Principles and Practice**. Paris: UNESCO Press, 1984.

WANG, Z., ZUO, R., DONG, Y. Mapping Himalayan leucogranites using a hybrid method of metric learning and support vector machine. **Computers and Geosciences**, v. 138, p. 104455, 2020.

WOODROW, K.; LINDSAY, J. B.; BERG, A. A. Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1022-1029, 2016.

YANG, X.; CHEN, H.; WANG, Y.; XU, C. -Y. Evaluation of the effect of land use/cover change on flood characteristics using an integrated approach coupling land and flood analysis. **Hydrology Research**, v. 47, n. 6, p. 1161-1171, 2016.

ZANATA, J. M.; PIROLI, E. L.; A DELATORRE, C. C. M.; GIMENES, G. R. Análise do uso e ocupação do solo nas áreas de preservação permanente da microbacia Ribeirão Bonito, apoiada em técnicas de geoprocessamento. **Geonorte**, v. 3, n. 5, p. 1262 - 1272, 2012.

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. **Processamento de imagens de satélite**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.

ZHANG, Y.; LU, S.; ZHOU, X.; YANG, M.; WU, L.; LIU, B.; WANG, S. Comparison of machine learning methods for stationary wavelet entropy-based multiple sclerosis detection: decision tree, k-nearest neighbors, and support vector machine. **Simulation**, v. 92, n. 9, p. 861-871, 2016.

ZOLLINI, S.; ALICANDRO, M.; DOMINICI, D.; QUARESIMA, R.; GIALLONARDO, M. UAV Photogrammetry for Concrete Bridge Inspection Using Object-Based Image Analysis (OBIA). **Remote Sensing**, v. 12, n. 19, 3180, 2020.