

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS



ProfÁgua

**MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL EM
GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**ZONEAMENTO DO USO DO SOLO EM ÁREAS
LOCALIZADAS NO VALE A JUSANTE DE BARRAGENS**

ROSSANO BELLADONA



**PORTO ALEGRE
SETEMBRO DE 2018**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ZONEAMENTO DO USO DO SOLO EM ÁREAS
LOCALIZADAS NO VALE A JUSANTE DE BARRAGENS**

ROSSANO BELLADONA

Dissertação submetida ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, sob a orientação do Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira.

Porto Alegre, setembro de 2018

CIP – Catalogação na Publicação

Belladona, Rossano
Zoneamento do Uso do Solo em Áreas Localizadas no
Vale a Jusante de Barragens / Rossano Belladona. --
2018.
95 f.
Orientador: André Luiz Lopes da Silveira.

Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas
Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Gestão e
Regulação de Recursos Hídricos, Porto Alegre, BR-RS,
2018.

1. Zoneamento. 2. Uso do Solo. 3. Vale a Jusante de
Barragens. I. Silveira, André Luiz Lopes da, orient.
II. Título.

ROSSANO BELLADONA

**ZONEAMENTO DO USO DO SOLO EM ÁREAS
LOCALIZADAS NO VALE A JUSANTE DE BARRAGENS**

Dissertação submetida ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira

Dissertação submetida em 18 de setembro de 2018, obtendo Aprovação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques – UFRGS

Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes – UFRGS

Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira – UFRGS

Dedico este trabalho
aos que ocupam o vale
a jusante de barragens.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos – PROFÁGUA, projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015.

A Agência Nacional de Águas (ANA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio na elaboração deste Mestrado.

Ao Prof. Dr. Jefferson Nascimento de Oliveira da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho em Ilha Solteira, SP, pelo empenho em coordenar o Mestrado a nível nacional.

A secretaria executiva do PROFÁGUA junto a Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho em Ilha Solteira, SP, por todo o esforço em ajudar com as atividades relacionadas ao Mestrado.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul em apostar na proposta do Programa de Mestrado Profissional.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS por receber a turma do PROFÁGUA 2016-2018.

Aos professores Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes, Carlos André Bulhões Mendes, Guilherme Fernandes Marques, Ana Luiza Carvalho da Rocha, André Luiz Lopes da Silveira, Cristiano Poletto e Jussara Cabral Cruz pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas do mestrado que compartilharam suas experiências profissionais.

Ao professor Márcio Benedito Baptista da UFMG por seus apontamentos ao conteúdo deste trabalho.

Ao professor André Luiz Lopes da Silveira por sua contribuição na orientação desta dissertação.

E, em especial, a Liane e ao Mateus pela paciência e compreensão.

RESUMO

Historicamente os acidentes por ruptura de barragem têm causado grandes prejuízos ao vale localizado a jusante do maciço. Baseado nos critérios usuais dos mapeamentos de inundações, dos mapas de inundação dos Planos de Ação de Emergência de barragens e do mapeamento de risco em encosta do Ministério das Cidades, esta dissertação tem como objetivo estabelecer uma metodologia para disciplinar o uso e a ocupação do solo nos locais do vale susceptíveis a um possível rompimento da barragem. Também, sugere-se usos que associem menores prejuízos às áreas com maiores riscos a fim de evitar que o mesmo seja potencializado. Para atingir o objetivo, este trabalho propõe uma quantificação do grau de perigo, sendo ele o produto da profundidade do escoamento pela velocidade do fluxo, e uma verificação da vulnerabilidade no vale a jusante da barragem. A composição do zoneamento se dá em função do risco que, por sua vez, é o produto do grau de perigo pela vulnerabilidade. O resultado mostrou que é possível obter quatro diferentes zonas ao longo do vale, conforme quatro níveis de risco (baixo, médio, alto e muito alto), e que os mapeamentos deste tipo de análise não devem ser realizados em escala inferior a 1:20.000. A ocupação e o uso do solo no vale deve primar pela segurança, buscando evitar que o risco seja potencializado. Zonas em nível de risco muito alto são aquelas que possuem as maiores restrições de uso e ocupação. Pelo fato desta metodologia compor outras três, a sua aplicação pode implicar em adequações legais. Entretanto, os instrumentos já existentes no Brasil podem permitir sua utilização, como é o caso da Política Nacional de Recursos Hídricos, do Código Tributário Nacional, da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, do Estatuto da Cidade e do Estatuto da Terra.

Palavras-chave: zoneamento, uso do solo, vale a jusante de barragem.

ABSTRACT

Historically, it is known that dam failure accidents have caused major losses to its downstream valley. Based upon usual criteria of flood mapping, emergency action plans flood maps and upon the landslide risk mapping of the Cities Ministry, this dissertation objective is to establish a methodology to rule land use and occupation on the downstream valley susceptible to eventual dam failure. In addition, it is suggested land uses that associate lower losses to the higher risk areas so to avoid its increase. In order to reach the objective, this work presents a hazard degree quantification, being the product of the water depth and the flow velocity, and the dam downstream valley vulnerability analysis. The zoning of the downstream valley is dependent upon the risk, which is the product of the hazard degree and the vulnerability. As the results, it was possible to obtain four different zones along the downstream valley, according to four risk levels (low, medium, high and very high), and it was verified that this sort of mapping ought not to be performed in scales lower than 1:20.000. Land use and occupation must be primed for safety in order to prevent the risk increase. Areas on very high risk level are those with the most land use and occupation restrictions. Due to the fact that the presented methodology compose other three, its application can imply in legal adjustments. However, the legal instruments existing in Brazil can allow its immediate use, for instance, the National Policy of Water Resources, the National Tributary Code, National Policy of the Civil Protection and Defense, the Cities Statute and the Land Statute.

Keywords: zoning, land use, dam downstream valley.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE QUADROS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XIV
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Justificativa	18
1.2. Problema de Pesquisa	21
1.3. Hipótese	22
2. OBJETIVOS E ESTRUTURA	23
2.1. Objetivo Geral	23
2.2. Objetivos Específicos	23
2.3. Estrutura da Dissertação	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1. Uso do Solo no Brasil	25
3.2. Gestão Territorial	25
3.3. Barragens	29
3.3.1. Tipos de Barragens	30
3.3.2. Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB)	31
3.3.3. Classificação de Risco a Jusante de Barragens	32
3.4. Plano de Ação de Emergência (PAE)	35
3.5. Áreas de Inundação	37
3.6. Áreas de Risco	38
3.7. Mapeamento de Áreas de Inundação	41
3.8. Mapeamento de Cheia Provocada por Ruptura de Barragem	51
3.8.1. Base Altimétrica Adequada a Escala de Trabalho	51
3.8.2. Mapas de Cheia de Ruptura	53
3.9. Mapeamento de Risco do Ministério das Cidades	57

4. METODOLOGIA	62
4.1. Categorização do Risco em Áreas de Inundação	63
4.2. Categorização do Risco a partir do Hidrograma de Ruptura da Barragem	65
4.3. Indicação do Uso do Solo	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1. Resultados	75
5.2. Discussão	83
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triângulo do Risco.	41
Figura 2. Áreas susceptíveis a inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS.	44
Figura 3. �reas de perigo de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS. ..	44
Figura 4. Mapa da vulnerabilidade a inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS.	46
Figura 5. Mapa das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS.	46
Figura 6. Mapeamento das inundações em Lajeado, RS, sem medidas de controle. .	47
Figura 7. Mapeamento das inundações em Lajeado, RS, considerando diques de proteção.	47
Figura 8. Mapa de inundação para $T_r = 5$ anos.	49
Figura 9. Mapa de inundação para $T_r = 20$ anos.	49
Figura 10. Mapa de inundação para $T_r = 100$ anos.	49
Figura 11. Mapa de perigo de inundação.	49
Figura 12. Composição do cenário de inundação resultante da simulação realizada por Pereira <i>et al.</i> (2003).	54
Figura 13. Identificação do espelho d'água da mancha de inundação próxima a estação de tratamento de esgoto da cidade de Ituiutaba.	55
Figura 14. Inundação junto a aproximação nordeste do rio Tijuco.	55
Figura 15. Inundação sobre um clube próximo a saída nordeste da cidade.	55
Figura 16. Fotografias registradas após o rompimento da barragem São Francisco em Mira�, MG.	56
Figura 17. Restituição da envoltória de inundação do rompimento da barragem São Francisco.	57
Figura 18. Síntese esquemática do presente estudo.	63
Figura 19. Diagrama de perigo de inundação.	50
Figura 20. Diagrama de perigo de inundação extrema.	67
Figura 21. Localização do município de Belo Horizonte e do Lago da Pampulha.	75
Figura 22. Uso do solo a jusante da Barragem da Pampulha até o Rio das Velhas.	76
Figura 23. Profundidade do escoamento esperado pela ruptura da Barragem da Pampulha. A análise se estende por 4,5 quilômetros.	78

Figura 24. Velocidade do escoamento esperada pela ruptura da Barragem da Pampulha. A análise se estende por 4,5 quilômetros.	78
Figura 25. Identificação dos Graus de Perigo; sendo FP = Fator de Perigo, dado por $v \times h$ (onde v = velocidade do escoamento [m/s] e h = altura da lâmina d'água no escoamento [m]).	79
Figura 26. Ocupação do solo na poligonal susceptível a inundação proveniente da ruptura.....	80
Figura 27. Identificação dos Graus de Perigo; sendo FP = Fator de Perigo, dado por $v \times h$ (onde v = velocidade do escoamento [m/s] e h = altura da lâmina d'água no escoamento [m]).	81
Figura 28. Identificação do zoneamento em função do Risco.....	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação de barragens de acordo com sua categoria de risco, o seu dano potencial associado e o volume do reservatório.	31
Quadro 2. Exemplos de classificação de risco a jusante de barragens.	32
Quadro 3. Classificação de risco quanto ao dano potencial associado.	34
Quadro 4. Somatório dos índices para a classificação de risco.	34
Quadro 5. Exigência de Plano de Ação de Emergência (PAE).	36
Quadro 6. Potencial destrutivo dos processos hidrológicos.	42
Quadro 7. Vulnerabilidade da ocupação urbana.	42
Quadro 8. Distância das moradias em relação ao eixo da drenagem.	43
Quadro 9. Grau de risco de inundação.	43
Quadro 10. Grau de perigo da inundação.	44
Quadro 11. Grau de vulnerabilidade da área afetada.	45
Quadro 12. Grau de risco de inundação.	46
Quadro 13. Níveis de perigo de inundação.	49
Quadro 14. Critérios para a determinação dos graus de risco.	60
Quadro 15. Síntese da metodologia aplicada ao estudo.	62
Quadro 16. Vulnerabilidade da ocupação urbana e infraestrutura.	65
Quadro 17. Descrição para o enquadramento do risco de inundação.	65
Quadro 18. Enquadramento do perigo em função do hidrograma de ruptura.	67
Quadro 19. Vulnerabilidade da ocupação urbana e infraestrutura.	68
Quadro 20. Enquadramento do risco em função do hidrograma de ruptura.	69
Quadro 21. Vulnerabilidade da ocupação rural, urbana, equipamentos públicos e infraestrutura.	70
Quadro 22. Zoneamento do vale de jusante de barragens.	71
Quadro 23. Descrição dos critérios para a determinação dos níveis de risco.	71
Quadro 24. Indicação dos usos e ocupação do solo para a área do vale a jusante da barragem.	73

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D	Bidimensional
ANA	Agência Nacional de Águas
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
Cemaden	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FP	Fator de perigo
F _{R\$}	Fator de retorno financeiro
h	Altura da lâmina d'água
hm ³	Hectômetro cúbico (1.000.000 de metros cúbicos)
ICOLD	International Commission on Large Dams
IR	Infravermelho
km	Quilômetro
Landsat	Land Remote Sensing Satellite
LiDAR	Light Detecting and Ranging
m	Metros
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PAE	Plano de Ação de Emergência
PIB	Produto Interno Bruto
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
s	Segundo
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

Tr	Tempo de retorno
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
v	Velocidade do escoamento
ZAE	Zoneamento Agroecológico
ZAS	Zonas de Autossalvamento
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico
ZSEE	Zoneamento Socioeconômico-Ecológico
Σ	Somatório

1. INTRODUÇÃO

A ocupação dos vales dos rios remonta à época em que os humanos deixaram de ser nômades para, através da agricultura, trabalhar o solo e produzir seus próprios alimentos. Como estas áreas eram férteis pelo aporte de nutrientes trazidos pelo rio durante os períodos de cheias e a disponibilidade de água era adequada para a tribo, a fixação de grupos de pessoas a estes locais se tornou ainda mais atrativa. Almeida e Viseu (1997) alertam que o benefício deste uso do solo, nestas regiões, já apresentava um custo intrinsecamente associado que era exatamente o que atraía as tribos, as enchentes. Como as pessoas não conheciam o histórico das cheias dos rios, independentemente dos benefícios que traziam, o uso do solo nestas áreas impunha grande risco às famílias sedentárias que ali permaneciam.

Das famílias sedentárias começaram a surgir aglomerados populacionais que demandavam não somente por quantidades de água, mas também que esta fosse o mais regular possível para que as necessidades de suas atividades agrícolas fossem atendidas. As demandas de água para o abastecimento das pessoas e para a irrigação das culturas permitiram a construção das primeiras barragens. Não há um consenso entre os historiadores quanto a primeira barragem, porém todas as pesquisas datam as primeiras barragens entre 3.000 a 2.750 anos a.C. no Egito e na Jordânia, o que era antigamente a Mesopotâmia.

Atualmente as barragens podem servir para diversas finalidades, seja para o abastecimento de água, para a irrigação, para a regularização de vazões, para o controle de cheias, para a geração de energia elétrica, para a contenção de rejeitos, para o paisagismo ou para a dessedentação de animais. Elas possuem relevante importância a nível social, econômico e cultural. Entretanto, diversos são os registros de acidentes de barragens, tanto no Brasil como no restante do planeta. Os efeitos destes acidentes são sentidos na região localizada a jusante dos barramentos, ao longo das margens do canal fluvial, que podem ser observados a dezenas de quilômetros a jusante da barragem.

Como exemplo de rompimento de barragem, a Barragem de South Fork nos Estados Unidos em 1889, que além dos danos ambientais e econômicos, causou a

morte de 2.209 pessoas na cidade de Johnstown, localizada a 23 quilômetros da antiga barragem (WORLD DIGITAL LIBRARY, 2017). Outro evento que merece ser apresentado foi a tragédia da Barragem Machhu II, na Índia, que em 1979, após severas chuvas na região, galgou e rompeu causando a destruição do vale a jusante, sendo que a estimativa de mortos foi entre 5.000 e 10.000 pessoas. Neste evento a cidade indiana de Morbi, localizada a 5 quilômetros de distância da barragem, foi a que mais sofreu com as ondas de quase 10 metros de altura (INDIA WATERPORTAL, 2017).

Entre os registros de desastres no vale a jusante de barragens está o de Banqiao, no leste da China, o mais fatal na história deste tipo de acidente. Após chuvas extremas na área, no dia 8 de agosto de 1975 a barragem perdeu a sua estabilidade e a onda de cheia causou a morte de aproximadamente 26.000 pessoal, sendo que outras 145.000 morreram por epidemias causadas pela contaminação das águas (ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 2017).

No Brasil, diversos são os registros de rompimento de barragem que causaram danos. O mais expressivo foi o da Barragem de Fundão localizada no Município de Mariana (MG) que, segundo Minas Gerais (2016), em 2015 provocou a morte de 17 pessoas e outras 600 desabrigadas, e gerou graves danos ambientais e socioeconômicos a toda a Bacia do Rio Doce.

A urbanização e a industrialização, que marcou a história demográfica e econômica do Brasil entre 1930 e 1980 (MATOS, 2012), exigiu a construção de grandes barragens. Os graves problemas de fornecimento e distribuição de energia registrados nos anos 2001 e 2002, devido à falta de investimentos no setor de geração de energia na década anterior, incentivaram a construção de outras grandes barragens como a de Belo Monte e de Jirau, por exemplo.

Historicamente, percebe-se que a díade ser humano e barragem é inseparável, bem como o risco existente nesta relação é intrínseco. Por isso, faz-se necessário estabelecer um zoneamento das áreas situadas a jusante dos maciços para poder regradar o uso do solo, principalmente buscando minimizar as possíveis mortes e reduzir as perdas econômicas, sociais, culturais e ambientais. O zoneamento destas áreas permitirá que o risco não seja potencializado com a instalação de novas residências, novos loteamentos, novos polos comerciais ou industriais ou novas zonas de ampliação de agricultura de grande tecnificação.

1.1. Justificativa

Em 1883 o Brasil teve sua primeira usina hidrelétrica colocada em operação no Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, na cidade de Diamantina em Minas Gerais, para alimentar duas bombas de desmorte para a extração de diamante do rico solo local. Na década seguinte, em 1893, o Estado de São Paulo recebeu sua primeira hidrelétrica, a usina de Monjolinho, localizada no município de São Carlos. 1896 foi o ano em que o Estado do Rio de Janeiro recebeu sua primeira hidrelétrica, a hidrelétrica Itamarati, instalada no rio Itamarati, afluente do rio Piabanha, no município de Petrópolis (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2017).

O início do Século XX foi marcado pela construção das primeiras grandes barragens. Em 1901 entrava em operação no rio Tietê, no município de Santana do Parnaíba (SP), a Usina Hidrelétrica Parnaíba, primeira do país a contar com uma barragem de mais de 15 metros de altura, sendo desativada em 1952. Para suprir a crescente demanda por energia que abastecia a iluminação pública e residencial bem como os bondes elétricos da cidade do Rio de Janeiro, as maiores hidrelétricas foram inauguradas naquele Estado em 1908, como é o caso da Usina Hidrelétrica Fontes Velha localizada no Ribeirão das Lajes, município de Piraí (RJ), sendo desativada somente em 1989 (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2017).

O período de 1931 a 1945 foi marcado pela criação de regulamentação dos serviços de geração de energia hidrelétrica e pela ampliação da capacidade instalada. O Código de Águas, instalado pelo Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934, consagrou o regime das concessões e autorizações para os aproveitamentos hidrelétricos (BRASIL, 1934).

De acordo com IBGE (2006), neste mesmo período, ou seja, do final do Século XIX até meados do Século XX, a população brasileira quase que triplicou seu contingente, passando de aproximadamente 17,5 milhões para 51,9 milhões de pessoas. Entretanto, na segunda metade do Século XX a população mais que triplica chegando a aproximadamente 169,6 milhões de brasileiros. A estrutura econômica do Brasil apresentou significativa mudança nas décadas de 1940 e 1950 quando o país deixa de ser eminentemente agrícola e a indústria e serviços assumem representatividade mais expressiva no Produto Interno Bruto (PIB). A partir da década de 1940 há um aumento relevante na taxa de urbanização passando de 31,24% para

81,23% no final do Século XX.

Este crescimento industrial e populacional, concentrado nas regiões urbanizadas, exigiu energia em grande quantidade além de que as cidades demandavam água para o abastecimento de seus habitantes. Entre as décadas de 1950 e 1990, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) colocou em operação suas principais usinas hidrelétricas. Em 1974 é criada a empresa Itaipu Binacional, porém somente em 1984 entra em operação da Usina Hidrelétrica de Itaipu, a maior do mundo em produção de energia, localizada no Rio Paraná, em área dos municípios de Foz do Iguaçu (PR) e Ciudad del Este, no Paraguai. Neste mesmo ano entra em operação a maior usina na Amazônia, a Usina Hidrelétrica de Tucuruí, cujo barramento está no Rio Tocantins (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2017).

De acordo com o Cadastro de Segurança de Barragens 2015 (ANA, 2016a), encontram-se cadastradas 17.259 barragens no Brasil, entretanto este número não representa a totalidade dos barramentos existentes no país já que vários podem não integrar esta lista. Este Cadastro aponta que deste total de barragens, 15.671 barragens são utilizadas para a contenção de rejeitos de mineração, 642 para a contenção de resíduos industriais, 286 para a geração de energia hidrelétrica e 660 fazem usos múltiplos da água. No que se refere ao porte estabelecidos pela Lei nº 12.334 de 2010 (BRASIL, 2010), estes barramentos estão categorizados em 1.504 grandes, ou seja, mais que 15 metros de altura ou um volume maior que três milhões de metros cúbicos, 2.121 são pequenos, ou seja, menos que 15 metros de altura ou um volume menor que 3.000.000 de metros cúbicos. Não há informação quanto ao porte do restante das barragens.

A importância histórica dos barramentos no Brasil é inquestionável, independentemente do tipo de uso para que são destinados, eles fizeram e fazem parte do desenvolvimento econômico, social e cultural do país. Entretanto, os barramentos também trazem um risco associado que deve ser considerado na fase de planejamento, de construção, de enchimento do reservatório, durante sua operação ou uso futuro.

A International Commission on Large Dams *apud* Carvalho (2015) estimou em 2,2% o número de barragens rompidas antes de 1950 e em 0,5% após 1950. Ainda Carvalho (*op. cit.*) relata que no Brasil diversas barragens colapsaram. O primeiro grande evento registrado foi em 26 de março de 1960 quando a Barragem de Orós, no Rio Jaguaribe, em Orós (CE), destinada a regularizar as águas do rio para amenizar os

problemas de falta de água nos períodos de seca na região, rompeu. À época foi o maior impacto registrado com barragens no Brasil. A ruptura deu-se por galgamento da barragem, inundando as cidades de Aracati, Itaiçaba, Jaguaribe e Limoeiro do Norte, situadas a jusante. Atingiu aproximadamente 60% da população do baixo Jaguaribe que totalizava 170 mil habitantes.

Outro evento que merece ser mencionado é o rompimento da barragem de Camará em 2004, no Rio Riachão, bacia do Rio Mamanguape, em Alagoa Grande (PB). Paiva Júnior (2006) disserta que a água represada seria utilizada pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) e o volume acumulado era previsto a atingir 26,5 hm³. A onda de cheia, que elevou o nível do rio em 5 metros, devastou casas ao longo de 20 km, quando alagou diversas ruas na sede do município de Alagoa Grande, afetando 3.344 pessoas. A cidade de Mulungo, a 50 km a jusante da barragem, também sofreu com a falta de comunicação, abastecimento de água e de energia elétrica.

De acordo com Minas Gerais (2016), no dia 5 de novembro de 2015, a barragem de Fundão, localizada no Município de Mariana (MG), se rompeu, causando uma enxurrada de lama e rejeitos de mineração que provocou a morte de 17 pessoas e outras 600 desabrigadas, milhares de pessoas sem água e gerou graves danos ambientais e socioeconômicos a toda a Bacia do Rio Doce. Este evento foi considerado o maior desastre ambiental do Brasil e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeito. A tragédia afetou 38 cidades e comprometeu os serviços de abastecimento de água e a arrecadação dos municípios, decorrentes da interrupção de atividades econômicas dependentes do rio.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 12.334 de 2010 (BRASIL, 2010), não deixa claro os controles que devem ser aplicados às áreas situadas a jusantes dos barramentos que se enquadram às suas prerrogativas, muito embora fomenta a gestão de risco. Tampouco, esclarece a quem cabe a responsabilidade de organizar o uso do solo nestes locais. Em seu artigo 12, a PNSB descreve o conteúdo mínimo que deverá possuir o Plano de Ação de Emergência (PAE) para os barramentos classificados como de dano potencial associado alto, sendo que um deles é a estratégia e o meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência. Novamente não é contemplada uma forma de regramento da ocupação e do uso do solo das áreas localizadas no vale a jusante.

1.2. Problema de Pesquisa

Os grandes prejuízos identificados na história dos acidentes por ruptura de barragem, independentemente do seu porte, estão localizados em regiões posicionadas no vale a jusante do maciço e próximos à linha da água. Estes prejuízos são os mais diversos como, por exemplo, danos ao meio ambiente, a perda econômica das áreas silvo-agrícolas e das áreas de pastagem para a pecuária, o desalojamento de famílias, a perda da identidade cultural e, principalmente, a perda de vidas.

As barragens são um ativo ao desenvolvimento econômico e social de uma região, um país, não obstante, elas podem se tornar um passivo para a região situada no vale a jusante.

A instalação de uma barragem, para o fim que ela é requerida, implica no atendimento de uma série de normas e exigências legais. Após a construção, durante a operação, a barragem deve ser monitorada para verificar quaisquer alterações estruturais, mecânicas ou hidráulicas que venham a comprometer a integridade física do maciço. Contudo, no Brasil não existe um regramento para o zoneamento do solo nas áreas a jusante das barragens. Há uma preocupação com o risco que a barragem impõe ao vale, porém não há uma preocupação com a forma de avanço da ocupação neste vale, ou seja, não há um instrumento para evitar que o risco seja potencializado. Novos loteamentos, novos polos comerciais ou industriais ou novas zonas de ampliação de agricultura de grande tecnificação potencializam o risco no vale. Na medida em que mais pessoas vivem ou circulam nestas áreas e mais recurso financeiro, científico e tecnológico é investido nestes locais maior podem ser as perdas.

Torna-se, assim, basilar a elaboração de uma metodologia para zonestar as áreas a jusante de barragens a fim de minimizar ou evitar que o risco de perda econômica, perda da identidade cultural e de vidas seja potencializado.

1.3. Hipótese

O zoneamento do uso do solo, elaborado a partir de atributos das metodologias para o mapeamento de áreas inundáveis, dos estudos de ondas de cheia provocadas por ruptura de barragem e o mapeamento de risco em encosta e margens de rios do Ministério das Cidades, pode contribuir para a redução de perdas e danos a jusante de uma barragem.

2. OBJETIVOS E ESTRUTURA

2.1. Objetivo Geral

Dado o problema de investigação, que no Brasil não existe um regramento oficial para o zoneamento do solo nas áreas situadas no vale a jusante das barragens, este trabalho tem como objetivo estabelecer uma metodologia para atender a esta falta. Para tanto, propõe-se utilizar os critérios usuais das metodologias de mapeamento de inundações, os mapas de inundação dos Planos de Ação de Emergência (PAE) de barragens e a metodologia aplicada ao mapeamento de risco em encosta.

2.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- analisar a aplicabilidade do Fator de Perigo (velocidade multiplicado pela profundidade do escoamento) para a composição do Grau de Perigo;
- propor critérios de enquadramento para a composição da Vulnerabilidade;
- categorizar o risco ao vale de jusante a partir de hidrograma de ruptura de barragem;
- sugerir usos que associem menores prejuízos às áreas com maiores riscos.

2.3. Estrutura da Dissertação

Para atingir os objetivos propostos para esta dissertação, os procedimentos metodológicos adotados permitiram dividi-la em sete capítulos, sendo que os dois capítulos iniciais compõem atributos introdutórios e a apresentação dos objetivos. Assim, a sua divisão encadeou nos seguintes títulos:

- Capítulo 3: Revisão bibliográfica. Este capítulo relaciona os aspectos relacionados ao uso e ocupação do solo, em especial nas regiões junto às linhas d'água e as formas de zoneamento atualmente empregadas no Brasil. A revisão, além de apresentar os tipos de barragens, também traz informações quanto à acidentes envolvendo barragens. O Brasil, preocupado com estes tipos de acidentes, promulga a Política Nacional de Segurança de Barragem ainda em 2010 que busca um cuidado inédito com o vale de jusante exigindo o Plano de Ação de Emergências para alguns tipos de barragens. Conceitos e metodologias para a identificação de áreas de risco são apresentados, em especial aqueles relacionados aos aspectos geológicos-geotécnicos e aqueles vinculados aos riscos hidrológicos;
- Capítulo 4: Descrição da proposta metodológica. Neste capítulo é elaborada, a partir de categorias de risco, uma maneira de realizar o zoneamento para o uso e a ocupação do solo situado junto ao vale de jusante de barragens;
- Capítulo 5: Resultados e discussão. A partir de um modelo hidrodinâmico realizado para uma ruptura de barragem, a metodologia é aplicada e o zoneamento é verificado. A partir desta verificação, discussão é realizada quanto a sua aplicabilidade, em especial quanto aos instrumentos legais já existentes;
- Capítulo 6: Conclusões quanto aos resultados obtidos e recomendações acerca da aplicabilidade da metodologia proposta nesta dissertação;
- Capítulo 7: São apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração desta dissertação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Uso do Solo no Brasil

O uso do solo no Brasil, no período colonial, esteve mais ligado ao litoral em função dos cultivos de cana-de-açúcar, algodão e café. O principal elemento de ocupação da região interiorana foi a pecuária extensiva que só se expandiu onde a vegetação era naturalmente aberta ou, mais tarde, onde as condições permitissem a formação de pastagens que pudessem ser manejadas com o uso do fogo. A busca pelos minérios teve um papel fundamental no adentrar ao território, região tal que somente homens alimentados por uma grande ambição é que poderiam enfrentar as dificuldades esperadas (ARAÚJO, 2002). Apesar de as primeiras cidades brasileiras nascerem no litoral, foram os rios importantes para a exploração do interior. Como os rios eram a maneira mais rápida para os exploradores chegar às áreas interioranas do Brasil colonial e também a via de acesso mais fácil para trazer os produtos do interior à costa, eles favorecem o surgimento de aglomerados urbanos junto às suas margens que posteriormente se tornaram cidades.

Priori *et al.* (2017) descrevem que a quebra da Bolsa de Valores de Nova York em 1929 afetou diretamente a economia cafeeira no Brasil conduzindo ao redirecionamento da economia brasileira. No campo, houve um processo de modernização da produção agrícola, focado a atender a demanda da economia urbano-industrial. Matos (2012) destaca que a desestabilização das relações campo-cidade permitiu o surgimento da díade urbanização e industrialização que iria marcar por cerca de 50 anos a história demográfica e econômica do país

3.2. Gestão Territorial

Para Duncan (2017), o termo território refere-se a uma área delimitada sob a posse de um ente, individual ou coletivo, tendo também o sentido de espaço vital, área contínua onde indivíduos e grupos defendem sua segurança e acesso aos recursos. Há vários sentidos figurados para a palavra território, mas todos compartilham da ideia

de apropriação de uma parcela geográfica por um indivíduo ou uma coletividade. Duncan (*op. cit.*) relata que o território é fruto de sua história que se manifesta no presente, portanto, um espaço dotado de heranças, sobre as formas das estruturas, da cultura e das relações sociais, apresentando-se como uma condição herdada.

Para Mafra e Silva (2004), a finalidade da gestão do território é o ordenamento territorial, ou seja, a análise da distribuição dos locais destinados à habitação e as atividades produtivas e outras num dado espaço, bem como das formas de utilização pelos diversos agentes envolvidos. O Ministério do Meio Ambiente *apud* Montaño e Souza (2016) evidencia que o conceito de planejamento territorial no Brasil está fortemente ligado a, pelo menos, duas tradições de zoneamento. Uma primeira que diz respeito ao planejamento agrícola sob a forma dos zoneamentos agroecológicos, nos quais se faz um estudo da aptidão dos solos e do clima de uma dada área para diversos tipos de cultura. Trata-se, nesse caso, de um instrumento técnico, de caráter indicativo, que subsidia o agricultor em suas decisões de investimento, ou o setor público no que concerne à concessão de créditos para a agricultura. A outra tradição está ligada à regulação do uso de solo urbano, que une instrumentos legais e normativos.

Contudo, Zêzere (2007) critica que o suporte físico dos territórios, quanto aos desastres naturais, tem sido menosprezado nos processos de ordenamento do território e planejamento urbano, e este fato tem conduzido a situações incompatíveis com o desenvolvimento sustentável. No caso dos eventos climáticos e hidrológicos extremos, admite-se a existência de um aumento do número de ocorrências, possivelmente associado às modificações climáticas globais. Porém, no caso dos fenômenos ligados à geodinâmica interna esse incremento não se confirma, e as razões para o agravamento dos prejuízos prendem-se ao aumento da vulnerabilidade das populações.

Quanto ao regramento territorial em virtude de grandes obras construídas pelo homem, como é o caso das barragens, muito pouco é discutido. Os planos de ação de emergência, estabelecidos pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei Federal nº 12.334 de 2010), apresentam estudos de inundação e devem indicar Zonas de Autossalvamento (ZAS) e os pontos vulneráveis que são potencialmente afetados pela onda gerada pela eventual ruptura parcial ou total da barragem. Porém, ainda estão longe de serem considerados instrumentos de gestão do território, propriamente ditos.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2017), sem considerar um modelo de zoneamento para áreas localizadas no vale a jusante de barragens, apresenta diferentes formas de administrar o território, além de ressaltar algumas já mencionadas neste Capítulo, sendo elas:

- *Zoneamento Ambiental* ou *Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE)*: que tem como objetivo viabilizar o desenvolvimento sustentável a partir da compatibilização do desenvolvimento socioeconômico com a proteção ambiental;
- *Zoneamento Socioeconômico-Ecológico (ZSEE)*: trata-se do próprio ZEE, cuja nomenclatura, no entanto, empregada nos estados de Mato Grosso e Rondônia, busca evidenciar, para além dos aspectos ambientais e econômicos, a dimensão social;
- *Zoneamento Agroecológico (ZAE)*: enquanto a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei Federal nº 6.931/1981) possui, dentre seus instrumentos, o ZEE, a Política Agrícola, regida pela Lei Federal nº 8.171/1991, prevê, em seu artigo 19, inciso III, a realização de zoneamentos agroecológicos, que permitem estabelecer critérios para o disciplinamento e o ordenamento da ocupação espacial pelas diversas atividades produtivas;
- *Zoneamento Agrícola de Risco Climático*: outro instrumento da Política Agrícola, o zoneamento agrícola de risco climático é elaborado com o objetivo de minimizar os riscos relacionados aos fenômenos climáticos, permitindo a identificação da melhor época de plantio das culturas, nos diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares;
- *Zoneamento Industrial*: disciplinado pela Lei Federal nº 6.803/1980, trata-se de tipologia de zoneamento realizado nas áreas críticas de poluição com a identificação das zonas destinadas à instalação de indústrias, em esquema de zoneamento urbano, compatibilizando as atividades industriais com a proteção ambiental;
- *Zoneamento Urbano*: instrumento utilizado nos planos diretores, através do qual a cidade é dividida em áreas sobre as quais incidem diretrizes diferenciadas para o uso e a ocupação do solo, especialmente os índices

urbanísticos. Através dele, supõe-se que o resultado final alcançado através das ações individuais esteja de acordo com os objetivos do município, que incluem proporcionalidade entre a ocupação e a infraestrutura e a necessidade de proteção de áreas frágeis e/ou de interesse cultural;

- *Etnozoneamento*: instrumento da Política Nacional de Gestão Territorial e Ambiental de Terras Indígenas, instituída pelo Decreto Federal nº 7.747/2012, destinado ao planejamento participativo e à categorização de áreas de relevância ambiental, sociocultural e produtiva para os povos indígenas, com base nos conhecimentos e saberes indígenas.

Ainda em 2017 a Lei Federal n.º 13.465 de 11 de julho, que trata da regularização fundiária em áreas urbanas e em áreas rurais com fração mínima parcelável, foi publicada, sendo posteriormente regulamentada pelo Decreto Presidencial n.º 9.310 de 15 de março de 2018. Brasil (2017), em seu artigo 9º, institui normas gerais e procedimentos para a regularização fundiária urbana dos núcleos informais comprovadamente existentes até 22 de dezembro de 2016. Brasil (*op. cit.*) deixa claro os objetivos desta Lei em seu artigo 10, quando busca, entre outros, identificar os núcleos informais, organizá-los e assegurar a prestação de serviços públicos aos seus ocupantes, ampliar o acesso à terra urbanizada pela população de baixa renda, prevenir e desestimular a formação de novos núcleos urbanos informais. Em seu artigo 11, parágrafo 2º, a Lei possibilita também a regularização fundiária em área situadas, total ou parcialmente, em área de preservação permanente ou de proteção de mananciais desde que sejam elaborados estudos técnicos que justifiquem as melhorias ambientais em relação à situação de ocupação informal anterior.

Quanto a gestão territorial do espaço urbano e rural regularizável, Brasil (2017) descreve, em seu artigo 35, o conteúdo mínimo para a elaboração do projeto de regularização fundiária. No contexto desta dissertação, cabe ressaltar o seu inciso VII o qual exige estudo técnico para as situações de risco. Os núcleos situados em áreas de riscos geotécnicos, de inundações ou de outros riscos somente poderão ser aprovados se estudos técnicos forem realizados, a fim de examinar a possibilidade de eliminação, de correção ou de administração de riscos na parcela por eles afetada. Cabendo aos Municípios a realocação dos ocupantes dos núcleos, caso não seja possível a administração, correção ou eliminação do risco.

Neste sentido, é possível perceber que as propostas do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2017) e o conteúdo da Lei Federal n.º 13.465/2017 apresentam o desenvolvimento sustentável, a produtividade e o bem estar da população como fatores em comum. Não obstante, fica evidente que os zoneamentos e o texto da Lei entram em conflito no que se refere à proteção ambiental e a redução de riscos, não que os outros três não sejam, entre si, conflitantes. No caso de inundações ou de onda de cheia provocada pelo rompimento de barragem, as formas de gestão territorial apresentadas não explicitam a preocupação com os resultados que podem ser gerados destes eventos. Pelo contrário, a Lei Federal n.º 13.465/2017 prevê a possibilidade de ocupação de áreas de preservação ambiental e de riscos a partir de estudos técnicos que examinem a possibilidade de eliminação, de correção ou de administração de riscos sobre a parcela da população que, por eles, pode ser afetada.

3.3. Barragens

As barragens, compreendendo o barramento, o reservatório e as estruturas associadas tais como os vertedouros, tomadas d'água, casas de força elétrica, estação de bombeamento e unidades de controle, são obras necessárias para uma adequada gestão dos recursos hídricos (ANA, 2016b).

O Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2017) define barragens como sendo obstáculos artificiais com a capacidade de reter água, ou qualquer outro líquido, rejeitos, detritos, para fins de armazenamento ou controle, podem variar em tamanho desde pequenos maciços de terra, usados frequentemente em fazendas, a enormes estruturas de concreto ou de aterro, geralmente usadas para fornecimento de água, de energia hidrelétrica, para controle de cheias e para irrigação, além de diversas outras finalidades.

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2011) considera uma grande barragem qualquer barragem que possua altura de 15 metros ou mais, a partir da fundação até sua crista, ou qualquer barragem com altura entre 5 e 15 metros de altura e que armazene mais de três milhões de metros cúbicos no reservatório por ela formado.

Ainda CBDB (2017) informa que as barragens têm servido como fonte confiável

de água para a vida das pessoas ao longo dos últimos 5 mil anos. Elas têm sido fundamentais na formação de estoques de água, indispensáveis ao estabelecimento e ao sustento de cidades e de fazendas, para a irrigação e para a produção de alimentos, em especial nas épocas de seca. No entanto, sua construção e operação podem envolver danos potenciais para às populações e aos bens materiais e ambientais existentes no seu vale de jusante e no seu entorno. Singh (1996) publicou o resultado de um estudo estatístico que relacionou as principais causas de rompimento total ou parcial de barragens ocorridos até aquela data:

- 37% (\pm 8%): problemas no maciço (infiltração, erosão interna—*piping*, poro pressão excessiva, deslizamento, abatimento);
- 30% (\pm 5%): vazões que excederam a capacidade de escoamento dos vertedores (galgamento);
- 23% (\pm 12%): projeto e/ou construção inadequada, material de baixa qualidade, atos terroristas, falhas na operação e manutenção;
- 10% (\pm 5%): deslizamentos (terra, rocha, geleira ou avalanches).

Antunes do Carmo (2010) disserta que todos estes tipos de rompimento são uma ameaça potencial ao vale a jusante da barragem que inclui o rio, as propriedades, as edificações, o meio ambiente, a cultura e as pessoas, bem como as suas inter-relações.

3.3.1. Tipos de Barragens

Segundo o que relata Singh (1996), as barragens são classificadas em diferentes formas que dependerão do tamanho, do material construtivo, da forma, da finalidade de uso e do potencial de risco, sendo as três primeiras as formas mais comuns de classificação.

Quanto ao tamanho, as barragens podem ser pequenas, médias ou grandes. Singh (1996) descreve que o tamanho está diretamente relacionado à altura do barramento ou ao volume de água armazenado no reservatório sendo que, de modo geral, são consideradas grandes as barragens com 30 metros ou mais de altura ou um volume igual ou superior a 62,5 hm³, médias aquelas entre 12 e 30 metros de altura ou um volume entre 1,25 hm³ e 62,5 hm³, e pequenas aquelas entre 8 e 12 metros de

altura ou um volume entre 0,6 hm³ e 1,25 hm³.

Com relação aos materiais utilizados na construção, uma barragem pode ser homogênea ou zoneada de terra, enrocamento com núcleo de argila, face de concreto ou com outro tipo de impermeabilização do núcleo ou, ainda, concreto de gravidade, arco ou contraforte. Algumas barragens são construídas com uma combinação de matérias, incluindo terra, enrocamento, alvenaria de pedra e concreto (SINGH, 1996).

As diferentes finalidades de uso para os quais uma barragem é construída podem ser elencadas: acúmulo de água para o abastecimento público, irrigação de culturas agrícolas, regularização de vazões, controle de cheias, geração de energia elétrica, contenção de rejeitos, paisagismo, piscicultura, melhoria nas condições de navegabilidade fluvial e dessedentação de animais.

A Resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 10 de julho de 2012, classifica as barragens de acordo com sua categoria de risco, o seu dano potencial associado e o volume dos reservatórios por elas formados. Nesta, as barragens são classificadas conforme resume o Quadro 1.

Quadro 1. Classificação de barragens de acordo com sua categoria de risco, o seu dano potencial associado e o volume do reservatório.

Categoria de Risco	Dano Potencial Associado	Volume para Barragens de Acumulação de Água [m³]	Volume para Barragens de Resíduos e Rejeito [m³]
Alto	Alto	Muito Grande: > 200 milhões	Muito Grande: > 50 milhões
Médio	Médio	Grande: ≥ 75 milhões e ≤ 200 milhões	Grande: > 25 milhões e ≤ 50 milhões
Baixo	Baixo	Média: ≥ 5 milhões e ≤ 75 milhões	Média: > 5 milhões e ≤ 25 milhões
		Pequena: < 5 milhões	Pequena: > 500 mil e ≤ 5 milhões
			Muito Pequena: ≤ 500 mil

Fonte: Adaptado de Conselho Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2012b).

3.3.2. Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB)

A preocupação com a segurança de barragens no Brasil surge ainda em 1963. CBDB (2018), em um relato de sua história, esclarece que foi no Segundo Seminário Nacional de Grandes Barragens, realizado em São Paulo em junho de 1963, que o tópico sobre segurança de barragens surge sob o tema Acidentes em Barragens, assunto este que se manteve em seminários seguintes. Entretanto, a discussão sobre segurança era puramente técnica e não era um assunto que estava disseminado entre todos os proprietários de barragens. Foi com a promulgação da Lei Federal n.º 12.334 de 20 de setembro de 2010 que o Brasil passa a possuir um instrumento legal que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais foi estabelecida pela Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Sua aplicabilidade restringe-se às barragens com altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 metros, e/ou capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³, e/ou reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis, e/ou categoria de dano potencial associado médio ou alto (BRASIL, 2010).

Brasil (2010) regra, em seu artigo 6º, que um dos sete instrumentos da PNSB é o Plano de Segurança de Barragem que deve, entre outras oito informações, conter, quando cabível, o Plano de Ação de Emergência (PAE). O PAE deverá ser exigido pelo órgão fiscalizador em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem, sendo necessário sempre que a barragem for classificada como de dano potencial associado alto.

3.3.3. Classificação de Risco a Jusante de Barragens

Almeida e Viseu (1997) apresentam alguns exemplos de classificação de risco a jusante de barragens utilizados em diferentes países. O Quadro 2 resume a categorização utilizada por estes países em três níveis sendo eles: baixo, significativo e alto. Percebe-se que o nível de enquadramento é para toda a extensão analisada do vale.

Quadro 2. Exemplos de classificação de risco a jusante de barragens.

Classificação do Risco	Estados Unidos	Portugal	Espanha
Baixo	O rompimento da barragem causará pequena perda econômica (agricultura pouco desenvolvida, estruturas desabitadas ou pouca área natural de importância ambiental) e nenhuma vida humana em risco.	O rompimento da barragem não provocará perdas de vida e pequeno dano à propriedade.	O rompimento ou mal funcionamento da barragem pode provocar danos moderados ao meio ambiente e a propriedade, bem como pequeno perigo à vida humana.
Significativo	O rompimento da barragem causará perdas econômicas consideráveis (áreas rurais com agricultura pujante, indústria, atividades econômicas e/ou áreas com belezas naturais). De 1 a 6 vidas humanas em risco.	O rompimento da barragem causará poucas perdas de vida e moderado dano à propriedade.	O rompimento ou mal funcionamento da barragem pode provocar danos importantes ao meio ambiente e a propriedade ou afetar uma quantidade reduzida de residências.

Quadro 2. Exemplos de classificação de risco a jusante de barragens. (Continuação)

Classificação do Risco	Estados Unidos	Portugal	Espanha
Alto	O rompimento da barragem causará perdas econômicas excessivas (áreas urbanas, agricultura, indústria, e/ou áreas com belezas naturais). Mais de 6 vidas humanas em risco.	O rompimento da barragem causará um grande número de perdas de vida e severo dano à propriedade.	O rompimento ou mal funcionamento da barragem pode provocar danos severos ao meio ambiente e a propriedade.

Fonte: Almeida e Viseu (1997).

A Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, pelo dano potencial associado e pelo seu volume (BRASIL, 2012b).

Quanto à categoria de risco, Brasil (2012b) esclarece que as barragens serão classificadas de acordo com aspectos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, levando-se em conta: suas características técnicas, seu estado de conservação e a existência do seu plano de segurança. Já o dano potencial é determinado baseado em critérios associados à área que pode ser afetada por um eventual rompimento, levando em consideração: a existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas, a existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários, a existência de infraestrutura ou serviços e a existência de equipamentos de serviços públicos essenciais, a ocorrência de áreas protegidas definidas em legislação, o tipo de fluido armazenado e o volume da barragem.

Para o caso de barragens para o armazenamento de água, independentemente da sua utilização, Brasil (2012b) estabelece que o somatório dos índices apresentados no Quadro 4 indicará o dano potencial em que a barragem será enquadrada. A classificação é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3. Classificação de risco quanto ao dano potencial associado.

Volume Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócioeconômico (d)
PEQUENO ≤ 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
MÉDIO De 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
GRANDE De 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)	–	ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
MUITO GRANDE > 200 milhões m ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)	–	–

Fonte: Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2012b).

Quadro 4. Somatório dos índices para a classificação de risco.

Dano Potencial Associado	Somatório dos Índices do Quadro 3 $\Sigma(a \text{ até } d)$
BAIXO	≤ 10
MÉDIO	Maior que 10 e menor que 16
ALTO	≥ 16

Fonte: Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2012b).

Percebe-se que, assim como as classificações de risco a jusante de barragem apresentadas por Almeida e Viseu (1997), Brasil (2012b) apresenta critérios que permitem uma única categoria para todo o vale de jusante considerado. A Resolução n.º 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos concentra-se muito mais na classificação da barragem do que no vale de jusante, propriamente dito, pois busca atender ao artigo 7º da Lei Federal n.º 12.334 de 2010 que trata exatamente da classificação das barragens. E esta classificação tem como objetivo definir a

periodicidade, conteúdo mínimo e equipe responsável pela inspeção de segurança na barragem e não no vale de jusante.

3.4. Plano de Ação de Emergência (PAE)

O PAE é um documento formal, a ser elaborado pelo dono da barragem, no qual deverão ser estabelecidas as ações a serem executadas pelo mesmo em caso de situação de emergência, bem como identificará os agentes a serem notificados dessa ocorrência conforme descrito no artigo 12 da Lei Federal nº 12.334 de 2010 (BRASIL, 2010).

Oito anos antes da promulgação da Lei nº 12.334 de 2010, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002) já dedicava um capítulo ao assunto, deixando claro que a falta de regulamentos não isentava o proprietário da barragem da responsabilidade em elaborar, atualizar e seguir o PAE. Brasil (2002, p. 34) cita que a falha de um equipamento essencial, tal como uma comporta de controle de cheias, uma ruptura de talude que possua o potencial de causar a ruptura da barragem, ou a ruptura completa da barragem, causada por galgamento, sismo ou erosão interna (piping) podem ser exemplos de emergência. Devido aos diversos tipos de emergências e aos tipos de barragens, os PAEs são específicos para cada local.

Um PAE possibilita o planejamento da municipalidade, das polícias local, das agências estaduais e de outras entidades afetadas na eventualidade de uma falha capaz de provocar a ruptura de uma barragem e a coordenação de esforços entre os diferentes níveis de governo. Sendo que um dos pontos-chave do PAE é a notificação de entidades com responsabilidades instituídas como, por exemplo, outras barragens a montante e jusante, bombeiros, moradores, defesa civil, etc (BRASIL, 2002 e ANA, 2016b).

Minimamente o PAE deve conter a identificação e análise das possíveis situações de emergência, os procedimentos para identificação e notificação de mal funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem, os procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação e a estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência (BRASIL, 2010).

Antunes do Carmo (2013) acrescenta que os planos de ação de emergência podem ser requisitos obrigatórios, mesmo sem a existência de estudos de ruptura, para as barragens que forem consideradas como de alto risco. Por exemplo, uma barragem que armazene um grande volume de água, situada num vale confinado no qual existem habitações em número significativo, precisaria claramente de um plano de emergência. Contudo, os requisitos mínimos para a obrigatoriedade de planos de emergência diferem entre países e mesmo entre regiões. Antunes do Carmo (*op. cit.*) nos proporciona alguns exemplos de distintos países que exigem o PAE, sendo eles também apresentados no Quadro 5.

Quadro 5. Exigência de Plano de Ação de Emergência (PAE).

Condição	Portugal ¹	França ¹	Romênia ¹	Suíça ¹	Brasil ²
Altura [m]	> 15 ou	> 20 e	> 10 ou	--	≥ 15 ou
Altura [m] Volume [m ³]	> 10 e > 1×10 ⁶	-- > 15×10 ⁶	-- > 10×10 ⁶ ou	-- > 2×10 ⁶ ou	≥ 3×10 ⁶ ou
Condição especial	--	--	Sempre que existam áreas residenciais nos primeiros 10 km a jusante da barragem	Para todas aquelas que representem um perigo elevado para a população a jusante	Para aquelas classificadas como de dano potencial associado alto

Fonte: Adaptado de ¹ Antunes do Carmo (2013) e de ² Brasil (2010).

O conteúdo mínimo do PAE é apresentado na Resolução nº 236 de 30 de janeiro de 2017 da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017) que solicita, entre outras coisas, uma síntese do estudo de inundação com os respectivos mapas, indicação de Zona de Autossalvamento (ZAS) e os pontos vulneráveis que são potencialmente afetados pela onda gerada pela eventual ruptura parcial ou total da barragem. A ZAS é a região do vale a jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar, no mínimo, a menor das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km (ANA, 2016b).

O Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE (ANA, 2016b) já menciona que para avaliar os danos no vale a jusante é necessário determinar as zonas que vão ficar inundadas pela cheia provocada pela ruptura da barragem, afetando a população, instalações, infraestruturas e ambiente. Para esta avaliação são utilizados modelos hidrodinâmicos que simulam diferentes cheias induzidas. Nestes modelos hidrodinâmicos, além do processo de propagação da onda de inundação, são analisadas diferentes origens do hidrograma de cheia através do

desenvolvimento hipotético de distintas brechas de ruptura.

A caracterização do vale a jusante é outra ferramenta que deve compor o PAE, momento em que o empreendedor deverá descrever e localizar a população e a infraestrutura em risco. No seu guia, ANA (2016b) orienta que a caracterização do vale a jusante deve considerar o tipo de povoamento existente, se ele é urbano, rural, misto ou disperso; o número de habitantes residentes; o tipo de ocupação social, se ela é primária, secundária ou terciária; as infraestruturas importantes, como rodovias, ferrovias, instalações de armazenamento de produtos perigosos; áreas naturais com estatuto de proteção especial; e patrimônio com interesse histórico.

3.5. Áreas de Inundação

Os cursos d'água são sistemas dinâmicos que transportam água e sedimentos e as suas interações determinam a morfologia do rio (SILVA *et.al.*, 2003). A água provém do escoamento superficial e subterrâneo que, por sua vez, origina-se das precipitações e das descargas da água disponível no subsolo. O sedimento é oriundo da bacia hidrográfica na qual o rio está inserido, e a partir da geologia e pedologia, do uso do solo e das inter-relações humanas que nela ocorrem. A dinâmica do rio tende a um equilíbrio que é facilmente interrompido por ação externa, seja ela de origem antrópica ou natural.

A inundação é um processo natural onde o nível da água, no seu curso, eleva-se acima do seu leito normal, ocasionando a submersão do leito maior do rio, área também denominada de planície de inundação. As precipitações intensas e distribuídas propiciam um alto volume acumulado de água na bacia hidrográfica de contribuição, fazendo com que o leito normal não possua as condições para escoar tal volume, permitindo que gradualmente o rio ocupe seu leito maior. Cunge, Holly e Verwey (1980) evidenciam que é necessário distinguir entre escoamento em canal e escoamento na planície de inundação. O escoamento sobre as planícies de inundação é muito mais complexo e mais difícil de descrever completamente que o escoamento que ocorre na calha; paradoxalmente, entretanto, sua representação matemática em modelos é muito mais simples. Na propagação do escoamento, o papel das planícies de inundação é de disponibilizar um volume de armazenamento com reduzida capacidade de escoamento.

A compactação e a impermeabilização do solo, a erosão do solo e o assoreamento dos rios, a remoção ou a modificação da cobertura vegetal da bacia hidrográfica alteram as variáveis hidrológicas que compõem o ciclo da água e isso potencializa as alterações sobre o escoamento superficial que está diretamente relacionado às inundações. Cemaden (2017) relatou que tem sido observado um aumento progressivo da intensidade e alcance dos eventos de inundação, o que nos leva a inferir que as alterações do uso do solo na bacia são uma das principais causas.

A ocupação desordenada das planícies de inundação, somada a uma drenagem inadequada, é o que expõe pessoas ao perigo. No Brasil há um baixo interesse por fomentar políticas públicas que estimulem a ocupação destas áreas com equipamentos que equilibrem o uso das áreas inundáveis com a capacidade de tolerar a inundação. Em grande parte dos casos, o leito maior da linha d'água tem sido ocupado por habitação voltada à população de baixa renda.

Não é questionável que historicamente o ser humano vive e convive junto aos rios e sabe de seus benefícios e perigos. E, por isso, as técnicas de mapeamento das áreas de inundação têm sido aprimoradas com a melhoria e ao acesso das tecnologias, em especial aquelas relacionadas com o sensoriamento remoto e suas aplicações em modelagem geográfica. Bitar (2014, p. 18) relata que podem-se empregar duas abordagens para realizar o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações, dado que o assunto envolve uma temática complexa e sem fórmulas definitivas. Uma delas envolve conceitos de hidrologia e hidráulica com a utilização de modelos matemáticos computacionais, a outra pressupõe análises dos diversos aspectos que envolvem o ambiente, como o tipo de solo, a geomorfologia do terreno e o tipo de cobertura vegetal.

3.6. Áreas de Risco

Entre os desastres naturais registrados no Brasil de 1991 a 2012, a seca é o desastre que mais afeta a população. De um total de 126.926.656 brasileiros atingidos por desastres naturais neste período, 51% sofreram com a seca. As enxurradas e as inundações são os eventos que seguem as secas com 21% e 12%, respectivamente. Entretanto, das perdas de vidas humanas, as enxurradas e inundações representam 71,55%, seguidos pelos movimentos de massa que somaram 15,6% das fatalidades (UFSC, 2013).

A Fundação João Pinheiro (2017) realizou pesquisa apontando um déficit habitacional no Brasil de 6.186.503 no ano de 2015, o que representa 9,3% dos domicílios particulares permanentes e improvisados. Entre as regiões com o maior déficit habitacional destacam-se a Sudeste e a Nordeste com, respectivamente, 2,430 e 1,924 milhões de moradias em 2015; em seguida, vêm as regiões Norte com 627 mil, Sul com 697 mil, e Centro-Oeste com 506 mil domicílios. Entre os Estados com maior déficit naquele ano destacam-se: São Paulo (1,306 milhão), Minas Gerais (552 mil), Bahia (451 mil), Rio de Janeiro (468 mil) e Maranhão (388 mil). Brasil (2007) já havia apontado o elevado déficit habitacional como o reflexo do quadro de exclusão social quanto ao direito de moradia, tendo como pano de fundo o processo desordenado histórico de urbanização no país.

Os dados da UFSC (2013) e da Fundação João Pinheiro (2017) quando projetados juntos não apontam cenários tranquilizadores para o futuro das populações especialmente urbanas do Brasil. Com a promulgação da Lei Federal nº12.608, de 10 de abril de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, o Brasil estabelece um instrumento legal que exige que na revisão dos seus planos diretores, os municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos façam, entre outras coisas, o mapeamento destas áreas (BRASIL, 2012a). Este mapeamento deverá compor as diretrizes para a urbanização destes municípios. Como esta Lei é recente, nem todos os municípios estão adequados às suas exigências.

Ainda em 2007, uma importante publicação foi apresentada pelo Ministério das Cidades, o Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios que apresenta um método de análise de risco adaptado à realidade das cidades brasileiras. Seu objetivo é a elaboração de um material de treinamento para o gerenciamento de áreas de risco com ênfase no mapeamento de risco de deslizamentos, enchentes e inundações e, assim, disponibilizar o conhecimento aos profissionais municipais envolvidos com o assunto.

Brasil (2007) relata que a população mais pobre resolve seus problemas de moradia ocupando áreas vazias das cidades que são desprezadas pelo mercado imobiliário. O problema é que, neste processo, as áreas vazias são aquelas ambientalmente frágeis, como margens de rios, mangues e encostas íngremes e a precariedade do tipo de ocupação e da forma de instalação da pouca infraestrutura

existente compõem um cenário de forte vulnerabilidade. Assim, os setores de alto risco surgem e, por ocasião dos períodos chuvosos mais intensos, têm sido palco de acidentes graves.

Os conceitos de suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco divergem de autor para autor, talvez pelo fato destes estarem inseridos nas mais diversas atividades humanas: econômicas, de saúde, de engenharia e de meio ambiente. Entretanto isto, por si só, necessitaria de um outro estudo. No mapeamento de áreas de risco, quando associados à movimentos de massa, estes conceitos foram compilados no trabalho realizado por Riffel, Guasselli e Bressani (2016). Eles concluíram que a **suscetibilidade** está ligada apenas ao sistema natural, sem levar em consideração a ação antrópica, representando somente a fragilidade do ambiente, já a **vulnerabilidade** levar em consideração as condições humanas, visto que são elas que mais influenciam na severidade de um desastre, ou seja, a vulnerabilidade está ligada à condição humana e a sua capacidade de enfrentar um evento adverso. Ainda, estes autores estabeleceram que **perigo** consiste em uma situação potencial para provocar danos, sendo que, associando o conceito aos movimentos de massa, essa situação potencial pode ser provocada por um fenômeno natural. E, por fim, apontam que o conceito de **risco** é o que gera a maior confusão, classificando o risco como a probabilidade de ocorrência de um desastre, considerando também que o risco é um dado que pode ser quantificado.

Crichton (1999), analisando o aumento dos custos econômicos oriundos de desastres naturais para seguradoras no Reino Unido, apontou para a necessidade de não somente antecipar riscos futuros, mas também evidenciou que explorar novas formas de reduzi-los é parte do trabalho das pessoas envolvidas com os eventos. Crichton, então, propôs o conceito de Triângulo do Risco, apresentado esquematicamente na Figura 1, onde que o risco é a probabilidade de uma perda que depende de três elementos: do perigo, da vulnerabilidade e da exposição.

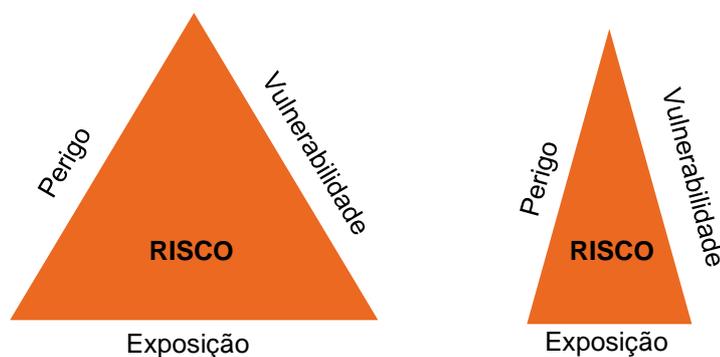


Figura 1. Triângulo do Risco.

Fonte: Traduzido de Crichton (1999).

Para Bitar (2014, p. 18), no caso das inundações fluviais, tem-se que a suscetibilidade estaria associada às condições naturais do terreno que favorecem a elevação do nível d'água no canal de drenagem com transbordamento, atingindo as planícies aluviais e os terraços fluviais. O perigo estaria associado ao período de retorno, ou seja, à frequência temporal em que o evento ocorre dentro de uma determinada área. Na análise de risco, incorporar-se-ia o uso e ocupação do solo nas áreas atingíveis.

3.7. Mapeamento de Áreas de Inundação

Diversas são as metodologias utilizadas para o mapeamento de áreas de inundação, enchente e alagamento, sendo elas variações de modelos hidrodinâmicos ou de análise geomorfológica ou ainda, no máximo, uma composição destas duas.

Uma das principais metodologias utilizadas para o mapeamento de áreas de risco quanto aos efeitos das inundações e enchentes foi proposta pelo Ministério das Cidades e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas em 2007 para auxiliar equipes municipais a identificarem e hierarquizarem suas áreas de riscos a partir de uma linguagem comum e unificada.

Esta metodologia é apresentada no Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios, Brasil (2007), que incorpora uma variável hidrodinâmica chamada "Processo Hidrológico" para a composição do risco, porém não especifica a metodologia da hidráulica fluvial ou indica modelos hidrodinâmicos a serem utilizados, isto permite concluir que é necessário um conhecimento técnico específico para a sua determinação.

Ao detalhar esta metodologia, Brasil (2007) propõe reconhecer os locais de perigo ou as áreas de risco por meio de pesquisa dirigida, buscando registros de ocorrências de enchentes e inundações na área urbana e em área de assentamentos precários. Esta metodologia também consiste em análise cartográfica e/ou aerofotogramétrica que possibilite a identificação dos principais cursos d'água com uma verificação posterior da ocupação humana existente e o seu risco potencial, permitindo uma setorização preliminar dos diferentes compartimentos de risco.

O primeiro critério de análise e classificação de risco sugeridos por Brasil (2007) consiste na identificação do cenário hidrológico. O Quadro 6 resume as tipologias dos processos hidrológicos sugeridos pelos autores.

Quadro 6. Potencial destrutivo dos processos hidrológicos.

Processo Hidrológico	Critério de Enquadramento
C1 – Baixo	Enchente e inundação lenta de planícies fluviais.
C2 – Médio	Enchente e inundação com alta energia cinética.
C3 – Alto	Enchente e inundação com alta energia de escoamento e capacidade de transporte de material sólido.

Fonte: Adaptado de Brasil (2007).

A vulnerabilidade da ocupação urbana é o segundo critério para a composição do risco. Neste critério, Brasil (2007) propõe uma análise do padrão construtivo das moradias sendo separado em somente duas classes, conforme mostrado no Quadro 7.

Quadro 7. Vulnerabilidade da ocupação urbana.

Vulnerabilidade	Critério de Enquadramento
V1 – Alta	Baixo padrão construtivo onde predominam moradias construídas com madeira e restos de material com baixa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos.
V2 – Baixa	Médio a bom padrão construtivo onde predominam moradias construídas em alvenaria com boa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos.

Fonte: Adaptado de Brasil (2007).

Um terceiro critério para análise de risco, sugerido por Brasil (2007), refere-se à distância das moradias ao eixo da drenagem. Neste critério há embutida a frequência de ocorrência: fenômenos com maior raio de alcance estão associados a chuvas de maior magnitude e de períodos de retorno menos frequentes. Este critério exige um conhecimento em hidrologia e de hidráulica fluvial para um enquadramento adequado, estando ele apresentado no Quadro 8.

Quadro 8. Distância das moradias em relação ao eixo da drenagem.

Periculosidade	Critério de Enquadramento
P1 – Alta	Alta possibilidade de impacto direto considerando o raio de alcance do processo.
P2 – Baixa	Baixa possibilidade de impacto direto considerando o raio de alcance do processo.

Fonte: Adaptado de Brasil (2007).

Uma vez conhecidos os três critérios, Brasil (2007) define o nível relativo de risco de inundação e enchentes através de diferentes arranjos entre estes critérios. O Quadro 9 relaciona os quatro níveis de risco que são discretizados a partir desta metodologia.

A dissertação de Junges Menezes (2014) utiliza uma metodologia similar para analisar as inundações ocorridas no município de Santa Cruz do Sul, RS, através de registros históricos e de análise geomorfológica. A proposta do autor não avalia as condições hidrodinâmicas, nem são analisadas as condições hidrológicas com chuvas de diferentes períodos de retorno. Com o auxílio de um inventário de inundações registradas em Santa Cruz do Sul e com uma base cartográfica com curvas de nível de equidistância de 5 metros, o autor compôs mapas de suscetibilidade, perigo e de risco a inundação para aquela cidade.

Quadro 9. Grau de risco de inundação.

Grau de Risco	Critério de Enquadramento
R1 – Baixo	P1 x C1 x V2 P2 x C1 x V1 P2 x C1 x V2 P2 x C2 x V2
R2 – Médio	P1 x C1 x V1 P1 x C2 x V2 P2 x C2 x V1 P2 x C3 x V2
R3 – Alto	P1 x V1 x C2 P1 x V2 x C3 P2 x V1 x C3
R4 – Muito Alto	P1 x V1 x C3

Fonte: Adaptado de Brasil (2007).

Junges Menezes (2014) identificou a susceptibilidade através de mapa (Figura 2) elaborado com o auxílio de um modelo digital do terreno realizado em software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a partir das curvas de nível de equidistância de 5 metros. De posse da declividade e hipsometria da área de estudo, o autor localizou

as áreas planas associadas às drenagens, realizando, posteriormente, aferições em campo para possíveis ajustes no mapa. O mapa de perigo (Figura 3) foi obtido por meio do cruzamento das áreas suscetíveis a inundação com o mapa de cadastro imobiliário, focando nas edificações com ocupação e as distâncias destas ao rio. Assim o autor estabeleceu três graus de perigo com base nos critérios que são apresentados no Quadro 10.

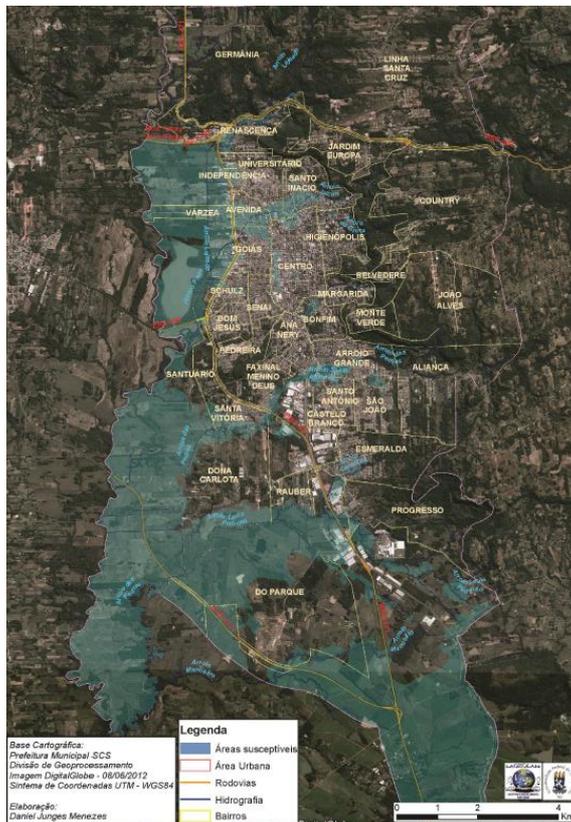


Figura 2. Áreas suscetíveis a inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS.

Fonte: Junges Menezes (2014).

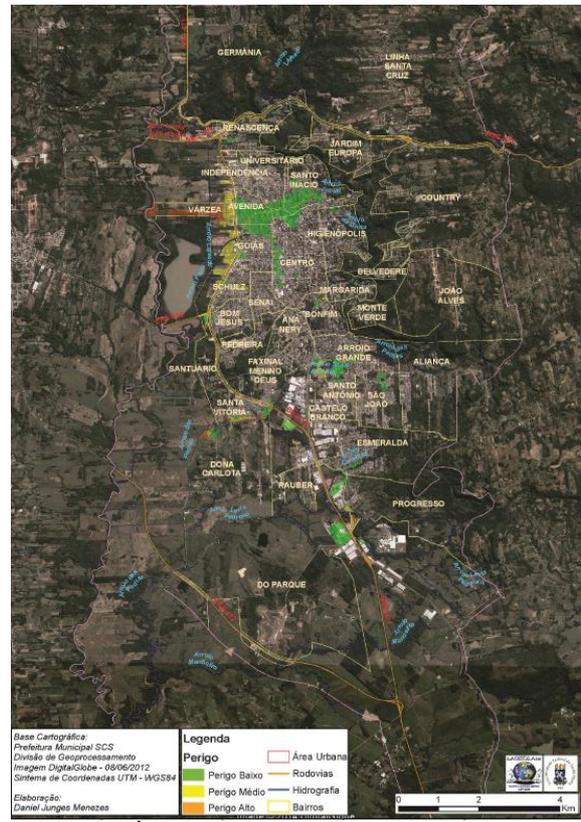


Figura 3. Áreas de perigo de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS.

Fonte: Junges Menezes (2014).

Quadro 10. Grau de perigo da inundação.

Grau de Perigo	Critério de Enquadramento
P1 – Baixo	<ul style="list-style-type: none"> Áreas mais distantes da drenagem, ou ainda associadas a drenagens de pequena magnitude, sendo considerados eventos extraordinários; Inundações atreladas às intervenções antrópicas, como impermeabilização de áreas associadas à presença de antigas drenagens, e que, causam danos principalmente às vias, registrados atualmente como alagamentos.
P2 – Médio	<ul style="list-style-type: none"> Áreas além da cota de inundação estabelecida para o rio Pardinho; Áreas com até 20 metros de distância de drenagem onde se considera severidade intermediária; Áreas além da cota de inundação estabelecida em drenagem onde se considera severidade alta.
P3 – Alto	<ul style="list-style-type: none"> Áreas aquém da cota de inundação estabelecida para o rio Pardinho; Áreas com até 20 metros de distância de drenagem onde se considera severidade alta; Áreas aquém da cota de inundação estabelecida em drenagem onde se considera severidade alta.

Fonte: Junges Menezes (2014).

A vulnerabilidade também foi objeto de análise de Junges Menezes (2014), sendo considerado como elementos principais o padrão de urbanização, tendo em vista a presença ou não de medidas estruturais, padrão das construções, e ainda o seu uso. O autor realizou diagnóstico por meio dos trabalhos de campo nas áreas de perigo e determinou três graus de vulnerabilidade que são apresentados no Quadro 11, sendo estes estabelecidos em função do cenário encontrado na área de estudo, e tendo em vista a sua heterogeneidade em relação à intervenção nas áreas de perigo. O autor apresentou o resultado deste diagnóstico através de um mapa que está reproduzido na Figura 4.

Quadro 11. Grau de vulnerabilidade da área afetada.

Grau de Vulnerabilidade	Critério de Enquadramento
V1 – Baixo	<ul style="list-style-type: none"> • Presença de medidas estruturais que reduzem a frequência das inundações ou mitigam danos; • Bom padrão construtivo, onde predominam casas de alvenaria, ruas calçadas ou pavimentadas.
V2 – Médio	<ul style="list-style-type: none"> • Médio padrão construtivo onde predominam casas de madeira e casas antigas pouco conservadas, casas de alvenaria inacabadas, alternância entre ruas pavimentadas e não pavimentadas; • Presença de algumas medidas que atenuam moderadamente os danos, intervenções de mitigação geralmente individuais, ou ainda sobreloja.
V3 – Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Padrão construtivo precário, com predomínio de casas pequenas, de madeira casa com material alternativo, casas sem conservação ou manutenção, ruas sem pavimentação; • Pouca capacidade de intervenção ou resposta às inundações.

Fonte: Adaptado de Junges Menezes (2014).

Para o zoneamento de risco de inundações Junges Menezes (*op. cit.*) realizou o cruzamento do mapa de perigo com as condicionantes de vulnerabilidade, considerando que quanto maiores forem os graus de perigo e vulnerabilidade, maior o risco, conforme pode ser visto na Figura 5. O autor utilizou a classificação sugerida por Brasil (2007) que separa o risco em quatro categorias: R1 (risco baixo), R2 (risco médio), R3 (alto risco) ou R4 (risco muito alto). O Quadro 12 discrimina a álgebra utilizada pelo autor para compor o risco.

Quadro 12. Grau de risco de inundação.

Grau de Risco	Critério de Enquadramento
R1 – Baixo	P1 x V1 P1 x V2
R2 – Médio	P1 x V3 P2 x V1 P2 x V2 P3 x V1
R3 – Alto	P2 x V3 P3 x V2
R4 – Muito Alto	P3 x V3

Fonte: Adaptado de Junges Menezes (2014).

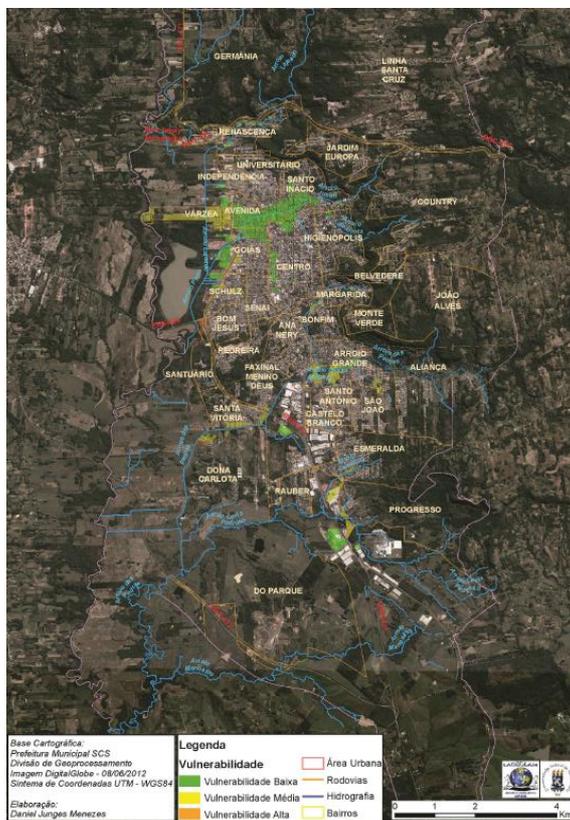


Figura 4. Mapa da vulnerabilidade a inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS.

Fonte: Junges Menezes (2014).

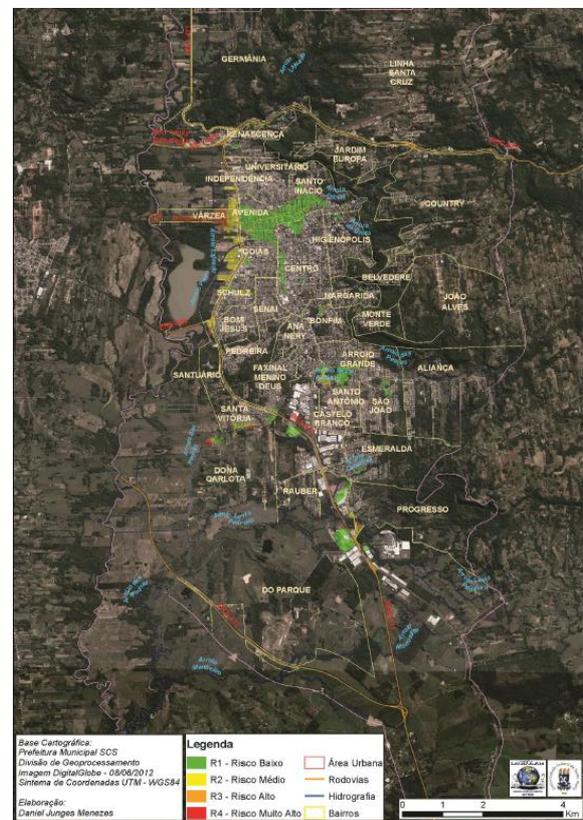


Figura 5. Mapa das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS.

Fonte: Junges Menezes (2014).

Outro trabalho que aborda conceitos relacionados ao mapeamento e elaboração de cartas de suscetibilidade, perigo e risco ao processo hidrológico de inundação fluvial foi apresentado por Campos *et al.* (2015), momento em que realizaram uma revisão bibliográfica concernente a este tema. Neste trabalho os autores utilizaram parâmetros geomorfológicos através de modelo digital de elevação com o auxílio de software que

permite análise topológica e trajetória de fluxo, não sendo consideradas as condições hidrodinâmicas responsáveis pelo escoamento.

As condições hidrológicas e hidrodinâmicas do local de pesquisa foram mais estudadas por Fadel (2015) quando, ao realizar sua dissertação para identificar combinações de medidas estruturais e não estruturais conforme o risco de prejuízo na cidade de Lajeado, RS, a autora avalia inundações com sete períodos de retorno distintos e realiza uma análise hidráulica do trecho em estudo com o auxílio do software HEC-RAS em escoamento em regime permanente. A autora não realizou avaliação de vulnerabilidade, perigo ou risco, entretanto apresentou nas suas combinações de medidas estruturais e não estruturais a possibilidade de redução dos prejuízos causados pela inundação, verificando o fator de retorno financeiro ($F_{R\$}$).

A Figura 6 apresenta a área passível de inundação, estudada por Fadel (2015), para diferentes períodos de retorno, enquanto que a Figura 7 identifica o mapa de inundação com a existência de um dique que pudesse conter as chuvas que gerassem vazões com períodos de retorno de até 25 anos.

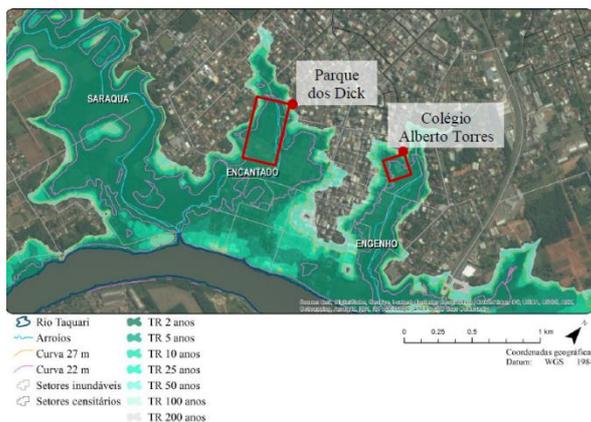


Figura 6. Mapeamento das inundações em Lajeado, RS, sem medidas de controle.

Fonte: Fadel (2015).

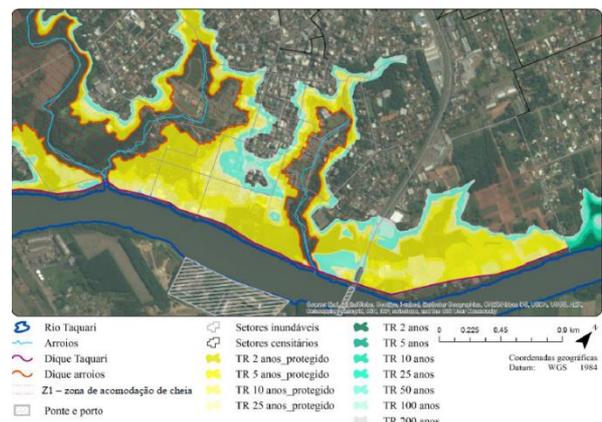


Figura 7. Mapeamento das inundações em Lajeado, RS, considerando diques de proteção.

Fonte: Fadel (2015).

Com sua análise hidrológica e hidrodinâmica e através de uma avaliação focada no retorno financeiro, Fadel (2015) concluiu que a alternativa mais vantajosa, das seis avaliadas, é aquela que apresenta medida não estrutural de restrição de ocupação a partir de estudos de zoneamento, ou seja, apresenta um $F_{R\$}$ maior do que 1, indicando que a diminuição dos danos é maior do que os gastos necessários para tal.

O desenvolvimento de metodologia que integre as características geomorfológicas da área, as condições hidrológicas da região e as peculiaridades hidrodinâmicas da linha de vertente em análise podem ser desafiadoras. Essa

integração exige uma equipe multidisciplinar e um profundo conhecimento em hidráulica fluvial, hidrologia e geoprocessamento. Pelo fato desta pesquisa buscar estabelecer uma metodologia para o zoneamento de áreas localizadas no vale a jusante de barragens, assunto que levanta grande preocupação dos proprietários de barragens, dos técnicos e da sociedade de maneira geral, uma análise integrada, mesmo que laboriosa e onerosa, deve ser priorizada. Um exemplo deste tipo de esforço pode ser buscado junto ao trabalho realizado por Monteiro e Kobiyama (2013).

Monteiro e Kobiyama (2013) propuseram uma metodologia para o mapeamento do perigo de inundação através da utilização de precipitação de projeto e de modelagem hidrológica e hidrodinâmica. Com chuvas com períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos os autores obtiveram diferentes vazões de pico que foram aplicadas em um modelo hidrodinâmico 2D. Eles testaram sua metodologia em uma região localizada no município de Ilhota, SC, e para mapear as áreas de perigo um Índice de Perigo foi estabelecido, sendo o perigo da inundação função da profundidade da lâmina de água e de sua velocidade.

Após calibrar e modelar diferentes níveis de inundação, conforme a chuva de projeto, Monteiro e Kobiyama (2013) obtiveram os seus respectivos mapas de inundação, que podem ser visualizados nas Figuras 8, 9 e 10. Eles identificaram uma pequena variação da área inundada e uma elevada variação do volume de inundação e justificam este comportamento distinto pelas características geomorfológicas da bacia hidrográfica na qual o estudo foi realizado, já que ela possui muitas áreas declivosas o que criaria uma forma encaixada na região de inundação. O mapa de perigo, ou seja, o produto final, foi obtido com os mapas de inundação e com o auxílio da ferramenta Mapper FLO2-D. Com a sua metodologia, Monteiro e Kobiyama (2013) definiram o mapa de perigo conforme o critério apresentado no Quadro 13, sendo apresentado na Figura 11.

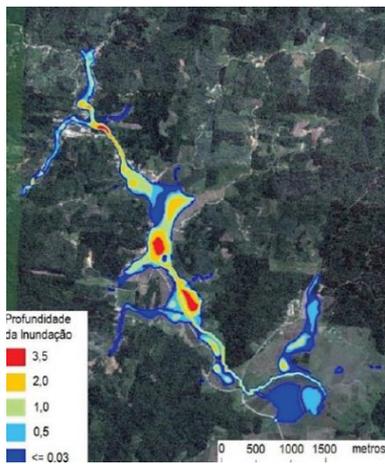


Figura 8. Mapa de inundação para Tr = 5 anos.

Fonte: Monteiro e Kobiyama (2013).

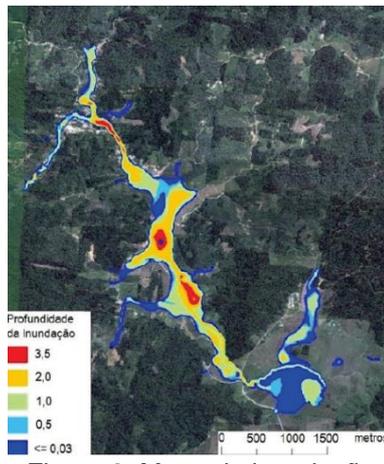


Figura 9. Mapa de inundação para Tr = 20 anos.

Fonte: Monteiro e Kobiyama (2013).

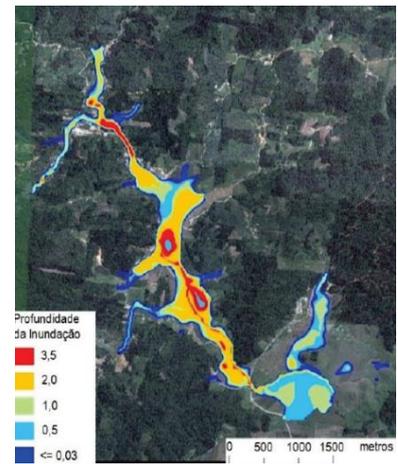


Figura 10. Mapa de inundação para Tr = 100 anos.

Fonte: Monteiro e Kobiyama (2013).

Quadro 13. Níveis de perigo de inundação.

Nível do Perigo	Cor do Mapa	Descrição
Alto (3)	Vermelho	As pessoas estão em perigo, tanto dentro quanto fora de suas casas. As construções estão em alta possibilidade de serem destruídas.
Médio (2)	Laranja	As pessoas correm possibilidade de fatalidades fora de suas casas. Construções talvez sofram danos e podem ser destruídas.
Baixo (1)	Amarelo	A possibilidade de fatalidades é baixa ou inexistente. Construções podem sofrer danos.
Inexistente (0)	Sem cor	Perigo inexistente.

Fonte: PREVENE (2001) *apud* Monteiro e Kobiyama (2013).

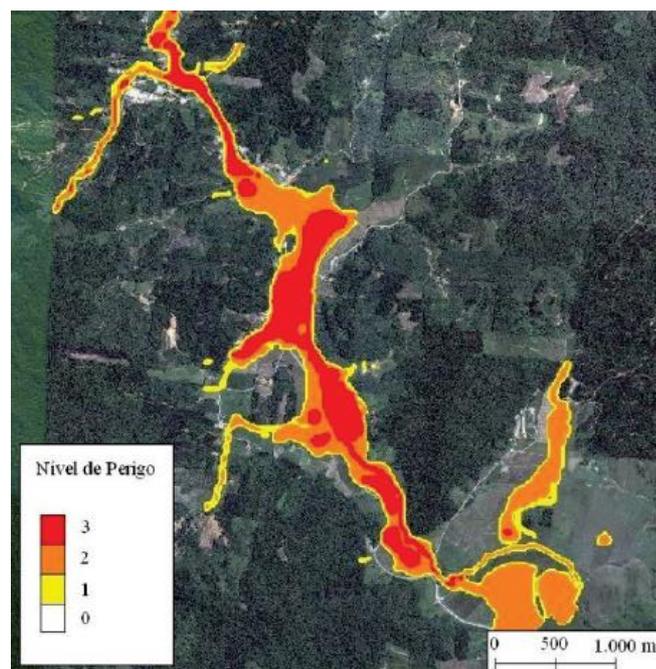
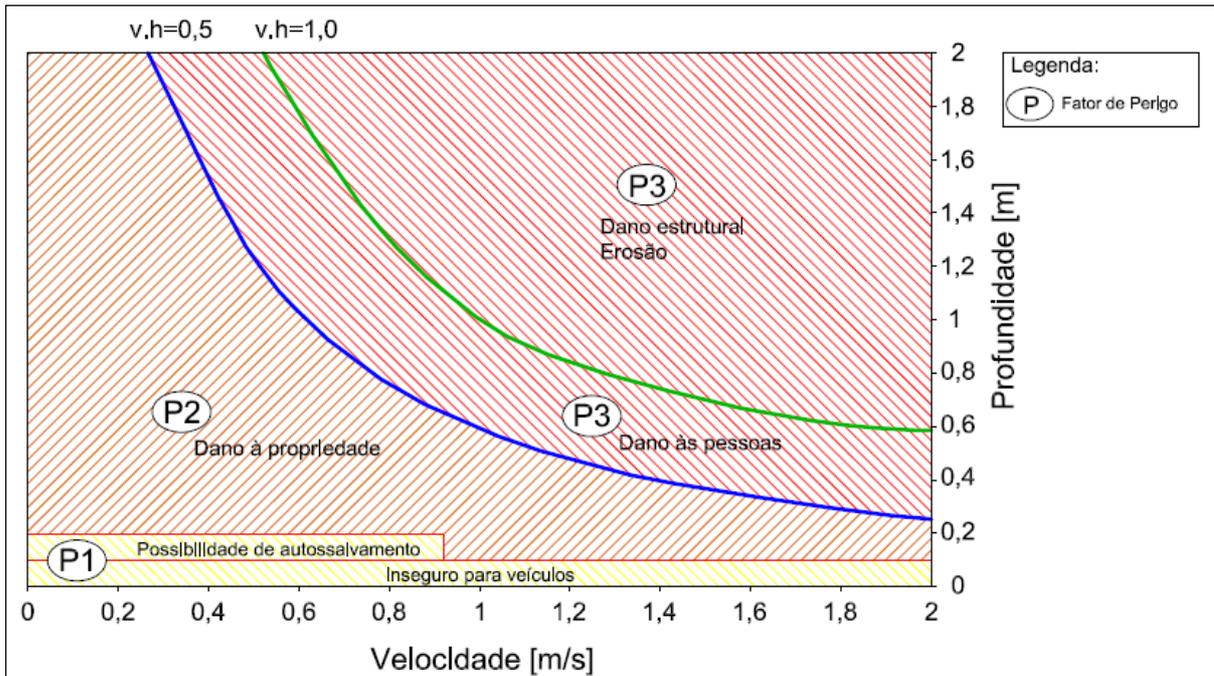


Figura 11. Mapa de perigo de inundação.

Fonte: Monteiro e Kobiyama (2013).

Ao analisar a ocupação ao longo do rio Vaal a montante da Vaal Barrage, primeira fonte de água para Johannesburgo, na África do Sul, Stephenson (2002) propôs um diagrama de perigo (Figura 12) cujo resultado é o produto da profundidade da inundação, medida em metros, e da velocidade do escoamento, em metros por segundo. Stephenson (2002) informa que o fator P1 implica perigo baixo, P2 perigo médio e P3 perigo alto.



Fonte: Traduzido e adaptado de Stephenson (2002).

Outro exemplo de categorização por grupos foi proposto por Kubal *et al.* (2009) em que uma análise multicritério é realizada em Leipzig na Alemanha preocupada com áreas urbanas que podem sofrer com inundações. Como a cidade pressupõe aspectos econômicos, sociais, e ecológicos, os autores apresentam sua análise multicritério sobre eles. Kubal *et al.* (2009) evidenciaram que um melhor conhecimento da distribuição espacial dos riscos sociais, econômicos e ecológicos pode ser obtido desenvolvendo grupos de critérios, entretanto deixam claro que vulnerabilidades individuais (base educacional, acesso a informação, limitações financeiras, entre outras), em um contexto social, ainda necessitam ser investigadas.

3.8. Mapeamento de Cheia Provocada por Ruptura de Barragem

Viseu e Almeida (2011) enfatizam que a análise do risco no vale a jusante de barragens pode ser completamente independente da análise do risco associado à barragem. Esta análise do risco visa a determinação das consequências da ruptura de uma barragem. De acordo com a experiência de Viseu e Almeida (2011), uma análise de risco no vale a jusante de barragens consiste na avaliação das consequências da sua ruptura sendo que para isto seria essencial a simulação da cheia induzida, a definição do zoneamento do risco e a caracterização da vulnerabilidade das áreas do vale que sofreriam os impactos desta cheia induzida.

O mapeamento de cheia induzida provocada por uma ruptura da barragem é documentação mínima exigida no Plano de Segurança da Barragem que, por sua vez, é um instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei Federal 12.334 de 20 de setembro de 2010. É a Resolução nº 236 de 30 de janeiro de 2017 da Agência Nacional de Águas que estabelece, entre outras coisas, esta condição mínima para todas as barragens classificadas como de dano potencial alto e para as barragens classificadas como de dano potencial médio e de categoria de risco alto (ANA, 2017).

3.8.1. Base Altimétrica Adequada a Escala de Trabalho

Ao analisar os estudos referentes ao mapeamento de cheias provocadas pelo rompimento real ou hipotético de barragens, diversas são as nomenclaturas utilizadas pelos autores para titular seus trabalhos. Alguns denominam rompimento hipotético e delimitação da área de inundação, outros chamam análise do rompimento hipotético da barragem, outros titulam mapeamento das zonas de inundação ocasionada pela ruptura de barragem e, até mesmo, mapeamento de áreas suscetíveis a inundação por rompimento de barragem.

Independentemente da denominação utilizada pelos modeladores, estes estudos estão sempre sobrepostos a uma base topográfica que, por óbvio, situa-se ao longo do canal ou do rio em análise, bem como das suas respectivas margens.

Diversas são as bases topográficas que podem ser utilizadas como, por

exemplo, o produto altimétrico das cartas do Exército, levantamentos topográficos de campo tradicional, perfilamento a laser com LiDAR (*Light Detecting and Ranging*) e até mesmo modelos digitais de elevação (MDEs) provenientes de satélite orbitais. O que se deve ter em consideração é que diferentes bases possuem diferentes níveis de precisão.

Em 2003, Pereira *et al.*, para realizar um estudo de modelagem da propagação de cheias ocasionadas por rompimento de barragens na cadeia de geração do rio Paranapanema que compreende a parte sudoeste do Estado de São Paulo e norte do Estado do Paraná, utilizaram 43 cartas do Exército para estabelecer a base cartográfica para a sua região de estudo, sendo 42 na escala 1:50.000 e uma na escala 1:100.000. Além disso, eles realizaram levantamentos de campo, contemplando a coleta de dados batimétricos para a obtenção das características geométricas das seções transversais do escoamento e o cadastramento das pontes ao longo do rio Paranapanema.

Em sua dissertação Souza (2016), durante a análise probabilística para a determinação do risco de inundação gerado em caso da ruptura de uma barragem de terra de 11 metros de altura localizada no sudeste do Estado do Pará, utilizou o MDE da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) para traçar seções transversais do rio por um trecho de 70 km no vale a jusante da barragem de terra.

Ao buscar fornecer subsídios para a elaboração de um plano de ação emergencial para uma barragem da Serra Gaúcha, Pereira (2016) realizou modelagem hidrodinâmica do vale a jusante em regime permanente e em regime não permanente sob a qual utilizou uma base topográfica proveniente de perfilamento a laser, o LiDAR, que foi realizado na área urbana do município de Caxias do Sul em 2013, com uma densidade de pontos equidistantes de 2 pontos/m².

ANA (2016b) sugere que, não havendo outra topografia disponível, a informação sobre altimetria pode ser obtida do modelo digital de elevação obtido a partir da SRTM que atualmente disponibiliza imagens de elevação com resolução espacial de 30 metros.

Cabe observar o estudo desenvolvido por Belladonna *et al.* (2017) que realizaram uma validação dos dados altimétricos do SRTM focado para modelagens hidráulico-hidrológicas para grandes áreas, que é o caso dos vales a jusante de barragens. Os autores compararam a altimetria do SRTM às informações de perfilamento a laser, o LiDAR, associadas à seis classes distintas de declividade do terreno. Belladonna *et al.*

(2017) alertam que perícia e precaução devem ser tomados na utilização do MDE obtido através do SRTM, em especial para projetos e obras que estão relacionados à gestão de recursos hídricos, pois evidenciaram que o erro médio quadrático nas regiões de topografia plana, suave ondulada ou ondulada é menor que nas áreas onde a geomorfologia implica em terrenos mais acidentados. Os autores não recomendam a utilização do SRTM em avaliações voltadas à recursos hídricos para regiões com declividades acima de 20%.

3.8.2. Mapas de Cheia de Ruptura

A proposta metodológica de zoneamento para as áreas localizadas no vale a jusante de barragens necessita estar em consonância com os diversos zoneamentos existente ou aplicáveis ao local. A compatibilização com o zoneamento ambiental, com o zoneamento agroecológico, com o zoneamento agrícola, com o zoneamento industrial, com os Planos Diretores Urbanos das cidades situadas nas regiões de interesse e até mesmo com o etnozoneamento é parte integrante da gestão dos recursos hídricos.

Os mapas de cheia de ruptura hipotética de barragens devem ser gerados em escala que permita que áreas que apresentam risco não sejam ocupadas e, ao mesmo tempo, que não comprometam áreas que não seriam afetadas inserindo-as em nível de restrição. Neste sentido, a compatibilidade de escala deve buscar atender a condição que permita definir a ocupação do solo, distinguir edificações que sofreriam a ação da cheia induzida e a infraestrutura envolvida. Viseu e Almeida (2011) expõem que a escala de referência usualmente utilizada é a de 1:25.000. Entretanto, dadas as condições atuais de acesso fácil às imagens de satélite e das bases altimétricas em alta resolução espacial, recomenda-se evitar escalas inferiores a 1:20.000.

Como exemplo de escala utilizada, tomamos o caso de Pereira *et al.* (2003) que, apesar de ter sido realizado em 2003 com as condições cartográficas disponíveis, pode ser de importante referência para a composição do que está sendo proposto nesta dissertação. Eles realizaram seu estudo sobre uma base altimétrica das cartas do Exército, datadas da década de 1960, com 42 na escala 1:50.000 e uma na escala 1:100.000 quase que mosaicada linearmente, o que nos permite visualizar a grande extensão da análise atingindo aproximadamente 450 km. A Figura 13 apresenta o

resultado de um trecho da extensão utilizada por Pereira *et al.* (2003), sendo que a imagem base apresentada é proveniente do Landsat 7 (*Land Remote Sensing Satellite*) e a altimetria das cartas do Exército. Os autores não deixam claro o que seria a área inundada inicial ou qual a procedência da análise, porém chamam a atenção do resultado gráfico da modelagem e entendem que é possível sua aplicação em quaisquer cenários que envolvam a propagação de ondas de cheia tanto naturais quanto daquelas provocadas por acidentes que venham a causar ruptura de barragens.

O Landsat 7 (*Land Remote Sensing Satellite*) foi lançado em abril de 1999 e encerrou em 2003. O instrumento no Landsat 7, o Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) possuía 8 bandas, sendo 6 com resolução espacial de 30 metros, 1 com resolução espacial de 60 metros no infravermelho (IR) além de inserir a banda pancromática que permitia a geração de composições coloridas com 15 metros de resolução (NASA, 2018).

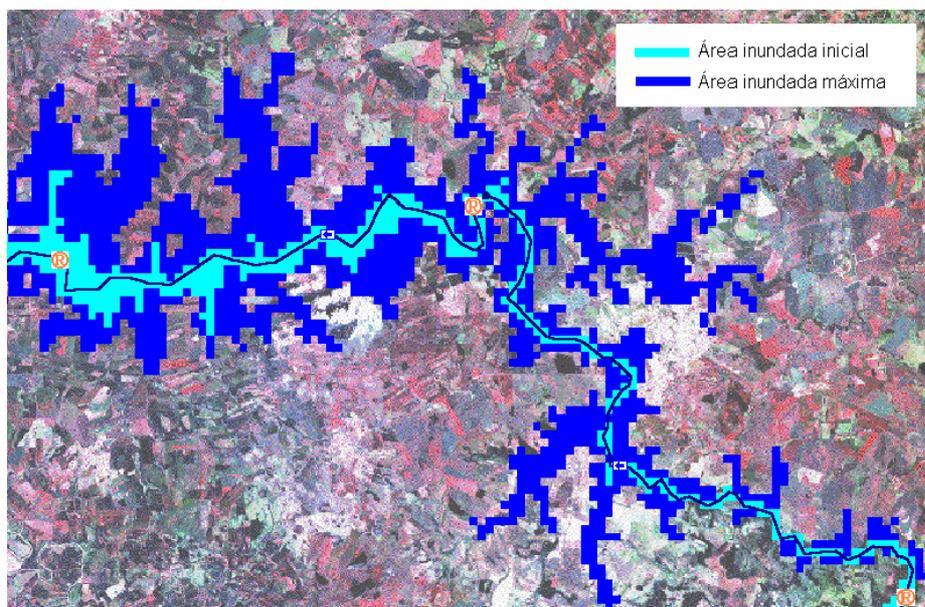


Figura 13. Composição do cenário de inundação resultante da simula o realizada por Pereira *et al.* (2003).

Fonte: Pereira *et al.* (2003).

Para o mapeamento do uso do solo na área localizada no vale a jusante da barragem, para fins de zoneamento, a escala utilizada por Pereira *et al.* (2003) não   adequada, o que refuta a conclusão da época, já que não   qualquer cenário em que a metodologia se aplica. Nesta aplica o não   possível distinguir edifica es.

Outro exemplo que pode ser mencionado   o estudo realizado por Mota (2017), quatorze anos depois. Em sua disserta o, Mota (2017) simulou o rompimento hipotético da barragem Salto Moraes no Rio Tijuco, afluente do Rio Paranaíba,

localizado no município de Ituiutaba no Estado de Minas Gerais e através de resultados gráficos, como o mapa de inundação sobre a base altimétrica do SRTM, analisou o impacto causado nas imediações do canal à jusante da barragem junto à sede daquele município. O resultado gráfico do trabalho de Mota (2017) foi apresentado em escala 1:7.800, que permite a visualização em detalhe da ocupação do solo. As Figura 14, 15 e 16 apresentam a área inundada pelo rompimento da barragem Salto Moraes, o que atingiria os arredores da cidade de Ituiutaba-MG, um edifício com área de lazer, estruturas de entretenimento e uma estação de tratamento de esgoto.



Figura 14. Identificação do espelho d'água da mancha de inundação próxima a estação de tratamento de esgoto da cidade de Ituiutaba.



Figura 15. Inundação junto a aproximação nordeste do rio Tijuco.



Figura 16. Inundação sobre um clube próximo a saída nordeste da cidade.

Fonte: Mota (2017). Observação: A imagens acima estão sem escala, porém Mota (2017) as apresentou em escala 1:7.800.

Em uma análise puramente visual das imagens das Figuras 14, 15 e 16 percebe-se que a escala 1:7.800 permite a elaboração de uma setorização do uso do solo sob a faixa de inundação. A setorização que se poderia sugerir seria: áreas de campo, áreas de uso comum como, ruas e estradas, áreas edificadas e áreas agricultadas.

Ao realizar uma retroanálise da ruptura da barragem de rejeitos São Francisco em Miraí no Estado de Minas Gerais, Rocha (2015) propôs delimitar a envoltória da inundação observada com a sua ruptura.

Rocha (2015) reporta que a barragem São Francisco sofreu um incidente em 2006 quando liberou um volume de 135.000 m³ de água e lama durante 2 dias, fato que ocasionou a destruição do ecossistema ribeirinho, inundação de áreas com agricultura e pastagem, além de prejudicar a dessedentação animal. Porém, foi em 10 de janeiro de 2007, após algumas horas de forte chuva, que a barragem rompeu, provocando o vazamento de lama no rio Fubá. Não foram registradas perdas de vida humana, contudo a vazão proveniente do evento avançou sobre plantações e edificações no

município de Mirai, entre diversos outros problemas ambientais, chegando a turbidez até o Estado do Rio de Janeiro. A Figura 17 apresenta fotografias registradas após o evento.



Figura 17. Fotografias registradas após o rompimento da barragem São Francisco em Mirai, MG. Fonte: Sawaya (2007) e Ávila (2007) *apud* Rocha (2015) p. 55.

Ao observar a brecha de ruptura no maciço da barragem São Francisco, Rocha (2015) utilizou modelos hidrodinâmicos sobre três modelos digitais de elevação diferentes como o SRTM, o Topodata e um MDE restituído a partir de carta topográfica, para obter uma mancha de inundação ao longo do rio Fubá. O produto obtido, por se tratar de uma retroanálise, foi comparado com a mancha observada. Ao final de sua análise, o autor percebeu que a topografia pode ser o principal fator de influência na previsão da mancha de inundação evidenciando que a utilização do MDE proveniente de carta topográfica superestimou em 106% a área da inundação, enquanto que o MDE do SRTM apresentou o melhor resultado subestimando em somente 10% a área.

A Figura 18 apresenta um trecho da extensão modelada por Rocha (2015) onde é possível verificar uma porção urbana de Mirai. A faixa compreendida entre as linhas de coloração alaranjada representa a inundação observada naquele evento, a faixa azulada representa a modelagem base, enquanto que a faixa entre as linhas lilás corresponde ao cenário modelado com calibração de rugosidade.

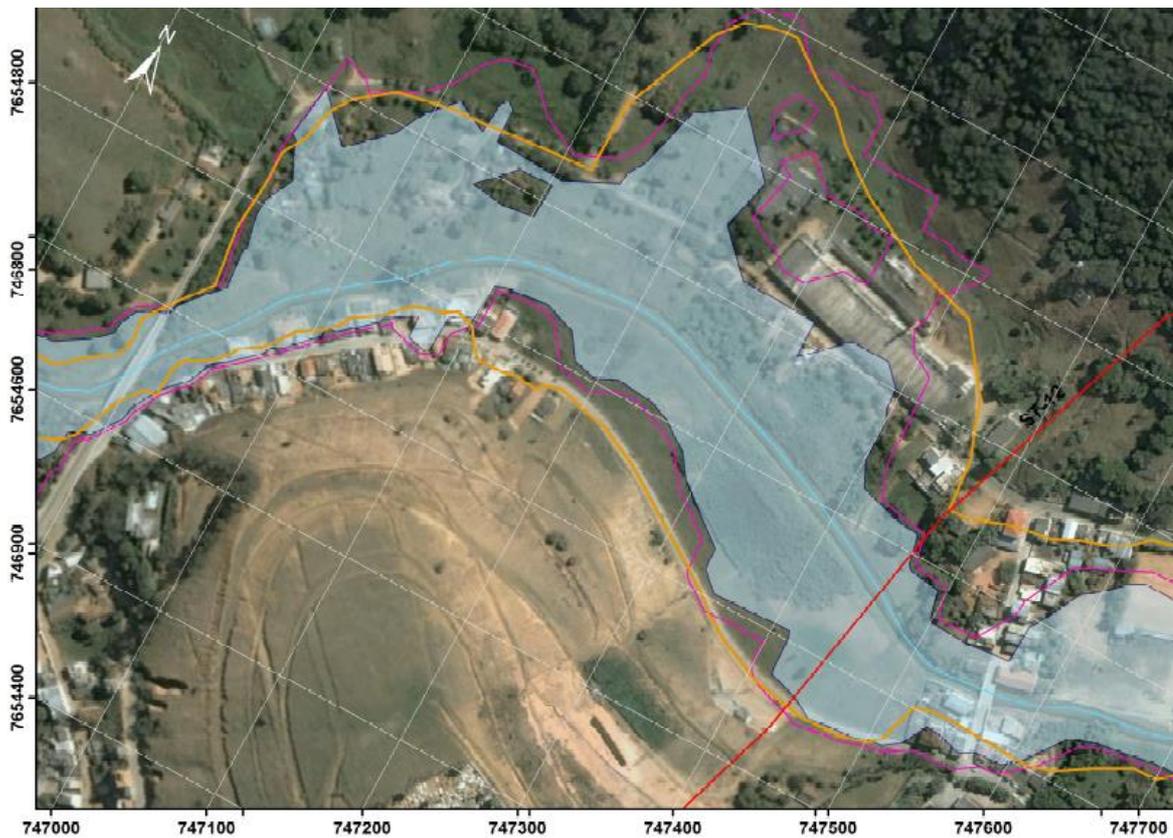


Figura 18. Restituição da envoltória de inundação do rompimento da barragem São Francisco.

Fonte: Rocha (2015) p 197, Folha 4/7.

3.9. Mapeamento de Risco do Ministério das Cidades

Na sua publicação, *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios, Brasil* (2007) dedica um capítulo a apresentar um roteiro metodológico para realizar a análise de risco e o mapeamento de áreas de risco em regiões de encosta e de baixada, focando o deslizamento de solo.

Sem deter-se nos procedimentos desta metodologia, foca-se aqui nos oito passos usados por Brasil (2007) para mapear os riscos em encostas:

- O primeiro passo é a obtenção de dados gerais sobre a moradia ou grupo de moradias como, por exemplo, a localização (endereço), identificação dos moradores (nomes), as condições de acesso (rua pavimentada, via de terra, escadaria) tipo de construção (madeira ou alvenaria);
- O segundo passo refere-se à caracterização do local onde a moradia ou grupo de moradia está. Nesta etapa exige uma observação mais abrangente do entorno, pois algumas descrições técnicas deverão ser

realizadas: deverá ser descrito o tipo de talude (natural ou corte), o tipo de material (solo, aterro, rocha), a existência de diferentes materiais (blocos de rocha, matacões, lixo, entulho), a inclinação da encosta ou do talude, a distância da moradia ao topo ou base da encosta ou taludes. Algumas destas análises demandam o conhecimento técnico e equipamentos específicos que não são encontrados no mercado comum;

- O terceiro passo deve ser focado na água porque a água é considerada a principal deflagradora de deslizamentos. Sua presença pode ser oriunda da chuva, de possíveis vazamentos nas tubulações de água e dos esgotos. Neste momento, uma verificação das condições da drenagem superficial deve ser realizada, bem como de possíveis ocorrências de surgências (nascentes) nos taludes;
- O quarto passo busca observar a vegetação nos taludes ou nas proximidades, já que nem toda vegetação traz acréscimo de estabilidade para as encostas. Neste passo, Brasil (2007) recomenda que seja também descrito se a área foi desmatada, se ocorre a presença de vegetação rasteira e se ocorre o plantio de algum cultivo;
- O quinto passo trata do parâmetro mais importante para a determinação de maior risco, são os sinais de movimentação ou feições de instabilidade. As principais feições se referem às juntas de alívio, fendas de tração, fraturas de alívio, trincas e os degraus de abatimento. Outra feição importante é a inclinação de estruturas rígidas como árvores, postes, muros e paredes. Por sua própria descrição, este passo também vai exigir conhecimento técnico em mecânica do solo e das rochas e, em alguns casos, conhecimento em patologia de fundações e estruturas;
- O sexto passo consiste em verificar os tipos de processos de instabilização esperados ou já ocorridos no local objeto de estudo. Esta fase exige que, com os resultados obtidos nos quatro passos anteriores, o usuário responsável pelo cadastro tenha condições de reconhecer o tipo de processo que pode vir a ocorrer. Nos casos em que o processo já tenha ocorrido, isso se torna mais simples. Treinamento e conhecimento técnico prévio são necessários para este passo, o que não

impede a consulta com especialistas da área de engenharia geotécnica;

- O sétimo passo é considerado o mais importante do roteiro metodológico, neste momento ocorre a determinação do grau de risco. Para a tomada de decisão em termos dos parâmetros analisados nos passos do roteiro, Brasil (2007) considera:
 1. Padrão construtivo (madeira ou alvenaria): para uma mesma situação a construção em alvenaria deve suportar maiores solicitações e, portanto, deve ser colocada em classe de risco inferior à moradia de madeira;
 2. Tipos de taludes: taludes naturais estão, normalmente, em equilíbrio. Taludes de corte e de aterro são mais propensos a instabilizações;
 3. Distância da moradia ao topo ou à base dos taludes: deve ser adotada como referência uma distância mínima com relação à altura do talude que pode sofrer a movimentação (para a Serra do Mar e outras áreas em São Paulo, adota-se a relação 1:1);
 4. Inclinação dos taludes: os deslizamentos ocorrem a partir de determinadas inclinações. Por exemplo, na região da Serra do Mar, em São Paulo, ocorrem a partir de 17° (poucos) e 25/30° (a maioria). Pode-se estabelecer que taludes acima de 17° são passíveis de movimentações. Estruturas geológicas podem condicionar a existência de taludes muito inclinados e mesmo assim estáveis;
 5. A presença de água deve ser criteriosamente observada. A existência de surgências nos taludes e a infiltração de água sobre aterros devem ser tomadas como sinais de maior possibilidade de movimentações;
 6. A chave para a classificação é a presença de sinais de movimentação/feições de instabilidade. Essa presença pode ser expressiva e em grande número.
- O oitavo (último) passo refere-se à necessidade de remoção de moradias

que estejam em área enquadradas em risco muito alto. Esta informação deverá balizar a Defesa Civil para que seja providenciada a remoção e já deverá conter o número de moradias e uma previsão de quantas pessoas terão que ser removidas.

Baseado no sétimo passo, o mais importante do roteiro metodológico, Brasil (2007) explicita os critérios para a determinação dos graus de risco estando eles apresentados no Quadro 14.

Quadro 14. Critérios para a determinação dos graus de risco.

Grau de Probabilidade	Descrição
<p style="text-align: center;">R1 Baixo ou Sem Risco</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. • Não se observa(m) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. • Mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
<p style="text-align: center;">R2 Médio</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. • Observa-se a presença de algum(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento. • Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.

Quadro 14. Critérios para a determinação dos graus de risco (continuação).

Grau de Probabilidade	Descrição
R3 Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. • Observa-se a presença de significativo(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo. • Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.
R4 Muito Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. • Os sinais/feições/evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de deslizamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação à margem de córregos, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. É a condição mais crítica, sendo impossível monitorar a evolução do processo, dado seu elevado estágio de desenvolvimento. • Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.

Fonte: Brasil (2007).

4. METODOLOGIA

A estratégia para estabelecer uma metodologia para reger o uso e ocupação do solo em áreas localizadas no vale a jusante de barragens foi organizada em quatro etapas. Cada etapa estabelece uma metodologia focada em atender a um dos objetivos específicos e, por consequência, o objetivo geral deste estudo.

A **primeira etapa** busca, para a composição do Grau de Perigo, verificar a aplicabilidade do Fator de Perigo, que é o produto da velocidade do escoamento pela profundidade que o mesmo atinge ao longo da calha de inundação.

A **segunda etapa** metodológica propõe critérios fundamentais para permitir um enquadramento para a composição da Vulnerabilidade do vale de jusante.

A **terceira etapa** objetiva categorizar o risco junto ao vale de jusante, a partir do Grau de Perigo e da Vulnerabilidade.

Por fim, a **quarta etapa** descreverá os usos, dentre as diversas atividades humanas, que são mais indicados para cada categoria de risco.

O Quadro 15 apresenta um resumo da proposta metodológica deste estudo, evidenciando cada metodologia aplicada para buscar atender aos objetivos específicos e, assim, o objetivo geral.

Quadro 15. Síntese da metodologia aplicada ao estudo.

Objetivo Geral	Objetivos Específicos	Metodologia
Gerar uma metodologia para reger o uso e a ocupação do solo em áreas localizadas no vale a jusante de barragens.	Analisar a aplicabilidade do Fator de Perigo para a composição do Grau de Perigo.	A partir de diagramas que compõem o perigo que inundações extremas impõem às pessoas e às estruturas, os parâmetros de velocidade e profundidade serão utilizados para a composição do Grau de Perigo.
	Propor critérios de enquadramento para a composição da Vulnerabilidade.	Utilizar diferentes enquadramentos de vulnerabilidade disponíveis na bibliografia.
	Categorizar o risco junto ao vale de jusante a partir de hidrograma de ruptura de barragem.	A partir do produto do Grau de Perigo e da Vulnerabilidade, o risco será categorizado em diferentes Graus de Risco.
	Sugerir usos que associem menores prejuízos às áreas de maiores riscos.	A partir das categorias de risco, serão apontados usos de atividade humana mais indicados à cada categoria.

Em síntese, este estudo propõe uma maneira de organizar a ocupação territorial no vale a jusante de barragens de forma que seja evitada a potencialização dos riscos como, por exemplo, os incentivos à aglomerados urbanos, avanço de atividades econômicas de elevados investimentos em regiões com maior risco. A Figura 19 apresenta uma síntese deste estudo.

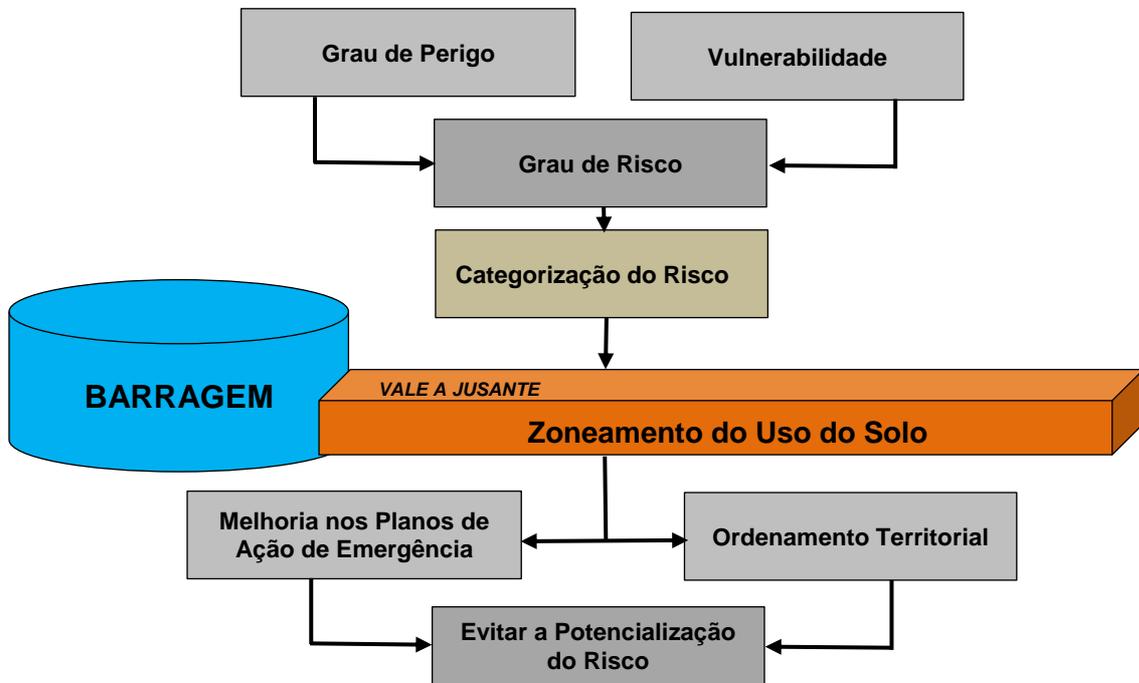


Figura 19. Síntese esquemática do presente estudo.

4.1. Categorização do Risco em Áreas de Inundação

O Capítulo 3.7 apresentou algumas metodologias utilizadas por alguns autores para estabelecer diferentes setores em uma região ou cidade que apresentam maior ou menor risco à população, ambiente, economia, cultura e/ou sociedade com relação às inundações. A metodologia proposta neste estudo permite que níveis de detalhamento, como o sugerido por Kubal *et al.* (2009), possam ser adaptados e inseridos, contudo, neste momento, uma abordagem mais simplificada será dada.

A metodologia proposta por Brasil (2007) indica quatro níveis distintos de risco à inundação denominados R1, R2, R3 e R4, cada um com sua devida definição. Junges Menezes (2014) também classificou o risco em sua dissertação em quatro grupos e também os denominou R1, R2, R3 e R4, entretanto com uma análise de classificação distinta. Por outro lado, ao não avaliar vulnerabilidade, perigo ou risco, Fadel (2015) buscou combinações entre medidas estruturais e não estruturais para investigar a

redução dos prejuízos econômicos causados por inundação.

A forma metodológica que Fadel (2015) abordou para a obtenção gráfica da inundação, em especial pela análise hidrológica e hidrodinâmica, pode ser aplicada para a composição da metodologia proposta neste estudo. Muito embora a verificação simplesmente econômica não é aqui considerada.

A proposição metodológica de Monteiro e Kobiyama (2013) pode ser utilizada para estabelecer o zoneamento em áreas a jusante de barragens, mesmo que o estudo tenha como foco o perigo à inundação e não o risco propriamente dito. Como os autores indicaram quatro níveis de perigo nomeados de 0, 1, 2 e 3 (sendo o nível 0 aquele com menor perigo) e que têm origem da precipitação de projeto, ou seja, do período de retorno considerado, não avaliam as condições estruturais ou o padrão construtivo das edificações, tampouco analisam as condições das vias de acesso, essencialmente a vulnerabilidade não é considerada. Este fato é esperado, pois o estudo busca mapear exatamente o perigo. Assim, em regiões ao longo do vale a jusante de uma barragem onde a ocupação humana é inexistente, porém inevitável no futuro, os níveis de perigo propostos por Monteiro e Kobiyama (2013) podem ser aqui aplicados.

Cabe lembrar que a metodologia proposta nesta dissertação não sugere ou avalia qual o período de retorno que deve ser utilizado, cabendo esta definição ao estudo de inundação. Entretanto, qualquer que seja o período de retorno utilizado, este deverá ser integrado à categorização de risco aqui introduzida.

Diversos são os trabalhos científicos, ou técnicos ou ambos que categorizam os riscos de uma inundação originada de uma dada precipitação de projeto. Neste momento serão consideradas as metodologias dos autores já apresentados para propor um enquadramento quanto ao risco a inundação. A nomenclatura sugerida por Brasil (2007) será utilizada para compor a setorização do risco.

Para a composição do risco, além da definição do índice de perigo, faz-se necessária a definição da classe de vulnerabilidade em que as edificações e/ou infraestruturas se encontram. Esta metodologia propõe a classificação sugerida por Brasil (2007), com apenas duas classes, e propõe alguma alteração na definição de cada classe, conforme apresentado no Quadro 16.

Quadro 16. Vulnerabilidade da ocupação urbana e infraestrutura.

Vulnerabilidade	Critério de Enquadramento
V1 – Baixa	<ul style="list-style-type: none"> • Médio a bom padrão construtivo onde predominam moradias construídas em alvenaria com boa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos. • Ruas pavimentadas com fácil acesso a veículos médios e pesados.
V2 – Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo padrão construtivo onde predominam moradias construídas com madeira e restos de material com baixa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos. • Ruas e vias sem pavimentação e pouca capacidade de intervenção ou resposta às inundações.

Fonte: Autor, adaptado de Brasil (2007) e de Junges Menezes (2014).

O enquadramento final para o risco de inundação é o produto do perigo de inundação pela vulnerabilidade das edificações, estruturas e da infraestrutura que estão dentro da área suscetível ao avanço da água. O Quadro 17 apresenta os graus de risco que o local estará enquadrado, bem como a descrição para chegar a tal enquadramento. O enquadramento ao grau de risco pode ser adequado a cada situação e/ou a cada técnico, que na sua análise, entenda que outras condicionantes devem ser verificadas tanto na categorização do perigo quanto da vulnerabilidade.

Quadro 17. Descrição para o enquadramento do risco de inundação.

Grau de Risco	Descrição para Enquadramento
R1 – Baixo	P1 x V1
R2 – Médio	P1 x V2 P2 x V1
R3 – Alto	P2 x V2 P3 x V1
R4 – Muito Alto	P3 x V2

Fonte: Autor.

4.2. Categorização do Risco a partir do Hidrograma de Ruptura da Barragem

ICOLD (1998) indica uma metodologia para análise de ruptura de barragens em quatro fases distintas:

1. Definição e simulação do evento de ruptura da barragem, elaborando o hidrograma de ruptura;

2. Propagação da onda de ruptura no vale a jusante da barragem por meio de modelos físicos e matemáticos;
3. Elaboração de mapas das áreas potencialmente inundáveis; e
4. Análise de risco e elaboração dos planos de emergência.

O Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE, elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2016b), apresenta em seu Capítulo 5 uma síntese do estudo de inundação para avaliar os danos no vale a jusante da barragem. Trata-se de um estudo que se baseia, essencialmente, na simulação do processo de formação de brechas, por modelos paramétricos, e da cheia induzida, momento em que deve ser identificada a metodologia de modelagem utilizada e as razões do seu uso. A identificação do software utilizado para a modelagem hidrodinâmica deve também ser apresentada.

Conforme as orientações de ICOLD (1998) e ANA (2016b) é possível inferir que os resultados das simulações hidráulicas de uma ruptura hipotética, que causará um hidrograma induzido, e a conformação da brecha são dependentes das variáveis de entrada que o engenheiro modelador utilizará.

Independentemente da habilidade do engenheiro modelador, dos parâmetros utilizados para a formação da brecha e do modelo hidrodinâmico utilizado, a metodologia aqui apresentada tem seu foco no perigo causado pela onda hipotética oriunda da modelagem realizada. O refino da modelagem e o cuidado com a inserção dos dados de entrada condicionarão a uma análise de risco, possibilitando menores incertezas.

De posse dos resultados da modelagem hidrodinâmica, o diagrama de perigo (Figura 20) proposto na metodologia de Karvonen *et al.* (2000) *apud* Kvočka *et al.* (2016) pode ser utilizado para compor o perigo de um rompimento modelado. Kvočka *et al.* (2016) investigaram métodos de avaliação de perigo de inundação extrema às pessoas. Karvonen *et al.* (2000) testaram o limite de segurança de pessoal às inundações provenientes de rompimento de barragem, combinando os parâmetros de profundidade e velocidade de escoamento através do seu produto.

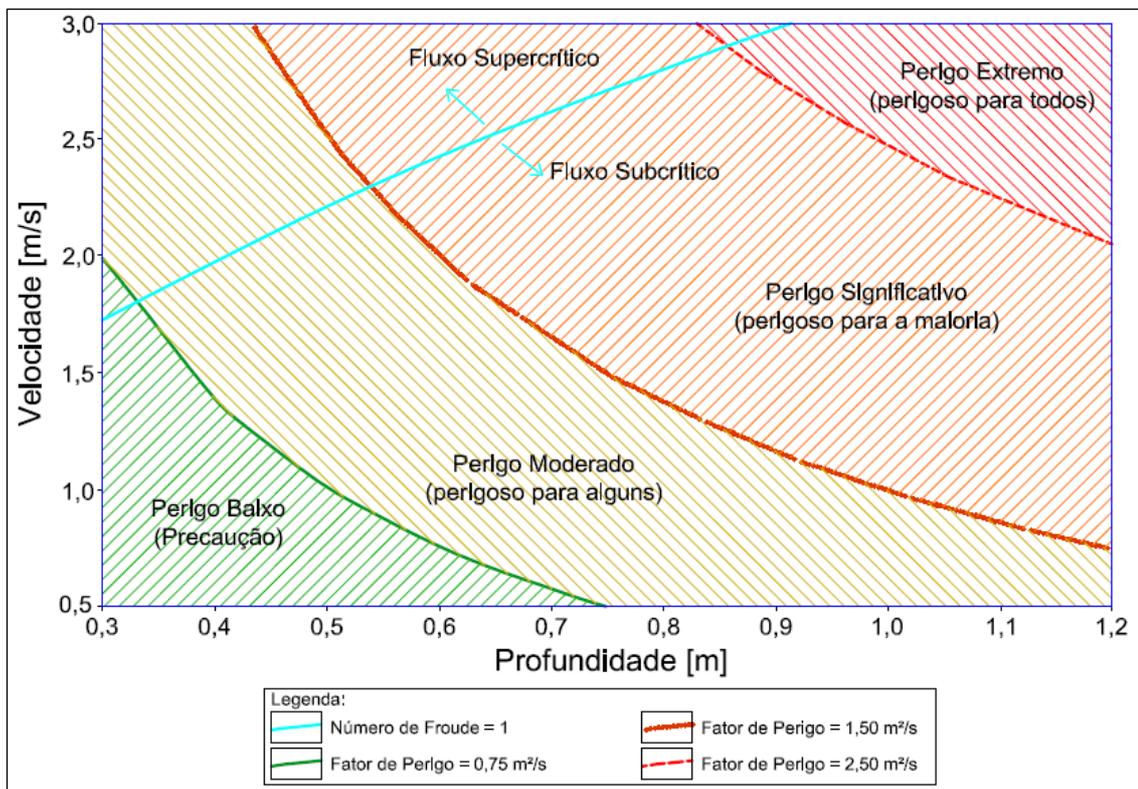


Figura 20. Diagrama de perigo de inundação extrema.

Fonte: Traduzido e adaptado de Karvonen *et al.* (2000) *apud* Kvočka *et al.* (2016).

Como a análise parte da relação com que a altura da onda de cheia atinge diferentes cotas do terreno com a velocidade em que a onda avança sobre a calha de escoamento, o resultado de perigo pode ser obtido após uma modelagem hidrodinâmica. Conforme o diagrama de perigo proposto por Karvonen *et al.* (2000) *apud* Kvočka *et al.* (2016), a classificação do grau de perigo é apresentada no Quadro 18.

Quadro 18. Enquadramento do perigo em função do hidrograma de ruptura.

Grau de Perigo	Descrição para Enquadramento
P1 – Baixo	Nível de precaução *FP ≤ 0,75
P2 – Moderado	Perigo para alguns (e.g. crianças) *FP > 0,75 ≤ 1,50
P3 – Significativo	Perigo para muitos *FP > 1,50 ≤ 2,50
P4 – Extremo	Perigo para todos *FP > 2,50

Fonte: Adaptado de Karvonen *et al.* (2000) *apud* Kvočka *et al.* (2016). * FP = fator de perigo, ou seja, $FP = v \times h$ (onde v = velocidade do escoamento [m/s] e h = altura da lâmina d'água no escoamento [m]).

Para a composição do risco quanto ao hidrograma de ruptura, a definição das classes de vulnerabilidade é necessária. Propõe-se aqui a utilização da classe de vulnerabilidade conforme uma estrutura básica apresentada no Quadro 19, onde alguma alteração é introduzida ao sugerido por Brasil (2007) para a definição de risco quanto a inundação. Nesta análise, as questões quanto ao Plano de Ação de Emergência da barragem propostas por Viseu e Almeida (2011) e ANA (2016b) também foram consideradas.

Quadro 19. Vulnerabilidade da ocupação urbana e infraestrutura.

Vulnerabilidade	Critério de Enquadramento
V1 – Baixa	<ul style="list-style-type: none"> • Área rural; • Baixa concentração populacional; • Médio a bom padrão construtivo onde predominam moradias construídas em alvenaria com boa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos; • Ruas pavimentadas com fácil acesso a veículos médios e pesados; • Pouca infraestrutura relevante (rodovias, ferrovias, instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas, etc.).
V2 – Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Área urbana; • Média e alta concentração populacional; • Baixo padrão construtivo onde predominam moradias construídas com madeira e restos de material com baixa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos; • Ruas e vias sem pavimentação e pouca capacidade de intervenção ou resposta às inundações; • Infraestrutura instalada (rodovias, ferrovias, instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas, etc.).

Fonte: Autor, adaptado de Brasil (2007), de Viseu e Almeida (2011) e de ANA (2016b).

O enquadramento final para o risco em função do hidrograma de ruptura da barragem também é o produto do perigo pela vulnerabilidade. O grau de perigo, dado em função do fator de perigo (FP), é multiplicado pela vulnerabilidade conforme sugerido no Quadro 19. O Quadro 20 apresenta os graus de risco que o local estará enquadrado, bem como a descrição para chegar a tal enquadramento.

Quadro 20. Enquadramento do risco em função do hidrograma de ruptura.

Grau de Risco	Descrição para Enquadramento
R1 – Baixo	P1 x V1 P1 x V2 P2 x V1
R2 – Médio	P2 x V2 P3 x V1
R3 – Alto	P3 x V2
R4 – Muito Alto	P4 x V1 P4 x V2

Fonte: Autor.

Considerando que as metodologias para o mapeamento do risco à inundação e para o mapeamento do risco ao hidrograma proveniente da ruptura de barragem são aplicadas sobre a mesma linha d'água (córrego, riacho ou rio), recomenda-se a utilização de qualquer uma delas. Como o perigo está relacionado à inércia (velocidade) do escoamento e a massa de água (altura do escoamento) o enquadramento será dado em função do estudo da onda de inundação ocasionada pela brecha hipotética da barragem. Entretanto, estudos de inundação de origem natural também pode compor o perigo através do Fator de Perigo ($FP = v.h$) em especial para as situações onde os dispositivos de segurança hidráulicos da barragem estão operando períodos de retorno maiores como, por exemplo, Tr_{10} , Tr_{20} , Tr_{50} , Tr_{100} e, talvez, Tr_{1000} .

A vulnerabilidade é intrínseca do local, ou seja, ela é independente da condição do escoamento ou da origem do hidrograma. Os critérios de enquadramento de vulnerabilidade podem variar de autor para autor, porém variáveis como o padrão construtivo das edificações, condições dos acessos e existência de estruturas de infraestrutura deverão ser sempre consideradas.

A partir da modelagem hidrodinâmica do rompimento hipotético de barragem, onde são facilmente obtidas as informações de velocidade, o alcance da inundação e as cotas de alagamento, calcula-se o Fator de Perigo e o segrega em quatro graus de perigo (baixo, moderado, significativo e extremo). As informações de vulnerabilidade poderão depender da habilidade do técnico na classificação das condições das edificações, dos acessos e da infraestrutura existente na faixa ao longo do canal suscetível ao alagamento. A fim de evitar um mal enquadramento, esta metodologia

considera duas classes de vulnerabilidade: baixa e alta, conforme indicado no Quadro 21. O que define a classe de vulnerabilidade é a ocorrência de um único critério como, por exemplo, havendo uma única escola, mesmo que em área rural sem um aglomerado populacional significativo, a vulnerabilidade passa a ser alta.

Quadro 21. Vulnerabilidade da ocupação rural, urbana, equipamentos públicos e infraestrutura.

Vulnerabilidade	Critério de Enquadramento Utilizado
V1 – Baixa	<ul style="list-style-type: none"> • Área rural com baixa tecnificação; • Área urbana com baixa concentração populacional; • Médio a bom padrão construtivo, onde predominam moradias construídas em alvenaria com boa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos; • Ruas pavimentadas com fácil acesso a veículos médios e pesados; • Inexistência de equipamentos públicos (escolas, creches, postos de saúde, hospitais, igrejas); • Pouca infraestrutura relevante (rodovias, ferrovias, pontes, viadutos, instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas, etc.).
V2 – Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Área rural com alta tecnificação; • Área urbana com média ou alta concentração populacional; • Baixo padrão construtivo onde predominam moradias construídas com madeira e restos de material com baixa capacidade de resistir ao impacto de processos hidrológicos; • Ruas e vias sem pavimentação que impossibilitem trânsito de veículos médios e pesados e com pouca capacidade de intervenção ou resposta às inundações; • Presença de um equipamento público (escola, creche, posto de saúde, hospital, igreja); • Infraestrutura instalada (rodovias, ferrovias, instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas, etc.).

Fonte: Autor, adaptado de Brasil (2007), de Viseu e Almeida (2011) e de ANA (2016b). Conforme Quadro 19.

A partir da metodologia apresentada neste estudo, sugere-se a utilização de zoneamento no vale a jusante de barragens a partir do risco, conforme apresentado no Quadro 22. Percebe-se que o grau de risco é o que zoneia a área, sendo ele uma composição do grau de perigo e da vulnerabilidade da área que sofrerá com a inundação. O enquadramento R1 representa as áreas com menor risco e o R4 as áreas com maior risco e, por tanto, aquelas com maior restrição quanto ao uso e ocupação do solo.

Quadro 22. Zoneamento do vale de jusante de barragens.

		Grau de Perigo			
		Baixo P1 *FP ≤ 0,75	Moderado P2 *FP > 0,75 ≤ 1,50	Significativo P3 *FP > 1,50 ≤ 2,50	Extremo P4 *FP > 2,50
Vulnerabilidade	Baixa V1	R1	R1	R2	R4
	Alta V2	R1	R2	R3	R4

Fonte: Autor. * FP = fator de perigo, ou seja, $FP = v \times H$ (onde v = velocidade do escoamento [m/s] e H = altura da lâmina d'água no escoamento [m]).

Utilizando a descrição proposta por Brasil (2007) para a setorização de áreas de risco localizada em encostas e em baixadas, é possível descrever as zonas de risco em áreas a jusante de barragens conforme consta no Quadro 23.

Quadro 23. Descrição dos critérios para a determinação dos níveis de risco.

Grau de Risco	Descrição Conforme Brasil (2007)	Descrição para Áreas a Jusante de Barragens
R1 Baixo	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. Mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.	O fator de perigo (FP) é baixo, inferior ou igual a $0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e nenhum condicionante de vulnerabilidade alta é identificado. O fator de perigo (FP) é baixo, inferior ou igual a $0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, mesmo com algum critério de enquadramento de alta vulnerabilidade, o risco é baixo. O fator de perigo (FP) é moderado, superior a $0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e igual ou inferior a $1,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e nenhum condicionante de vulnerabilidade alta é identificado.
R2 Médio	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. Observa-se a presença de algumas evidências de instabilidade, porém incipientes. Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento. Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.	O fator de perigo (FP) é moderado, superior a $0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e igual ou inferior a $1,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e pelo menos um condicionante de vulnerabilidade alta é identificado. O fator de perigo (FP) é significativo, superior a $1,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e igual ou inferior a $2,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e nenhum condicionante de vulnerabilidade alta é identificado.
R3 Alto	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. Observa-se a presença de significativas evidências de instabilidade. Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo. Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.	O fator de perigo (FP) é significativo, superior a $1,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e igual ou inferior a $2,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e pelo menos um condicionante de vulnerabilidade alta é identificado.

Quadro 23. Descrição dos critérios para a determinação dos níveis de risco (continuação).

Grau de Risco	Descrição Conforme Brasil (2007)	Descrição para Áreas a Jusante de Barragens
R4 Muito Alto	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. As evidências de instabilidade são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.	O fator de perigo (FP) é extremo, superior a 2,50 $m^2.s^{-1}$, e qualquer se seja a análise da vulnerabilidade da área em estudo, o risco será considerado muito alto.

Fonte: Autor e Brasil (2007), conforme Quadro 14.

4.3. Indicação do Uso do Solo

A ocupação e o uso do solo no vale localizado a jusante de barragens deve primar pela segurança e deve dar-se de tal maneira a evitar que o risco seja potencializado. A indicação do uso do solo é realizada através de duas componentes: as categorias do zoneamento e as atividades humanas como, por exemplo, moradias, agricultura, comércio e indústria.

Em áreas zoneadas como de categoria de Risco Baixo (R1), praticamente não há restrição quanto a ocupação e ao uso do solo. Entretanto, deve-se evitar a construção e instalação de atividades que envolvam educação e saúde, pois, nestes casos, pressupõe a permanência de uma concentração de pessoas como, é o exemplo, de escolas, casas de repouso, hospitais. Novos centros prisionais devem ser evitados mesmo em áreas de Risco Baixo (R1), uma vez que a edificação não possibilita a dispersão das pessoas que ali estão restritas.

Na ocasião da cheia provocada pela ruptura de barragem, as áreas categorizadas como de Risco Médio (R2) apresentam um grau de restrição de uso que se concentra nas atividades que envolvem aglomerações humanas ou atividades de grande porte e com potencial de dano ambiental muito significativo. Também, todas as restrições de uso e ocupação aplicáveis ao Risco Baixo (R1) se repetem no R2. A urbanização neste nível é permitida desde que apresente um projeto urbanístico em conformidade com as normas e que o arruamento comporte veículos de grande porte como, por exemplo, caminhões. Aglomeração humana temporária também é recomendada como é o caso de estádios de futebol e ginásio de esportes.

Como o Grau de Perigo é alto e o fator de perigo (FP) é significativo, superior a $1,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e igual ou inferior a $2,50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, áreas zoneadas como de categoria de Risco Alto (R3) devem evitar a ocupação humana permanente de qualquer maneira. Novas atividades industriais, comerciais e de serviços com alojamentos devem ser proibidas em áreas categorizadas com R3 e as restrições do uso e da ocupação do solo nas áreas de Risco Médio (R2) também se aplicam àquelas de Risco Alto (R3). As infraestruturas de grande circulação de pessoas não são indicadas aqui, como é o caso dos aeroportos, ferroviárias e rodoviárias. Atividades esportivas que não envolvam a concentração de espectadores podem ser realizadas nestas áreas como, por exemplo, campos de futebol, quadras de esportes, campos de golfe, bem como parques e praças, ou seja, atividades que permitam o autossalvamento. Atividades agrícolas que não necessitem de alojamento também são indicadas para as áreas de Risco Alto (R3).

As restrições quanto ao uso e ocupação do solo para as áreas situadas em Risco Muito Alto (R4) são abrangentes: as restrições do uso e da ocupação do solo nas áreas de Risco Alto (R3) se mantêm neste nível; qualquer atividade que envolva a ocupação de pessoas, mesmo que de forma temporária, não são indicadas para estas zonas; atividades agrícolas de grande tecnificação como, por exemplo, estufas, silos e armazenamento também devem ser evitadas em áreas R4. O Quadro 24 apresenta algumas sugestões para o uso e a ocupação do solo em cada uma destas categorias.

Quadro 24. Indicação dos usos e ocupação do solo para a área do vale a jusante da barragem.

Grau de Risco	Descrição do Grau de Risco	Usos e Ocupação	
		Indicados	Não Indicados
R1 Baixo	O grau de perigo é baixo e nenhum condicionante de vulnerabilidade alta é identificado; O grau de perigo é baixo mesmo com condicionante de vulnerabilidade alta; O grau de perigo é moderado e nenhum condicionante de vulnerabilidade alta é identificado.	Todos do R2; Áreas residenciais com arruamento para, pelo menos, veículos pequenos (automóveis); Atividades industriais, comerciais e de prestação de serviços.	Escolas; Hospitais; Casas de repouso Unidades básica de saúde; Centros prisionais. Atividades industriais que envolvem substancias toxicas ou perigosas (ex: cloro-química, pesticidas, defensivos, nuclear, etc)
R2 Médio	O grau de perigo é moderado e pelo menos um condicionante de vulnerabilidade alta é identificado; O grau de perigo é significativo e nenhum condicionante de vulnerabilidade alta é identificado.	Todos do R3; Áreas residenciais com regramento específico de edificação e arruamento que comporte veículos de médio e grande porte; Atividades agrícolas de todos os tipos; Atividades comerciais e de prestação de serviço; Atividades industriais de quase todo tipo; Atividades esportivas com aglomeração de espectadores.	Todos do R1; Atividades industriais de elevado potencial poluidor e de grande porte (e.g. refinarias de petróleo, siderúrgicas, montadoras de veículos, abatedouros, etc.); Ocupação urbana sem regramento urbanístico; Igrejas.

Quadro 24. Indicação dos usos e ocupação do solo para a área do vale a jusante da barragem (continuação).

Grau de Risco	Descrição do Grau de Risco	Usos e Ocupação	
		Indicados	Não Indicados
R3 Alto	O grau de perigo é significativo e pelo menos um condicionante de vulnerabilidade alta é identificado.	Todos do R4; Atividades agrícolas sem alojamento; Atividades industriais, comerciais de serviços sem alojamento.	Todos do R2; Ocupação humana permanente; Atividades industriais, comerciais ou serviços com alojamento; Rodoviárias, Ferroviárias; Aeroportos.
R4 Muito Alto	O grau de perigo é extremo independente de qual seja a vulnerabilidade da área.	Atividades esportivas sem aglomeração de espectadores; Parques; Praças; Atividades agrícolas sem alojamento e de baixa tecnificação; Áreas de interesse Ambiental (e.g. corredores ecológicos, áreas de proteção, etc.); Áreas de reserva legal; Estradas.	Todos do R3; Atividades industriais, comerciais e de serviços; Ocupação humana.

Fonte: Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados

Para a aplicação da metodologia apresentada neste estudo, os mapas de inundação elaborados por Vianini Neto (2016) serão utilizados como referência. Vianini Neto (2016) buscou avaliar os principais impactos na extensão e envoltória da mancha de inundação da ruptura hipotética da Barragem da Pampulha, em Belo Horizonte, além de realizar uma retroanálise da brecha de ruptura do acidente ocorrido em 1954.

Em 1936 foram iniciadas as obras de represamento do Ribeirão Pampulha que deu origem ao nome da barragem, localizada na zona norte do município de Belo Horizonte no Estado de Minas Gerais (Figura 21). A finalidade da barragem foi promover um reservatório para abastecimento de água e uma contenção de cheias para viabilizar a operação e a ampliação do campo de aviação (atual Aeroporto da Pampulha), instalado em 1933, ao lado da barragem (VIANINI NETO, 2016).

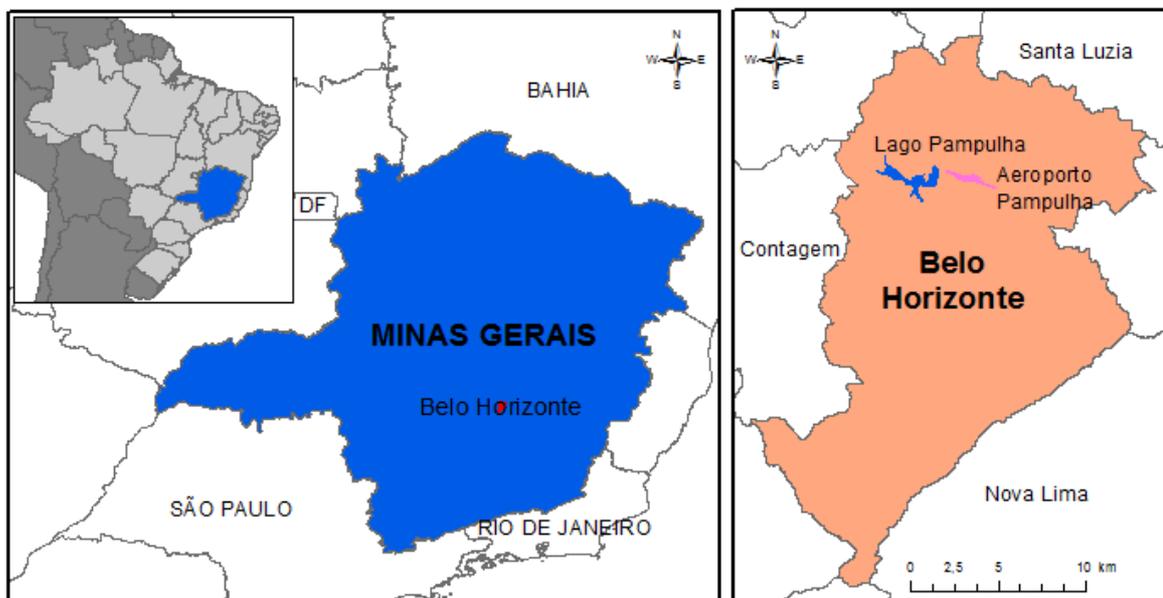


Figura 21. Localização do município de Belo Horizonte e do Lago da Pampulha.

Construída com maciço de terra, teve sua primeira etapa inaugurada em 1938 com crista na elevação 797,60 m e soleira do extravasor tipo tulipa na elevação 796,10 m. A cota de fundo da barragem, onde era o leito natural do Ribeirão Pampulha, foi cadastrada na elevação 785,00 m na face de jusante, portanto a barragem tinha altura

máxima de 12,60 m. Em 1943 foi concluída a segunda etapa de construção da barragem, onde foi realizado o alteamento da crista em 6,50 m de altura, passado para a elevação 802,60 m. Com isso a barragem ficou com 17,60 m de altura e volume de 18 milhões de metros cúbicos até a soleira do extravasor. No dia 20 de abril de 1954 a barragem rompeu e entre os anos de 1954 a 1958 a barragem foi reconstruída com a crista alteada para a elevação 805,00 m, alcançando 20,00 m de altura (VARGAS *et al.* 1955 *apud* VIANINI NETO, 2016).

O vale a jusante da barragem da Pampulha é caracterizado por alta aglomeração urbana, fruto do crescimento da capital Mineira. Próximo ao pé de jusante está o Aeroporto de Belo Horizonte, conhecido como Aeroporto da Pampulha, que recebe voos de diversas origens do Brasil. O Ribeirão Pampulha, após a barragem, ainda margeia os bairros de São Bernardo e Minaslândia antes de fluir para o Ribeirão da Onça. Ainda pelo Ribeirão da Onça, suas águas permeiam diversos outros bairros da Capital para finalmente desaguar do Rio das Velhas, no extremo nordeste. Por uma extensão de 13 quilômetros do pé da Barragem da Pampulha, o vale é eminentemente urbano e somente nos seus últimos 3.600 metros antes de adentrar ao Rio das Velhas é que a paisagem urbana abre espaço para uma cobertura natural do solo, porém diversos são os municípios banhados pelo Rio das Velhas como é o caso de Santa Luzia, ao norte da Capital. A Figura 22 apresenta imagem de satélite identificando o lago da Barragem da Pampulha bem como o Ribeirão Pampulha a jusante da mesma, o Ribeirão da Onça até o Rio das Velhas.



Figura 22. Uso do solo a jusante da Barragem da Pampulha até o Rio das Velhas.

Percebe-se que o vale a jusante da barragem, até o Rio das Velhas (verde), possui uma ocupação eminentemente urbana. O vale, até o Rio das Velhas, se estende por 16,6 quilômetros.

Fonte da Imagem: Google (2018).

Vianini Neto (2016) mapeou uma área que se estendeu desde o lago da Pampulha até o Rio das Velhas, utilizando como base topográfica o aerolevanteamento com perfilhamento a laser LiDAR da região metropolitana de Belo Horizonte realizado em 2008, com curvas de nível de 1 em 1 metro. Para a análise metodológica, proposta neste estudo, será utilizada a porção inicial do trecho modelado que se estende da barragem até o bairro de Minaslândia o que compreende uma extensão de 4,5 quilômetros.

A modelagem hidrodinâmica realizada por Vianini Neto (2016), base para esta verificação, considerou dia chuvoso com um tempo de retorno de 10.000 anos e admitiu uma brecha ocasionada por *piping*, a mesma observada no evento de 1954. O modelo hidrodinâmico usado foi o HEC-RAS (2D) rodado em regime de escoamento não permanente, observando um hidrograma com uma vazão máxima de 5.693 m³/s gerando um volume de 35.167.710 m³ que escoou por 13 horas.

A Figura 23 e a Figura 24 apresentam, respectivamente, as profundidades do escoamento e as velocidades máximas atingidas no vale a jusante da barragem. Percebe-se que as profundidades máximas ultrapassam os 12 metros de altura na porção mais encaixada do vale e que em grande parte da área do aeroporto a água ultrapassa os 6 metros de altura. Por outro lado, as velocidades de escoamento observadas na modelagem hidrodinâmica de Vianini Neto (2016) são baixas em quase todo o vale, apenas observando-se valores acima de 1,50 m em áreas muito restritas ou junto a brecha modelada. Reitera-se que a modelagem hidrodinâmica do autor se estendeu até o Rio das Velhas, a 16,6 quilômetros da barragem, entretanto a avaliação aqui apresentada corresponde aos 4,5 quilômetros iniciais.

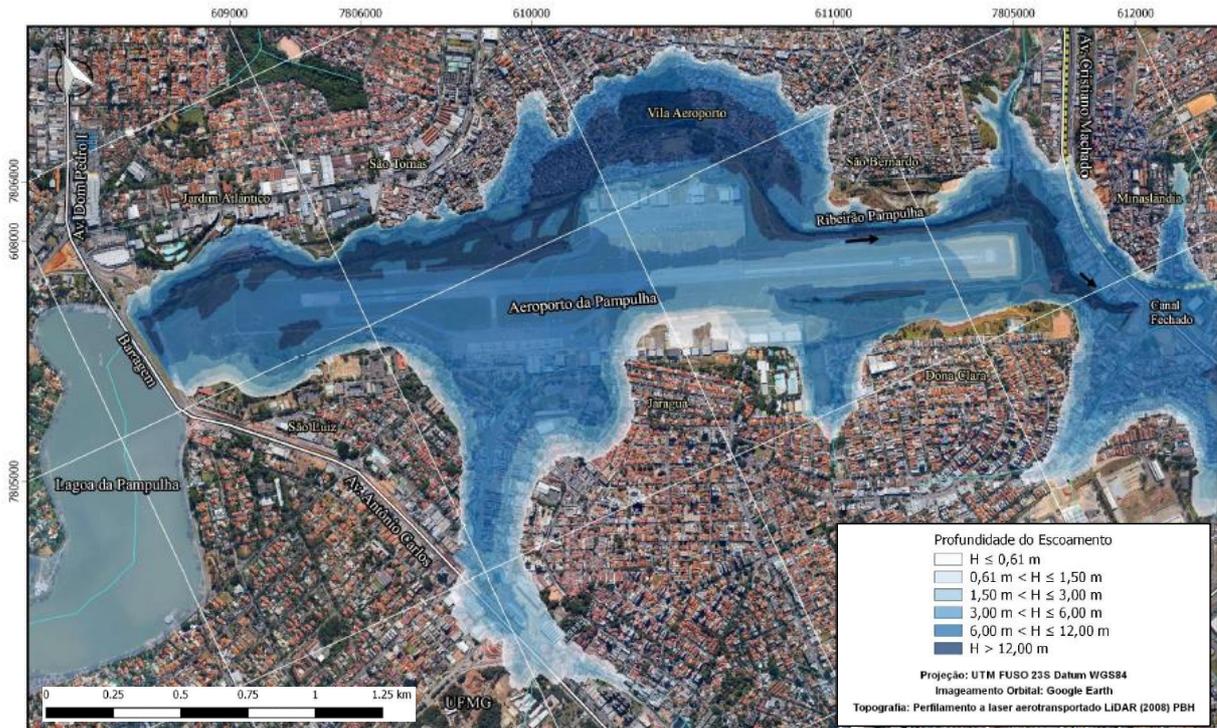


Figura 23. Profundidade do escoamento esperado pela ruptura da Barragem da Pampulha. A análise se estende por 4,5 quilômetros.

Fonte: Vianini Neto (2016). Escala aproximada de 1:16.000.

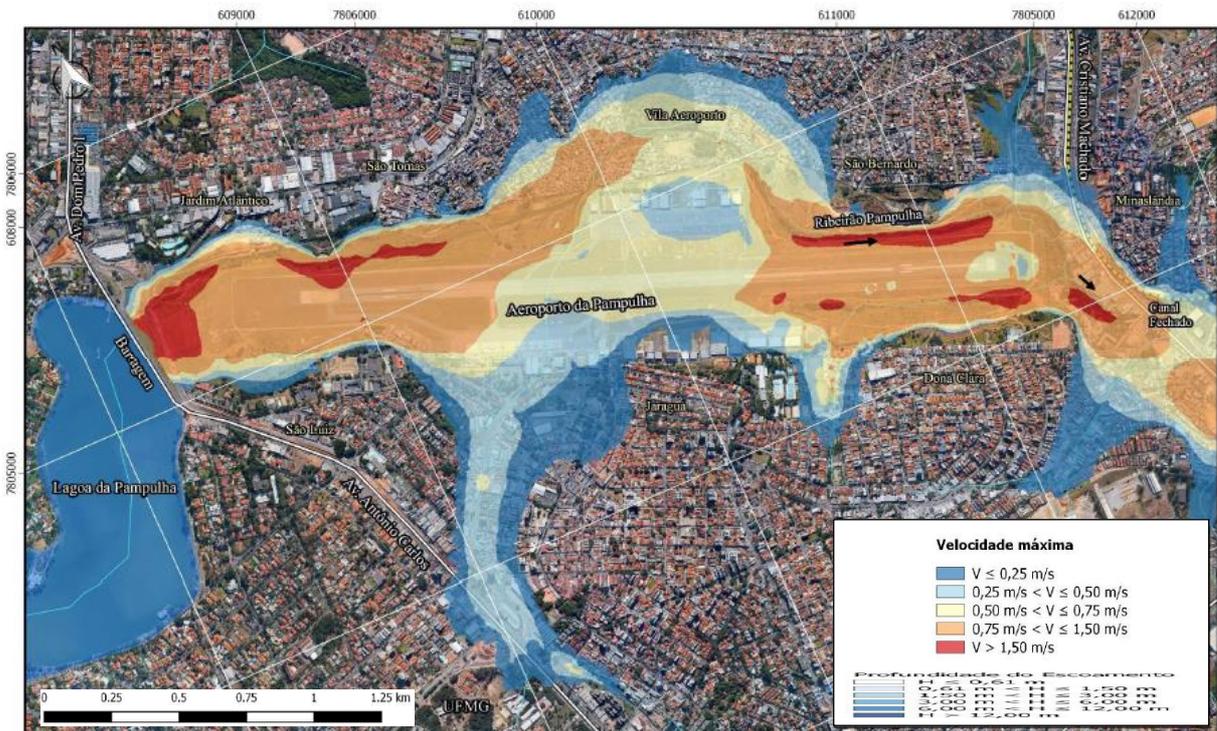


Figura 24. Velocidade do escoamento esperada pela ruptura da Barragem da Pampulha. A análise se estende por 4,5 quilômetros.

Fonte: Vianini Neto (2016). Escala aproximada de 1:16.000.

Para a determinação do Grau de Perigo foi necessária a obtenção do Fator de Perigo que, por sua vez, é dado pelo produto da profundidade e velocidade do escoamento. O Grau de Perigo foi discretizado em Baixo (P1), Moderado (P2), Significativo (P3) e Extremo (P4). Para a sua obtenção foi utilizada uma álgebra de mapas com o auxílio do Software ArcGIS 10.4 (ESRI, 2015) onde, através da ferramenta Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator, realizou-se a multiplicação da profundidade pela velocidade sendo a imagem resultante, posteriormente, reclassificada nos quatro grupos conforme o seu Fator de Perigo ($FP \leq 0,75$; $0,75 < FP \leq 1,50$; $1,50 < FP \leq 2,50$; e $FP > 2,50$). A Figura 25 localiza os diferentes Graus de Perigo junto ao vale de jusante analisado, dada a alta profundidade do escoamento é evidenciado que grande parte do vale, neste trecho de 4,5 quilômetros, apresenta um grau de perigo extremo.

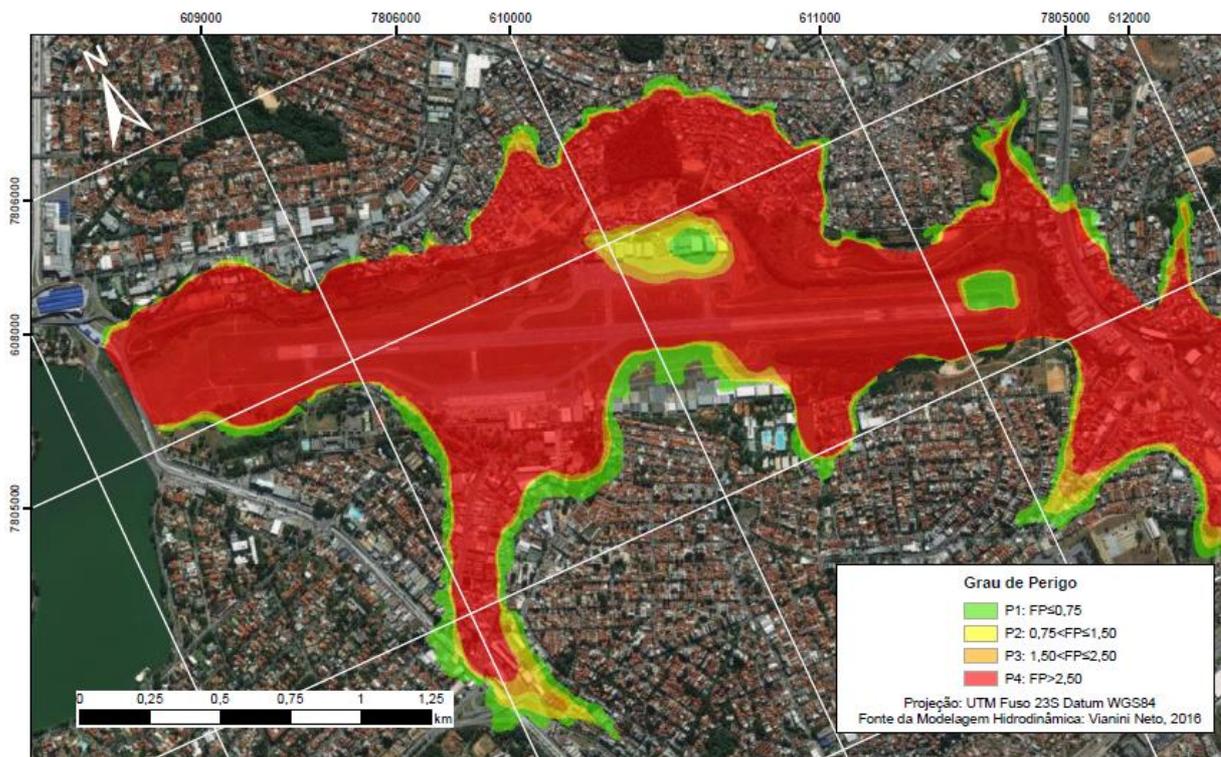


Figura 25. Identificação dos Graus de Perigo; sendo $FP =$ Fator de Perigo, dado por $v \times h$ (onde $v =$ velocidade do escoamento [m/s] e $h =$ altura da lâmina d'água no escoamento [m]).
 Fonte: Autor. Escala aproximada de 1:16.000.

Para a determinação da vulnerabilidade da área suscetível a sofrer com o volume de água decorrente da ruptura proposta por Vianini Neto (2016) foi lançado mão da utilização do GoogleStreetView (GOOGLE, 2018). Com esta ferramenta foi possível identificar remotamente as características da área urbana, a condição das ruas, a localização de escolas, creches, igrejas e de postos de saúde. Além disto, a infraestrutura localizada na área mapeada também foi avaliada como, por exemplo, o

aeroporto, rodovias e pontes.

A área, eminentemente urbana, possui edificações de médio a bom padrão construtivo, sendo construções em alvenaria em ruas pavimentadas que permitem um acesso fácil à veículos de pequeno e médio porte. Isso, por si só, configura uma vulnerabilidade baixa, porém o que fez com que houvesse o enquadramento em vulnerabilidade alta é a elevada concentração populacional e o adensamento construtivo sobre os lotes. O aeroporto é uma infraestrutura que configura vulnerabilidade alta. Assim, as áreas mapeadas como de baixa vulnerabilidade são aquelas que apresentam vegetação rasteira ou baixa concentração populacional sem a presença de equipamentos públicos. O mapeamento da vulnerabilidade pode ser identificado na Figura 27. A Figura 26 ilustra algumas imagens extraídas do GoogleStreetView (GOOGLE, 2018) do vale em análise, imagens obtidas nos anos de 2014 e 2017. A localização das imagens pode ser verificada junto a Figura 27.



Figura 26a: Escola municipal.



Figura 26b: Igreja.



Figura 26c: Pista do aeroporto.



Figura 26d: Margem esquerda ribeirão.



Figura 26e: Praça Bagatelle.



Figura 26f: Av. Cristiano Machado.

Figura 26. Ocupação do solo na poligonal suscetível a inundação proveniente da ruptura.

Fonte das Imagens: Google (2018).

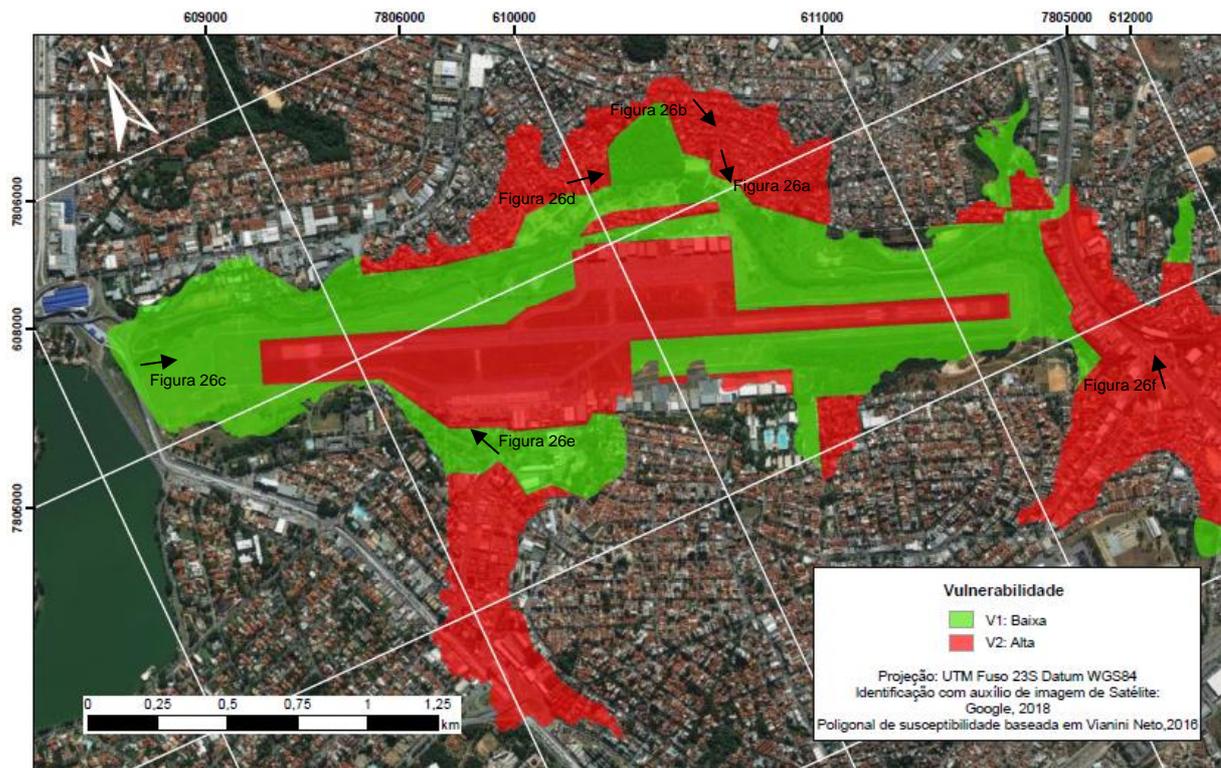


Figura 27. Identificação dos Graus de Perigo; sendo FP = Fator de Perigo, dado por $v \times h$ (onde v = velocidade do escoamento [m/s] e h = altura da lâmina d'água no escoamento [m]).

Fonte: Autor. Escala aproximada de 1:16.000.

Após realizada a modelagem hidrodinâmica de uma ruptura hipotética e concluída a verificação do grau de perigo e da vulnerabilidade do vale de jusante de uma barragem, é possível obter o risco deste vale. No caso proposto para a barragem da Pampulha, o mapeamento do risco obtido para os primeiros 4,5 quilômetros ao longo do canal é apresentado na Figura 28. Para obter o resultado do risco em quatro níveis de zoneamento, utilizou-se a ferramenta Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator do Software ArcGIS 10.4 (ESRI, 2015). Como a categorização demanda a entrada de quatro graus de perigo por dois níveis de vulnerabilidade, foi necessária a aplicação de uma álgebra condicional para a obtenção dos quatro níveis de risco, assim dentro da ferramenta Raster Calculator aplicou-se o condicional “Con”.

Dado que o setor utilizado do modelo hidrodinâmico é imediatamente após a barragem e que a topografia da região sofreu alteração antrópica e não possui desnível acentuado, o grau de perigo foi identificado como extremo na maior parte do vale, situação influenciada pela alta profundidade do escoamento. A alta vulnerabilidade prepondera, já que a alta concentração populacional na área urbana e a presença do aeroporto espalham-se por quase todo o vale analisado.

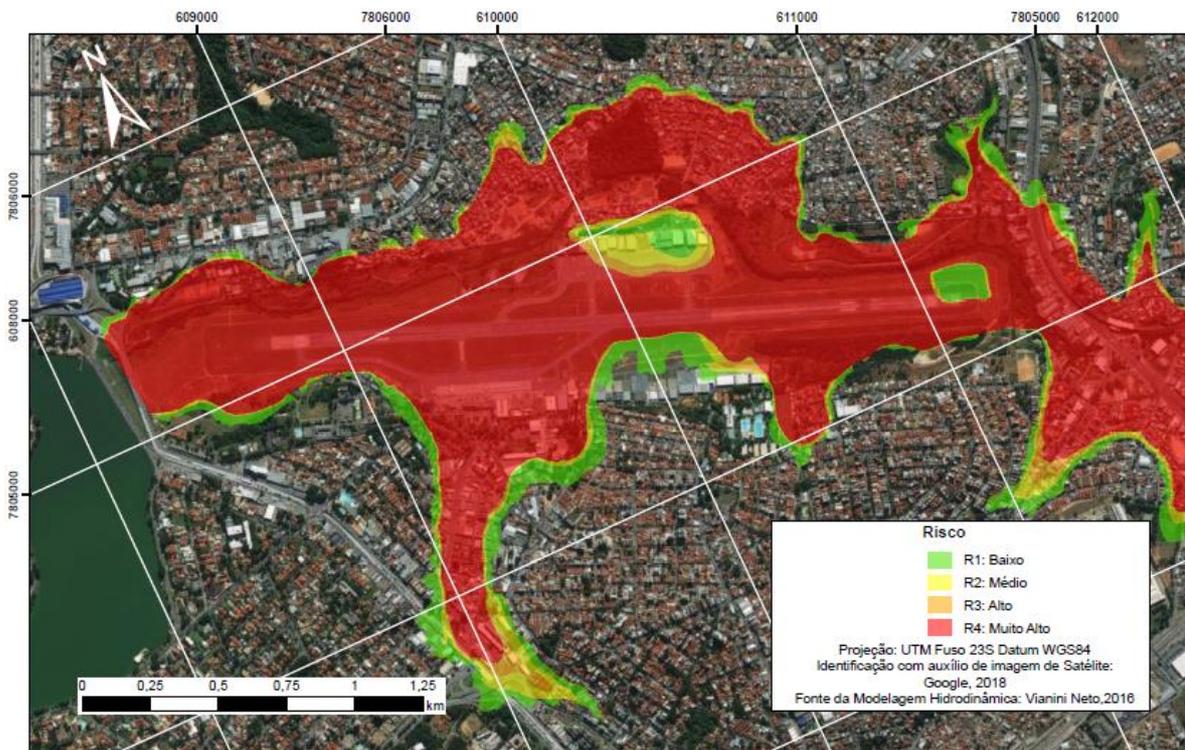


Figura 28. Identificação do zoneamento em função do Risco.

Fonte: Autor. Escala aproximada de 1:16.000.

O vale a jusante da barragem que é atingido pela onda de inundação possui uma área de 335,8 hectares, sendo que deste total:

1. 269,4 hectares são enquadrados em Risco Muito Alto (R4), onde o grau de perigo é extremo, independentemente da análise da vulnerabilidade;
2. 38,7 hectares enquadram-se em Risco Baixo (R1), onde o grau de perigo é baixo independentemente da análise da vulnerabilidade ou o grau de perigo moderado quando a vulnerabilidade é baixa;
3. 18,2 hectares são enquadrados em Risco Médio (R2), onde o grau de perigo é significativo, porém a vulnerabilidade baixa; ou o grau de perigo moderado e a vulnerabilidade alta;
4. 9,5 hectares são enquadrados em Risco Alto (R3), onde o grau de perigo é significado e a vulnerabilidade é alta.

A análise espacial do trecho de jusante foi realizada em escala digital de 1:16.000. Desta maneira, reitera-se que os mapeamentos para este tipo de estudo não devem ocorrer em escalas inferiores a 1:20.000.

5.2. Discussão

A classificação de risco a jusante de barragens apresentada por Almeida e Viseu (1997) categoriza em três níveis diferentes (baixo, significativo e alto) toda a extensão analisada do vale. Diferentemente da proposta metodológica desta dissertação, os autores não aplicam distintas classes a diferentes posições ao longo da calha. Uma vez classificado como nível alto, por exemplo, independentemente da distância ou da cota sobre a linha de inundação em que uma dada atividade estiver, ela estará em uma área de risco alto. O oposto também é verdadeiro, ou seja, um vale classificado como de baixo risco terá esta categorização até mesmo junto aos setores da calha com maiores fatores de perigo (onde o produto da altura da lâmina d'água e da velocidade de escoamento são maiores).

Assim como Almeida e Viseu (1997), Brasil (2012b) também apresenta critérios que permitem uma única categoria para todo o vale de jusante considerado, pois a classificação ocorre de acordo com aspectos da própria barragem. Os resultados desta dissertação mostram ser possível obter diferentes classes para um mesmo vale, mesmo levando em consideração critérios similares aos adotados por Brasil (2012b) como, por exemplo, a existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas, a existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários, a existência de infraestrutura ou serviços e a existência de equipamentos de serviços públicos essenciais, a ocorrência de áreas protegidas definidas em legislação e o volume da barragem.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL,1997) apresenta uma preocupação, entre outras coisas, com a disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos e com a gestão da água para proporcionar o seu uso múltiplo. A prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais é um objetivo desta Política, entretanto não há referência direta à prevenção e defesa contra eventos críticos que podem ser causados por obras vinculadas à disponibilidade de água e do uso múltiplo, como é o caso de obras de barragens. Nada a respeito do zoneamento de áreas localizadas a jusante de barragens é abertamente mencionado.

Mesmo que a Política Nacional de Recursos Hídricos não mencione explicitamente a elaboração de zoneamento do vale a jusante de barragens, conforme

a metodologia aqui proposta, o mesmo pode ser realizado dentro dos Planos de Recursos Hídricos. Sendo um dos cinco instrumentos da PNRH, o Plano de Recursos Hídricos é um plano diretor que visa fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos. Uma vez que compete ao Comitê da Bacia Hidrográfica, em que a barragem está ou será construída, aprovar o Plano de Recursos Hídricos, poderia o Comitê solicitar a análise de risco do vale a jusante para fins de zoneamento, conforme proposto nesta metodologia. Outro momento em que a realização do zoneamento do vale a jusante poderia ser exigida seria na outorga de direito de uso do recurso hídrico para o armazenamento, para a captação, para o abastecimento e para os aproveitamentos hidrelétricos.

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (BRASIL, 2012a) tem como objetivos estimular o ordenamento da ocupação do solo urbano e rural, tendo em vista sua conservação e a proteção da vegetação nativa, dos recursos hídricos e da vida humana; e o combate a ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis e de risco. Baseado nestes objetivos, é possível constatar que o ordenamento territorial e o combate a ocupação de áreas de risco já estão restritos por lei federal. Assim, o que poderia estar faltando seria uma metodologia que organizasse esta ocupação e uso do solo e, novamente, a estrutura apresentada neste estudo poderia se enquadrar neste cenário.

Importante é de se ressaltar que não há necessidade da criação de instrumento legal para exigir o regramento da ocupação e uso do solo ao longo do vale a jusante da barragem. Conforme Brasil (2012a) em seus artigos 7º e 8º, é obrigação dos Estados e dos Municípios identificar e mapear as áreas de risco, realizar estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades e, entre outras coisas, promover a fiscalização das áreas de risco de desastre e vedar novas ocupações nessas áreas.

Os instrumentos do Estatuto da Cidade já preveem a ordenação e controle do uso do solo para evitar a proximidade de usos incompatíveis ou inconvenientes e a exposição da população a riscos de desastres. Brasil (2001) evidencia que o plano diretor, quando exigido, é parte integrante do processo de planejamento municipal, devendo englobar o território do Município como um todo. Ele deve apresentar o mapeamento das áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos. Entretanto, o Estatuto das Cidades não menciona explicitamente a condição de risco à população do

Município que uma determinada intervenção ou obra pode causar. Resta permitir que seja integrado a ele o zoneamento do vale a jusante da barragem a fim de evitar que o risco existente a estas áreas seja potencializado.

O Código Tributário Nacional prevê diversos impostos como, por exemplo, o imposto sobre a propriedade territorial rural, o imposto sobre a propriedade predial e territorial urbana e o imposto sobre a transmissão de bens imóveis (BRASIL, 1966). Poucas são as possibilidades de isenção total ou parcial destes impostos.

A isenção, ainda quando prevista em contrato, é sempre decorrente de lei que especifique as condições e requisitos exigidos para a sua concessão, os tributos a que se aplica e, sendo o caso, o prazo de sua duração. A isenção pode ser restrita a determinada região do território da entidade tributante, em função de condições a ela peculiares (BRASIL, 1966, art. 176). Quanto a isenção, chama-se a atenção para o disposto no art. 179 da Lei Federal 5.172 de 1966:

Art. 179. A isenção, quando não concedida em caráter geral, é efetivada, em cada caso, por despacho da autoridade administrativa, em requerimento com o qual o interessado faça prova do preenchimento das condições e do cumprimento dos requisitos previstos em lei ou contrato para sua concessão.

§ 1º Tratando-se de tributo lançado por período certo de tempo, o despacho referido neste artigo será renovado antes da expiração de cada período, cessando automaticamente os seus efeitos a partir do primeiro dia do período para o qual o interessado deixar de promover a continuidade do reconhecimento da isenção.

§ 2º O despacho referido neste artigo não gera direito adquirido, aplicando-se, quando cabível, o disposto no artigo 155 (BRASIL, 1966).

Brasil (1966) permite que as restrições à propriedade, decorrentes da aplicação da metodologia proposta neste estudo, podem ser compensadas com a isenção dos impostos que incidem sobre a área. Esta isenção é um instrumento de compensação já existente que pode fazer-se uso.

A Política Nacional de Segurança de Barragens solicita a elaboração dos planos de ação de emergência, contudo não deixa claro os controles que devem ser aplicados às áreas situadas no vale a jusante dos barramentos e não aponta a quem cabe a responsabilidade de organizar o uso do solo nestes locais. Assim, percebe-se que a incorporação da metodologia apresentada nesta dissertação pode complementar um instrumento de gestão do território à esta Política.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os conflitos inerentes à gestão territorial são tão antigos quanto a história que lá existe e a barragem implica na observância de uma gestão territorial diferenciada e específica, sendo que esta discussão ainda é pouco realizada a nível nacional ou internacional. O Plano de Ação de Emergência, da maneira com que está estruturado, não pode ser considerado uma ferramenta para a gestão ou para o planejamento do uso do solo do vale a jusante da barragem.

O método proposto nesse trabalho partiu de uma análise de quatro formas utilizadas para o mapeamento de áreas de inundação. Uma que consiste em realizar uma análise cartográfica, através de modelos digitais de elevação e a existência de ocupação humana, obtendo quatro diferentes compartimentos de risco. Outra que, através de um inventário de inundações e de análise geomorfológica, estabelece mapas de suscetibilidade, perigo e de risco. Uma terceira abordagem apresentou um produto diferente, ao invés de ser realizada uma avaliação de vulnerabilidade, perigo ou risco, o estudo relacionou as áreas de inundação com um fator de retorno financeiro. A última abordagem propôs um mapeamento do perigo da inundação através da utilização de dados de chuva com a aplicação de modelo computacional hidrodinâmico.

Quanto aos estudos de modelagem de inundação provocada pela ruptura fictícia de barragens, inicialmente lançou-se mão da definição da escala cartográfica de trabalho, sendo recomendado que os mapeamentos deste tipo de análise não ocorressem em escala inferior a 1:20.000. As três referências utilizadas mostraram a importância da escala de trabalho. A primeira, realizada em 2003, utilizou uma escala de trabalho de 1:50.000 e imagens do satélite Landsat 7, porém não deixou claro qual seria a área inundada o que evidencia que a escala utilizada à época não se adequa às demandas atuais. A segunda, realizada em 2017, utilizou a base altimétrica do SRTM e apresentou um resultado gráfico em escala 1:7.800, permitindo a visualização em detalhe do alcance da cheia. A última referência, de 2015, apresentou a cartografia da cheia de ruptura em escala 1:3.000 sendo que a base altimétrica também foi proveniente do SRTM, possibilitando a análise em detalhe do alcance da cheia.

Para a determinação do perigo, observou-se que é basilar o conhecimento das

características geomorfológicas do vale. As metodologias para a composição do fator de perigo (STEPHENSON, 2002, e KARVONEN *et al.*, 2000, *apud* KVOCKA *et al.*, 2016) mostraram-se eficazes para a determinação do grau de perigo porque, ao obter um produto da profundidade do escoamento pela velocidade do fluxo, permitiram a classificação de diferentes níveis de perigo.

Por outro lado, a vulnerabilidade está muito mais associada às condições econômicas, sociais e culturais do que às condições físicas do vale e das componentes hidrodinâmicas do escoamento. A ferramenta GoogleStreetView mostrou-se eficiente para a obtenção do mapa de vulnerabilidade, uma vez que ela permitiu avaliar a área suscetível ao alagamento de maneira remota. Não obstante, não se recomenda fazer a substituição de vistorias *in loco* nas áreas propensas ao alagamento pelo uso desta ferramenta.

De posse das informações do perigo e da vulnerabilidade é possível a determinação do grau de risco do vale a jusante da barragem, gerado pelo produto do primeiro pelo segundo. O grau de risco passa a representar as classes de zoneamento, sendo de Risco Baixo (R1), Risco Médio (R2), Risco Alto (R3) e Risco Muito Alto (R4), o que significa que quanto maior o grau de risco mais restritivo é o uso e a ocupação do solo.

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, sugeriram-se usos que associem menores prejuízos às áreas de maiores riscos. Com a preocupação na segurança e buscando evitar com que o risco seja potencializado, esta dissertação apontou diferentes atividades humanas indicadas à cada uma das quatro categorias. Na zona classificada como de Risco Baixo (R1) as indicações de restrição são praticamente nulas, onde sugere-se evitar atividades de educação, saúde e aquelas que envolvam a restrição de movimentação, como os centros prisionais, bem como atividades de alto potencial poluidor. Por outro lado, áreas com o risco mais alto (R4) admitem o menor número de atividades humanas.

As atividades indicadas e não indicadas neste trabalho não correspondem à todas aquelas existentes, por isso recomenda-se prudência ao analisar a instalação de novas atividades no vale a jusante. Recomenda-se evitar novas atividades com restrição de instalação nas quatro diferentes zonas para que o dano não seja potencializado.

Assim, com o resultado gerado a partir dos diferentes mapeamentos de áreas de

inundação e com referência à metodologia sugerida pelo Ministério das Cidades, aceita-se a hipótese desta dissertação. O zoneamento do uso do solo, conforme a metodologia utilizada, pode contribuir para a redução de perdas e danos no vale a jusante de barragens.

Diversas são as análises que ocorrem ao longo do vale de jusante de barragens para identificar as modificações hidrológicas e para avaliar os efeitos provocados pelas ondas de cheia. Recomendações são apontadas quanto a importância de desenvolver um zoneamento preventivo no uso do solo do vale de jusante, muito embora não é de fácil acesso a obtenção de trabalhos que explicitamente indiquem etapas para elaboração de um regramento em função do risco imposto pela barragem. Como esta dissertação apresenta uma metodologia para efetivamente elaborar o zoneamento do vale a partir de referências brasileiras consagradas nas áreas de inundação e risco geológico-geotécnico, considera-se ser um trabalho inovador.

Por ser um trabalho inovador, a sua aplicação pode implicar em adequações legais. Entretanto, instrumentos já existentes podem permitir sua utilização, como é o caso da Política Nacional de Recursos Hídricos que, através dos Planos de Bacia e da outorga de direito de uso do recurso hídrico, pode exigir a sua realização. A possibilidade de compensação pecuniária existe desde 1966, pois o Código Tributário Nacional já prevê a isenção de impostos em função de condições peculiares. A própria Política Nacional de Proteção e Defesa Civil já exige o ordenamento territorial e o combate a ocupação de áreas de risco. O Estatuto da Cidade prevê a ordenação e controle do uso do solo para evitar a proximidade de usos incompatíveis ou inconvenientes e a exposição da população a riscos de desastres, sendo o Plano Diretor o principal instrumento de planejamento municipal. Desta forma, o Plano Diretor pode ser instrumento de restrição às novas atividades no vale a jusante das barragens inseridas nas áreas de sua abrangência.

Uma limitação identificada neste trabalho foi a impossibilidade de verificar o vale de jusante com as indicações do uso do solo propostas. Como recomendação, sugere-se a sua incorporação aos planos diretores urbanos e aos planos de bacia hidrográfica.

Por fim, e com base nos resultados obtidos é possível concluir que as áreas localizadas no vale a jusante de barragens são áreas de risco, independentemente do estado de conservação da barragem ou do grau de qualificação técnica que a equipe de segurança possua.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. B. de; VISEU, T. Dams and valleys safety: a present and future challenge. In: **Dams and safety management at downstream valleys**. António Betâmio de Almenda e Teresa Viseu (Ed.), Rotterdam: Balkema. 1997.
- ANA. **Cadastro de segurança de barragens 2015**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2016a.
- _____. **Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência - PAE**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2016b.
- _____. Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017. **Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017.
- ANTUNES DO CARMO, J. S. Guidelines and tools to prevent risks in valleys downstream from large dam-reservoir systems: a review. In: **Risk Analysis VII & Brownfields V**. Brebbia C. A (Ed.), Southampton, UK: Witpress, pp. 137-148, 2010.
- _____. Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos. In: **Riscos naturais, antrópicos e mistos**. 1ª ed., Luciano Fernandes Lourenço, Manuel Alberto Mateus (Ed.), Coimbra, Portugal: Departamento de Geografia. Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, pp.441-461, 2013.
- ARAÚJO, Q. R. de (org.). **500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus, Bahia: Editus, 2002.
- BELLADONA, R.; VARGAS, T. De; REIS, L. C. T. dos; SILVEIRA, A. L. L. da. Metodologia para validação do MDE SRTM para a sua utilização em projetos em recursos hídricos. In: **Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis, Novembro, 2017.
- BITAR, O. Y. (coord.). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000**. Nota Técnica Explicativa - São Paulo: IPT –

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014.

BRASIL. Decreto n. 24.643, de 10 de julho de 1934. **Código de Águas**. Rio de Janeiro, jul 1934.

_____. Lei n. 5.172, de 25 de outubro de 1966. Dispõe sobre o Código Tributário Nacional. **Diário Oficial da União**. Brasília, 27 out. 1966.

_____. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**. Brasília, 9 jan. 1997.

_____. Lei n. 10.257, de 10 de julho de 2001. Estatuto da Cidade. Estabelece diretrizes gerais da política urbana. **Diário Oficial da União**. Brasília, 11 jul. 2001.

_____. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Cristiano César Aires Rocha, Lázaro Luiz Neves, Maria Inês Muanis Persechini (Org.). Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002.

_____. Ministério das Cidades e Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura (Org.). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007.

_____. Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial da União**. Brasília, 21 set. 2010.

_____. Lei n. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da**

União. Brasília, 11 abr. 2012a.

_____. Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 143 de 10 de julho de 2012. **Diário Oficial da União.** Brasília, 4 set. 2012b.

_____. Lei n. 13.465, de 11 de julho de 2017. Dispõe sobre a regularização fundiária rural e urbana, sobre a liquidação de créditos concedidos aos assentados da reforma agrária e sobre a regularização fundiária no âmbito da Amazônia Legal; institui mecanismos para aprimorar a eficiência dos procedimentos de alienação de imóveis da União; altera as Leis nºs 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, 13.001, de 20 de junho de 2014, 11.952, de 25 de junho de 2009, 13.340, de 28 de setembro de 2016, 8.666, de 21 de junho de 1993, 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 12.512, de 14 de outubro de 2011, 10.406, de 10 de janeiro de 2002 (Código Civil), 13.105, de 16 de março de 2015 (Código de Processo Civil), 11.977, de 7 de julho de 2009, 9.514, de 20 de novembro de 1997, 11.124, de 16 de junho de 2005, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 10.257, de 10 de julho de 2001, 12.651, de 25 de maio de 2012, 13.240, de 30 de dezembro de 2015, 9.636, de 15 de maio de 1998, 8.036, de 11 de maio de 1990, 13.139, de 26 de junho de 2015, 11.483, de 31 de maio de 2007, e a 12.712, de 30 de agosto de 2012, a Medida Provisória nº 2.220, de 4 de setembro de 2001, e os Decretos-Leis nºs 2.398, de 21 de dezembro de 1987, 1.876, de 15 de julho de 1981, 9.760, de 5 de setembro de 1946, e 3.365, de 21 de junho de 1941; revoga dispositivos da Lei Complementar nº 76, de 6 de julho de 1993, e da Lei nº 13.347, de 10 de outubro de 2016; e dá outras providências. **Diário Oficial da União.** Brasília, 8 set. 2017.

CAMPOS, S. J. A. M.; STEFANI, F. L.; PAULON, N.; FACCINI, L. G.; BITAR, O. Y. Mapeamento de áreas sujeitas à inundação para planejamento e gestão territorial: cartas de suscetibilidade, perigo e risco. In: **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.** v. 5, n.1, 2015, São Paulo, pp. 67-81, 2015.

CARVALHO, E. Segurança de barragem e avaliação de riscos. In: **Anais do XXX Simpósio Nacional de Grandes Barragens.** Foz do Iguaçu, Maio. 2015.

CBDB. **Apresentação.** Comitê Brasileiro de Barragens. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20das%20Barragens>>. Acesso em Setembro de 2017.

- _____. **Histórico.** Comitê Brasileiro de Barragens. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/1-29/Hist%C3%B3rico>>. Acesso em Abril de 2018.
- CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Inundação.** Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/inundacao/>>. Acesso em Novembro de 2017.
- CRICHTON, D. **The Risk Triangle.** 1999. Disponível em: <<http://www.ilankelman.org/crichton/1999risktriangle.pdf>>. Acesso em Abril de 2018.
- CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M. Jr; VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics.** Bath, Great Britain: Pitman Publishing, 1980.
- DUNCAN, M. **Gestão territorial: visões e significados.** Disponível em: <http://www.academia.edu/2052742/Gest%C3%A3o_Territorial_Vis%C3%B5es_e_significados>. Acesso em Setembro de 2017.
- ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. **Typhoon Nina–Banqiao dam failure.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/event/Typhoon-Nina-Banqiao-dam-failure>>. Acesso em: Setembro de 2017.
- ESRI. **ArcGIS for Desktop: release 10.4.** Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2015.
- FADEL, A. W. **Incorporação do risco de prejuízo no gerenciamento de medidas de controle de inundação.** 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2015: resultados preliminares.** Diretoria de Estatística e Informações. Belo Horizonte: FJP, 2017.
- GOOGLE. Google Earth Pro. Version 7.3.1 (64-bit): Google Incorporated: 2018. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2018.
- ICOLD. **Bulletin 111: Dam break flood analysis: review and recommendations.** International Commission on Large Dams. Paris, França: ICOLD, 1998.
- _____. **Constitution Statuts.** International Commission on Large Dams. Disponível em: <http://www.icold-cigb.net/userfiles/files/CIGB/INSTITUTIONAL_FILES/Co-

- nstitution2011.pdf> Acesso em: Setembro de 2017.
- INDIA WATERPORTAL. Disponível em: <<http://www.indiawaterportal.org/articles/machhu-dam-disaster-1979-gujarat-discussion-book-tom-wooten-and-utpal-sandesara>>. Acesso em: Setembro de 2017.
- JUNGES MENEZES, D. **Zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS**. 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós Graduação em Geografia (PPGGeo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- KARVONEN; R.; HEPOJOKI, H.; HUHTA, H.; LOUHIO, A. **The use of physical models in dam-break flood analysis**. Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis (RESCDAM). Final report of Helsinki University of Technology, Finnish Environment Institute, Finland, 2000.
- KUBAL, C.; HAASE, D.; MEYER, V.; SCHEUER, S. Integrated urban flood risk assessment - adapting a multicriteria approach to a city. In: **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, n. 6, pp.1881-1895, 2009.
- KVOCKA, D.; FALCONER, R. A.; BRAY, M. Flood hazard assessment for extreme flood events. In: **Natural Hazards**, v. 84, n. 3, pp. 1569–1599, 2016.
- MAFRA, F.; SILVA, J. A. da. **Planeamento e gestão do território**. Porto, Portugal: SPI – Sociedade Portuguesa de Inovação, 2004.
- MATOS, R. Migração e urbanização no Brasil. In: **Geografias**, n.14, 2012, Belo Horizonte, pp. 07-23, 2012.
- MEMÓRIA DA ELETRICIDADE. **Linha do Tempo**. Disponível em: <<http://memoriadaeletricidade.com.br/Default.asp?pagina=destaques/linha&menu=368&iEmpresa=Menu#44247>>. Acesso em: Setembro de 2017.
- MINAS GERAIS. **Relatório**: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Belo Horizonte, 2016.
- MMA. **Gestão territorial**. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial>>. Acesso em: Outubro de 2017.
- MONTAÑO, M.; SOUZA, M. P. de. Integração entre planejamento do uso do solo e de recursos hídricos: a disponibilidade hídrica como critério para a localização de

- empreendimentos. In: **Engenharia Sanitária e Ambiental** [online]. 2016, vol.21, n.3, pp. 489-495. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522016118729>>. Acesso em: Outubro de 2017.
- MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. In: **REGA**. v.10, n.2, jul./dez, pp. 13-25, 2013.
- MOTA, K. R. R. **Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba, MG**. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Landsat 7**. Disponível em: <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-enhanced-thematic-mapper-plus/>> Acesso em: Maio de 2018.
- PAIVA JÚNIOR, H. B. de. **Efeitos do rompimento da barragem de Camará na área urbana do município de Alagoa Grande-PB**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2006.
- PEREIRA, P. N.; SANTOS, R. P. dos; FERREIRA, W. F. V.; GUIMARÃES, R. D. S.; MARTINS, J. R. S.; FADIGA JR., F. M.; SANTOS, R. C. P. dos. Modelação da propagação de cheias ocasionadas por rompimento de barragens na cadeia de geração do rio Paranapanema. In: **Anais do XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Salvador, Outubro, 2003.
- PEREIRA, C. M. **Subsídios para a elaboração de um plano de ação emergencial para uma barragem da serra gaúcha**. 2016. 130 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.
- PRIORI, A.; POMARI, L. R.; AMÂNCIO, S. M.; IPÓLITO, V. K. **História do Paraná: séculos XIX e XX** [online]. Maringá: Eduem, 2012. A modernização do campo e o êxodo rural. pp. 115-127. Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/k4vrh/pdf/priori-9788576285878-10.pdf>>. Acesso em: Outubro de 2017.
- RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; BRESSANI, L. A. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. In: **Boletim Goiano de**

- Geografia** (Online). v. 36, n. 2, maio/julho, 2016, Goiânia, pp. 285-101, 2016.
- ROCHA, F. F. **Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil**. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- SILVA, R. C. V. da; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. **Hidráulica fluvial**. Volume 1. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003.
- SINGH, V. P. **Dam breach modeling technology**. Baton Rouge, EUA: Springer-Science, 1996.
- SOUZA, D. H. C. **Análise probabilística e de sensibilidade dos parâmetros de um estudo de rompimento hipotético: barragem de terra**. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. In: **Urban Water**, v. 4, n. 4, pp. 425- 430, 2002.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA-UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012**. Volume Brasil. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED-UFSC, p. 126, 2013.
- VIANINI NETO, L. **Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais**. 2016. 304 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- WISEU, T.; ALMEIDA, A. B. de. Gestão do risco nos vales a jusante de barragens. In: **Territorium**. v. 18, pp. 33-42, 2011.
- WORLD DIGITAL LIBRARY. Disponível em: <<https://www.wdl.org/en/item/9571/>>. Acesso em: Setembro de 2017.
- ZÊZERE, J. L. Riscos e ordenamento do território. **Inforgeo**, Lisboa, n. 20/21, p. 59-63, julho 2007.