



Paula Morais Canedo de Magalhães

**Mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos com
base em modelo GIS**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Rio de Janeiro
Abril de 2021



Paula Morais Canedo de Magalhães

**Mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos com
base em modelo GIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof^a. Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Departamento de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ

Prof. Vitor Nascimento Aguiar

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da autora, do orientador e da universidade.

Paula Morais Canedo de Magalhães

Graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2018. Principais áreas de interesse: análise de risco de desastres naturais, interações solo-água, modelagem matemática.

Ficha Catalográfica

Magalhães, Paula Morais Canedo de

Mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos com base em modelo GIS / Paula Morais Canedo de Magalhães ; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão. – 2021.

138 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2021. Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Fluxos de detritos. 3. Sistema de Informação Geográfica. 4. Análise multicritério. 5. Mapeamento de risco. I. Sayão, Alberto S. F. J. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho aos meus pais, Sonia e Paulo, e a
minha avó, Cestemia, por serem meus maiores exemplos
de vida e por serem os responsáveis pela pessoa que
sou hoje.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pelo amor, carinho e paciência dedicados a mim durante toda a minha vida. Por serem um exemplo de trabalho e dedicação e sempre terem me apoiado e acreditado em mim. E por todos os ensinamentos, profissionais ou de vida, que me transmitiram ao longo de todos esses anos.

Aos meus amigos Mariah, Conrado e Lucas agradeço pela amizade construída e pelo companherismo nesses últimos anos. Ao Pedro Henrique agradeço por estar presente nos momentos importantes da minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Alberto Sayão por sua colaboração no desenvolvimento desta pesquisa, bem como aos demais professores da PUC-Rio pelos conhecimentos transmitidos.

Aos membros da banca examinadora Prof. Anna Laura e Prof. Vitor, pelas sugestões e críticas construtivas feitas a este trabalho.

Agradeço também do Prof. Rogério Feijó da UERJ pelas contribuições relevantes para a construção deste trabalho.

À Capes, pelo auxílio concedido, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

E por fim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e conclusão do meu curso de mestrado.

Resumo

Morais Canedo de Magalhães, Paula; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (orientador). **Mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos com base em modelo GIS**. Rio de Janeiro, 2021. 138 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A identificação de áreas com predisposição à ocorrência de desastres naturais surge como informação importante, principalmente no contexto urbano. Sendo assim, o objetivo desse estudo foi propor uma metodologia para o mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos, considerado como um dos acidentes naturais que mais provocam mortes e perdas materiais.

Para tanto, esse estudo fez a modelagem de estabilidade das encostas diretamente num *software* GIS, em que foram utilizados o Modelo do Talude Infinito, para o cálculo da estabilidade, e do Método CN, como modelo de infiltração. Na análise de risco, considerou-se que Risco é definido pelo produto da probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos (Perigo), onde é avaliada a influência das características do meio físico e do seu processo deflagrador; com a severidade das suas consequências, medidas em termos de população afetada (Exposição) e suas fragilidades (Vulnerabilidade).

Os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando que a metodologia foi adequada para atingir os objetivos propostos, qualificando-a como viável e promissora para estudos futuros. Dentre as suas vantagens tem-se: ser facilmente replicada para outras áreas de estudo, possuir uma sequência simples de cálculos possuir dados de entrada de fácil obtenção e apresentar baixo custo computacional.

Palavras – chave

Fluxos de detritos; Sistema de Informação Geográfica; Análise multicritério; Mapeamento de risco.

Abstract

Morais Canedo de Magalhães, Paula; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (advisor). **Mapping of debris flow risk areas based on a GIS model.** Rio de Janeiro, 2021. 138 p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The identification of areas prone to the occurrence of natural disasters is an important information, especially in urban areas. Therefore, this study aimed to propose a methodology for debris flow risk assessment, considered as one of the natural disasters that most cause deaths and material losses.

To this end, this study made the slope stability modeling directly in a GIS *software*, in which the Infinite Slope Model was used for the slope stability calculation, and the CN Method, as the infiltration model. For the risk assessment, Risk is defined by the product of the probability of the occurrence of a debris flow event (Hazard), where the influence of the environment's physical characteristics and its triggering process are evaluated; with the severity of its consequences, measured in terms of the affected population (Exposure) and its weaknesses (Vulnerability).

The results obtained were satisfactory, indicating that the methodology presented was adequate to achieve the proposed objectives, qualifying it as viable and promising for future studies. Among its advantages: being easily replicated to other areas of study; have a simple sequence of calculations; have easily obtainable input data; and present low computational cost.

Keywords

Debris flows; Geographic Information System; Multicriteria analysis; Risk mapping.

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Contexto e Motivação da Dissertação	13
1.2. Objetivos da pesquisa	18
1.3. Proposta da dissertação	18
1.4. Organização dos capítulos	19
2. Revisão Bibliográfica	21
2.1. Fluxo de Detritos	21
2.1.1. Classificação	21
2.1.2. Mecanismos condicionantes e deflagradores	28
2.1.3. Histórico de fluxos de detritos	30
2.1.4. Características das encostas que influenciam nos movimentos de massa	32
2.2. Desastres Naturais	37
2.2.1. Desastres naturais no Estado do Rio de Janeiro	38
2.2.2. Fenômenos que geram desastres naturais	42
2.3. Conceitos de Risco, Perigo e Vulnerabilidade	44
2.4. Uso de GIS em análises de estabilidade de encostas	48
2.5. Lógica <i>Fuzzy</i>	51
2.6. Técnica AHP	53
2.7. Método Curva-Número do <i>Soil Conservation Service</i> (SCS-CN)	55
3. Metodologia	60
3.1. Delimitação da área de estudo	61
3.2. Mapa de Inventário	62
3.3. Mapa de Perigo	63
3.3.1. Etapa 1: Determinação da suscetibilidade do meio físico	63
3.3.2. Etapa 2: Determinação da probabilidade de instabilidade	66
3.4. Mapa de Vulnerabilidade e Exposição	72

3.5. Mapa de Risco	74
4. Estudo de Caso: Bacia do Córrego D'antas	75
4.1. Características gerais de Nova Friburgo	76
4.2. O desastre da Região Serrana	79
5. Resultados e Discussões	82
5.1. Delimitação da área de estudo	82
5.2. Mapa de Inventário	83
5.3. Mapa de Perigo	85
5.3.1. Etapa 1: Determinação da suscetibilidade do meio físico	86
5.3.2. Etapa 2: Determinação da probabilidade de instabilidade	106
5.4. Mapa de Vulnerabilidade e Exposição	117
5.5. Mapa de Risco	121
6. Conclusões	123
6.1. Sugestões para pesquisas futuras	125
Referências	126

Lista de figuras

Figura 1 – Classificação dos desastres naturais por tipo (mod. UNDRR, 2020a)	14
Figura 2 – Impacto dos desastres (mod. UNDRR, 2020a)	15
Figura 3 – Total de desastres registrados divididos por tipo (mod. UNDRR, 2020a)	15
Figura 4 – Formas de fluxos de detritos, quanto à topografia (Nettleton; Martin; Hencher, 2005)	26
Figura 5 – Configuração de um fluxo de detritos (Nunes; Sayão, 2014)	28
Figura 6 – Curvaturas Horizontais e Verticais (Valeriano, 2008)	34
Figura 7 – Variação da taxa de infiltração com o tempo sob condições de intensidade de precipitação constante (Pruski, 2008)	36
Figura 8 – Top 10 dos países mais afetados por desastres naturais em números absolutos, comparado com o Top 10 dos países mais afetados por desastres naturais para cada 100.000 habitantes (UNDRR, 2020a).	39
Figura 9 – (a) Percentagem de pessoas afetadas por tipo de desastre. (b) Percentagem de mortos por tipo de desastre (Ribeiro, 2015)	40
Figura 10 – Frequência mensal de movimentos de massa no Estado do Rio de Janeiro (CEPED UFSC, 2013)	41
Figura 11 – Composição do risco (Zonensein, 2007)	46
Figura 12 – Funções de pertinência (Gomide; Gudwin, 1994)	53
Figura 13 - Curva de vazão acumulada versus chuva acumulada de acordo com o Método CN (SCS, 1964)	56
Figura 14 – escoamento superficial direto em função da chuva e CN – solução gráfica (SCS, 1964)	58
Figura 15 – Fluxograma com a metodologia proposta	61
Figura 16 – Ilustração genérica do processo de normalização	66
Figura 17 – Modelo do Talude Infinito	69
Figura 18 – Delimitação da bacia hidrográfica do Córrego D’Antas e hidrografia principal com indicação das áreas urbanizadas.	76
Figura 19 – Delimitação do município de Nova Friburgo e das Bacias dos Rios Bengala e Córrego D’Antas (Telles; Rodrigues; Neto, 2015).	78
Figura 20 – Distribuição de precipitação média mensal na Bacia do Córrego D’Antas – Dados do Posto pluviométrico Piller	78

Figura 21 - Vistas aéreas do fluxo de detritos do Hospital São Lucas (Valverde Sancho, 2016).	80
Figura 22 – Delimitação da bacia hidrográfica do Córrego D’Antas e hidrografia principal	83
Figura 23 – Mapa de Inventário	85
Figura 24 – Modelo digital de elevação (MDE)	87
Figura 25 –Mapa de declividade	88
Figura 26 – Esquema de curvatura vertical	89
Figura 27 – Esquema de curvatura horizontal	89
Figura 28 – Mapa de curvatura vertical	90
Figura 29 – Mapa de curvatura horizontal	91
Figura 30 – Mapa de inventário e litologia	93
Figura 31 – Mapa de tipo de solo	95
Figura 32 –Mapa de uso do solo	96
Figura 33 – Mapa de CN	97
Figura 34 – Função de normalização de declividade	101
Figura 35 – Função de normalização de curvatura vertical	101
Figura 36 – Função de normalização de curvatura horizontal	102
Figura 37 – Função de normalização de infiltração	102
Figura 38 – Mapa de Suscetibilidade	104
Figura 39 – Mapa de profundidade de solo	109
Figura 40 – Mapa de carga crítica de água	111
Figura 41 – Mapa de Probabilidade	113
Figura 42 – Mapa de Perigo	114
Figura 43 – Valores de precipitação registrados no posto pluviométrico Fazenda Mendes para janeiro de 2011	115
Figura 44 – Densidade populacional	118
Figura 45 – Mapa de Vulnerabilidade	120
Figura 46 – Mapa de Risco	122

Lista de tabelas

Tabela 1 - Materiais envolvidos em movimentos de massa do tipo fluxo (Hungu et al., 2001).	23
Tabela 2 – Definições de fluxos de detritos (Kobiyama; Reginatto; Michel, 2014)	24
Tabela 3 – Base de dados de fluxos de detritos brasileiros (mod. Gramani, 2001)	31
Tabela 4 – Intensidade de chuva vs. Perigo (Ribeiro, 2015)	44
Tabela 5 – Escala de julgamento da técnica AHP (Saaty, 1990)	54
Tabela 6 – Valores de índice randômico (IR) em função da ordem da matriz (Saaty, 1990)	55
Tabela 7 – Grupos hidrológicos Método CN (Genovez; Neto; Sartori, 2005)	59
Tabela 8 – Condições de antecedentes de umidade do solo (SCS, 1964)	59
Tabela 9 – Classes de estabilidade (FS) (ABNT, 2009)	67
Tabela 10 - Capacidade média de recuperação relacionada à faixa de rendimento (Rezende, 2018)	74
Tabela 11 – Coordenadas das cicatrizes identificadas na Bacia do Córrego D’Antas em 19/01/2011 (mod. Silva, 2016)	84
Tabela 12 – Características dos tipos litológicos	92
Tabela 13 – Correlação entre Tipo de Uso do solo para obtenção de CN	94
Tabela 14 – Informação dos critérios qualitativos por cicatriz	98
Tabela 15 - Valores de normalização da litologia	103
Tabela 16 – Matriz de comparação paritária	103
Tabela 17 – Autovetor da matriz de comparação, ou seja, os pesos de cada critério – suscetibilidade	104
Tabela 18 – Avaliação do Mapa de Suscetibilidade	106
Tabela 19 – Valores de ângulo de atrito e peso específico dos materiais encontrados na bacia do Córrego D’Antas (Pelizoni, 2014; Silva, 2016)	110
Tabela 20 – Avaliação do Mapa de Probabilidade	116
Tabela 21 – Informações de vulnerabilidade e resiliência por setor censitário	119

1. Introdução

Desastres naturais são eventos que ocorrem em todo o mundo sob diversas formas causando, em muitos casos, perdas de vidas, econômicas e ambientais. Segundo informações das Nações Unidas, nas últimas duas décadas foram registrados 7.348 desastres ao redor do mundo que afetaram a vida de aproximadamente 4 bilhões de pessoas, das quais 1,23 milhões foram vítimas fatais. Esses desastres também causaram um prejuízo econômico de aproximadamente US\$2,97 trilhões em todo o mundo (UNDRR, 2020a).

Diferentemente de problemas sociais, os desastres naturais não ocorrem em determinado lugar em função da sua riqueza, desenvolvimento econômico ou educação da população. Suas causas podem ser tão complexas que esses eventos se tornam de difícil previsão, principalmente quanto à ocorrência e magnitude (Ribeiro, 2015).

Ainda que não se consiga extinguir a ocorrência dos desastres naturais, buscar entender o fenômeno e diagnosticar as suas principais causas é um primeiro passo para tentar mitigar suas consequências negativas.

Um outro passo também importante é buscar uma análise quali-quantitativa para prever uma eventual possibilidade desses desastres.

1.1. Contexto e Motivação da Dissertação

De acordo com *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR) o termo desastre refere-se a

“uma séria interrupção do funcionamento de uma comunidade ou sociedade envolvendo perdas e impactos em fatores humanos, materiais, econômicos e ambientais, de maneira a exceder a capacidade do elemento afetado de lidar com as consequências usando seus próprios recursos” (UNDRR, 2020b).

Quando a natureza desses eventos é de origem natural, é recebida a nomenclatura de “desastres naturais” (UNDRR, 2020b). Entram nessa classificação fenômenos como inundações, furacões, tornados, erupções vulcânicas, terremotos, tsunamis, movimentos de massa, entre outros (Figura 1).



Figura 1 – Classificação dos desastres naturais por tipo (mod. UNDRR, 2020a)

Quando esses eventos afetam elementos específicos de uma sociedade é configurada uma situação de risco. Nesse sentido, o risco é definido como “a presença de elementos vulneráveis em áreas expostas à eventos perigosos” (UNDRR, 2020b).

Segundo o relatório “*Human cost of disasters*” da UNDRR (UNDRR, 2020a), entre os anos de 1980-1990 e 2000-2019 houve um significativo aumento do número de desastres ao redor do mundo (Figura 2 e Figura 3).

Esse aumento é atribuído a muitos fatores, sendo os principais reportados pela UNDRR: (1) existência de uma alta densidade populacional nas áreas que mais registram desastres naturais, indicando que o aumento do risco não só depende da frequência e da probabilidade de ocorrência do evento perigoso, mas também é altamente influenciado pela exposição das pessoas à esse evento; (2) melhoramento da capacidade de registro e divulgação dos eventos; (3) aumento do número de casos de desastres relacionados ao aumento da temperatura média global, que por sua vez contribui para o aumento da intensidade e frequência de eventos climáticos extremos como secas, furacões e chuvas torrenciais.

Interessante notar que embora tenha havido um significativo aumento no número de desastres reportados, nas perdas econômicas associadas e no número de pessoas

atingidas, o número de mortes teve pouca variação. Isso mostra que embora existam mais pessoas expostas à eventos perigosos, estes não tem levado as pessoas ao óbito.



Figura 2 – Impacto dos desastres (mod. UNDRR, 2020a)



Figura 3 – Total de desastres registrados divididos por tipo (mod. UNDRR, 2020a)

Os desastres devidos a chuvas intensas afetam principalmente áreas montanhosas, provocando inundações ao longo dos canais naturais de drenagem e escorregamentos nas encostas. Essa situação é típica da região serrana do estado do Rio de Janeiro, cujos rios são hidraulicamente rápidos, com grande capacidade erosiva, dinamicamente relacionados com a intensidade das chuvas e marcados por enchentes de curta duração (Canedo; Ehrlich; Lacerda, 2011).

Segundo Pinho, Francisco e Salgado (2013), as fragilidades naturais das bacias hidrográficas dessa região estão, em geral, relacionadas a encostas com grandes declives, vales estreitos, camada de solo pouco espessa e afloramentos de rocha nas partes mais elevadas. Essas fragilidades naturais são agravadas pela ocupação desordenada do solo que levou a ocupação das chamadas “áreas de risco”, sobretudo, mas não exclusivamente, por populações de baixa renda, as quais constroem sem qualquer orientação técnica (Canedo; Ehrlich; Lacerda, 2011).

Dessa maneira, a existência de zonas de risco tem uma relação direta com o processo de formação e crescimento de cidades. Segundo Kobiyama e Michel (2010), muitas cidades iniciaram seu processo de desenvolvimento na ocupação da planície de inundação de rios como forma de garantir o abastecimento de água para seus habitantes. Contudo, ao ocupar as planícies inundáveis, a população fica mais exposta à eventos de inundações. Com o crescimento das cidades e com as planícies já ocupadas, o crescimento urbano passa a se dar no sentido das encostas, o que acarreta numa maior exposição ao risco de deslizamento e movimentos de massa em geral.

Desde a década de 60, o estado do Rio de Janeiro vem sendo palco de grandes tragédias provocadas por chuvas intensas, onde se destacam os eventos ocorridos nos anos de 1966, 1967, 1988, 2006, 2010 (Canedo; Ehrlich; Lacerda, 2011).

Contudo, em janeiro de 2011, a conjugação de chuvas frontais de longa duração, chuvas de verão de curta duração e alta intensidade, grande fonte de umidade proporcionada pela formação da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), características naturais das encostas da Serra do Mar, ocupação desordenada das encostas e margens de rios (Canedo; Ehrlich; Lacerda, 2011), propiciou a ocorrência do que ficou posteriormente conhecido como “Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro”.

Esse evento atingiu 7 municípios da região serrana do Rio de Janeiro (Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, São José do Vale do Rio Preto, Areal, Sumidouro e Bom Jardim) e afetou 305 mil pessoas, com 912 vítimas fatais oficiais, de acordo com os Dados da Defesa Civil Estadual. Com relação a perdas e danos, estimativas do Banco Mundial apontam para custos totais da ordem de R\$4,78 bilhões (Motta, 2014; Nunes, 2013).

Nessa ocasião, diversos movimentos de massa foram deflagrados resultando em danos catastróficos. Um tipo específico de movimento de massa observado em diversos locais foi do tipo “fluxo de detritos” (Valverde Sancho, 2016).

Segundo Schuster, Salcedo e Valenzuela (2002), a maior quantidade das mortes associadas a movimentos de massa na América Latina foi ocasionada por fluxos de avalanches, fluxos de detritos ou fluxos de lodos, todos de média-alta velocidade. Acredita-se que esse tipo de movimento seja o que mais provoca mortes e perdas materiais (Jakob; Hungr, 2005), tendo em vista seu poder de destruição (Hungr, 2003). Uma característica interessante desse tipo de movimento de massa é que ele possui uma matriz de água e grãos que, durante seu desenvolvimento, é capaz de transportar sólidos grossos e finos, devido à suspensão das suas partículas em água, fazendo com que seu comportamento seja semelhante ao de um fluido viscoso (Kobiyama; Reginatto; Michel, 2014; Takahashi, 2007). Quando o material sólido envolvido possui de 20 a 80% de sua granulometria na categoria graúda, é caracterizado um “fluxo de detritos” (Varnes, 1978).

O desastre de janeiro de 2011 teve tal magnitude que configurou um marco nas políticas de gestão de riscos e desastre, chamando a atenção para a necessidade de investimento em prevenção, monitoramento e mitigação de desastres naturais.

Ainda que não se consiga extinguir a ocorrência dos desastres naturais, buscar entender o fenômeno e diagnosticar as suas principais causas é um primeiro passo para tentar mitigar suas consequências negativas.

Ao se entender melhor os eventos ocorridos no passado, é possível desenvolver medidas de mitigação, melhorar a gestão do território e assim contribuir para a redução da vulnerabilidade das cidades, tornando-as mais resilientes (Magalhães et al., 2014; Ribeiro, 2015).

Segundo Canedo, Ehrlich e Lacerda (2011) essas medidas incluem: o mapeamento da área de risco, os sistemas de alerta, o planejamento de contingência, o plano de desocupação das áreas de risco e as obras de contenção de encostas e de controle de inundações.

Apesar do ocorrido em 2011 ter sido um evento atípico, alguns dos processos que potencializaram os seus danos são relativamente comuns e podem voltar a ocorrer, principalmente de forma localizada, como é o caso de fluxos de detritos.

Nesse contexto, a identificação e o mapeamento das áreas com predisposição à ocorrência de processos naturais catastróficos, surge como informação importante, sendo particularmente útil no planejamento urbano, zoneamento de risco e gestão ambiental. As metodologias apresentadas diferenciam-se principalmente na concepção do problema e formas de investigação, mas visam a definição de áreas mais susceptíveis à ocorrência do processo e a caracterização do risco envolvido (Silva, 2016). O estudo apresentado nessa dissertação analisa a ocorrência de fluxos de detritos, para promover a identificação de áreas perigosas e o mapeamento de risco para a população.

1.2. Objetivos da pesquisa

Os objetivos dessa dissertação dividem-se em objetivo principal e secundários, a saber:

1. **Objetivo Principal:** Propor uma metodologia para o mapeamento de risco de fluxo de detritos visando auxiliar autoridades competentes na hierarquização e identificação de áreas onde o fluxo de detritos possui grande risco de ocorrência, auxiliando no ordenamento da ocupação do território.
2. **Objetivos Secundários:** (1) analisar a ocorrência de fluxos de detritos; (2) identificar a probabilidade de ocorrência desses eventos, (3) e promover a identificação de áreas vulneráveis.

1.3. Proposta da dissertação

A metodologia proposta se baseou na utilização do Sistema de Informação Geográfica (GIS) como ferramenta de estudo de movimentos de massa e análises de risco.

A difusão dessa ferramenta foi tão importante que alguns modelos de estabilidade de encostas vêm sendo utilizados em conjunto com *softwares* GIS.

Como exemplo desses modelos pode-se citar o *Map-Based Probabilistic Infinite Slope Analysis* (PISA-m), *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model* (TRIGRS) e o *Shallow Slope Stability Model* (SHALSTAB).

Todos esses modelos têm em comum a utilização do Modelo do Talude Infinito para o cálculo da estabilidade das encostas. Contudo, diferem-se na escolha do modelo de infiltração utilizado. Enquanto o PISA-m não apresenta modelo específico de infiltração, o TRIGRS utiliza soluções analíticas para equações de escoamento vertical unidimensional e o SHALSTAB utiliza um modelo hidrológico de estado uniforme.

Na metodologia proposta nessa dissertação, a avaliação da estabilidade das encostas utilizou o Modelo do Talude Infinito, enquanto, para o modelo hidrológico, foi escolhido o Método CN do SCS.

Para avaliar a efetividade da metodologia proposta, ela foi aplicada na bacia do Córrego D'Antas em Nova Friburgo-RJ, uma região que foi palco de diversos fluxos de detritos deflagrados em janeiro de 2011.

Destaca-se que a metodologia proposta se destina, exclusivamente, a uma fase de planejamento de atuação no controle de eventos de fluxo de detritos, sendo, particularmente útil no auxílio à elaboração de leis de ocupação do solo, ou para a elaboração/atualização dos Planos de Contingência. Os resultados apresentados representam, portanto, uma fase prévia ao desenvolvimento de projetos e implementação de obras que deverão compreender uma análise mais profunda e detalhada da estrutura inicialmente concebida.

1.4. Organização dos capítulos

Ao todo, essa dissertação conta com 6 capítulos, além das referências bibliográficas. O Capítulo 1 (atual), conta com a introdução à temática da pesquisa, sua contextualização e seus objetivos.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica efetuada para o embasamento teórico da dissertação. Esse capítulo é subdividido de acordo com os principais tópicos abordados: características dos fluxos de detritos; desastres naturais; conceitos de risco, perigo e vulnerabilidade; uso do GIS em análise de estabilidade de encostas; lógica *fuzzy*; técnica AHP; Método CN.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta nessa dissertação. Nele estão descritas as formulações matemáticas utilizadas além dos procedimentos necessários à obtenção dos Mapas Perigo, Vulnerabilidade e Exposição e Risco.

No Capítulo 4 é feita a descrição da Bacia do Córrego D'Antas, escolhida como área de estudo, além das características dos eventos de fluxos de detritos ocorridos em janeiro de 2011.

O Capítulo 5 contém a aplicação comentada da metodologia proposta para a região escolhida como Estudo de caso.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa e as sugestões para futuras pesquisas correlatas.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, são discutidos os conceitos utilizados para o embasamento teórico do trabalho proposto. São apresentados aspectos referentes aos conceitos de movimentos de massa com ênfase nos fluxos de detritos, bem como uma discussão sobre a obtenção dos parâmetros necessários à análise proposta.

2.1. Fluxo de Detritos

Esse item é dedicado a uma classificação mais detalhada sobre o tipo de movimento conhecido na classificação de Varnes (1978) como “fluxo”, mais precisamente “fluxo de detritos”. Esses movimentos de massa dependem muito da topografia, condições climáticas, geomorfologia, geologia e de outras características intrínsecas das regiões. Por este motivo existem diversas definições para este movimento (Sacoto, 2017).

Corroborou para o surgimento de diversas definições o fato de as características e os mecanismos de fluxo de detritos permanecerem mal compreendidos por muito tempo, e devido a isto surgiram diversas nomenclaturas que refletem as várias origens, composições e aparências de fluxos de detritos (Sacoto, 2017).

2.1.1. Classificação

Existem muitas classificações para caracterizar os movimentos de massa. Em particular, a definição de fluxo é ainda mais discordante entre as diversas classificações (Hungry et al., 2001).

No que diz respeito à fluxo de detritos uma das primeiras definições encontradas na literatura é a de Stiny (1910) *apud* Valverde Sancho (2016). Nela, fluxo de detritos é definido como um fluxo intenso que se movimenta encosta abaixo, carregando consigo sólidos provenientes de uma determinada massa erodida. A massa mobilizada é então composta por água, solo, rocha, e apresenta o comportamento de um fluido viscoso.

Já segundo a classificação de Varnes (1978) todo movimento de massa que envolvem grandes distorções internas com fluxos sub-aquosos é classificado como “fluxo”. Se o material envolvido possuir de 20 a 80% de sua granulometria na categoria gráuda é caracterizado com fluxo de detritos.

Para Hutchinson (1988), “fluxo” pode ser entendido como todo movimento envolvendo rochas e solos, que possui características de movimento semelhantes a um fluido viscoso. A ruptura inicial é diretamente relacionada com o aumento da poropressão.

Segundo Hungr et al. (2001), fluxo de detritos é definido como um movimento característico de materiais saturados não-plásticos (areias e partículas finas com índice de plasticidade menor que 5%) que ocorrem em regiões de grande declividade, podendo atingir velocidades que variam desde rápidas a muito rápidas.

Além disso, esses autores também propuseram mudanças quanto ao tipo de material envolvido. A classificação proposta por Hungr et al. (2001) passa a considerar a divisão de materiais não com relação à sua granulometria, mas com relação à formação do depósito onde o material foi encontrado, da quantidade de água envolvida e do índice de plasticidade. Essa classificação está apresentada na Tabela 1 e segue o seguinte critério: o primeiro termo refere-se à origem do material e se ele se encontra agregado ou não; o segundo termo refere-se à coesão do material e ao seu Índice de Plasticidade (IP); o terceiro termo refere-se ao grau de saturação e ao Índice de Liquidez (IL).

Tabela 1 - Materiais envolvidos em movimentos de massa do tipo fluxo (Hungr et al., 2001).

Origem	Cracterística	Condição ¹	Nome
ORDENADO (marinho, lagunar, fluvial, eólico, vulcânico, antropogênico)	Não coesivo P.I.<5% Coesivo P.I.>5%	Seco ou Saturado Plástico ($I_L < 0,5$) Líquido ($I_L > 0,5$)	Cascalho, Areia, Silte Argila, “ <i>Quick clay</i> ”
NÃO ORDENADO (residual, coluvionar, glacial, vulcânico, antropogênico)	Não coesivo P.I.<5% Coesivo P.I.>5%	Seco ou Saturado Plástico ($I_L < 0,5$) Líquido ($I_L > 0,5$)	Detritos ² Terra, Lama
Turfa	Orgânico	Saturado	Turfa
Rocha	Fragmentado	Seco ou Saturado	Rocha

¹ Relacionado com o material encontrado nas proximidades da superfície de ruptura no momento da ruptura. Em vários casos, a condição do material pode ser deduzida através do comportamento do movimento de massa, especialmente pela velocidade.

² Detritos podem conter um considerável proporção de material orgânico.

Outros autores, como Burton e Bathurst (1998); Corominas et al. (2003); Moreiras (2004), fazem a classificação de acordo com o movimento, considerando-o semelhante à movimentação de um fluido. Já Rickenmann (1999) faz a classificação com relação ao material envolvido, considerando-o como um tipo de escoamento com alta concentração de sedimentos. É importante ressaltar que essas abordagens, embora diferentes, não são excludentes (Motta, 2014).

Segundo Iverson e Denlinger (1987), fluxo de detritos é definido como um fluxo de partículas sólidas de rocha, solo e matéria orgânica, formando uma matriz de fluido que inclui água no estado líquido, partículas finas carregadas em suspensão, sólidos dissolvidos e bolhas de gás.

Já Kobiyama, Reginatto e Michel (2014) definem fluxo de detritos como um fluxo composto por uma mistura de sedimento e água que se movimenta continuamente por ação da gravidade, com enorme mobilidade.

A Tabela 2 apresenta outras definições encontradas na literatura para fluxo de detritos.

Tabela 2 – Definições de fluxos de detritos (Kobiyama; Reginatto; Michel, 2014)

Autores	Conceitos
Costa (1988)	O fluxo de detritos é fluido não newtoniano viscoplástico ou dilatante, fluindo de maneira laminar e com perfil de concentração de sedimento uniforme. A concentração de sedimento varia de 70 a 90% do peso total (47 a 77% do volume). A tensão cisalhante é maior que 40 N/m ² .
Jan & Shen (1997)	O fluxo de detritos é um fluxo gravitacional de material composto por uma mistura de solo, rocha, água e/ou ar, oriundo de escoamento com elevada quantidade de escoamento superficial. Suas propriedades variam de acordo com a quantidade de água e argila, tamanho dos sedimentos e distribuição granulométrica.
USGS (1997)	Os fluxos de detritos são escoamentos de movimento rápido, os quais ocorrem nos mais diversos locais do mundo. Eles são particularmente perigosos à vida e à propriedade, pois se movimentam abruptamente e destroem objetos no seu caminho, além de frequentemente ocorrerem sem alerta.
Imaizumi et al. (2008)	Os movimentos de massa são divididos em dois tipos: de encostas e de canais. Os movimentos de encostas e de canais são considerados escoamentos e fluxos de detritos, respectivamente.
IRDR (2014)	O fluxo de detritos é um tipo de escoamento que ocorre quando uma chuva intensa provoca a descida de uma grande quantidade de detritos (troncos, rochas, lamas, etc.) em encostas por ação da força gravitacional.

Uma característica interessante dos fluxos de detritos é que eles possuem uma matriz de água e grãos em forma de fluxo parcialmente ou totalmente saturado, que transporta partículas grossas e finas. Essa massa transportada costuma carrear uma mistura de água e materiais soltos não uniformizados, de baixa plasticidade, compostos por uma miscelânea de areias, seixos, matacões e siltes. Podem estar incluídos na sua composição materiais orgânicos como troncos, galhos, entre outros. A quantidade e tipo de materiais dependem das diferentes fontes de detritos que estão envolvidas no evento (Kobiyama; Reginatto; Michel, 2014).

Durante o desenvolvimento de um fluxo de detritos, os sólidos são transportados devido à suspensão das suas partículas em água, fazendo com que seu comportamento seja semelhante ao de um fluido viscoso. Nesse caso, o comportamento dinâmico de um fluxo de detritos deve levar em consideração a atuação conjunta das forças dos sólidos (regidos pela equação de Coulomb) e das forças hidráulicas (regidas pela lei da Viscosidade de Newton) (Takahashi, 2007).

Além disso, durante o evento, características do fluxo como a massa específica, a velocidade, a vazão, as interações entre os grãos do fluido viscoso e as interações entre

os grãos e o leito do rio variam, o que deixa o cálculo das forças atuantes ainda mais complicado (Takahashi, 2007).

Nesse sentido, surge o conceito de “sedimentos hiperconcentrados” ou “fluxo hiperconcentrado” para descrever os fenômenos regidos por uma reologia determinada pela interação de partes sólidas e líquidas em movimento. Um “fluxo hiperconcentrado” é um fluido em movimento que transporta uma alta porcentagem de material sólido. Nesse tipo de fenômeno a consideração da hidrodinâmica não-linear, que considera a interação sólido-fluido como determinante para o comportamento do fluxo, tem ganho importantes avanços teóricos (Alvarado, 2006).

Pelas implicações que envolvem este movimento, o fluxo de detritos sempre é classificado como um movimento de massa catastrófico, sendo capaz de produzir alterações topográficas importantes, devido ao seu alto poder de erosão e destruição (Rodine, 1974; Takahashi, 2007).

Tal característica está associada à viscosidade e ao empuxo do fluido, que permite que o fluxo seja capaz de suportar e movimentar grandes e pesados blocos rochosos devido às forças de atrito e colisão destes blocos com a mistura formada pelas diversas partículas em movimento. Além disso, devido a sua fluidez, esse grande volume de material transportado pode alcançar longas distâncias (Alvarado, 2006).

Os fluxos de detritos podem ainda ser subdivididos em 4 categorias em função dos materiais envolvidos e as velocidades alcançadas (Jakob; Hungr, 2005). Essas categorias são:

- Corrida de Detritos (*Debris Flow*): movimento rápido a extremamente rápido de detritos saturados, não plásticos, em locais confinados ou não, com índice de Plasticidade (IP) inferior a 5% na fração solo;
- Corrida de Lama (*Mud Flow*): movimento rápido a extremamente rápido de lama (material fino) saturada, em locais confinados ou não, com muita água envolvida e alta plasticidade;
- Inundação de Detritos (*Debris Flood*): movimento rápido, a partir do movimento de água, com elevada quantidade de detritos, em local confinado ou não;
- Avalanche de Detritos (*Debris Avalanche*): movimento rápido ou extremamente rápido de material superficial, saturado ou parcialmente saturado, em local confinado ou não.

Quanto à forma, podem-se distinguir dois tipos básicos de movimentos, conforme mostrado na Figura 4, baseados na topografia e geologia local:

- Fluxo de detritos não canalizados ou abertos: formam seu próprio caminho pelas encostas, como faixas ou camadas, antes de depositar o material em áreas mais baixas, ou com gradientes mais baixos, ou onde as taxas de fluxo são reduzidas (Nettleton; Martin; Hencher, 2005);
- Fluxo de detritos canalizados: seguem um caminho preferencial de escoamento. Esses caminhos são geralmente canais naturais de drenagem de primeira ou segunda ordem ou outras condições topográficas que controlam as direções de fluxo, tais como cicatrizes de eventos anteriores, etc. A presença desses canais de drenagem é muito importante na formação de fluxo de detritos, pois são caminhos preferenciais de escoamento de água superficial, o que, por sua vez, contribui para aumentar a fluidez da massa mobilizada. Outra importância desses canais é que eles proporcionam certo confinamento lateral, o que promove um aumento da altura do movimento, permitindo a geração de gradientes de velocidades na vertical mais significativos (Hungr et al., 2001). Em geral possuem consistência semelhante a um concreto úmido (Hutchinson, 1988), com densidade elevada e alto teor de sólidos, podendo chegar a 80% (Cruden; Varnes, 1996). Os fluxos de detritos canalizados podem transportar materiais com alguns metros de diâmetro, tais como blocos rochosos.

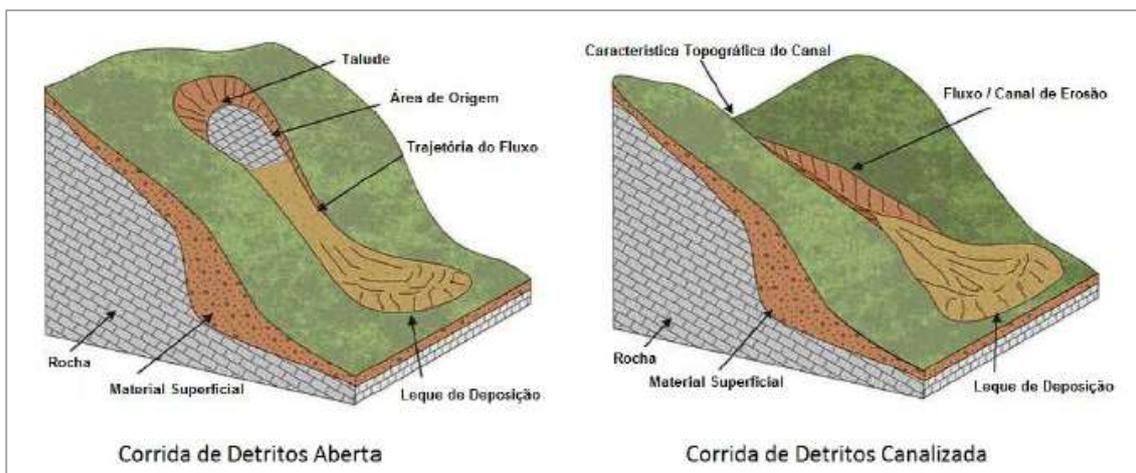


Figura 4 – Formas de fluxos de detritos, quanto à topografia (Nettleton; Martin; Hencher, 2005)

Quanto a sua estrutura, fluxos de detritos podem ser divididos em 3 grandes zonas: (a) zona de iniciação; (b) zona de transporte; (c) zona de deposição (Figura 5).

- Zona de iniciação: Geralmente essa é a zona mais alta do movimento, estando localizada na parte alta da encosta, ou em locais mais íngremes. Vandine (1996) reporta inclinações maiores que 25° . É nessa zona onde ocorre a ruptura. A mobilização representa o processo pelo qual uma massa aparentemente rígida de solo, sedimento, ou rocha passa de um estado estável para um estado instável que dará origem ao fluxo de detritos (Nunes; Sayão, 2014; Takahashi, 1981).
- Zona de transporte: corresponde ao local percorrido pelo fluxo de detrito quando o mesmo se encontrava em movimento. Essa zona é caracterizada por ser o local onde ocorre o incremento da massa mobilizada (seja por erosão ou por carreamento do material local). Geralmente, essa zona é caracterizada por possuir inclinações mais suaves quando comparada à zona de iniciação. Existe uma certa divergência quanto à inclinação característica dessa zona. Bathurst, Burton e Ward (1997) reportam inclinações da ordem de 10° , já Costa e Fleisher (1984) propõe inclinações da ordem de 15° . O movimento nessa zona ocorre através de uma onda (ou várias) e é composta por uma frente rochosa, composta por partículas de maior diâmetro como pedregulhos, blocos de rocha e material não liquefeito, pelo corpo principal, composto por uma massa de material fino e detritos liquefeitos, e pela cauda, composta por fluxo turbulento composto por uma carga de sedimentos dissolvidos em água (Jakob; Hungr, 2005).
- Zona de deposição: corresponde à zona onde a massa se deposita. Essa zona possui um formato semelhante à um leque, sendo por isso conhecida como leque de detritos (*debris fan*). Vandine (1996) indica que a zona de deposição é dividida em duas partes, a primeira com declividades menores do que 15° , e a segunda, com declividades menores do que 10° . A deposição ocorre quando: (1) o movimento perde sua energia, motivado pela redução na declividade do canal de drenagem; (2) o fluxo deixa de ser canalizado; (3) o movimento é impedido por uma barreira natural ou artificial; (4) atinge sua espessura crítica, relacionada pela coesão das partículas, ângulo de atrito interno do fluxo e declividade do terreno.

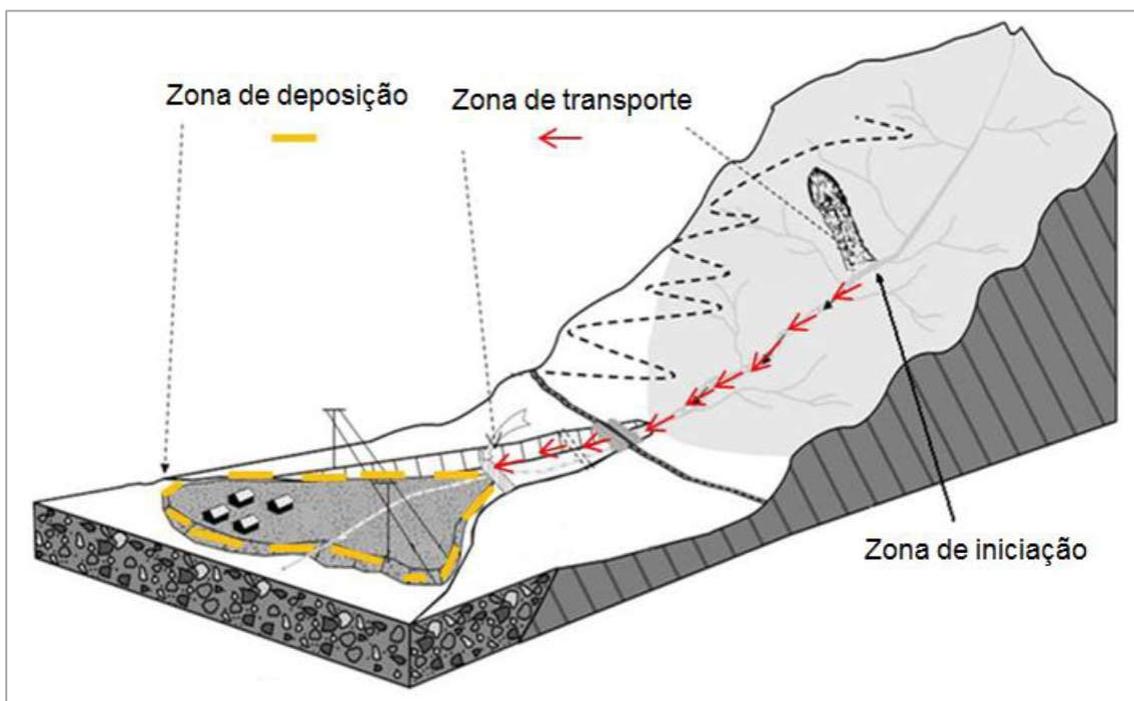


Figura 5 – Configuração de um fluxo de detritos (Nunes; Sayão, 2014)

2.1.2. Mecanismos condicionantes e deflagradores

Fluxos de detritos estão muito ligados aos processos hidrogeológicos de bacias hidrográficas. Observa-se que existem diversos fatores que influenciam na sua ocorrência, dentre eles podemos citar: estrutura geológica, topografia, características do solo e da vegetação, hidrologia, intensidade de precipitações e as atividades humanas no local (Lin; Cheng; Peng, 2012).

Os fatores que causam fluxos de detritos podem ser então divididos em duas categorias. A primeira são os fatores condicionantes, ou seja, é necessária uma combinação de condições para que o movimento se inicie. Essas combinações podem incluir efeitos de (Motta, 2014):

- Condição climática: processos de gelo e degelo enfraquecem a estrutura do solo e ambientes extremamente quentes ressecam o solo favorecendo a erosão por água;
- Intemperismo: diminuição da resistência ao cisalhamento em decorrência de processos intempéricos e formação de uma superfície potencial de ruptura.

- Vegetação: raízes de plantas podem se desenvolver dentro de fraturas o que aumenta as tensões de tração em seu interior favorecendo a sua abertura. Além disso, cria-se um caminho preferencial para a passagem da água o que favorece o intemperismo no seu interior.
- Mudanças no uso do solo e atividades de construção: construções envolvendo corte e aterro, obras de drenagem, desmatamento etc., provocam mudanças no ambiente que podem favorecer a ocorrência de desabamentos e processos de erosão.
- Chuvas: chuvas de pequena e média intensidade podem não provocar ruptura de encostas, mas podem contribuir para a sua deterioração. Contudo, chuvas intensas são capazes de levar um grupo de encostas à ruptura.

A segunda causa são os fatores deflagradores, ou seja, são aqueles fatores que por si só iniciam o movimento. O fator mais significativo para o início dos movimentos é a elevação da poropressão ao longo de superfícies de ruptura pré-existentes ou potenciais (Motta, 2014), geralmente deflagrados por chuvas intensas. Starkel (1979) enfatiza que existe uma chuva capaz de provocar uma corrida de massa. Essa chuva ele chamou de chuva crítica e ela possui uma combinação específica entre intensidade e duração.

Segundo Costa e Fleisher (1984), o mecanismo mais estudado e presente na literatura é o desenvolvimento de fluxos de detritos decorrente de precipitações e degelo. Esse aumento da quantidade de água promove uma elevação da poropressão, o que, por sua vez, diminui a resistência ao cisalhamento.

Após a iniciação ocorre a propagação, que é o deslocamento da massa mobilizada pelas encostas ou fundos de vale, finalizando-se na área de deposição. Durante a propagação há a incorporação dos materiais detríticos em sua trajetória: matacões, blocos de rochas, areia, silte, argila e restos vegetais (às vezes, árvores inteiras). Isto se dá com velocidade e densidade elevadas, gerando energia cinética altamente destrutiva. Por esse motivo, fluxos de detritos são os movimentos de massa que apresentam maior magnitude e intensidade de modificação do relevo, podendo alcançar dimensões catastróficas (Avelar; Lacerda; Netto, 2006).

2.1.3. Histórico de fluxos de detritos

O fluxo de detritos consiste em uma mistura de sedimentos e água que se move como um fluido contínuo, impulsionado pela força gravitacional. O material sólido que compõe o fluxo tem sua origem nos deslizamentos de encostas e na erosão do leito dos talwegues íngremes da bacia hidrográfica, sendo mobilizados essencialmente pela água advinda da chuva (Projeto GIDES, 2018).

Esse material tende a se deslocar encosta abaixo seguindo a calha de córregos e/ou rios, aumentando seu volume até atingir trechos em que a declividade se torna mais suave, onde o material se deposita e transborda além da seção do canal (Projeto GIDES, 2018).

De acordo com Santi et al. (2011), os fluxos de detritos são o tipo de ameaça natural mais comum nas regiões montanhosas, vulcânicas, semi-áridas ou subpolares e são o tipo de movimento de massa que gera a maior quantidade de mortes e perdas materiais, sendo considerados de natureza catastrófica (Jakob; Hungr, 2005).

Eventos destrutivos de fluxos de detritos foram reportados na China, na parte alta das montanhas no Paquistão, no Afeganistão, na Índia, na zona montanhosa no Japão, nas zonas altas da Nova Zelândia, entre outros lugares (Hewitt, 2004; Li; Al, 2004; Nakano, 1974; Selby, 1993; Xu; Zhang; Li, 2011).

No Brasil, desastres associados a fortes chuvas e a movimentos de massa têm sido documentados desde 1711, quando o Corpo de Bombeiros do Rio de Janeiro fez um dos primeiros registros de inundações geradas por intensas chuvas (Silva, 2016).

Os fluxos de detritos ocorridos no Brasil, em sua maioria, possuem localização nas principais áreas montanhosas: Serra do Mar, Serra de Maranguape e Serra Geral, evidenciando que esses movimentos de massa ocorrem geralmente em áreas escarpadas, sendo deflagrados por chuvas torrenciais curtas ou chuvas moderadas prolongadas (Silva, 2016).

Alguns dos casos de fluxos de detritos mais significativos da história brasileira estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Base de dados de fluxos de detritos brasileiros (mod. Gramani, 2001)

Ordem	Data	Local	UF	Volume (m ³)
1	1996	Córrego das Pedras - Cubatão	SP	16000
2	1996	Bacia do Papagaio	RJ	42000
3	2008	Rio dos Cedros A	SC	55920
4	2008	Rio dos Cedros B	SC	61340
5	1976	Braço Norte - Cubatão	SP	62000
6	1996	Bacia do Quitite	RJ	90000
7	1971	Ferrovia de Santos	SP	100000
8	1994	Córrego das Pedras - Cubatão	SP	150000
9	1976	Rio Cachoeira - Cubatão	SP	156000
10	1986	Lavrinhas	SP	160000
11	1999	Via Anchieta km42	SP	300000
12	1975	Grota Funda	SP	1000000
13	1995	Timbé do Sul	SC	1000000
14	1967	Caraguatatuba	SP	4500000
15	1967	Serra das Araras	RJ	10000000

Um dos principais desafios no estudo dos fluxos de detritos inclui estimar as zonas de risco. Segundo Rogelis e Werner (2014), alguns autores tem apresentado pesquisas feitas com a finalidade de identificar áreas susceptíveis a fluxos de detritos usando metodologias quantitativas como correlações matemáticas, sensoriamento remoto dentro de um ambiente GIS, são eles: De Scally and Owens (2004); De Scally et al. (2010); Wilford et al. (2004); Rowbotham et al (2005); Chen e Yu (2011); Santangelo et al. (2012); Crosta e Frattini (2004); Griffiths et al. (2004); Kostaschuk (1986); Patton e Baker (1976); Bertrand et al. (2013).

Esses estudos buscam identificar a susceptibilidade de uma região à formação de fluxos de detritos a partir de suas características físicas. Uma das conclusões desses estudos é que parâmetros morfológicos de uma bacia de drenagem possuem forte correlação com os processos de inundação e formação de fluxo de detritos que ocorrem no seu interior (Crosta et al., 2001). Essas características morfológicas da bacia também contribuem para o tamanho do fluxo e seu poder de destruição.

2.1.4. Características das encostas que influenciam nos movimentos de massa

Segundo Souza (2014), existem três características principais das encostas que atuarão como dinamizadoras dos movimentos de massa, são elas: (1) geométricas (declividade e concavidades vertical e horizontal); (2) geológicas (tipos de solos e rochas que a compõem); (3) ambiente fisiográfico em que se insere (clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, etc). Ressalta-se que a alteração natural ou artificial destas condicionantes pode facilmente implicar a alteração da condição de sua estabilidade.

Os fatores topográficos têm influência direta na instabilidade das encostas e são os mais utilizados na previsão de movimentos de massa pela grande maioria dos autores. Os parâmetros mais usados são a declividade da encosta e a forma do seu perfil (curvaturas verticais e horizontais côncavas ou convexas), estas duas características do relevo exercem um papel preponderante na deflagração de movimentos de massa (Silva, 2016).

A declividade, seja ela natural ou resultante da intervenção humana, influencia no desencadeamento de movimentos de massa, tendo grande importância nos processos geomorfológicos e no condicionando cursos de água (Christofoletti, 1974).

Além disso, a velocidade de deslocamento do material e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional à declividade. Portanto, existe uma relação direta entre a erosividade e a declividade. Canais perenes ou temporários encaixados próximos às cabeceiras apresentam maior erosividade, devido à elevada declividade e alto gradiente de energia. Assim, pode-se deduzir que regiões fortemente dissecadas (ou seja, com alta densidade de drenagem) e alta declividade apresentam maior número de pontos favoráveis a riscos de escorregamentos, como indicado por Christofoletti (1974).

As declividades acima de 30° apresentam risco de deslizamentos mais frequente. Acima de 60° o regolito é menos espesso e, teoricamente, diminuiria o risco de escorregamentos. Contudo, existem casos registrados de deslizamentos em regiões com declividades superiores à 60° (Souza, 2014). Só no Estado do Rio de Janeiro, 25 fenômenos de deslizamentos foram verificados em áreas cujo manto de regolito era pouco

espesso, principalmente ao redor de cabeceiras de drenagem e em épocas de pluviosidade elevada, tornando exposta a rocha de base (Fernandes; Amaral, 1996).

Especificamente para fluxos de detritos, Lin, Cheng e Peng (2012) definem que ocorrem, geralmente, em área com declividades maiores do que 10°, sendo mais comuns em áreas cuja declividade varia entre 15° e 30°. Importante ressaltar que essa faixa de valores é apenas uma sugestão, observa-se, inclusive, que os fluxos de detritos brasileiros, comumente, ocorrem em declividades mais acentuadas.

No que diz respeito aos fatores de forma das encostas, estas podem ser classificadas em côncavas, convexas e retilíneas, ou em até combinações dessas classificações (Figura 6). Esse formato influencia na ocorrência e no tipo de movimento de massa que pode acontecer em determinada região (Souza, 2014).

A curvatura horizontal das vertentes refere-se ao direcionamento dos fluxos de água orientados pela forma da vertente. Segundo Bigarella (2003), esse parâmetro indica as áreas de escoamento superficial divergente e convergente. Áreas convergentes tendem a concentrar os fluxos d'água, aumentando seu potencial de erosão pluvial. Sendo assim, as vertentes que apresentam configuração côncava ou que possuem segmentos côncavos em sua seção (*hollows*), por serem zonas de convergência de fluxo de água e por possuírem material disponível para a mobilização (pois tem maior volume de material depositado, como colúvio ou tálus), são as mais favoráveis à ocorrência de deslizamentos (Fernandes; Amaral, 1996).

Áreas de intensa pluviosidade combinada a regiões de relevo com formas mais verticalizadas como espigões e serras escarpadas, com elevadas altitudes, vertentes longas e altas declividades também são propícias a deslizamentos (Souza, 2014).

Já a curvatura vertical relaciona-se com os processos de transporte e acumulação de água, minerais e matéria orgânica no solo. Assim, as formas das vertentes poderá ser um indicativo da dinâmica erosiva da área abordada (Valeriano, 2008).

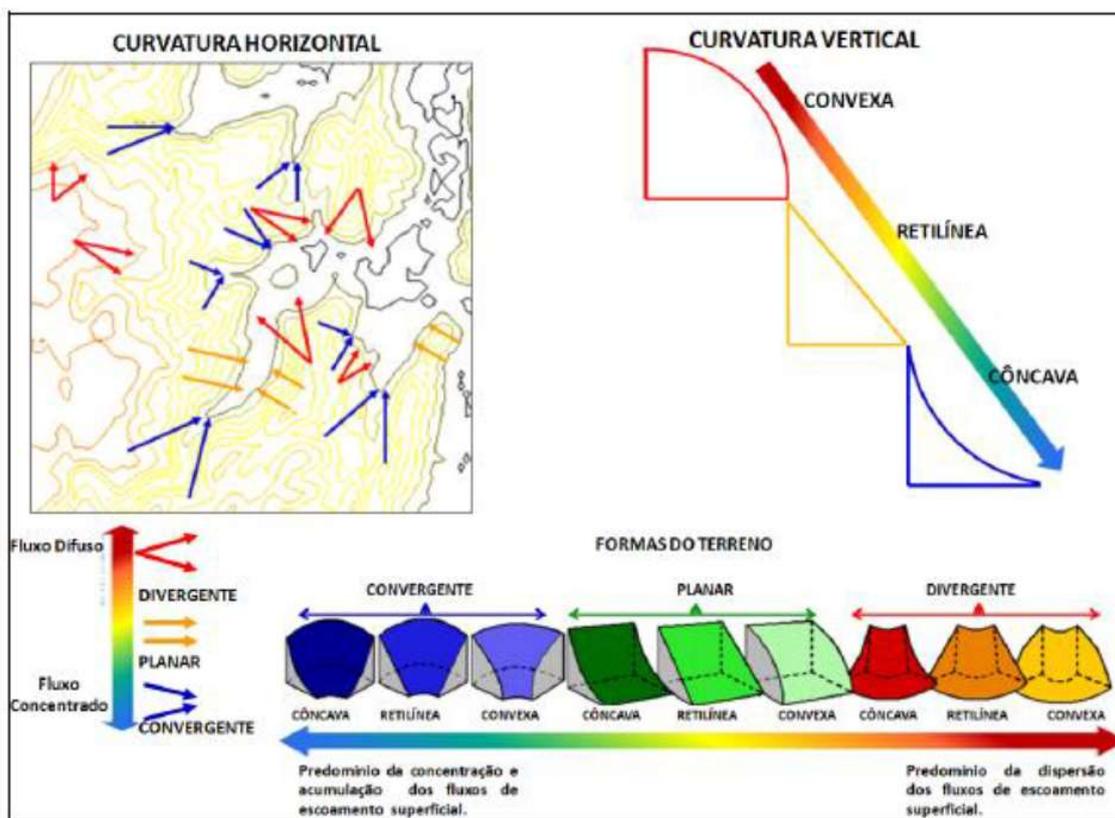


Figura 6 – Curvaturas Horizontais e Verticais (Valeriano, 2008)

Segundo Souza (2009) muitas das feições das encostas possuem sua origem associada a processos geológicos e geomorfológicos que atuaram no passado e que, em muitos casos, ainda atuam naqueles locais. A geologia do local possui papel de fundamental importância no processo de deslizamento de encostas. Entre os processos geológicos e geomorfológicos vale destacar: fraturas, falhas e propriedades dos solos.

Os fatores geológicos que condicionam os movimentos de massa levam em conta o tipo e a distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas, que podem ser divididos em maciços rochosos e terrosos. Frente aos fenômenos de instabilidade, cada litologia comporta-se de forma diferente, apresentando variabilidade nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, permeabilidade, além de outras características (Silva, 2016).

Nos maciços rochosos, os principais processos de instabilização ocorrem em taludes de corte e em áreas de escarpa. O grau de alteração da rocha e as estruturas como falhas, disjunções e juntas de alívio servem como zonas preferenciais de percolação de

água e alteração de rocha, diminuindo a resistência ao cisalhamento e atuando na deflagração dos processos de instabilização (Silva, 2016).

De modo geral, as falhas atuam como caminhos preferenciais de alteração, permitindo que a frente de intemperismo avance para o interior do maciço de modo muito mais efetivo. Muitas destas descontinuidades são formadas pelo alívio de pressão, encontrando-se intemperizadas, o que causa deslizamentos (Wolle; Carvalho, 1989).

A presença de diques básicos em maciços rochosos graníticos-gnáissicos pode influenciar a dinâmica hidrológica de modo semelhante às falhas, podendo mesmo condicionar a ocorrência de escorregamentos, como mostrado por Amaral e Porto (1989).

No que diz respeito às propriedades do solo, Selby (1993) afirma que a resistência ao cisalhamento dos solos depende de vários fatores, entre eles: os tipos de minerais e suas estruturas, tipos de cátions adsorvidos no solo, forma e distribuição do tamanho das partículas, teor de água, tipo de solo, fatores externos, tais como o clima e vegetação; material parental (Lacerda; Bahia, 1998).

Outra característica importante é a textura do solo. Essa característica está ligada não só a suscetibilidade à erosão, mas também a porosidade. De um modo geral, sabe-se que os solos de textura mais grossas, com altos teores de areia, apresentam uma maior susceptibilidade à ação erosiva (Venturim; Bahia, 1989). Os solos finos tendem a apresentar boa agregação quando secos, porém, quando umedecidos, passam a ter uma baixa taxa de estabilidade (Souza, 2014).

A textura do solo também está diretamente ligada com a porosidade e à movimentação de água dentro da massa de solo. A porosidade consiste na relação de volume de espaços vazios contidos no volume total de solo. Os poros presentes na massa de solo podem ser classificados em microporos ou macroporos, dependendo diretamente da arrumação e do grau compactação das partículas, sendo determinantes na quantidade de espaços disponíveis à percolação da água (Albuquerque et al., 1993). Contudo, essa propriedade pode ser modificada devido aos processos físicos, químicos, biológicos e de manejo do solo.

Outro ponto importante na estabilidade de encostas é a hidrologia de encostas (Sidle; Pearce; O'loughlin, 1985). O regime de chuvas (principalmente intensidade e duração),

juntamente com a taxa de infiltração e de transmissividade e a evapotranspiração controlam as pressões de água no solo, influenciando na estabilidade da encosta.

Para um dado evento de chuva, o processo de infiltração da água que incide sobre a superfície da encosta ocorre em três fases distintas: entrada, estocagem e transmissão de água dentro do solo (Dunne; Leopold, 1978).

Para Hillel (1980), a capacidade de infiltração do solo varia com tempo, e depende da umidade inicial e da sucção do solo, como também da textura e estrutura. Assim, a capacidade de infiltração é controlada por diversas variáveis, tais como: características das chuvas, presença de vegetação, umidade antecedente, estrutura do solo, manejo, entre outras.

De maneira geral, no processo de infiltração, a água é puxada para dentro do solo por forças gravitacionais, que movem a água verticalmente, e de capilaridade, que impulsionam a água em todas as direções (Dunne; Leopold, 1978). Quando a precipitação que atinge o solo possui intensidade menor do que a capacidade de infiltração, toda a água precipitada penetra no solo, provocando progressiva diminuição na capacidade de infiltração.

Persistindo a precipitação, a partir de um tempo, a taxa de infiltração iguala-se à capacidade de infiltração, passando a decrescer com o tempo e tendendo a um valor constante, caracterizado como a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) (Figura 7) (Pruski, 2008)).

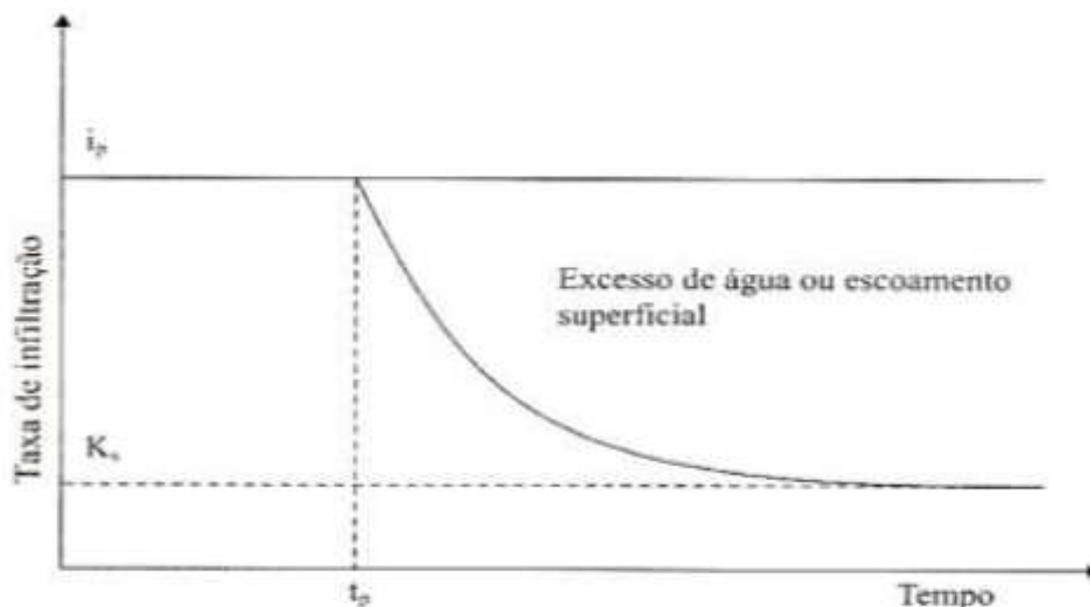


Figura 7 – Variação da taxa de infiltração com o tempo sob condições de intensidade de precipitação constante (Pruski, 2008)

No que diz respeito a fluxos de detritos, a suscetibilidade natural de uma bacia hidrográfica à sua formação possui semelhanças com a geração de escoamentos superficiais para um dado evento de chuva. Ambos eventos são influenciados pelas condições do tipo de solo, das atividades humanas exercidas na região e até pelas condições de cobertura vegetal (Jakob, 1996). As características de tipo e uso do solo vão influenciar principalmente na infiltração da água de chuva na encosta, o que por sua vez influencia na sua estabilidade.

2.2. Desastres Naturais

Uma das agências, com abrangência internacional, que lidera os estudos de saúde pública, conflitos humanos e impactos socio-econômicos de desastres naturais e tecnológicos, é o Centro para Pesquisa em Epidemiologia de Desastres (CRED - *Center for Research on the Epidemiology of Disasters*). Fundado em 1973 pela Escola de Saúde Pública da UCLouvain, na Bélgica, o CRED possui o mais abrangente banco de dados de eventos emergenciais em todo o mundo, o *Emergency Events Database* (EM-DAT).

Esse banco de dados tem a função de fornecer dados objetivos para dar suporte às medidas de prevenção de desastres em nível nacional e internacional, além de fornecer uma base para avaliação da vulnerabilidade e apoio humanitário. Atualmente, o EM-DAT conta com o registro de mais de 24.000 desastres naturais e tecnológicos em todo o mundo entre os anos de 1900 até o presente momento.

Esse banco de dados é constantemente alimentado e, para que um desastre possa ser registrado nesse banco de dados, ao menos um dos seguintes critérios deve ser respeitado: (1) ter sido registrada a morte de 10 ou mais pessoas; (2) ter afetado pelo menos 100 pessoas; (3) ter sido declarado estado de emergência; (4) ter sido solicitado um pedido de ajuda internacional frente à catástrofe (UNDRR, 2020a).

Esse desastre pode ser do tipo natural, quando seu evento deflagrador é gerado por circunstâncias naturais, sejam elas de origem geológicas, hidrometeorológicas ou biológicas; ou do tipo tecnológico, quando seu evento deflagrador é gerado por atividades

humanas como degradação ambiental ou ameaças tecnológicas (como acidentes químicos e nucleares) (UNISDR, 2004).

Segundo a UNDRR (2020a), desastres naturais podem ser subdivididos em 6 categorias de acordo com o tipo de perigo que eles oferecem. Essas categorias são:

- Geofísicos: incluem terremotos, movimentos de massa seca, atividade vulcânica.
- Hidrológicos: incluem inundações, deslizamentos, tsunamis.
- Meteorológicos: incluem tempestades, temperatura extremas, neblinas.
- Climatológicos: secas, congelamento de lagos, queimadas.
- Biológicos: incluem acidentes com animais, epidemias, infestação de insetos.
- Extraterrestres: incluem impacto de meteoros, outros eventos ligados ao espaço.

Seja qual for o desastre considerado, as suas consequências serão mais ou menos graves, dependendo das condições de vulnerabilidade e de resiliência do elemento atingido por estes eventos.

De maneira geral, a população está se tornando mais vulnerável a esses fenômenos, principalmente em países em desenvolvimento, onde o crescimento urbano se faz de forma desordenada e uma parcela considerável das pessoas vive em moradias frágeis e em áreas de risco, como margens dos rios e encostas (Tominaga, 2009), estando, portanto, expostas à eventos perigosos.

Embora não seja possível reduzir a ocorrência dos processos naturais que deflagram eventos perigosos, é possível mitigar suas consequências reduzindo a exposição dos elementos aos eventos perigosos e aumentando a sua resiliência (Ribeiro, 2015).

2.2.1. Desastres naturais no Estado do Rio de Janeiro

Segundo o relatório *Human cost of disasters 2000-2019* (UNDRR, 2020a), o Brasil está entre os 10 países com população mais afetada por desastres naturais, em números absolutos. Também fazem parte dessa lista países como Estados Unidos, Etiópia, Paquistão, Índia, Bangladesh, Tailândia, Vietnã, China e Filipinas (Figura 8).

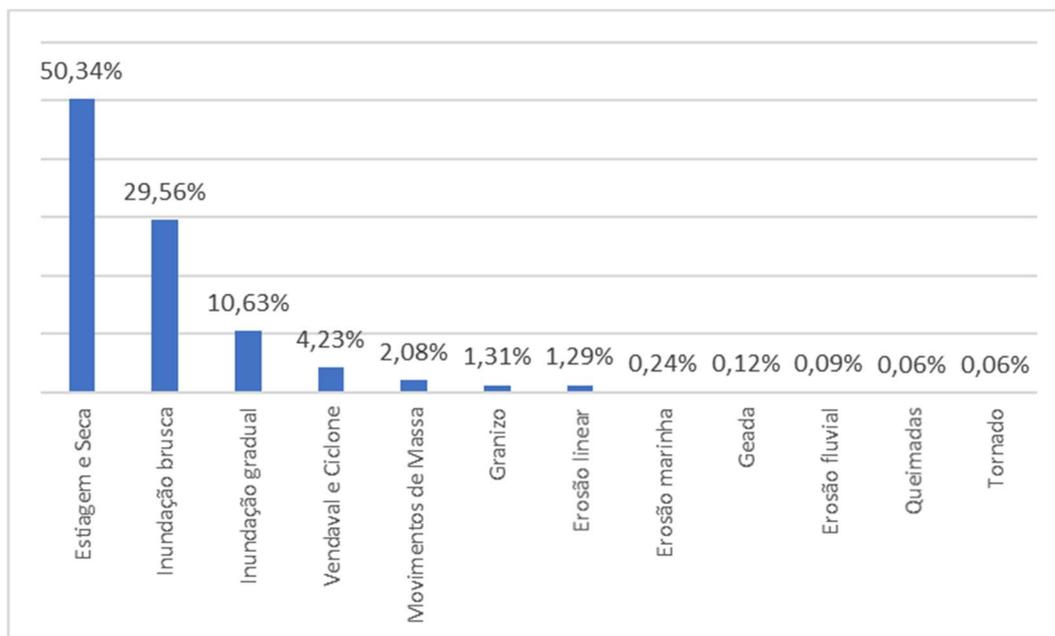


Figura 8 – Top 10 dos países mais afetados por desastres naturais em números absolutos, comparado com o Top 10 dos países mais afetados por desastres naturais para cada 100.000 habitantes (UNDRR, 2020a).

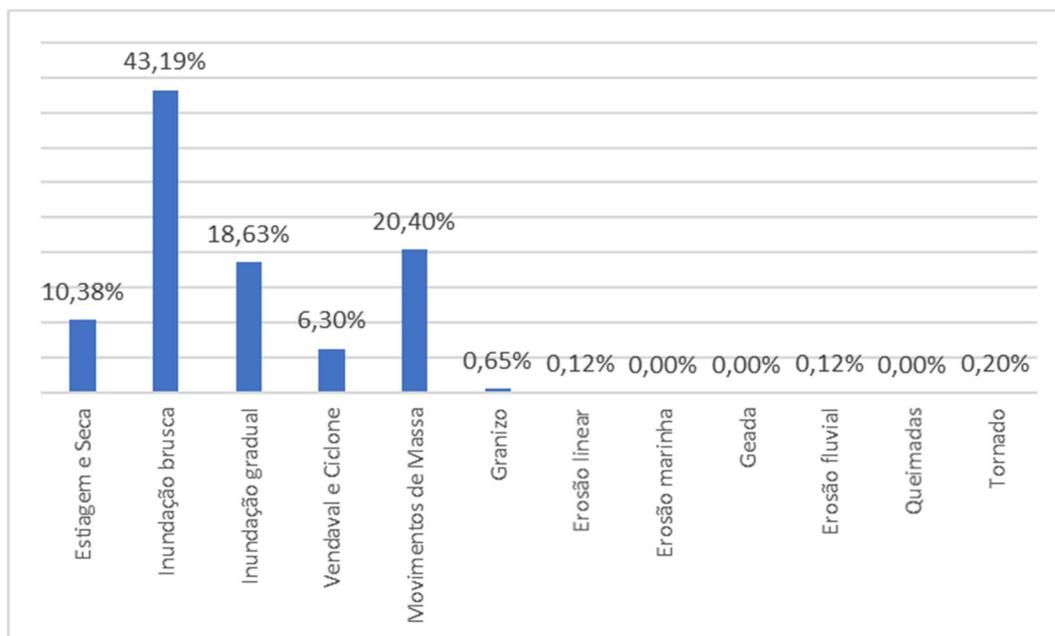
No Brasil, são muitos os casos de desastres naturais registrados ao longo da sua história, sendo o desastre da Região Serrana do Rio de Janeiro considerado um marco nas políticas de gestão de risco e desastre no país. A Figura 9 mostra as percentagens de pessoas afetadas e mortos por desastres naturais ocorridos no Brasil.

Observa-se que os desastres naturais que mais assolam a população brasileira em termos de quantidade de pessoas afetadas são eventos de estiagem e seca, seguidos por eventos de inundação (seja ela brusca ou gradual). Nessa categoria, os movimentos de massa aparecem em quinto lugar, afetando cerca de 2,08% das pessoas.

Contudo, esse comportamento não repete ao se analisar a percentagem de mortes por tipo de desastre. Observa-se que o desastre natural com maior quantidade de vítimas fatais são os eventos de inundação (seja ela brusca ou gradual), seguidos pelos movimentos de massa.



(a)



(b)

Figura 9 – (a) Percentagem de pessoas afetadas por tipo de desastre. (b) Percentagem de mortos por tipo de desastre (Ribeiro, 2015)

Especificamente no Estado do Rio de Janeiro, os desastres relacionados aos movimentos de massa somam 153 registros oficiais, ocorridos entre 1991 e 2012 em 54 dos 92 municípios deste estado. Dos 153 registros, 4 estão relacionados a quedas, tombamentos ou rolamentos de blocos de rocha; 3 correspondem a corridas de massa (solo, lama) e os 143 restantes estão associados a deslizamentos de solo e ou rocha (CEPED UFSC, 2013).

Dentro de Estado do Rio de Janeiro, a Região Serrana (formada pelos municípios de Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, Itaipava, Sumidouro, São José do Vale do Rio Preto e Bom Jardim) é particularmente afetada. A frequência dos movimentos de massa nessa região está relacionada com o declive das encostas, muito acentuado e com elevada rede de drenagem que ocupa vales profundos. Esses fatores favorecem uma maior intensidade dos processos morfodinâmicos e, conseqüentemente, aumentam a suscetibilidade à erosão e aos movimentos de massa (CEPED UFSC, 2013).

No caso da região tropical úmida brasileira (onde está localizado o Estado do Rio de Janeiro), a ocorrência desses eventos está associada a estação das chuvas. Essa estação ocorre entre os meses de outubro e março, com chuvas mais intensas na estação do verão, que corresponde ao período de dezembro a março.

Conforme pode ser observado na Figura 10, a frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Estado do Rio de Janeiro aumenta entre os meses de verão com destaque para dezembro e janeiro. Esse fato evidencia a relação direta entre os movimentos de massa e as estações chuvosas, sendo a chuva o principal agente deflagrador desses movimentos (CEPED UFSC, 2013).

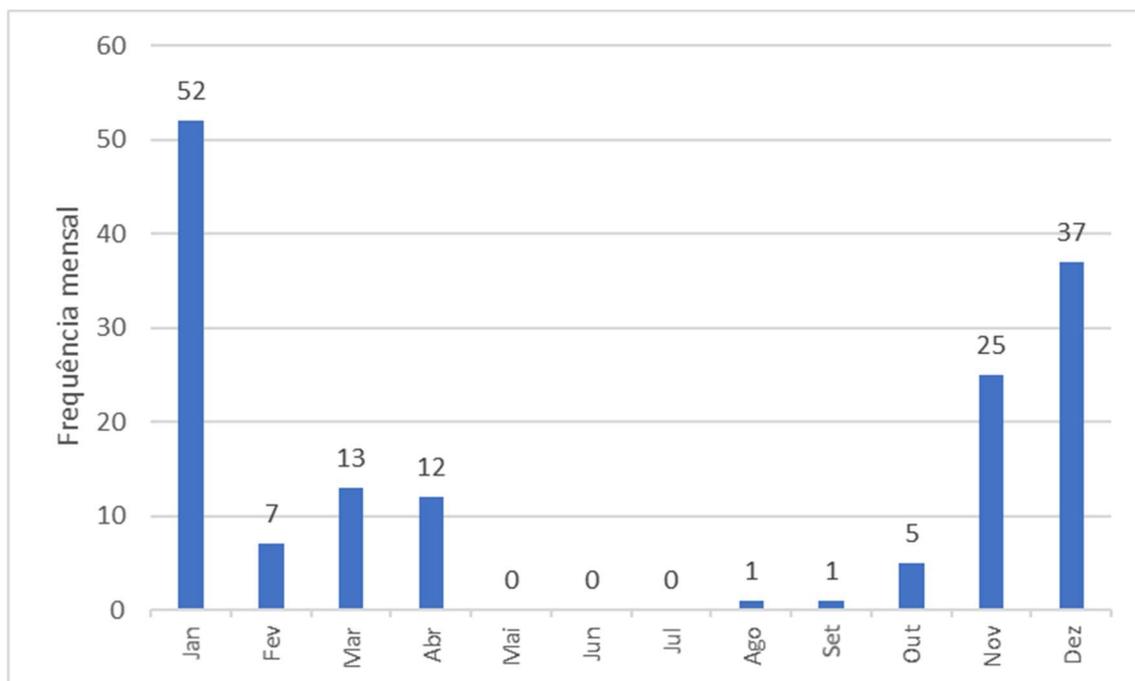


Figura 10 – Frequência mensal de movimentos de massa no Estado do Rio de Janeiro (CEPED UFSC, 2013)

2.2.2. Fenômenos que geram desastres naturais

Segundo Kobiyama e Michel (2010), muitas cidades iniciaram seu processo de desenvolvimento com a ocupação das planícies de inundação de rios. Essa localização permitia fácil acesso à água doce para o abastecimento das cidades.

Com o crescimento das cidades e com as planícies esgotadas, o crescimento urbano começa a se dar no sentido das encostas, que são regiões com grande possibilidade ocorrência de desastres relacionados aos deslizamentos de terra e outros movimentos de massa com grande capacidade de destruição (Ribeiro, 2015).

Segundo o governo do estado Rio de Janeiro, os deslizamentos de encostas são os fenômenos mais frequentes e trágicos enfrentados pela Defesa Civil. A ocupação das encostas com construções irregulares, com cortes e aterros incompatíveis com o terreno, acúmulo de lixo nas partes mais altas, desmatamento, obstrução dos caminhos de descida das águas, entre outros são elementos também causadores e intensificadores dos deslizamentos, fazendo com que grande parte dos morros fluminenses sejam áreas de risco em potencial (Ribeiro, 2015).

As causas dos movimentos de massa podem ser divididas em externas e internas. As externas são solicitações que provocam um aumento das tensões cisalhantes ao longo da superfície potencial de ruptura sem que haja um aumento da resistência ao cisalhamento do material da encosta. Se essas tensões induzidas se igualarem à resistência ao cisalhamento disponível do material da encosta, ocorrerão os movimentos de massa (Terzaghi, 1952).

Entre as causas externas mais comuns estão os movimentos de massa induzidos por modificações nas geometrias dos taludes como: (1) aumento da declividade da encosta por processos de erosão; (2) escavações feitas pelo homem; (3) deposição de material na parte superior da encosta (Terzaghi, 1952); (4) cortes excessivos no pé das encostas; (5) forma de ocupação desordenada das encostas pelo homem (principais problemas estão associados aos cortes e aterros, efetuados para se criar uma região plana para a construção de moradias, problemas de drenagem das águas servidas e águas pluviais e ao lançamento inadequado de lixo) (CEPED UFSC, 2013).

As causas internas, por outro lado, são aquelas que provocam um movimento de massa sem que ocorra aumento das tensões cisalhantes e sim uma redução da resistência ao cisalhamento do material da encosta. As causas internas mais comuns estão associadas a um aumento do poro pressão, decréscimo da coesão aparente do material do talude e variações do lençol freático (Terzaghi, 1952). As causas internas estão relacionadas principalmente à presença da água que pode afetar a estabilidade da encosta de diferentes maneiras.

No interior da massa do solo a água pode estar presente na zona de aeração (acima do lençol freático) ou na zona de saturação (abaixo do lençol freático). Na zona de aeração o solo está parcialmente saturado e a água forma meniscos entre as partículas de solo que atrai uma ao encontro da outra. Essa tensão adicional entre as partículas do solo, denominada de sucção, faz com que ocorra um aumento da coesão entre partículas (conhecida como coesão aparente) proporcionando um aumento da resistência ao cisalhamento do solo (Ribeiro, 2015).

Quando a água da chuva infiltra na encosta aumentando o seu nível de saturação, ocorre uma redução das tensões de sucção, fazendo com que a coesão aparente diminua induzindo a uma redução da resistência ao cisalhamento disponível. Essa água infiltrada pode inclusive atingir a zona de saturação provocar também um aumento do nível do lençol freático. Na zona de saturação, a pressão da água reduz as forças de contato entre as partículas do solo reduzindo assim a tensão efetiva e conseqüentemente a resistência ao cisalhamento disponível (Ribeiro, 2015).

Algumas instituições gestoras da política de riscos de desastres já estimaram valores de referência de índices pluviométricos motivadores dos movimentos de massa e das inundações para mobilizar e emitir alertas para a população.

Para o Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ), a situação deve ser de atenção quando os valores de precipitação acumulados em 72 horas, somados à chuva prevista para as próximas 24 horas chegarem a 115 mm; ou os valores de precipitação acumulados em um mês, juntamente a previsão de chuvas nas próximas 24 horas chegarem a 270 mm; ou as chuvas das últimas 23 horas ultrapassarem 60 mm e a previsão for superior a 20 mm para a próxima hora (DRM-RJ, 2012).

Já o sistema Alerta Rio, da prefeitura do Rio de Janeiro, monitora 33 estações pluviométricas na cidade, com o objetivo de emitir boletins de alerta à população em

casos de previsão de chuvas intensas que possam causar inundações e movimentos de massa. A classificação da intensidade de chuva e do perigo associado, segundo esse sistema, está exposta na Tabela 4.

Tabela 4 – Intensidade de chuva vs. Perigo (Ribeiro, 2015)

Classificação da intensidade de chuva e perigo de deslizamento e inundações	
Leve	1,1 a 5,0 mm/h
Moderada	5,1 a 25,0 mm/h
Forte	25,1 a 50,0 mm/h
Muito forte	Maior que 50,0 mm/h

2.3. Conceitos de Risco, Perigo e Vulnerabilidade

O termo Risco tem uma variedade de significados e abrangências que englobam fatores econômicos, sociais e ambientais. Cada setor ou atividade possui sua própria definição de Risco, o que gera uma falta de compreensão entre os especialistas. Embora uma definição única para o termo seja quase impossível, é de extrema importância que a interpretação particular seja exposta e entendida, tendo também que ser coerente com o tema de estudo (Samuels; Gouldby, 2009).

Alguns autores definem Risco como sendo a combinação entre a probabilidade de ocorrência de um evento causador de dano e as suas consequências (Helm, 1996, *apud* Ribeiro, 2015).

Outros estudos introduzem ao termo Risco às condicionantes relacionadas à vulnerabilidade e exposição. Ou seja, o Risco total é determinado pela associação dos três elementos: Perigo, Vulnerabilidade e Exposição (Crichton, 1999; Granger et al., 1999).

O conceito de Risco usado pela UNESCO (Sayers et al., 2013), vai ao encontro dessa definição, sendo portanto definido como “a combinação da possibilidade de um evento particular ocorrer e o impacto causado por esse evento”.

Para as Nações Unidas (UNISDR, 2004, 2009), o Risco é constituído pela probabilidade de consequências danosas ou perdas esperadas (ao indivíduo, à propriedade, aos bens de sustento próprio, interrupção de atividades econômicas e danos

ambientais) resultantes de interações entre os perigos naturais ou induzidos pelo homem e as condições de vulnerabilidade/capacidade do sistema.

Já o Glossário de Defesa Civil (Ministério da Integração Nacional, 2009), produzido pela Secretaria Nacional de Defesa Civil/Ministério da Integração Nacional, diz que Risco é a combinação da probabilidade de ocorrência de um dado evento com suas consequências negativas sobre um sistema sócio-econômico-ambiental. Esse glossário traz cinco definições para risco, conforme enunciado abaixo:

- Medida de dano potencial ou prejuízo econômico expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis.
- Probabilidade de ocorrência de um acidente ou evento adverso, relacionado com a intensidade dos danos ou perdas, resultantes dos mesmos.
- Probabilidade de danos potenciais dentro de um período especificado de tempo e/ou de ciclos operacionais.
- Fatores estabelecidos, mediante estudos sistematizados, que envolvem uma probabilidade significativa de ocorrência de um acidente ou desastre.
- Relação existente entre a probabilidade de que uma ameaça de evento adverso ou acidente determinado se concretize e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor a seus efeitos.

Para a Engenharia, a forma mais clássica de computar o Risco é pela definição de Varnes (Figura 11). Segundo Varnes (1984) *apud* Bell e Glade (2004), o Risco (R) é dado em função da probabilidade de um evento perigoso (H) ocorrer e da severidade das suas consequências (C). O risco, portanto, pode ser calculado conforme a Eq. 1.

$$R = H * C \qquad \text{Eq. 1}$$

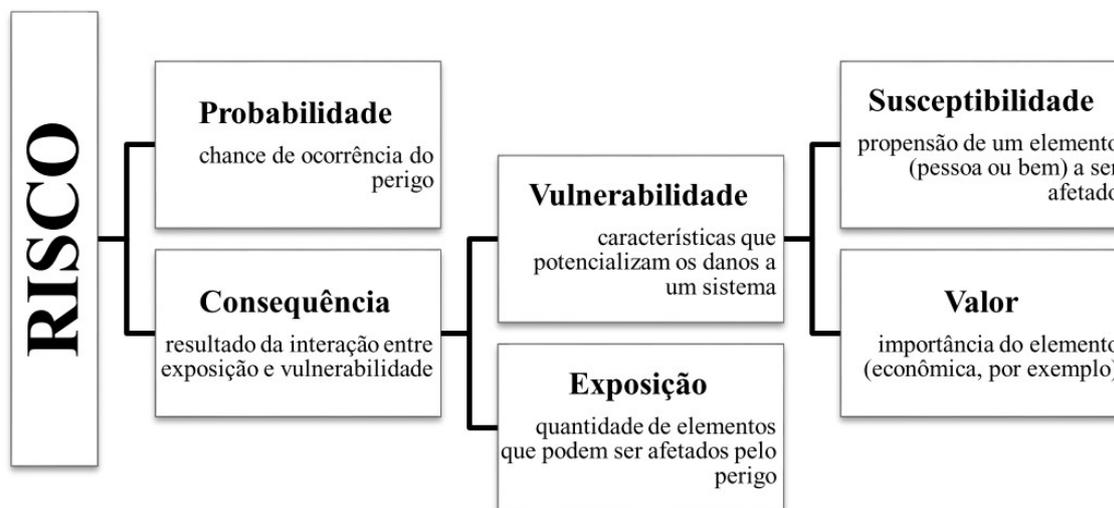


Figura 11 – Composição do risco (Zonensein, 2007)

Observa-se que todas as definições de risco apresentadas são muito semelhantes, indicando concordância entre os diversos órgãos.

Contudo, é comum encontrar problemas de tradução na definição dos elementos que compõe a análise de risco. Muitas vezes, os termos risco (do inglês *risk*) e perigo (*hazard*) são confundidos em linguagem cotidiana e geram interpretações erradas. Embora esses conceitos estejam atrelados, não devem ser utilizados como sinônimos (Zonensein, 2007).

O termo *risk* corresponde à relação entre probabilidade de ocorrência de um evento e das suas consequências, sendo, portanto, traduzido como “Risco”. Já o termo *hazard* se refere à ocorrência do fenômeno em si, sendo traduzido como “Perigo”.

Para CETESB (2014), Perigo refere-se à situação que tem potencial para causar danos e ameaça à existência ou aos interesses de pessoas, propriedades ou meio ambiente, estando associado a uma probabilidade da ocorrência em uma dada área.

Já para Sayers et al. (2013), Perigo se refere ao fenômeno, substância, atividade humana ou condição capaz de causar perda de vida, dano físico, impactos à saúde, prejuízo à propriedade, perda de casas e serviços, interrupção social e econômica, ou danos ambientais. Portanto, o Perigo incorpora a frequência temporal e a respectiva magnitude associada ao processo deflagrador.

O Perigo, portanto, representa o primeiro elemento da análise de risco segundo Varnes (1984) *apud* Bell e Glade (2004). Ressalta-se que o Perigo existirá sempre,

independentemente de obras, incentivos, realocação da população, entre outras ações. Por outro lado, o Risco é uma característica que tem a possibilidade de ser gerenciada, controlada e reduzida através de medidas de mitigação.

O segundo elemento na análise de risco segundo Varnes (1984) *apud* Bell e Glade (2004) são as Consequências. Essa por sua vez se desmembra em duas dimensões: Vulnerabilidade e Exposição.

A Exposição é uma medida direta da quantidade de bens, objetos, pessoas, infraestruturas, meio ambiente, serviços, processos produtivos, entre outros, que se localizam em áreas afetadas pelo Perigo. A Exposição quantifica, por exemplo, o número de pessoas, propriedades, equipamentos comunitários, habitats etc., que podem estar expostos ao Perigo. Entretanto, a Exposição é apenas o primeiro fator para a materialização do Risco. Sem exposição, o Risco se anula, mas no caso de exposição, para que o dano se concretize, é necessário que o sistema exposto seja vulnerável, ou seja, que seja frágil em relação ao impacto do perigo que o ameaça e possa, portanto, sofrer danos (Sayers et al., 2013).

Nesse sentido, a Vulnerabilidade reúne as características que potencializam os danos de um sistema, sendo influenciada pela propensão de um elemento receptor experimentar um dado dano durante um evento perigoso e da importância desse elemento. De maneira geral, esse termo se refere às consequências sobre o sistema e ao valor potencial de perdas associadas, independentemente da probabilidade de qualquer perigo específico (Sayers et al., 2013).

Anbalagan e Singh (1996) relacionaram o conceito de valor potencial de perdas às consequências dos eventos. Mais especificamente definiram os danos potenciais, que consideram as perdas de vida, os ferimentos, perdas de bens, propriedades e ao meio ambiente. As consequências podem ser, portanto, avaliadas em função da vulnerabilidade e da capacidade de recuperação dos elementos que estão em risco (Veról, 2013; Zonensein, 2007).

A capacidade de recuperação dos elementos está ligada a conceitos de resiliência. A Resiliência, portanto, pode ser entendida como o inverso da Vulnerabilidade, representando a habilidade de uma estrutura ou conjunto de estruturas, mesmo quando sob ameaça de um evento extremo, continuar suprindo com serviços fundamentais, assim

como a velocidade e a capacidade de adaptação e recuperação pós-evento, retornando a uma situação de funcionamento normal (CIRIA, 2010).

Na análise dos desastres de movimentos de massa, em particular fluxos de detritos, considerar o risco como sendo uma função do Perigo, da Exposição, da Vulnerabilidade e da Resiliência é uma avaliação admissível.

Neste caso, o Perigo é representado pela probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos. Já as Consequências (que englobam os conceitos de Exposição, Vulnerabilidade e Resiliência), para fins dessa dissertação, são medidas em danos a indivíduos, a propriedades e a atividades econômicas.

Ressalta-se que a ocorrência de um fluxo de detritos em ambiente natural, sem ocupação antrópica, pode apresentar um potencial risco ambiental. Porém, nessa dissertação, esse tipo de risco não será avaliado.

2.4. Uso de GIS em análises de estabilidade de encostas

Segundo o guia Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios do Ministério das Cidades (Ministério das Cidades, 2007) a coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, cidades, áreas agrícolas, etc é uma atividade de extrema importância. Com o desenvolvimento da tecnologia de informática e aprimoramento dos sistemas computacionais essa atividade, que antes era realizada a partir de base cartográfica em papel (o que impedia uma análise conjunta entre os diversos mapas e dados), pode ser realizada em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento.

Dentre as tecnologias de Geoprocessamento, o SIG (Sistema de Informações Geográficas) ou GIS (na versão em inglês *Geographical Information System*) e o conjunto de instrumentos computacionais que processam dados de natureza espacial (banco de dados, mapas e etc.), permitem a realização de análises complexas ao combinar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados.

O GIS tem se tornado uma indústria multi-bilionária fundamentada principalmente no desenvolvimento de *softwares* e sistemas de produção de dados espaciais (Ray; Smedt, 2009). Atualmente, muitos países, institutos e empresas coletam e disponibilizam informações espaciais (do tipo *open-access*) sobre uma ampla quantidade de tópicos, incluindo modelos digitais de elevação, distribuição de usos do solo, mapas de chuvas, mapas de fronteiras políticas, etc.

Além disso, os dados que são inseridos no GIS podem ser de várias naturezas, tais como (Ministério das Cidades, 2007):

- Dados temáticos: descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica, expressa de forma qualitativa. Estes dados, obtidos a partir de levantamento de campo, são inseridos no sistema por digitalização ou de forma mais automatizada, a partir de classificação de imagens.
- Imagens: São obtidas por satélites, fotografias aéreas ou “scanners” aerotransportados. Essas imagens representam uma forma indireta de captura de informação. Esses dados são armazenados como matrizes, em que cada elemento de imagem (denominado “pixel”) tem um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente.

Dentre as vantagens do GIS pode-se citar: (1) facilita a geração de mapas temáticos; (2) facilita a consulta e manutenção de dados; (3) representa graficamente informações de natureza espacial; (4) realiza operações sobre elementos gráficos; (5) possibilita a visualização dos dados geográficos; (6) apresenta recursos de saída na forma de mapas, gráficos e tabelas; (7) integra conjuntos de dados diversos (espaciais e não espaciais).

Essa ferramenta possui interessante aplicação no planejamento urbano (Ministério das Cidades, 2007), na medida em que permite: a constituição de uma base cartográfica georeferenciada que reproduz a configuração do território do município, identificando logradouros, edificações, redes de infra-estrutura, propriedades rurais, acidentes geográficos, etc; a inclusão de informações socio-econômicas e sobre equipamentos públicos, possibilitando a identificação das áreas com maior nível de carência e os melhores locais para instalação de equipamentos e serviços públicos; monitorar áreas com maior necessidade de proteção ambiental; a elaboração de mapas de risco.

Devido a isso, diversos estudos têm utilizado ferramentas de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas (GIS) para identificar e analisar movimentos de massa (Abay; Barbieri; Woldearegay, 2019; Alexander, 1995; Lin; Cheng; Peng, 2012; Paliaga et al., 2019; Silva, 2016).

Essas técnicas integradas às pesquisas de campo dos locais afetados por deslizamentos de terra, têm sido usadas no estudo e na preparação de mapas de risco de deslizamento de terra e mapas de inventário (Abay; Barbieri; Woldearegay, 2019).

O uso do GIS permitiu também o avanço de análises em escala regional da suscetibilidade de movimentos de massa (Corominas et al., 2003). Assim, diversos trabalhos foram publicados sobre estudos em escalas regionais (Alexander, 2008; Ray; Smedt, 2009), como por exemplo: Fator de avaliação de perigo de deslizamentos (Anbalagan, 1992), Abordagem sobre o risco em áreas montanhosas de (Deoja et al., 1991), Técnicas baseadas em GIS (Saha; Gupta; Arora, 2002; Thapa; Dhital, 2000), Técnicas estatísticas (Dhakal; Amada; Aniya, 2004; Pathak; Nilsen, 2004), Técnicas determinísticas (Joshi et al., 2000), Avaliação de risco (Petley; Hearn; Hart, 2004).

De fato, a difusão do uso de GIS contribuiu substancialmente para o entendimento das rupturas de encostas e estudos de movimentos de massa (Carrara et al., 1991). Inclusive, alguns autores têm utilizado modelos de cálculo de estabilidade de encostas baseados em GIS.

O *Map-Based Probabilistic Infinite Slope Analysis* (PISA-m), *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model* (TRIGRS) e o *Shallow Slope Stability Model*, (SHALSTAB) são alguns modelos de estabilidade de encostas usados em conjunto com o *softwares* GIS (Armas et al., 2013; Li et al., 2019).

O *Map-Based Probabilistic Infinite Slope Analysis* (PISA-m) é um programa, desenvolvido por William C. Haneberg, que realiza cálculos probabilísticos de estabilidade de taludes em ambiente GIS a partir de dados topográficos obtidos pelo LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Esse programa é baseado em uma formulação “*first-order, second moment*” (FOSM) do Modelo do Talude Infinito, e pode incluir nos seus cálculos efeitos da resistência proporcionada pelas raízes das árvores (Cole, 2013).

Já o *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model* (TRIGRS) é um programa em Fortran projetado para modelar deslizamentos rasos induzidos pela chuva. Resumidamente, o programa calcula mudanças de poropressão e no fator de segurança (FS), devido à infiltração da chuva (Baum; Savage; Godt, 2008).

Para o cálculo da infiltração da água de chuva, o TRIGRS utiliza soluções analíticas para equações que representam escoamento vertical unidimensional em materiais isotrópicos e homogêneos para condições saturadas ou não-saturadas. Já para o cálculo da estabilidade das encostas, o programa utiliza o Modelo do Talude Infinito para calcular o fator de segurança (FS) de cada uma das células do grid. Ressalta-se que este programa é usado em conjunto com o *software* do sistema de informações geográficas (GIS) para preparar grades de entrada e visualizar os resultados do modelo (Baum; Savage; Godt, 2008).

Por fim, o *Shallow Slope Stability Model* (SHALSTAB) é um modelo matemático determinístico fisicamente baseado que associa dados topográficos extraídos de um Modelo Digital de Elevação (MDE) com equações derivadas da combinação entre o modelo hidrológico de estado uniforme - *Steady State* - e o de estabilidade de encostas baseado no Modelo do Talude Infinito.

Em um Sistema de Informações Geográficas (GIS), o SHALSTAB gera um índice, expresso em logaritmo, que atribui para cada célula da matriz de saída um intervalo de valor referente à razão da chuva crítica com a transmissividade do solo (q/T), em que quanto maior o valor do $\log(q/T)$, maior será o grau de instabilidade da encosta (Gerente; Luiz; Santo, 2014).

2.5. Lógica Fuzzy

A maioria dos parâmetros de seleção de uma área suscetível a um determinado evento não pode ser fornecida com precisão. Essa imprecisão pode estar associada ao próprio dado em si ou até na subjetividade do critério selecionado.

A avaliação do critério selecionado, bem como os pesos a ele associado, é comumente expressa em termos linguísticos pelos tomadores de decisão (Wang et al., 2009). A transição da imprecisão proporcionada pela linguagem (por exemplo, "muito baixo", "baixo", "médio", "alto" ou "muito alto") para a quantificação numérica é realizada aplicando a teoria dos conjuntos difusos (Pochampally; Gupta; Kamarthi, 2003).

Segundo Rignel, Chenci e Lucas (2011) e Wagner (2003), a Lógica difusa (ou *fuzzy*) é uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral, descritas em linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação.

Na teoria de conjuntos clássica, um determinado elemento apenas pode pertencer ou não pertencer a um dado conjunto. Ou seja, dado um universo U e um elemento particular $x \in U$, o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com respeito a um conjunto $A \subseteq U$ é dado por (Gomide; Gudwin, 1994):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

A função $\mu_A(x): U \rightarrow \{0, 1\}$ é chamada de função característica na teoria clássica de conjuntos.

Assim, dentro dessa teoria, pode-se aceitar até duas opções: todos os números dentro de um erro percentual terão um fator de pertinência 1, tendo todos os demais um fator de pertinência 0 (Figura 12a), ou seja, todos os valores dentro desse erro percentual assumido serão pertencentes ao conjunto analisado; ou, para o caso preciso, o fator de pertinência 1 é somente ao número exato, sendo 0 para todos os demais (Figura 12b), ou seja, somente o valor exato procurado é pertencente ao conjunto analisado.

Em contrapartida, Zadeh (1965) propôs uma outra forma de caracterização. Ele sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. Dessa forma o fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor 0 indica uma completa exclusão e um valor 1 representa completa pertinência. A essa lógica foi atribuída o nome de Lógica Difusa o Lógica *fuzzy*.

A Lógica *fuzzy*, portanto, mede a pertinência de um determinado elemento dentro de um conjunto. Ou seja, ela trata de valores que variam entre 0 e 1, em que quanto mais próximo de 1 mais verdadeiro é o pertencimento daquele elemento dentro do conjunto

analisado. Exemplificando, ao considerar 3 valores de pertinência tais como 0,1, 0,5 e 0,9, significa respectivamente que: é quase falso que esse elemento pertença ao conjunto; é meio verdade que esse elemento pertença ao conjunto; e é quase verdade que esse elemento pertença ao conjunto (Silva, 2005).

Esta generalização aumenta o poder de expressão da função característica. Tomando um exemplo prático: deseja-se expressar a ideia de que uma temperatura tem seu valor por volta de 25°C. Para isso, pode-se utilizar uma função de pertinência triangular (Figura 12c), com o pico em 25, indicando que quanto mais perto o número de 25, mais pertinente esse valor é ou então mais próximo ao valor verdadeiro esse valor é (Gomide; Gudwin, 1994).

Formalmente, dado um universo U e um elemento particular $x \in U$, um conjunto *fuzzy* $A \subseteq U$ é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x)$ que assume valores em um intervalo $\{0,1\}$. O conjunto *fuzzy* $A \subseteq U$ é, então, um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{\mu_A(u)|u\}, u \in U$$

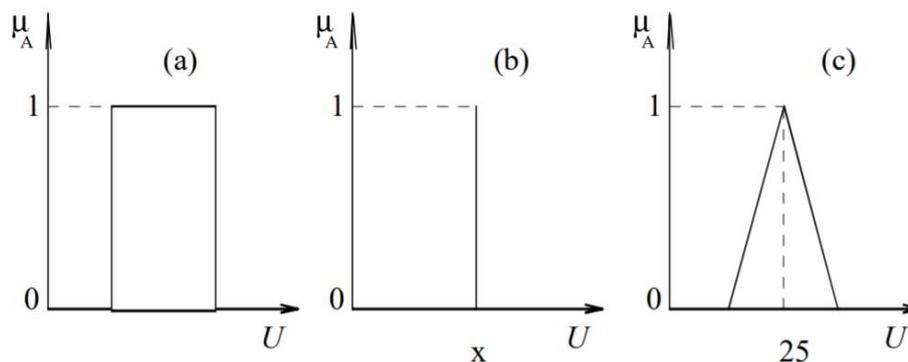


Figura 12 – Funções de pertinência (Gomide; Gudwin, 1994)

2.6. Técnica AHP

Essa é uma técnica de análise multi-critério amplamente difundida. Nela, os critérios selecionados como relevantes para a avaliação são comparados par a par e é atribuída uma

importância relativa ao relacionamento desses critérios conforme a escala definida por Saaty (1990) e apresentada na Tabela 5. Dessa forma a técnica AHP permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos.

Tabela 5 – Escala de julgamento da técnica AHP (Saaty, 1990)

Valores Numéricos	Termos Verbais	Explicação
1	Igual importância	Dois alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação a outra
5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação a outra
7	Muito fortemente mais importante	Alternativa fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extremamente mais importante	Evidência favorece uma alternativa em relação a outra, com grau de certeza mais elevado
2, 4, 6, 8	Valores importantes intermediários	Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições

Uma vez definidas as importâncias de cada combinação de critérios, esses valores irão compor uma matriz de comparação paritária. Essa matriz deve possuir 3 propriedades:

- **Identidade:** todos os elementos da diagonal principal devem ser iguais a 1. Essa diagonal representa cada critério comparado a si mesmo;
- **Reciprocidade:** cada elemento acima da diagonal da matriz de comparação paritária é igual ao inverso do elemento correspondente, situado abaixo da diagonal, isto é, $a_{ij} = 1/a_{ji}$;
- **Consistência:** a matriz de comparações paritária deve satisfazer a propriedade de transitividade. Significa que na comparação de três critérios: se A é preferível a B e B é preferível a C; conseqüentemente A é preferível a C.

Em seguida, calcula-se os autovetores da matriz de comparação paritária. O autovetor normalizado que corresponde ao autovalor máximo, fornece os pesos dos critérios comparados. Para avaliar a coerência do julgamento, Saaty (1990) propôs determinar o índice de consistência (IC) e a razão de consistência (RC).

O índice de consistência (IC) de uma matriz de comparações paritárias indica quanto o autovalor está afastado do valor teórico esperado n (número que representa a

ordem da matriz). Quanto mais próximos forem esses dois valores, mais consistente será o resultado. Esse valor é calculado pela seguinte equação (Eq. 2):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Eq. 2}$$

A razão de consistência (RC) determina se o grau de consistência é satisfatório e calculada pela Eq. 3.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad \text{Eq. 3}$$

Nesse cálculo o valor de IC é comparado ao valor do índice randômico (IR), cujos valores variam com o valor de n e estão tabelados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de índice randômico (IR) em função da ordem da matriz (Saaty, 1990)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

2.7.

Método Curva-Número do *Soil Conservation Service* (SCS-CN)

Esse é um método popular, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service*¹ (SCS) do *United States Department of Agriculture* (USDA), usado para computar o volume de escoamento superficial de um dado evento de chuva dentro de uma bacia hidrográfica.

O Método do Curva-Número (CN) se baseia em dois fenômenos observados empiricamente após chuvas de longa duração ou alta intensidade: (1) o escoamento superficial direto só se inicia depois que certa quantidade de chuva foi acumulada; (2) e que a curva de vazão acumulada versus chuva acumulada tende assintoticamente para uma reta a 45° (Figura 13) (SCS, 1964).

¹ Em 1994 o nome *Soil Conservation Service* (SCS) foi modificado para *Natural Resources Conservation Service* (NRCS). Contudo, o nome SCS ainda é o mais difundido, sendo esse associado ao Método CN.

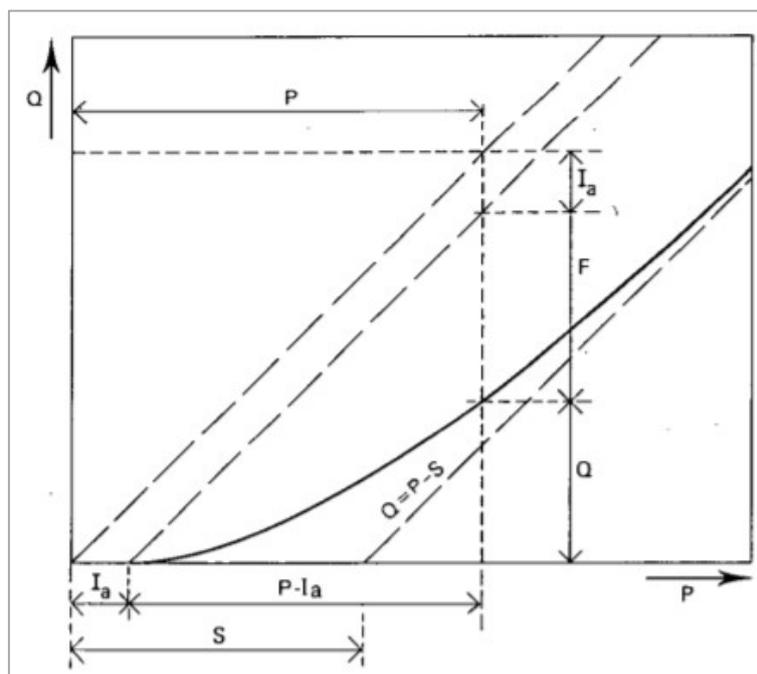


Figura 13 - Curva de vazão acumulada versus chuva acumulada de acordo com o Método CN (SCS, 1964)

Dessa forma, segundo o Método CN, parte da chuva que incide sobre uma região é perdida sob a forma de duas parcelas. A primeira parcela, conhecida como “abstração”, representa a interceptação da cobertura vegetal e urbana, acúmulo em depressões na superfície, e por processos de evaporação. Essa parcela atua na retirada de água do sistema chuva-vazão antes do compute do escoamento superficial direto. A segunda parcela, conhecida como “retenção atual” ou “quantidade de água infiltrada”, representa o processo de infiltração. Essa parcela é aumentada com o aumento da chuva até o seu valor máximo conhecido como “potencial máximo de retenção” (SCS, 1964).

Na sua formulação matemática, o Método CN assume que a razão entre a retenção atual (ou quantidade de água infiltrada) e o potencial máximo de retenção é igual à razão entre o escoamento superficial direto atual e o escoamento superficial potencial máximo (ou seja, a chuva incidente menos a abstração), conforme Eq. 4 (SCS, 1964):

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde F (mm) é a retenção atual ou quantidade de água infiltrada; S (mm) é o potencial máximo de retenção (mm); Q (mm) é a profundidade de escoamento superficial direto atual; P (mm) é a chuva incidente ; e I_a (mm) é a abstração inicial.

Depois que ocorre o início do escoamento superficial, toda chuva adicional se torna ou escoamento ou infiltra. Em outras palavras, a parcela de água infiltrada no solo é dada pela diferença entre chuva, abstração inicial e escoamento conforme a Eq. 5 (SCS, 1964):

$$F = P - I_a - Q \quad \text{Eq. 5}$$

Combinando as Eq. 4 e Eq. 5, obtém-se as Eq. 6 e Eq. 7, que representam as estimativas de escoamento superficial direto e infiltração, respectivamente:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad \text{Eq. 6}$$

$$F = \frac{(P - I_a) * S}{(P - I_a + S)} \quad \text{Eq. 7}$$

Segundo análises de regressão realizadas pelo próprio SCS, indicaram a seguinte relação entre I_a e S (Eq. 8).

$$I_a = 0,2 * S \quad \text{Eq. 8}$$

Portanto, a equação característica para o cálculo de escoamento superficial direto (também chamada de chuva efetiva (P_e), ou seja, parte da chuva que gera o escoamento superficial direto) é dada pela Eq. 9 e Eq. 10 (Bhuyan; Mankin; Koelliker, 2003; Mishra; Pandey; Singh, 2012; Rawls et al., 1993; Williams; Laseur, 1976).

$$Q = P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} ; P \geq 0,2S \quad \text{Eq. 9}$$

$$Q = P_e = 0 ; P < 0,2S \quad \text{Eq. 10}$$

O valor do potencial máximo de retenção (S) representa principalmente os processos de infiltração que ocorrem no solo após o início do escoamento superficial

direto. Essa infiltração é controlada pela taxa de infiltração na superfície do solo, ou pela taxa de transmissividade no perfil de solo, ou pela capacidade de armazenamento de água no perfil de solo. Esse potencial é convertido num parâmetro empírico adimensional chamado Curva-Número (CN) de acordo com a Eq. 11 (SCS, 1964):

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \text{ ou } S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Eq. 11}$$

A Figura 14 mostra a solução gráfica da Eq. 9, onde o escoamento superficial direto pode ser determinado em função da chuva e do CN.

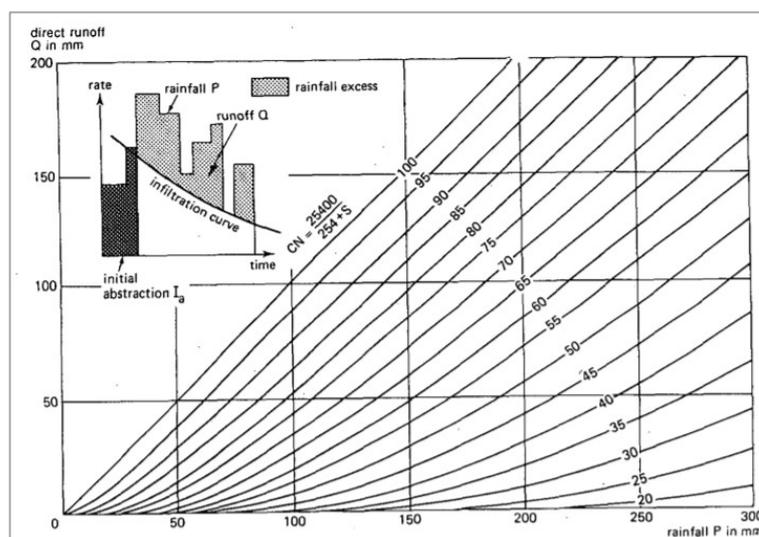


Figura 14 – Escoamento superficial direto em função da chuva e CN – solução gráfica (SCS, 1964)

O valor do CN, por sua vez, é dado em função de:

- Uso do solo: características do tipo de cobertura da superfície;
- Estado de conservação do solo: aplicado principalmente pra áreas agrícolas. Inclui informações de terraceamento, rotação de culturas, queimadas, etc.
- Grupo hidrológico do solo: divisão dos tipos de solo em 4 grupos hidrológicos segundo suas características de taxa de infiltração e transmissividade (Tabela 7).
- Condições antecedentes de umidade do solo: podem ser divididas em 3 classificações (Tabela 8). Essas classes são baseadas na chuva acumulada de 5 dias anteriores ao início do escoamento, e alteram o valor de CN. Normalmente é

adotado o valor de CN como sendo igual ao valor de CNII, correspondente a um valor médio anual. Caso se deseje calcular o valor de CN para as condições I (seco) e III (úmido), pode-se usar as Eq. 12 e Eq. 13.

$$CNI = \frac{4,2 * CNII}{10 - 0,0588 * CNII} \quad \text{Eq. 12}$$

$$CNIII = \frac{23 * CNII}{10 + 0,13 * CNII} \quad \text{Eq. 13}$$

Tabela 7 – Grupos hidrológicos Método CN (Genovez; Neto; Sartori, 2005)

Grupo Hidrológico	Grupo de resistência à erosão	Profundidade	Permeabilidade	Textura	Razão Textural	Grandes grupos de solos	Índice K
A	alto	muito profundo (>2 m) ou profundo (1 a 2 m)	rápida/rápida	média/média	<1,2	LR, LE, LV, LVr, LVt, LH, LEa e LVa	1,25
			moderada/rápida	muito argilosa/muito argilosa			
				argilosa/argilosa			
B	moderado	profundo (1 a 2 m)	rápida/rápida	arenosa/arenosa	1,2 a 1,5	LJ, LVP, PV, PVL, Pln, TE, PVI, R, RPV, RLV, Lea e Lva	1,1
			rápida/moderada	arenosa/média			
				arenosa/argilosa			
			moderada/moderada	média/argilosa			
argilosa/muito argilosa							
C	baixo	profundo (1 a 2 m) moderadamente profundo (0,5 a 1 m)	lenta/rápida	arenosa/média	>1,5	Pml, PVp, PVI, Pc e M	0,9
			lenta/moderada	média/argilosa			
			rápida/moderada	arenosa/argilosa			
				arenosa/muito argilosa			
D	muito baixo	moderadamente profundo (0,5 a 1 m) ou raso (0,25 a 0,5 m)	rápida, moderada ou lenta sobre lenta	muito variável	muito variável	Li-b, Li-ag, gr, Li-fi, Li-ac e PVp (rasos)	0,75

Tabela 8 – Condições de antecedentes de umidade do solo (SCS, 1964)

AMC I	O solo da bacia está praticamente seco (i. e. a umidade do solo está próxima ao ponto de murcha)
AMC II	Condição média
AMC III	O solo da bacia está praticamente saturado (i. e. a umidade do solo está próxima à capacidade de campo)

3. Metodologia

Neste capítulo, são descritas as ferramentas metodológicas a serem utilizadas no trabalho proposto.

Para a Engenharia, o Risco de um desastre é definido pelo produto da probabilidade de ocorrência (Perigo) com as consequências (Vulnerabilidade e Exposição) desse evento, assim, se uma dessas duas dimensões for inexistente, o Risco se anula. Sendo assim, a metodologia proposta faz uso de 4 mapas, a saber:

- Mapa de Inventário: não é usado diretamente no cálculo do Risco, mas serve como base para a elaboração do Mapa de Perigo. Nele estão contidas informações como a distribuição espacial dos eventos, seu tipo e cicatrizes de eventos passados;
- Mapa de Perigo: indica a probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos;
- Mapa de Vulnerabilidade e Exposição: indica a quantidade de pessoas expostas a um fluxo de detritos, bem como a sua fragilidade frente a esse evento.
- Mapa de Risco: é calculado pelo produto dos Mapas de Perigo e de Vulnerabilidade e Exposição.

Ressalta-se que a metodologia faz uso de geoprocessamento e de sistema de informações geográficas (GIS). É importante citar que é necessário o uso de um *software* que seja capaz de processar esses dados e neste trabalho o *software* escolhido foi o QGIS 3.16.

Nos próximos itens será apresentada a metodologia de confecção de cada um dos mapas supracitados, bem como a metodologia geral do mapeamento de risco. As etapas de cálculo para o mapeamento de risco estão na Figura 15.

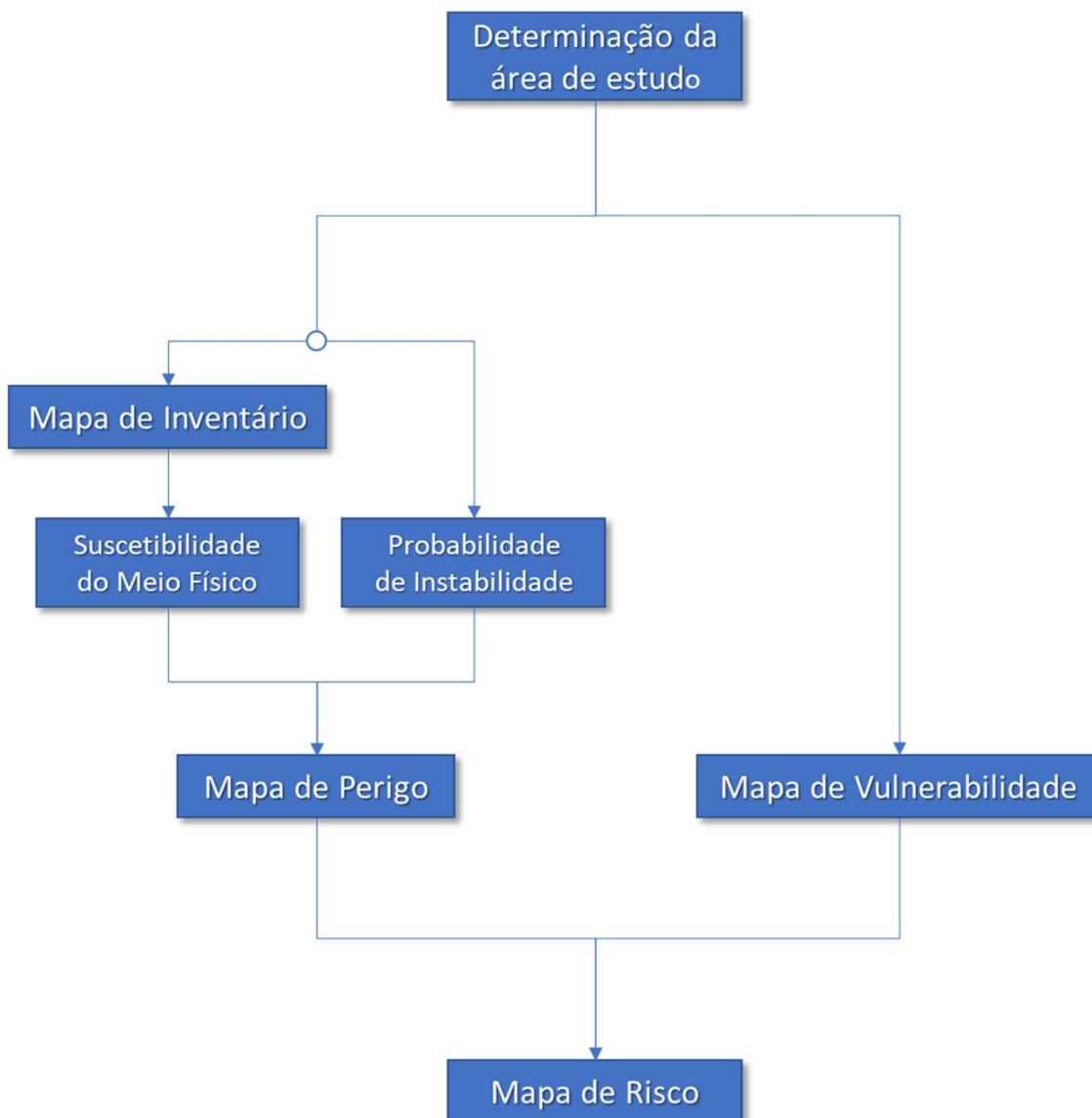


Figura 15 – Fluxograma com a metodologia proposta

3.1. Delimitação da área de estudo

Fluxos de detritos são movimentos de massa catastrófico, constituídos por sedimentos (finos e grossos) e água, que se move como um fluido contínuo e viscoso impulsionado pela gravidade (Takahashi, 2007). Devido as suas características físicas e

de movimento, os fluxos de detritos estão intimamente ligados à processos hidrológicos dentro de bacias hidrográficas (Zhang et al., 2014).

Esse conceito de estudar fluxo de detritos tomando como base a bacia hidrográfica como um todo pode ser observado nos trabalhos de (Alexander, 2008; Armas et al., 2013; Carrara et al., 1991; Gong et al., 2020; Lee; Park, 2016; Li et al., 2019; Ray; Smedt, 2009; Zhang et al., 2014; Zhou et al., 2014). Essa forma de análise, muito usada em hidrologia e hidráulica, permite observar eventuais interações entre as áreas afetadas da bacia com as áreas vizinhas levando a uma análise mais abrangente do problema. Depois de analisado o funcionamento da bacia como um todo, pode-se focar em uma determinada região dentro da área de estudo.

3.2. Mapa de Inventário

Uma vez definida a bacia hidrográfica de estudo, pode-se determinar o mapa de inventário dos movimentos que ocorreram na região. Os principais objetivos ao se realizar um mapa de inventário são (Bobrowsky; Hervás, 2009):

- distribuir espacialmente os movimentos de massa numa região;
- mostrar os efeitos dos eventos desencadeadores (como chuvas, terremotos, etc);
- determinar as estatísticas dos movimentos de massa;
- prover informações confiáveis para os modelos de suscetibilidade e de perigo.

Em resumo, esse mapa permite estudar os fatores que possivelmente contribuem para a formação de um evento de fluxo de detritos, além de formar uma base de dados para este tipo de evento.

3.3. Mapa de Perigo

A confecção do Mapa de Perigo é realizada em duas etapas: (1) Etapa 1 – determinação da suscetibilidade do meio físico; (2) Etapa 2 – determinação da probabilidade de instabilidade.

A Etapa 1 consiste em identificar quais áreas dentro da bacia possuem as características físicas (julgadas relevantes nessa pesquisa) para a formação de fluxo de detritos. Para tanto, selecionou-se 5 critérios que representam características topográficas, geomorfológicas e de infiltração da área de estudo. A suscetibilidade do meio físico é, então, dada pela média ponderada desses 5 critérios. Os pesos utilizados são definidos segundo a técnica de análise multicritério AHP como forma de minimizar a subjetividade inerente à sua escolha (Bobrowsky; Hervás, 2009).

Já a Etapa 2 consiste na determinação do tempo de recorrência da chuva que levaria a instabilização das áreas identificadas na Etapa 1. Assim, a probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos está condicionada às características do meio físico e a probabilidade de ocorrência do processo deflagrador.

3.3.1. Etapa 1: Determinação da suscetibilidade do meio físico

Com base na pesquisa bibliográfica feita, optou-se por avaliar a suscetibilidade do meio físico conforme sugerido por Li et al. (2019). Segundo esses autores, a formação de fluxo de detritos depende de 3 fatores, a saber: (1) da declividade do terreno; (2) do material que formará o volume do fluxo, cuja quantidade é influenciada pela estrutura geológica, uso, tipo do solo e atividade humana; (3) condições de deflagração, sendo os eventos chuvosos os mais comuns.

Nesse sentido, essa pesquisa utilizou uma análise qualitativa para a determinação da suscetibilidade de uma bacia hidrográfica em gerar fluxo de detritos com base em informações de topografia, litologia, tipo e uso do solo.

Dentre os fatores topográficos selecionados estão a declividade e as curvaturas vertical e horizontal. Esses fatores têm influência direta na estabilidade das encostas e são os mais utilizados na previsão de movimentos de massa pela maioria dos autores (Silva, 2016).

A declividade, seja ela natural ou resultante da intervenção humana, influencia não só no desencadeamento do movimento, como também na velocidade de deslocamento do material e, portanto, na sua capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas.

A curvatura vertical relaciona-se com os processos de transporte e acumulação de água, minerais e matéria orgânica no solo. Assim, as formas das vertentes poderá ser um indicativo da dinâmica de transporte de partículas sólidas da área estudada (Valeriano, 2008).

A curvatura horizontal das vertentes refere-se ao direcionamento dos fluxos de água orientados pela forma da vertente. Segundo Bigarella (2003), esse parâmetro indica as áreas de escoamento superficial divergente e convergente.

Dentre os fatores geológicos, optou-se por utilizar o tipo e a distribuição dos materiais que compõem o substrato da área estudada, que podem ser divididos em maciços rochosos e terrosos. Nos maciços rochosos, os principais processos de instabilização ocorrem em taludes de corte e em áreas de escarpa. O grau de alteração da rocha e as estruturas como falhas, disjunções e juntas de alívio servem como zonas preferenciais de percolação de água e alteração de rocha, diminuindo a resistência ao cisalhamento e atuando na deflagração dos processos de instabilização. Já os maciços terrosos estão diretamente relacionados com a formação do relevo, principalmente nas áreas de formação de solos residuais e depósitos de colúvio e tálus (Silva, 2016). Ressalta-se ainda que, nos maciços terrosos, o deslizamento translacional das camadas/capas de solo residual pouco espessas nas cristas das encostas podem gerar fluxos de detritos.

Por fim, para representar a influência do tipo e uso do solo, optou-se por utilizar o valor potencial máximo de retenção de água no solo obtido segundo o Método do Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) (item 2.7 do capítulo anterior). Esse método além de ser usado na estimativa de escoamentos superficiais, também tem sido largamente aplicado para estimar a capacidade de infiltração de um determinado solo, pois cada combinação de tipo e uso do solo possuem um valor tabelado de CN que, por sua vez, determina um valor potencial máximo de retenção de água no solo (S),

equivalente ao valor máximo de água que pode infiltrar (Aron; Lakatos; Miller, 1977; Hjelmfelt, 1980; Mishra; Singh, 2004; Zhou et al., 2014).

Considerando tudo o que foi exposto até agora, foram selecionados cinco (5) critérios que vão ser usados na avaliação da suscetibilidade do meio físico à formação de fluxo de detritos. Esses critérios são: declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal, litologia e potencial máximo de retenção de água no solo (S).

Para fazer a avaliação combinada de todos esses critérios optou-se por utilizar a lógica *fuzzy*, uma vez que ela permite a transformação de diversos tipos de informações em uma mesma linguagem “numérica”, permitindo as comparações entre elas (Burrough; Mcdonnell; Lloyd, 2015).

Segundo a lógica *fuzzy*, um valor de elemento igual a 1 significa “total pertencimento”, e um valor igual a 0 significa “total não-pertencimento”. Assim, cada um dos critérios selecionados deve ter suas informações normalizadas para valores entre 0 e 1 de acordo com a influência daquele elemento na formação de fluxo de detritos.

O processo de normalizar cada mapa de critério de acordo com a lógica *fuzzy* foi feito da seguinte maneira. Primeiramente, determinou-se, para cada uma das cicatrizes identificadas no Mapa de Inventário, os valores correspondentes de cada um dos cinco critérios selecionados.

De posse dessa informação, os valores de cada um dos critérios compreendidos entre o primeiro e o terceiro quartil da distribuição de valores de cada critério receberam valor de pertencimento igual a 1. Todos os demais valores eram determinados segundo uma função linear até atingir o valor de pertencimento mínimo igual a 0 para os valores mais extremos encontrados na integralidade do mapa.

Essa abordagem foi tomada com o intuito de se evitar o efeito de valores extremos que poderiam inserir distorções no processo de normalização. Na Figura 16 é apresentada uma ilustração genérica desse processo de normalização.

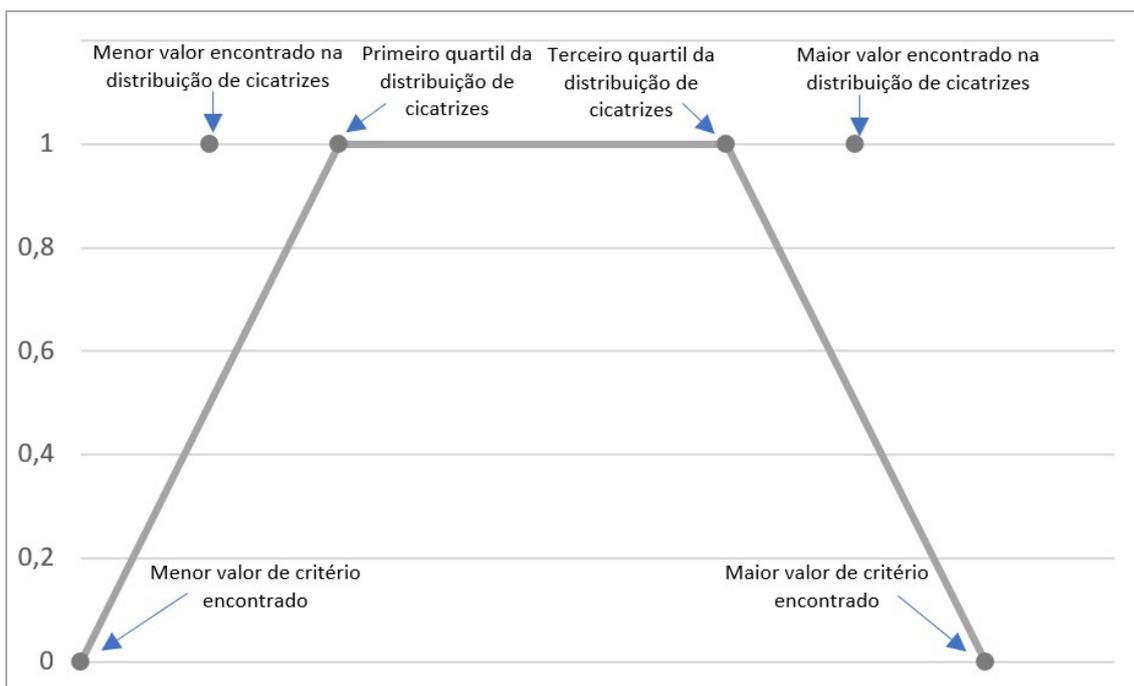


Figura 16 – Ilustração genérica do processo de normalização

Uma vez normalizados os mapas segundo a lógica *fuzzy* foi feita a sobreposição ponderada deles. Cada mapa recebe um peso, que varia entre 0 e 1, calculado segundo a técnica AHP, apresentada no item 2.6 do capítulo anterior.

Ao final, terá sido produzido um mapa que indica quais regiões dentro da bacia conjugam a maior quantidade de características físicas necessárias para gerar fluxos de detritos. Em outras palavras, é indicada a suscetibilidade do meio físico à geração de fluxos de detritos.

3.3.2.

Etapa 2: Determinação da probabilidade de instabilidade

A avaliação da estabilidade das encostas proposta nesse trabalho faz uso de uma análise em escala regional (Burton; Bathurst, 1998; Dhakal; Amada; Aniya, 2004; Saha;

Gupta; Arora, 2002), ou seja, é avaliada a condição de estabilidade de toda a bacia hidrográfica escolhida como área de estudo.

Seja numa análise local ou numa análise regional, a estabilidade de uma encosta pode ser calculada de acordo com a razão entre a sollicitação cisalhante e a resistência ao cisalhamento do material, a essa razão dá-se o nome de fator de segurança (FS) (Skempton; Delory, 1957).

Segundo a NBR 11.682/2009 (ABNT, 2009) os valores mínimos recomendados de FS são dados de acordo com a Tabela 9. Ressalta-se que os valores apresentados se referem às análises de estabilidade interna e externa do maciço, sendo independentes de outros fatores de segurança recomendados por normas de dimensionamento de estruturas de contenção.

A estabilidade da encosta é predominantemente dependente dos valores de coesão, ângulo de atrito do arranjo de partículas e do nível d'água dentro da massa de solo (se existir).

Particularmente nas encostas de países tropicais, é comum a existência de perfis de intemperismo sobrejacentes a um horizonte de rocha fraturada, cuja interface funciona como uma região drenante, garantindo que o nível freático se mantenha em níveis profundos. Assim, na maior parte do tempo, os horizontes de solo se mantêm em um estado não saturado (Gerscovich; Vargas Jr.; Campos, 2015). Nesse sentido, a presença da sucção mátrica possui um papel importante no controle da resistência ao cisalhamento do solo, e conseqüentemente, na estabilidade de encostas (Huat; Ali; Low, 2006).

Tabela 9 – Classes de estabilidade (FS) (ABNT, 2009)

		Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
		Alto	Médio	Baixo
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	1,5	1,5	1,4
	Médio	1,5	1,4	1,3
	Baixo	1,4	1,3	1,2

Considerando que os parâmetros de resistência do solo não variam ao longo do tempo, o gatilho para a instabilidade das encostas é, normalmente, o acréscimo da saturação do solo, acarretando o aumento da poro-pressão e conseqüentemente na redução das tensões efetivas normais à superfície de ruptura (Ray; Smedt, 2009).

Por isso, eventos de chuva têm sido considerados como um dos principais eventos deflagradores de fluxos de detritos (Costa; Fleisher, 1984) e outros movimentos de massa rasos que ocorrem em encostas íngremes de solo residual (Huat; Ali; Low, 2006). Para um dado evento de chuva, a água vai infiltrar no solo promovendo um aumento da saturação em zonas com baixa profundidade próximas à superfície, o que pode causar a ruptura da encosta em prolongados eventos de chuva (Gerscovich; Vargas Jr.; Campos, 2015; Muntohar; Liao, 2010).

Ressalta-se que a taxa de infiltração de água no solo se reduz com o tempo e que o processo de fluxo interno de água no solo continua a ocorrer mesmo após a chuva ter cessado. Ou seja, a frente de saturação continuará a se mover para mais fundo da massa de solo, só parando quando atingir o equilíbrio ou estado estacionário (Huat; Ali; Low, 2006). Com isso, é possível que a ruptura ocorra algum tempo após o fim do evento pluviométrico (Gerscovich; Vargas Jr.; Campos, 2015).

Segundo Huat, Ali e Low (2006), alguns autores têm incorporado a infiltração nas avaliações de estabilidade de encostas, tais como: Othman (1989), Anderson (1991), Abdullah e Ali (1994), Suhaimi (1997) e Ali e Rahardjo (2004). Na maioria dos trabalhos consultados, nas análises de estabilidade de encostas, a taxa de infiltração é assumida como uniforme e o solo como homogêneo.

Recentemente, Li et al. (2019) propuseram um modelo solo-água para avaliar a suscetibilidade de uma dada região à formação de fluxos de detritos.

Segundo esses autores, de todos os tipos de fluxos de detritos, os mais comuns são os movimentos rasos de solo, que apresentam a superfície de ruptura planar e que são deflagrados por eventos chuvosos. Dessa forma, é viável à aplicação do Modelo do Talude Infinito para o cálculo da estabilidade (Muntohar; Liao, 2010).

A formulação matemática para o cálculo de FS é apresentada na Eq. 14 e na Figura 17. Para a sua aplicação são adotadas 3 hipóteses: (1) o fluxo de subsuperfície é assumido

como paralelo à superfície da encosta; (2) a superfície crítica de ruptura ocorre na parte do solo saturada pelo processo de infiltração; (3) o nível d'água do lençol freático é profundo e, portanto, não presente, resultando na expressão (Muntohar; Liao, 2010):

$$FS = \frac{c' + (\gamma_t * H * \cos^2(\alpha) - z_w * \gamma_w * \cos(\alpha)) * \operatorname{tg}(\varphi')}{\gamma_t * H * \cos(\alpha) * \sin(\alpha)} \quad \text{Eq. 14}$$

Onde c' (kPa) é a coesão, φ' ($^\circ$) ângulo de atrito, γ_t (kN/m³) peso específico do solo saturado, γ_w (kN/m³) peso específico da água, α ($^\circ$) é a declividade, z_w (m) é a carga de água, H (m) é a espessura de solo.

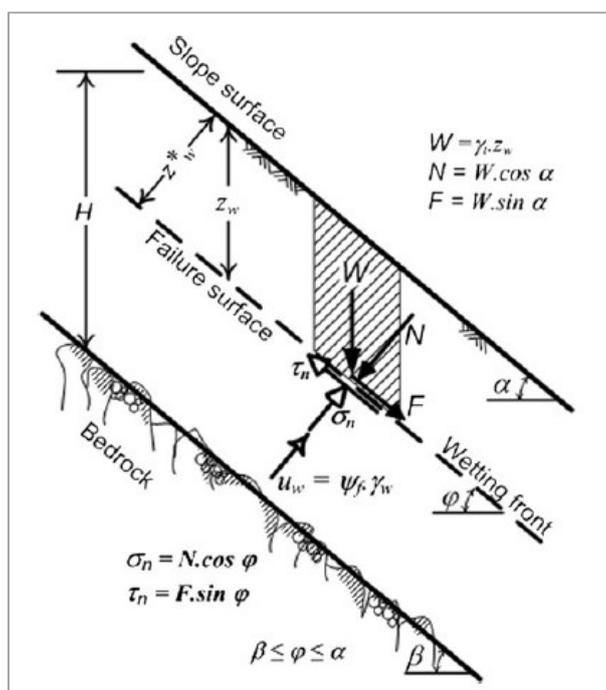


Figura 17 – Modelo do Talude Infinito

No que diz respeito à obtenção dos parâmetros para o cálculo de FS, ressalta-se que: (1) os valores dos parâmetros de resistência do solo podem ser obtidos em ensaios de campo/laboratório ou em literatura (com uma adoção de valores médios, metodologia comum em análises em escala regional); (2) as informações da declividade das encostas podem ser obtidas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) disponíveis para *download* em sites de órgãos nacionais.

Já a espessura do solo é um parâmetro de difícil obtenção quando se trabalha com escala regional, principalmente na falta de informações de sondagens. Por conta disso, a

espessura do solo foi calculada segundo o modelo desenvolvido por Saulnier, Beven e Oblet (1997), que assume que as características geométricas/topográficas de uma região são inversamente proporcionais à espessura de solo.

Esse modelo assume que a taxa de erosão aumenta com a altitude. Sendo assim, solos rasos estão associados à maiores altitudes, enquanto solos mais espessos ocorrem em altitudes menores. A espessura do solo pode ser calculada segundo Eq. 15:

$$h_i = h_{max} - \left(\frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \right) * (h_{max} - h_{min}) \quad \text{Eq. 15}$$

Onde h_{max} (m) e h_{min} (m) referem-se à máxima e à mínima espessura de solo encontrada na região, z_{max} (m) e z_{min} (m) referem-se às elevações máximas e mínimas.

Até então os parâmetros apresentados diziam respeito a características do solo e topográficas. Adotando a hipótese de que esses parâmetros podem variar dentro da área de estudo, mas são constantes no tempo, a deflagração de um processo de instabilização é feita unicamente pela variação da carga de água dentro do solo, sendo esse o único parâmetro que varia espacial e temporalmente.

Considerando que o nível do lençol freático ocorre em nível profundo, portanto não representativo para o cálculo de estabilidade, essa carga de água advém, essencialmente, de um processo de infiltração. Portanto, é possível calcular a carga de água crítica que leva a encosta à ruptura, ou seja, que atinja FS igual a 1.

De posse desse valor, é possível calcular qual a chuva que é capaz de promover esse valor de infiltração. Esse cálculo usou como base o Método CN, desenvolvido pelo SCS, e descrito com maiores detalhes no item 2.7 do capítulo anterior. Normalmente, com esse método, determina-se as parcelas de abstração, infiltração e escoamento superficial para uma dada chuva. Contudo pode-se proceder de maneira inversa e calcular o valor da chuva a partir de um valor de infiltração. Para tanto, basta inverter a Eq. 16 e apresentá-la em função de “P” conforme Eq. 17:

$$F = \frac{(P - 0,2 * S) * S}{(P + 0,8 * S)} \quad \text{Eq. 16}$$

$$P = \frac{F * S}{S - F} + 0,2 * S \quad \text{Eq. 17}$$

Onde F (mm) é a retenção atual ou quantidade atual de água infiltrada; S (mm) é o potencial máximo de retenção (mm); P (mm) é a chuva incidente.

Esse valor de chuva, por sua vez, é associado a um tempo de recorrência ou de retorno (TR), sendo esse definido como o intervalo médio de tempo (geralmente em anos) em que pode ocorrer ou ser superado um dado evento, ou seja, é o inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou ultrapassado: $TR = 1/p$.

Dessa forma, a probabilidade de instabilidade de uma encosta é atrelada à probabilidade de ocorrência da chuva que promoverá essa instabilidade, ou seja, é atrelada a probabilidade de ocorrência do processo deflagrador.

O cálculo de uma chuva para um determinado TR pode ser feito a partir de uma curva de Intensidade, Duração e Frequência (IDF) que correlaciona a intensidade de precipitação com diferentes durações e tempos de recorrência. Cita-se a Equação do tipo Otto Pfafstetter, conforme a seguinte expressão (Eq. 18) (Pfafstetter, 1982):

$$P = TR^{(\alpha + \frac{\beta}{TR^\gamma})} * [a * t + b * \log(1 + c * t)] \quad \text{Eq. 18}$$

Onde P é a altura de chuva (mm); TR é o tempo de recorrência (anos); t é a duração (horas); α , β são os valores que dependem da duração da precipitação; γ , a, b, c são os parâmetros constantes para cada posto.

A duração da chuva é adotada como sendo igual ao tempo de concentração da bacia (t_c). Existem diversas formas de se calcular o tempo de concentração de uma bacia, mas para essa pesquisa adotou-se o método de George Ribeiro (Eq. 19) (Ribeiro, 1961):

$$t_c = \frac{16 * L}{(1,05 - 0,2 * p) * (100 * sl)^{0,04}} \quad \text{Eq. 19}$$

Onde L é o comprimento do rio principal da bacia (km); p é a percentagem da bacia com cobertura vegetal (entre 0 e 1); sl é a declividade média da bacia (m/m).

O produto final desses procedimentos é um mapa que indica a probabilidade de instabilidade de uma encosta dentro da área de estudo.

Confrontando esse mapa com o mapa de suscetibilidade do meio físico, obtido na Etapa 1, obtêm-se quais locais dentro da área de estudo possuem as características físicas para formar fluxo de detritos e qual a probabilidade desse local se tornar instável, sendo esse o Mapa de Perigo.

A etapa final do processo é comparar o Mapa de Perigo produzido com as cicatrizes de movimentos anteriores presentes no Mapa de Inventário.

3.4. Mapa de Vulnerabilidade e Exposição

O Mapa de Vulnerabilidade e Exposição conjuga informações de exposição, vulnerabilidade e resiliência da população dentro da área de estudo, estando relacionado à fragilidade desse grupo frente a um evento de fluxo de detritos (Li et al., 2019).

Geralmente, a vulnerabilidade é dividida em quatro tipos (Frey et al., 2016; Liu; Lei, 2003):

- Física: Inclui perdas devido a danos físicos em sistemas de infraestrutura e edificações;
- Ambiental: Relacionada com a vulnerabilidade dos recursos naturais como água, ar e uso da terra;
- Econômico: Relacionado com as atividades econômicas e rendimento financeiro dos habitantes. Indicadores usuais para a vulnerabilidade econômica são o PIB e a renda per capita, em que quanto maior o seu valor menor a vulnerabilidade;
- Social: Relacionado com o impacto na população e estruturas sociais. Indicadores comuns usados na avaliação da vulnerabilidade social são: a densidade populacional, em que áreas com maior densidade populacional são mais vulneráveis; idade, em que os grupos considerados mais vulneráveis são os idosos e crianças; nível educacional, em que pessoas com menor grau de escolaridade são mais vulneráveis.

Embora essa noção de vulnerabilidade seja um conceito amplo e com diversas interpretações, foi adotada que esta vulnerabilidade está relacionada com fatores socioeconômicos.

Considerando os indicadores mais comuns para essas duas dimensões, o cálculo da Vulnerabilidade e Exposição segue a formulação matemática expressa na Eq. 20:

$$VE = \frac{I_E * I_{idade} * I_{alfabetização}}{I_{CR}} \quad \text{Eq. 20}$$

Onde, VE é a Vulnerabilidade e Exposição, I_E é o indicador de exposição; I_{idade} é o indicador de vulnerabilidade devido à idade, $I_{alfabetização}$ é o indicador de vulnerabilidade devido ao grau de alfabetização; e I_{CR} é o indicador de capacidade de recuperação no pós desastre.

O indicador de exposição (I_E) representa efetivamente os elementos expostos e foi adotado como sendo a densidade populacional, ou seja, o número de habitantes por quilômetro quadrado.

O indicador de vulnerabilidade devido à idade (I_{idade}) está relacionado com a porcentagem de pessoas mais vulneráveis sob o ponto de vista de idade. Esse indicador representa, portanto, a porcentagem da população com menos de 10 anos e mais de 65 anos, ou seja, a porcentagem de crianças e idosos (Rezende, 2018).

O indicador de vulnerabilidade devido ao grau de alfabetização ($I_{alfabetização}$) está relacionado com a porcentagem de pessoas mais vulneráveis sob o ponto educacional. Esse indicador representa a porcentagem da população não alfabetizada com mais de 5 anos.

O indicador de capacidade de recuperação (I_{CR}) representa a capacidade de reposição da população afetada. Ele considera a diferença entre a renda e despesa média dos habitantes de uma região, dividida pela renda total dessa região. Assim, esse indicador representa o valor passível de uso para cobertura de danos não previstos, conforme apresentado na Tabela 10 (Rezende, 2018). Em outras palavras, esse indicador representa a resiliência da população afetada.

Contudo, ressalta-se que o indicador de capacidade de recuperação (I_{CR}) também pode ser entendida como o inverso da vulnerabilidade. Isto é, ele tem uma relação inversamente proporcional com a vulnerabilidade, ou seja, quanto menor for a capacidade de recuperação do elemento, maior será a sua vulnerabilidade.

Tabela 10 - Capacidade média de recuperação relacionada à faixa de rendimento (Rezende, 2018)

Faixa de rendimento	Faixa de rendimento normalizada por salário mínimo*	CR
Até R\$3000,00	Até 2,7 salários mínimos	0,0000
De R\$3000,00 a R\$4000,00	De 2,7 até 3,6 salários mínimos	0,0420
De R\$4000,00 a R\$6000,00	De 3,6 até 5,5 salários mínimos	0,0768
Maior que R\$6000,00	Maior do que 5,5 salários mínimos	0,1996

* o valor do salário mínimo no ano de 2021 era de R\$ 1.100,00 ou então US\$ 203,37 segundo a cotação do Banco Central do Brasil para o dia 03 de maio de 2021.

Observa-se que quanto maior forem os elementos expostos e quanto mais vulneráveis eles forem, maior será o valor de VE. Por outro lado, maiores valores de resiliência contribuem para diminuir o valor de VE.

O Mapa de Vulnerabilidade e Exposição é dado, então, pela normalização dos valores encontrados para VE. O menor valor de vulnerabilidade encontrado receberá valor zero, enquanto que os valores maiores que o terceiro quartil da distribuição dos seus valores receberão valor igual a 1. Todos os demais devem receber um valor entre 0 e 1 segundo uma função linear.

3.5. Mapa de Risco

Genericamente, esse mapa apresenta a relação entre a probabilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno perigoso e a magnitude de danos ou consequências sociais e econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade (Bobrowsky; Hervás, 2009). No caso específico desse trabalho, risco refere-se ao produto entre probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos e a vulnerabilidade das pessoas afetadas por ele.

Assim, o Mapa de Risco é, então, obtido pelo produto dos Mapas de Perigo e Vulnerabilidade e Exposição, segundo a fórmula Eq. 21:

$$R = \text{Perigo} * \text{Vulnerabilidade e Exposição} \quad \text{Eq. 21}$$

4. Estudo de Caso: Bacia do Córrego D'Antas

Em 11 de janeiro de 2011, chuvas extremas acarretaram na maior catástrofe ocorrida na região Serrana do Rio de Janeiro e um dos maiores desastres socioambientais já ocorridos no último século (Coelho Netto et al., 2013; Ximenes; Montezuma; Sato, 2017). Na época, todos os 7 municípios afetados (Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, São José do Vale do Rio Preto, Areal, Sumidouro e Bom Jardim) decretaram estado de calamidade pública (Ribeiro, 2015).

Segundo dados da Defesa Civil Estadual, esse evento, deixou 350 desaparecidas, 8.795 desabrigados, 22.604 desalojados e provocou a morte de mais de 900 pessoas. Com relação a perdas e danos, estimativas do Banco Mundial apontam para custos totais da ordem de R\$4,78 bilhões (Motta, 2014; Nunes, 2013).

Dentre os municípios atingidos, Nova Friburgo foi o mais afetado, apresentando no pós-desastre cerca de 3.622 cicatrizes de deslizamentos em uma área de 400 km² (Coelho Netto et al., 2013; Medeiros; Barros, 2011; Telles; Rodrigues; Neto, 2015). Dentro de Nova Friburgo um dos lugares mais atingidos foi a Bacia do Córrego D'Antas (Figura 18). Por toda a bacia houve casos de deslizamentos translacionais rasos e fluxos de detritos, ocasionando grande destruição das áreas marginais dos canais, das casas, dos prédios e das escolas (Ximenes; Montezuma; Sato, 2017). Essa sucessão de desastres fez com que essa bacia fosse amplamente estudada.

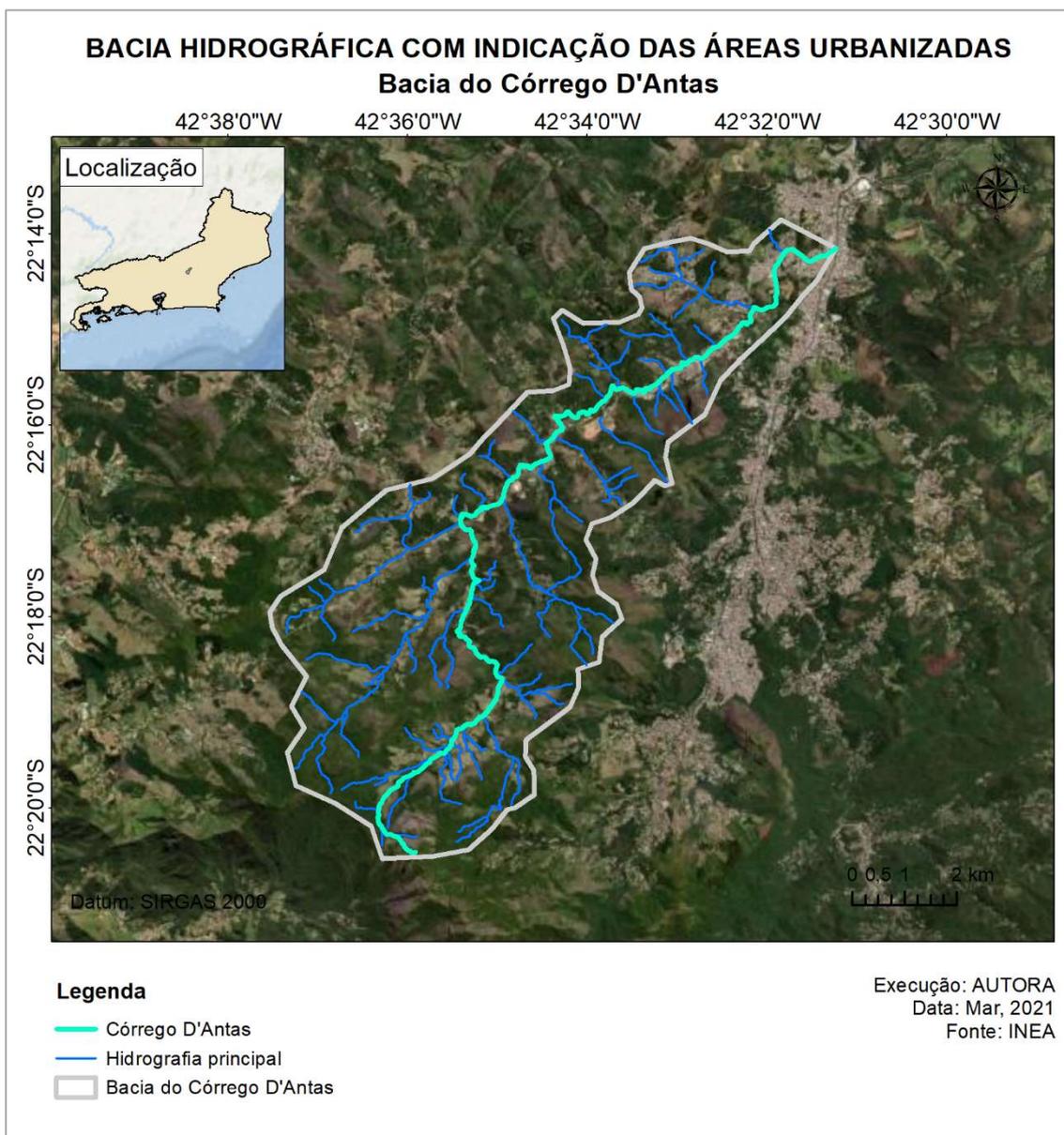


Figura 18 – Delimitação da bacia hidrográfica do Córrego D'Antas e hidrografia principal com indicação das áreas urbanizadas.

4.1. Características gerais de Nova Friburgo

O município de Nova Friburgo possui cerca de 933 km² e está localizado na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, limitado pelas coordenadas geográficas dos paralelos

Sul 22° 11' e 22° 24' e os meridianos de longitude Oeste 42° 37' e 42° 27' (Correia, 2011; Telles; Rodrigues; Neto, 2015).

O processo de ocupação e formação do município de Nova Friburgo data de 1818, quando o Rei D. João VI, interessado em intensificar a colonização do interior do Brasil, baixou um decreto que autorizava o estabelecimento de uma colônia na região (Prefeitura Municipal de Nova Friburgo, 2014).

Essa nova colônia, chamada de Nova Friburgo, iniciou seu processo de urbanização com a inauguração da estrada de ferro *Leopoldina Railway*, que conectava o centro da cidade ao porto do Rio de Janeiro (Prefeitura Municipal de Nova Friburgo, 2014).

A partir de 1937, quando Nova Friburgo se transformou em pólo industrial e comercial do Centro-Norte fluminense, a cidade passou a ter um rápido crescimento populacional com intensa ocupação das áreas urbanas (Prefeitura Municipal de Nova Friburgo, 2014). Esse desenvolvimento urbano se deu de maneira desordenada acarretando na ocupação de áreas vulneráveis tais como margens de rios e encostas (Ximenes; Montezuma; Sato, 2017).

Segundo o Censo Demográfico de 2010 do IBGE (IBGE, 2010), a população atual de Nova Friburgo é de 182.082 habitantes, dos quais 88% vivem em áreas urbanas. A maior concentração populacional está na sede municipal, localizada na confluência dos rios Bengalas e Córrego D'Antas (Telles; Rodrigues; Neto, 2015).

A Bacia do Córrego D'Antas possui em torno de 51,53 km², conforme mostrado na Figura 19, e encontra-se inserida no contexto morfoclimático da Serra do Mar. A sua precipitação média anual é de 2.359 mm, sendo que os meses de dezembro e janeiro são os mais chuvosos (com uma precipitação média mensal de cerca de 300 mm) e os meses junho e julho são os mais secos (com uma precipitação média mensal de cerca de 75 mm). A distribuição de precipitação mensal média encontra-se na Figura 20.

Na época do Megadesastre, foram registrados 297mm acumulados na noite entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2011 (Ottero; Chargel; Hora, 2018), caracterizando um evento de cerca de 350 anos de tempo de recorrência segundo dados do INEA. Essa intensa chuva, junto com o fato de o mês anterior também ter sido chuvoso, propiciaram a ocorrência de diversos fluxos de detritos na Bacia do Córrego D'Antas.

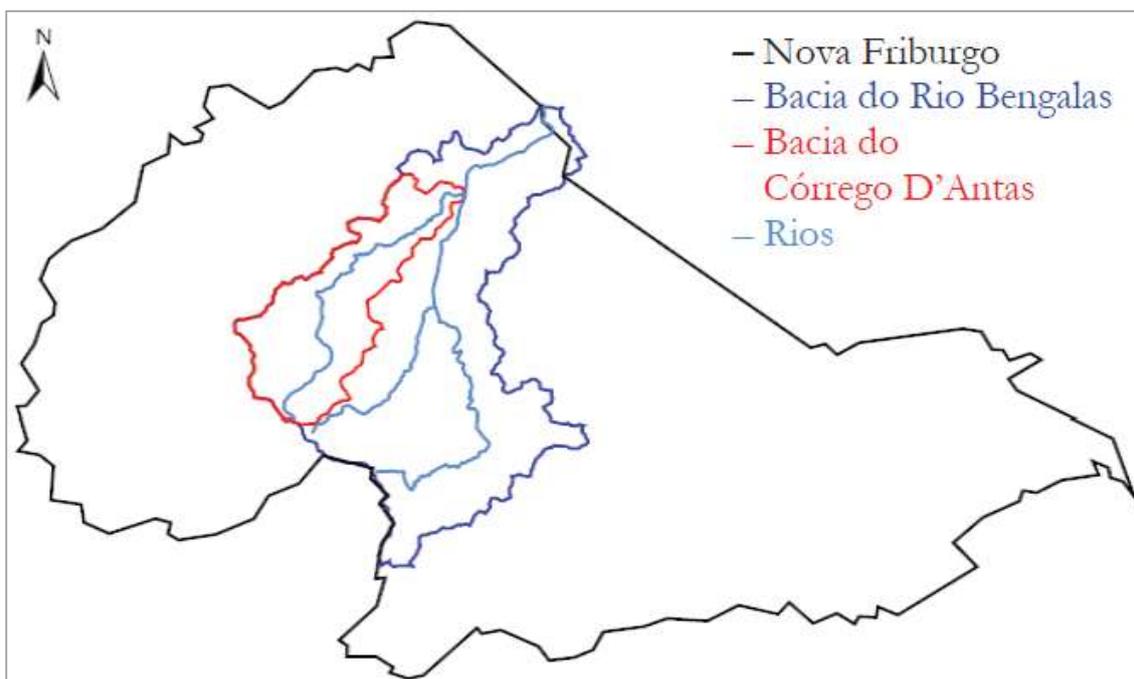


Figura 19 – Delimitação do município de Nova Friburgo e das Bacias dos Rios Bengala e Córrego D'Antas (Telles; Rodrigues; Neto, 2015).

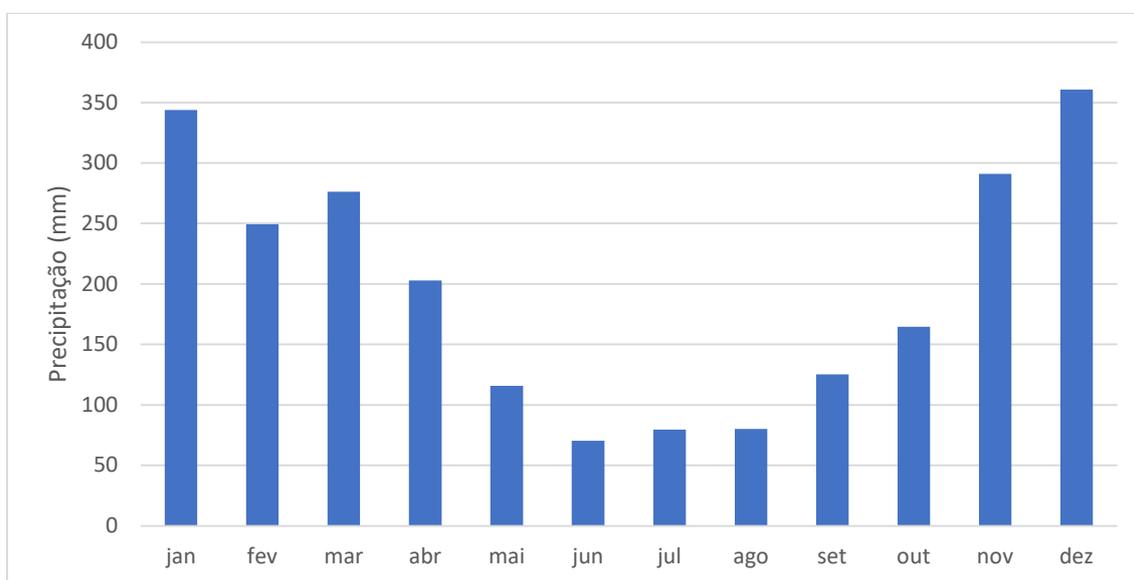


Figura 20 – Distribuição de precipitação média mensal na Bacia do Córrego D'Antas – Dados do Posto pluviométrico Piller

4.2. O desastre da Região Serrana

Em 11 de janeiro de 2011, chuvas extremas acarretaram numa das maiores tragédias socioambientais do país, ao lado de tragédias anteriores como as da Serra das Araras, em janeiro de 1967, de Caraguatatuba, em março de 1967, e a de Santa Catarina, em novembro de 2008 (Ernani; David, 2011 *apud* Ribeiro, 2015)).

Segundo Canedo, Ehrlich e Lacerda (2011), nos dias que precederam ao desastre da Região Serrana houve chuvas pré-frontais de forte intensidade que causaram a saturação do solo. Já na noite de 11 para 12 de janeiro, nuvens convectivas, conhecida por *cumulus nimbus*, realimentadas por umidade proveniente da Amazônia, ficaram estacionadas por mais de 4 horas sobre as cabeceiras de vales da região provocando chuvas intensas.

Esse extenso período chuvoso, que circundou o desastre, foi alimentado e mantido pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Essa zona direciona grande quantidade de umidade amazônica até o Oceano Atlântico, passando pelas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil, transportando a alta umidade da Amazônia pelo país. A combinação acabou por formar um evento hidrológico atípico e de difícil ocorrência.

Essa chuva de enormes proporções incidiu sobre uma região de encostas com grandes declives, vales estreitos, camada de solo pouco espessa e afloramentos de rocha nas partes mais elevadas. Segundo Pinho, Francisco e Salgado (2013), essas características físicas da região foram determinantes para as ocorrências dos deslizamentos, fluxos de detritos e das enxurradas, que conduziram lama e detritos por longas distâncias pelos vales (Figura 21).

Um exemplo importante de um fluxo de detritos ocorrido na região foi o do Morro Duas Pedras (Figura 21a). O movimento teve início próximo ao cume da montanha (Figura 21b) com mobilização de solo e blocos de rocha que desceram pela escarpa rochosa. Em seguida, esse material atingiu e erodiu o tálus depositado no talvegue (Figura 21c), para finalmente se depositar nas proximidades do Hospital São Lucas e no bairro Duas Pedras, onde causou diversas mortes (Figura 21d) (Valverde Sancho, 2016).



Figura 21 - Vistas aéreas do fluxo de detritos do Hospital São Lucas (Valverde Sancho, 2016).

O impacto causado pelo desastre da Região Serrana foi tamanho, que suas consequências configuraram um marco nas políticas de gestão de riscos e desastre no país, impulsionando desafios pela urgente necessidade de investimento em prevenção, monitoramento e mitigação (Ribeiro, 2015).

No que diz respeito as consequências sobre as pessoas, calcula-se que 42% da população dos municípios atingidos sofreram consequências diretas do desastre (Ribeiro, 2015). Contudo, devido ao elevado número de pessoas desaparecidas nesse evento, é difícil

determinar com exatidão o número de vítimas, mas estima-se que mais de 300 mil pessoas foram afetadas, das quais mais de 900 perderam suas vidas (Canedo; Ehrlich; Lacerda, 2011).

Para fins de comparação e avaliação da quantidade de vítimas durante o desastre de 2011, observa-se que o número de mortes nesse evento representa quase 51% das vítimas fatais (1.783 no total) no estado do Rio de Janeiro entre os anos de 1991 a 2010 devido à desastres naturais de acordo com o Atlas Brasileiro dos Desastres Naturais (CEPED UFSC, 2013). Por sua vez, o número de desabrigados foi equivalente a mais de 20% do número de desabrigados por desastres naturais no estado no mesmo período de análise (CEPED UFSC, 2013).

Com relação às perdas econômicas e danos materiais, estimativas do Banco Mundial apontam para valores na ordem de R\$ 4.78 bilhões. Desse total, R\$ 3.15 bilhões estão relacionados à infraestrutura, principalmente ao setor de transporte, saneamento e comércio, com ações relacionadas à recuperação e oferta de crédito; enquanto R\$ 1.62 bilhões são relacionados ao setor habitacional.

5. Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados comentados obtidos na aplicação da metodologia proposta na Bacia do Córrego D'Antas.

5.1. Delimitação da área de estudo

Conforme mencionado, a área de estudo escolhida para esse estudo foi a bacia hidrográfica do Córrego D'Antas, localizada no município de Nova Friburgo-RJ. Sua delimitação foi feita com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido junto ao IBGE na escala 1:25.000 e pode ser observada na Figura 22, onde está também apresentada a sua hidrografia principal.

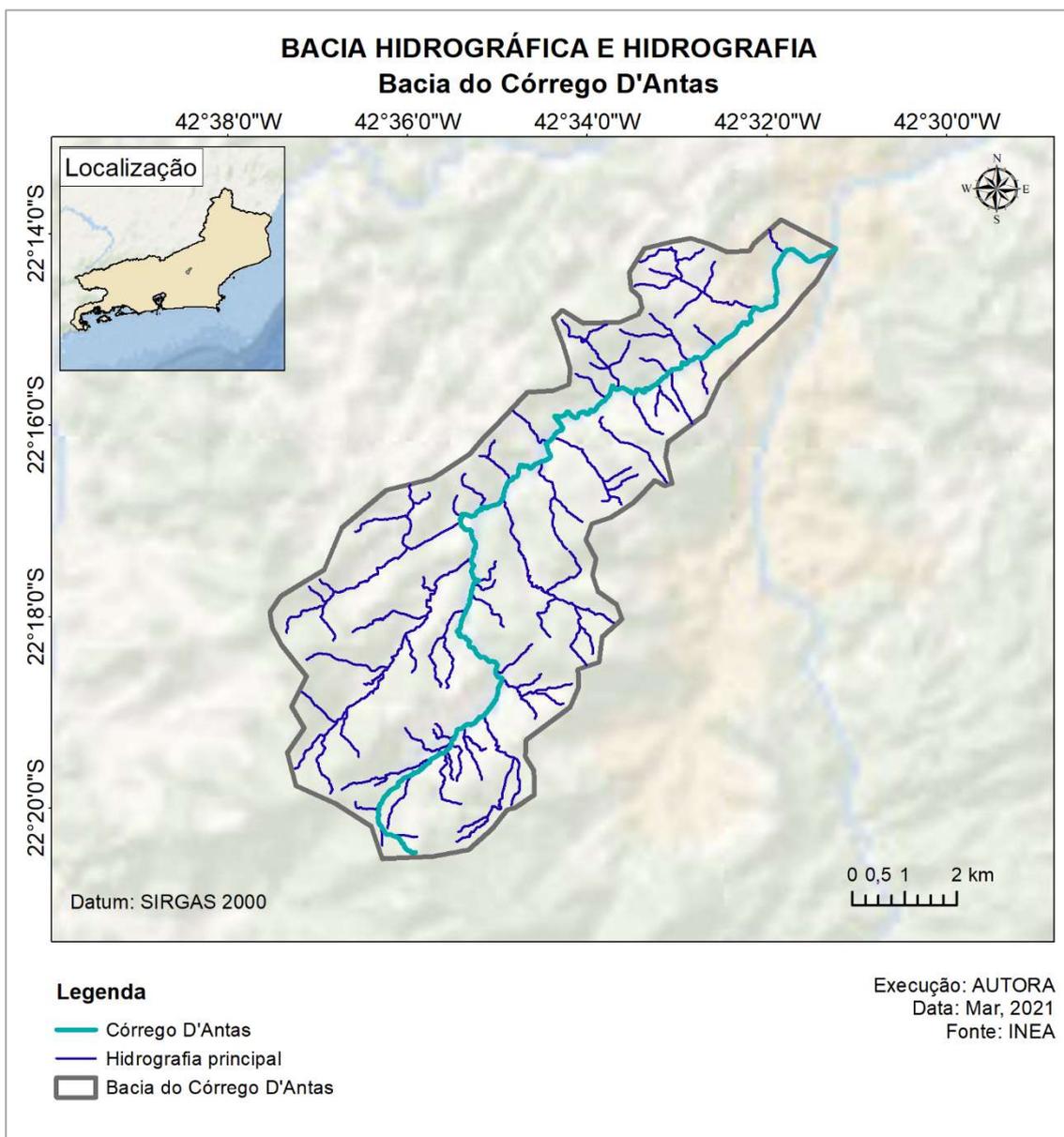


Figura 22 – Delimitação da bacia hidrográfica do Córrego D'Antas e hidrografia principal

5.2. Mapa de Inventário

O mapa de inventário conta com a localização das 28 cicatrizes de fluxos de detritos encontradas dentro da Bacia do Córrego D'Antas. Essas informações foram obtidas por Silva

(2016) através de levantamento de imagem do *software Google Earth* datadas de 19/01/2011. A localização dessas cicatrizes está descrita na Tabela 11 e pode ser observada na Figura 23.

Tabela 11 – Coordenadas das cicatrizes identificadas na Bacia do Córrego D'Antas em 19/01/2011 (mod. Silva, 2016)

ID	Longitude	Latitude
1	-42,604826	-22,304492
2	-42,609315	-22,300758
3	-42,610532	-22,324570
4	-42,616788	-22,301824
5	-42,613745	-22,292283
6	-42,573160	-22,305702
7	-42,552963	-22,272910
8	-42,551199	-22,268146
9	-42,550034	-22,266424
10	-42,554717	-22,264822
11	-42,556348	-22,267468
12	-42,556677	-22,267008
13	-42,548546	-22,266069
14	-42,545635	-22,264077
15	-42,560172	-22,257180
16	-42,544780	-22,261555
17	-42,559972	-22,247807
18	-42,556761	-22,247756
19	-42,559368	-22,249832
20	-42,561608	-22,249908
21	-42,562950	-22,249343
22	-42,566248	-22,250517
23	-42,580529	-22,264190
24	-42,581931	-22,266354
25	-42,582795	-22,267057
26	-42,583618	-22,267152
27	-42,568425	-22,256289
28	-42,570774	-22,248367

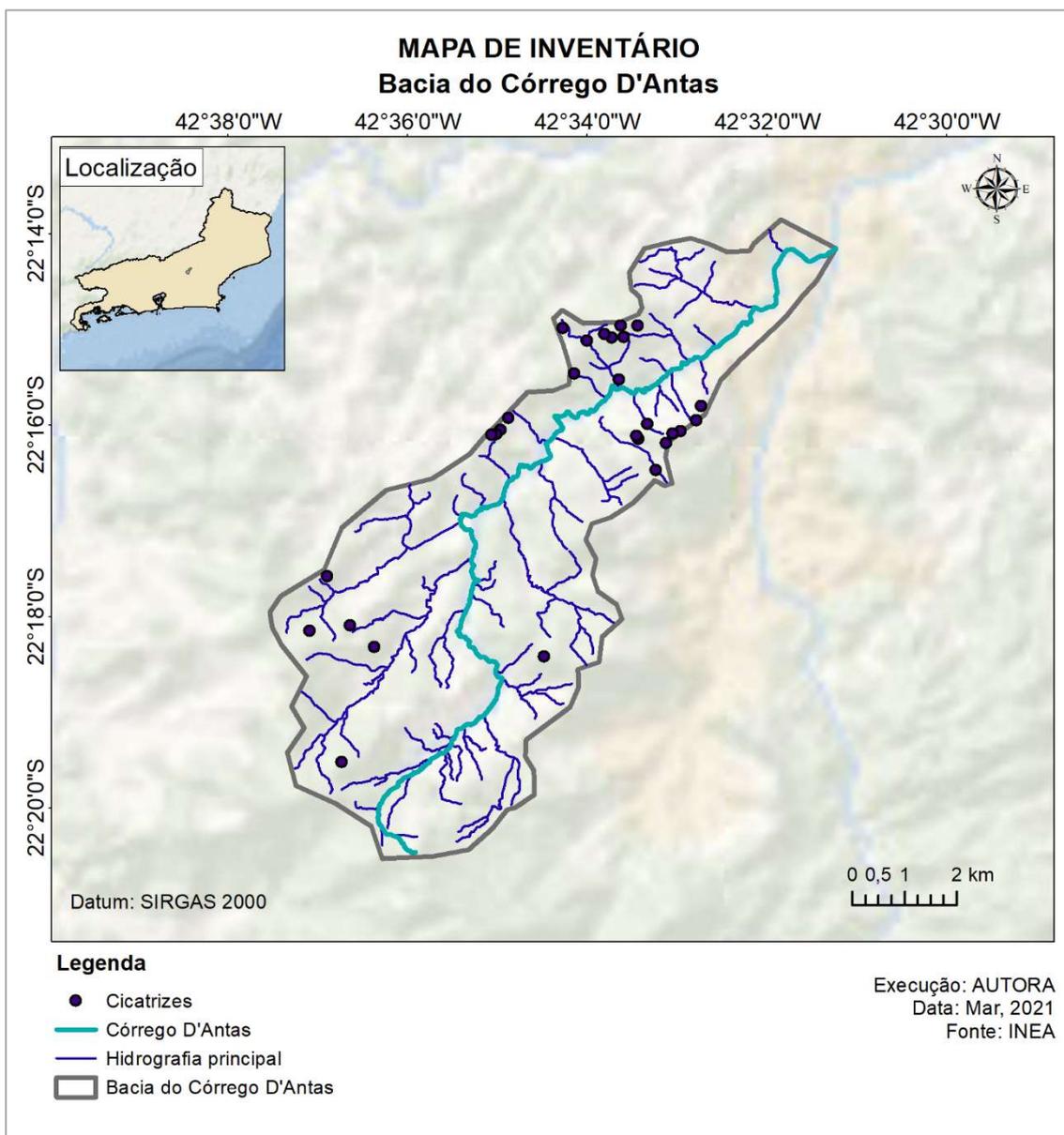


Figura 23 – Mapa de Inventário

5.3. Mapa de Perigo

No Mapa de Perigo é representada a probabilidade de ocorrência de um fluxo de detritos. Essa probabilidade está condicionada às características do meio físico e a probabilidade de ocorrência do processo deflagrador.

A confecção desse mapa consiste em duas etapas, sendo a primeira referente a determinação da suscetibilidade do meio físico à formação de fluxo de detritos e a segunda a determinação da probabilidade da área se tornar instável.

5.3.1.

Etapa 1: Determinação da suscetibilidade do meio físico

A primeira parte da metodologia proposta é determinar a suscetibilidade da bacia de estudo à formação de fluxo de detritos com base em uma análise qualitativa.

Nessa análise, a suscetibilidade é determinada com base em informações de topografia, litologia, tipo e uso do solo assim como sugerido por Li et al. (2019). Depois é feita uma média ponderada entre essas informações, cujos pesos são estabelecidos segundo a técnica de análise multi-critério AHP (Bobrowsky; Hervás, 2009).

Para representar as informações de topografia, litologia, tipo e uso do solo, foram selecionados 5 critérios considerados relevantes na formação de fluxo de detritos, a saber:

- Representando a influência da topografia:
 - Declividade;
 - Curvatura vertical;
 - Curvatura horizontal;
- Representando a influência da geologia:
 - Litologia;
- Representando a influência da do tipo e uso do solo:
 - Potencial máximo de retenção de água no solo (S), equivalente ao potencial máximo de infiltração.

Alguns desses critérios foram obtidos diretamente em bancos de dados nacionais, e outros foram produzidos neste estudo como subproduto de outros mapas. Dentre os mapas obtidos em bancos de dados estão os mapas de litologia, MDE, uso e tipo de solo. Dentre os mapas derivados de outros estão os mapas de declividade, curvaturas vertical e horizontal (derivados do MDE) e infiltração (derivado dos mapas de uso e tipo de solo).

O mapa de declividade foi obtido através do MDE. Para cada pixel do MDE, a declividade foi determinada como a máxima taxa de mudança da elevação em relação à distância entre um pixel e seus vizinhos. Observa-se que a área estudada possui uma altitude variando entre 840 e 1995 metros com declives entre $0,07^\circ$ e $69,21^\circ$. Esses mapas podem ser observados nas Figura 24 e Figura 25.

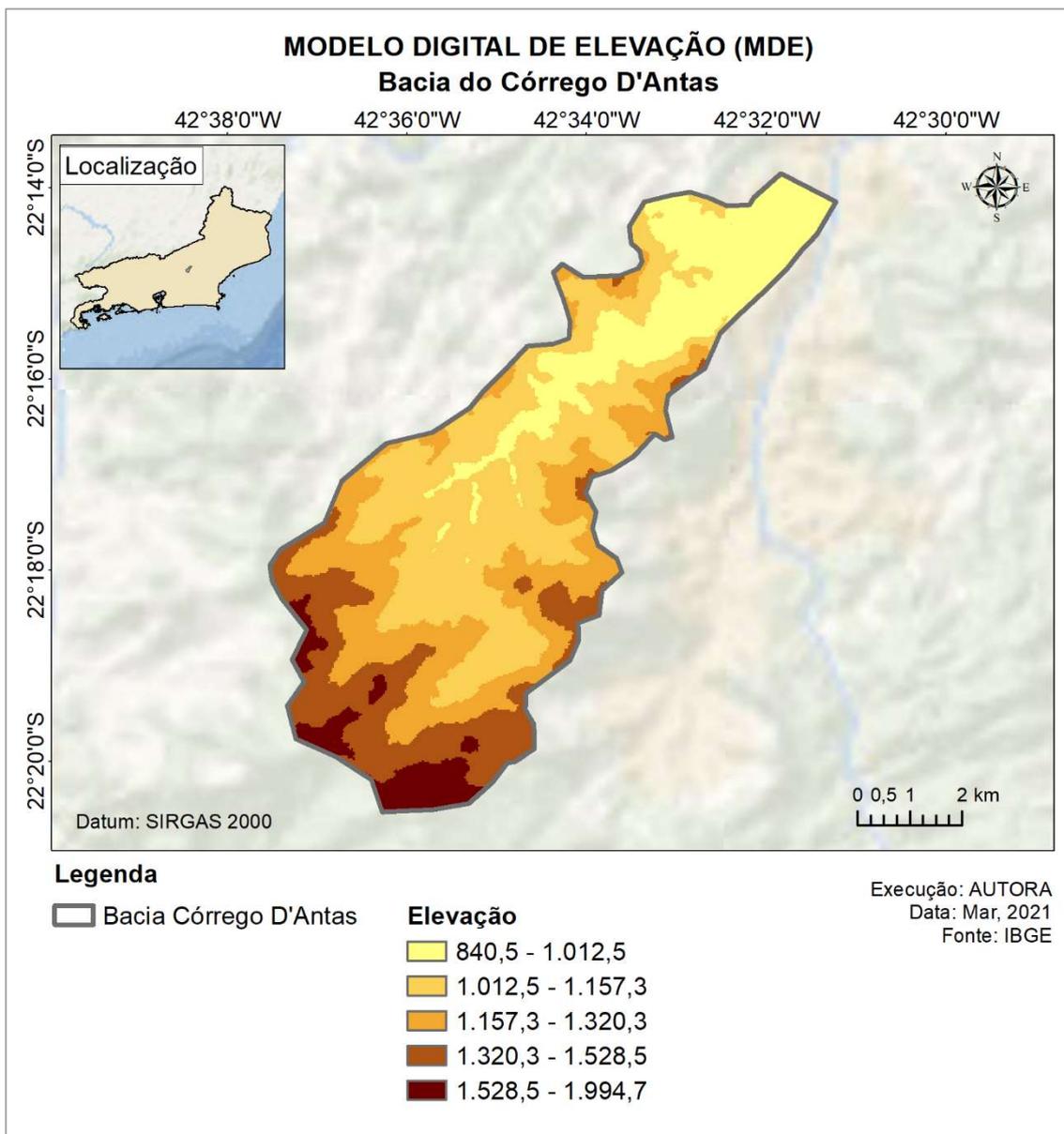


Figura 24 – Modelo digital de elevação (MDE)

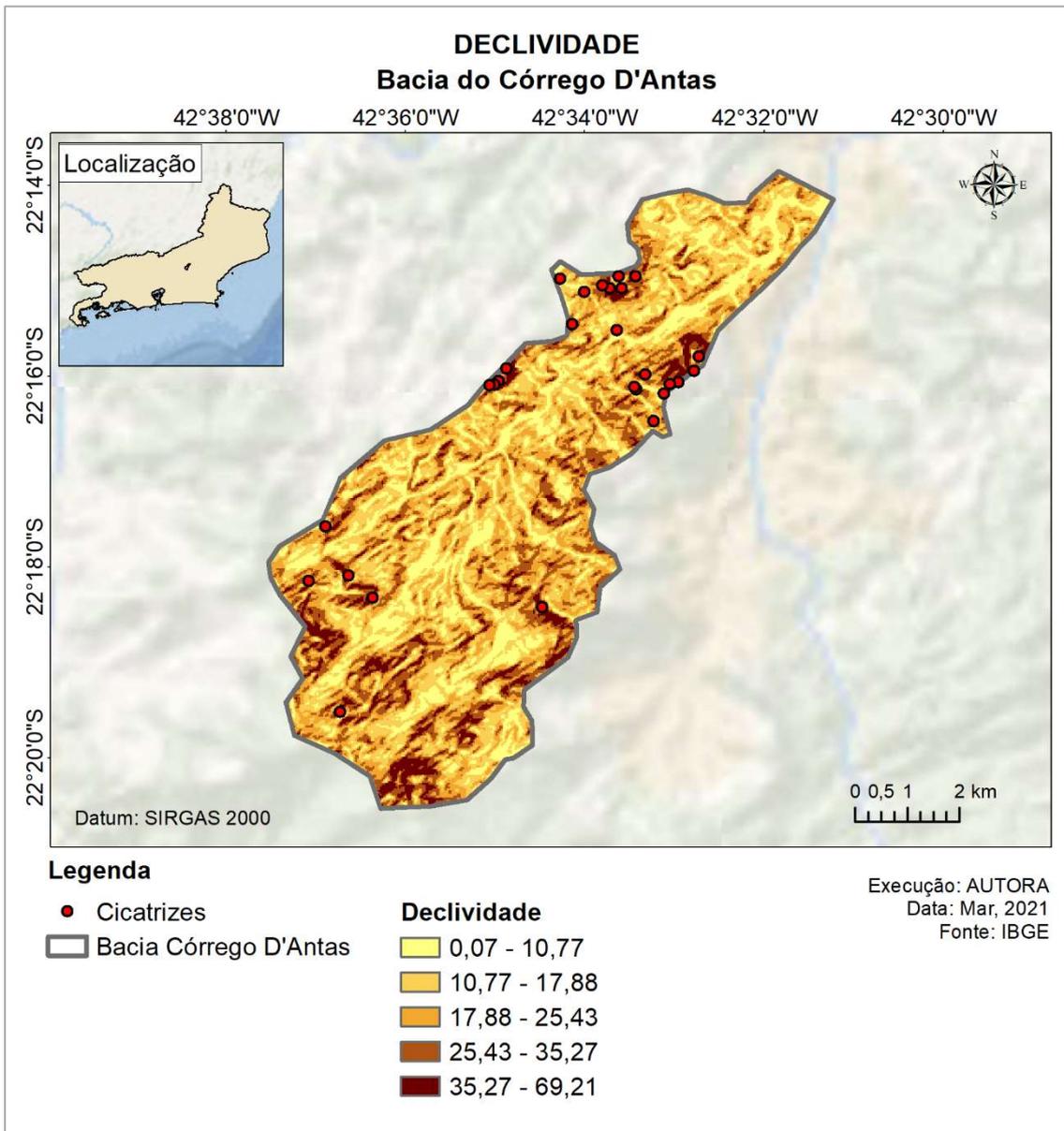


Figura 25 –Mapa de declividade

Outras informações que representam influência da topografia na formação de fluxo de detritos são as curvaturas vertical e horizontal. A curvatura vertical representa a curvatura do relevo paralela à encosta, influenciando na aceleração e desaceleração de fluxos através da superfície. Valores negativos indicam um relevo convexo; valores positivos indicam um relevo côncavo; e zero indica uma superfície retilínea (Figura 26).

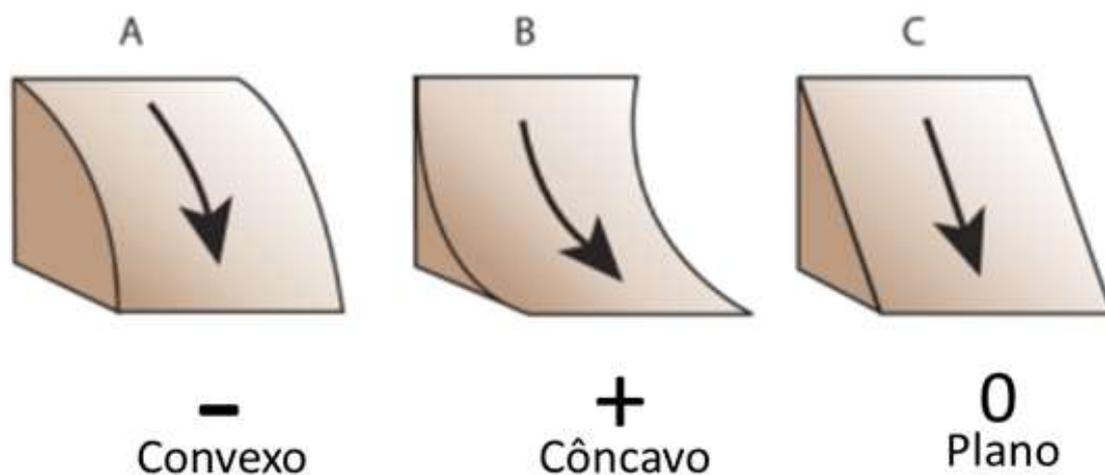


Figura 26 – Esquema de curvatura vertical

Já a curvatura horizontal representa a curvatura do relevo perpendicular à encosta, influenciando na convergência e divergência de fluxos através da superfície. Valores positivos indicam um relevo divergente; valores negativos indicam um relevo convergente; e zero indica uma superfície planar (Figura 27).

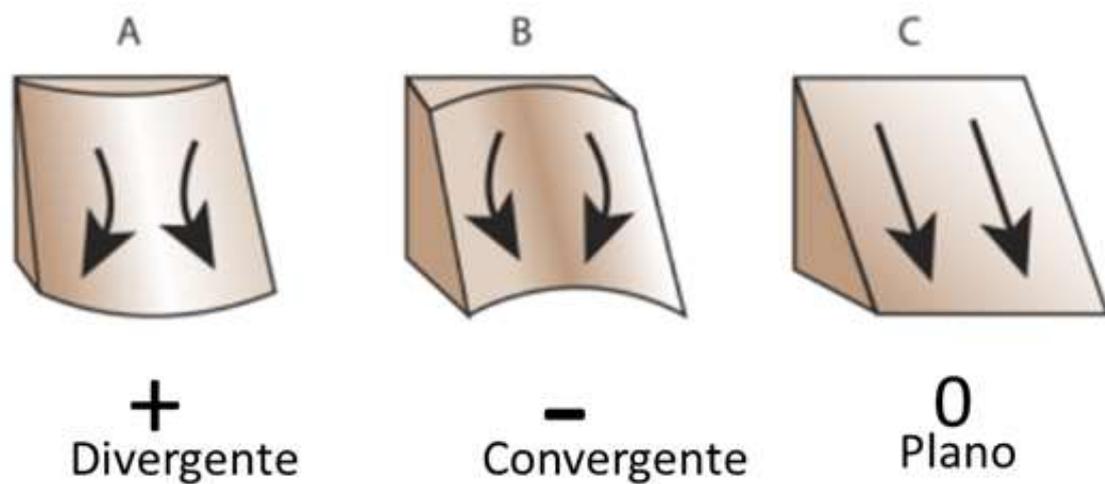


Figura 27 – Esquema de curvatura horizontal

Os mapas de curvatura vertical e horizontal também foram obtidos por meio do MDE, onde a partir dos dados de elevação determina-se a curvatura perpendicular e paralela à encosta. Esses mapas podem ser observados nas Figura 28 e Figura 29.

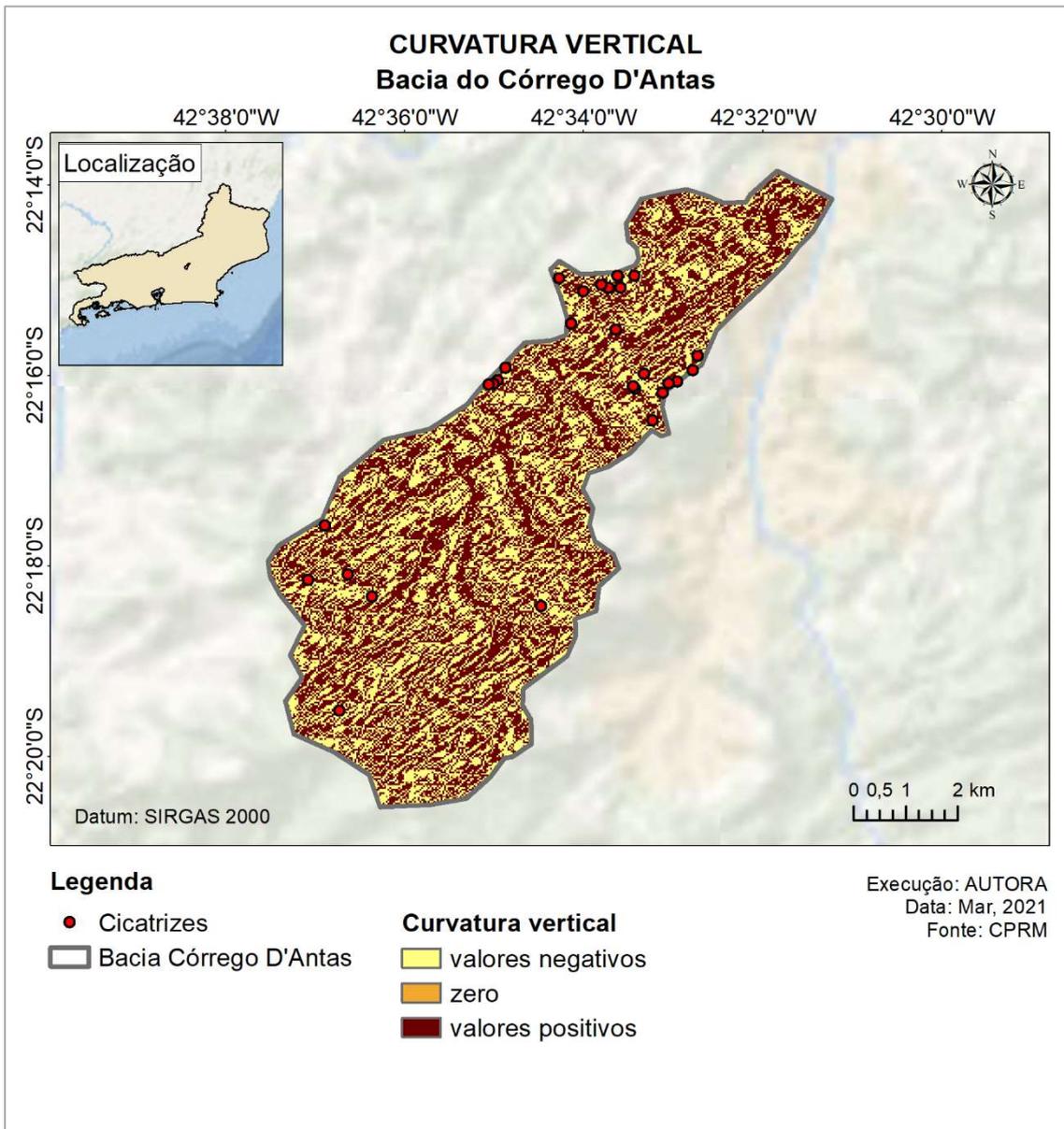


Figura 28 – Mapa de curvatura vertical

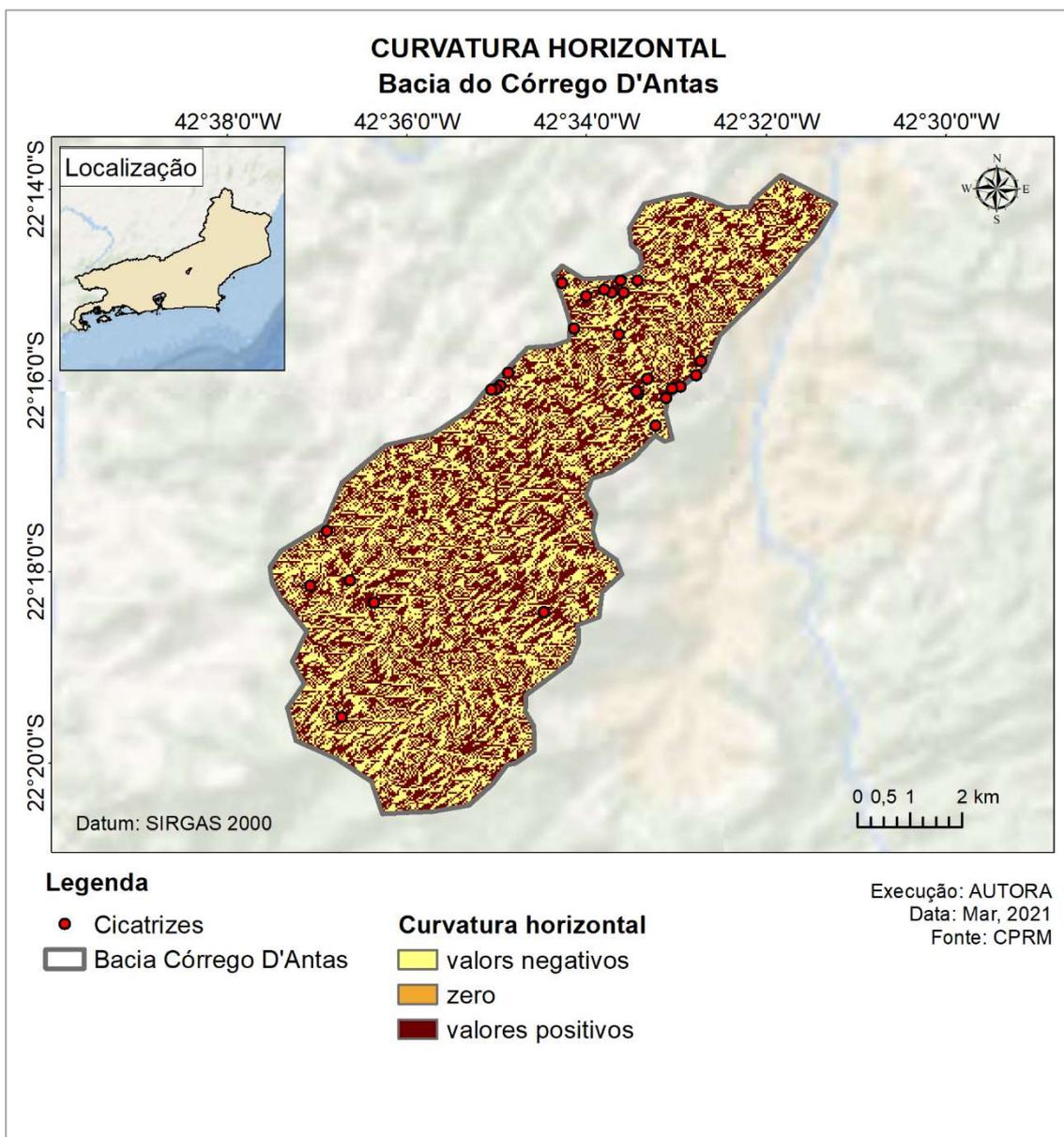


Figura 29 – Mapa de curvatura horizontal

No que diz respeito à geologia, essa área é composta por 7 tipos litológicos, cujas informações foram obtidas junto ao GEOBANK do Serviço Geológico Brasileiro – CPRM e encontram-se na Tabela 12 e Figura 30.

Segundo Pelizoni (2014), esses mesmos materiais encontrados na Bacia do Córrego D'Antas se dividem ainda em:

- Material rochoso pouco fraturado;
- Material de rocha alterada granito- gnaisse fraturado;
- Material de depósito, constituído por colúvio e solo residual;
- Solo residual maduro.

Silva (2016) corrobora com a análise de Pelizoni (2014) e acrescenta que os granitos das classes litológicas Nova Friburgo e Cordeiro encontravam-se alterados, mostrando, inclusive, um comportamento erosivo nos períodos de maior precipitação.

Tabela 12 – Características dos tipos litológicos

Nome	Hierarquia	Tipo	Principais características
Conselheiro Paulino	Corpo	Ígnea	Plutônica
Cordeiro	Suíte	Ígnea	Plutônica
Depósito Colúvio-Aluvionar	Não definida	Material superficial	Sedimento inconsolidado
Depósitos gravitacionais (tálus)	Não definida	Material superficial	Sedimento inconsolidado
Granito Nova Friburgo	Corpo	Ígnea	Plutônica
Granito Serra da Onça	Corpo	Ígnea	Plutônica
Rio Negro	Complexo	Metamórfica	Metamorfismo regional

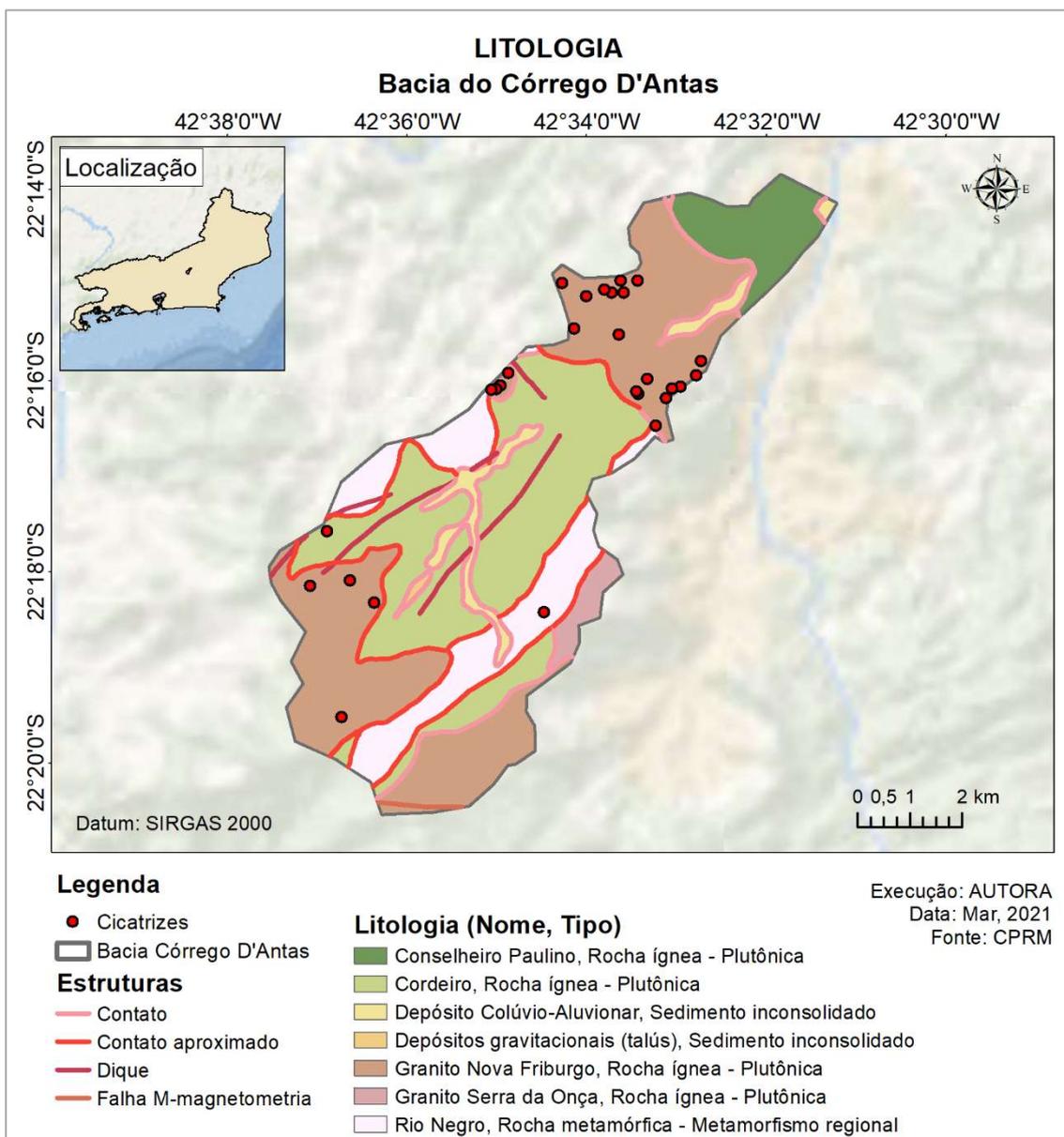


Figura 30 – Mapa de inventário e litologia

Para avaliar o processo de infiltração, são considerados as influências do tipo e uso do solo. Esses são os parâmetros de entrada para o Método CN e cujas informações podem ser obtidas junto ao INEA e trabalhos de hidrologia disponíveis para a região.

O uso do solo representa as características do tipo de cobertura da superfície, enquanto o tipo de solo está relacionado com as características de sub-superfície. De acordo com o Método CN, os tipos de solo são divididos em 4 grupos hidrológicos (GH) de acordo com suas

características de taxa de infiltração e transmissividade. Esses grupos hidrológicos são chamados de A, B, C e D e foram apresentados com mais detalhes na Tabela 7 do item 2.7.

Com essas informações de uso (Figura 31) e tipo de solo (Figura 32) entra-se na Tabela 13 e obtêm-se o valor de CN correspondente àquela combinação. Por exemplo, a combinação entre um uso do solo do tipo “Vegetação Secundária em Estágio Inicial” com um tipo de solo do GH “A”, produzem um CN igual a 45.

É importante destacar que o valor de CN apresentado corresponde ao valor de CNII, ou seja, àquele que considera uma condição de umidade do solo antecedente mediana entre os pontos de capacidade de campo e de murcha permanente. Essa opção foi adotada como forma de representar o comportamento médio da região, evitando situações extremas de solo quase seco e solo quase saturado.

Pela metodologia do *Soil Conservation Service*, com o valor de CN pode-se calcular o potencial máximo de retenção de água no solo (S), de acordo com a Eq. 11 já apresentada no capítulo 2. Ressalta-se que, pela metodologia, esse valor é fixo e que depende unicamente da combinação do tipo e uso do solo (ou, em outras palavras, do valor do CN). A distribuição dos valores de CN e infiltração potencial máxima na Bacia do Córrego D’Antas são apresentados na Figura 33.

Tabela 13 – Correlação entre Tipo de Uso do solo para obtenção de CN

Uso do Solo	Tipo de Solo				
	A	B	C	D	ÁGUA
Vegetação secundaria em estágio inicial	45	66	77	83	100
Reflorestamento	45	66	77	83	100
Vegetação secundaria em estágio médio / avançado	25	55	70	77	100
Vegetação	36	60	73	79	100
Campo / pastagem	49	69	79	84	100
Solo exposto	68	79	86	89	100
Agricultura	39	61	74	80	100
Urbano	77	85	90	92	100
Mangue	90	90	90	90	100
Afloramento rochoso	90	90	90	90	100
Áreas úmidas	90	90	90	90	100
Sombra	60	60	60	60	100
Água	100	100	100	100	100

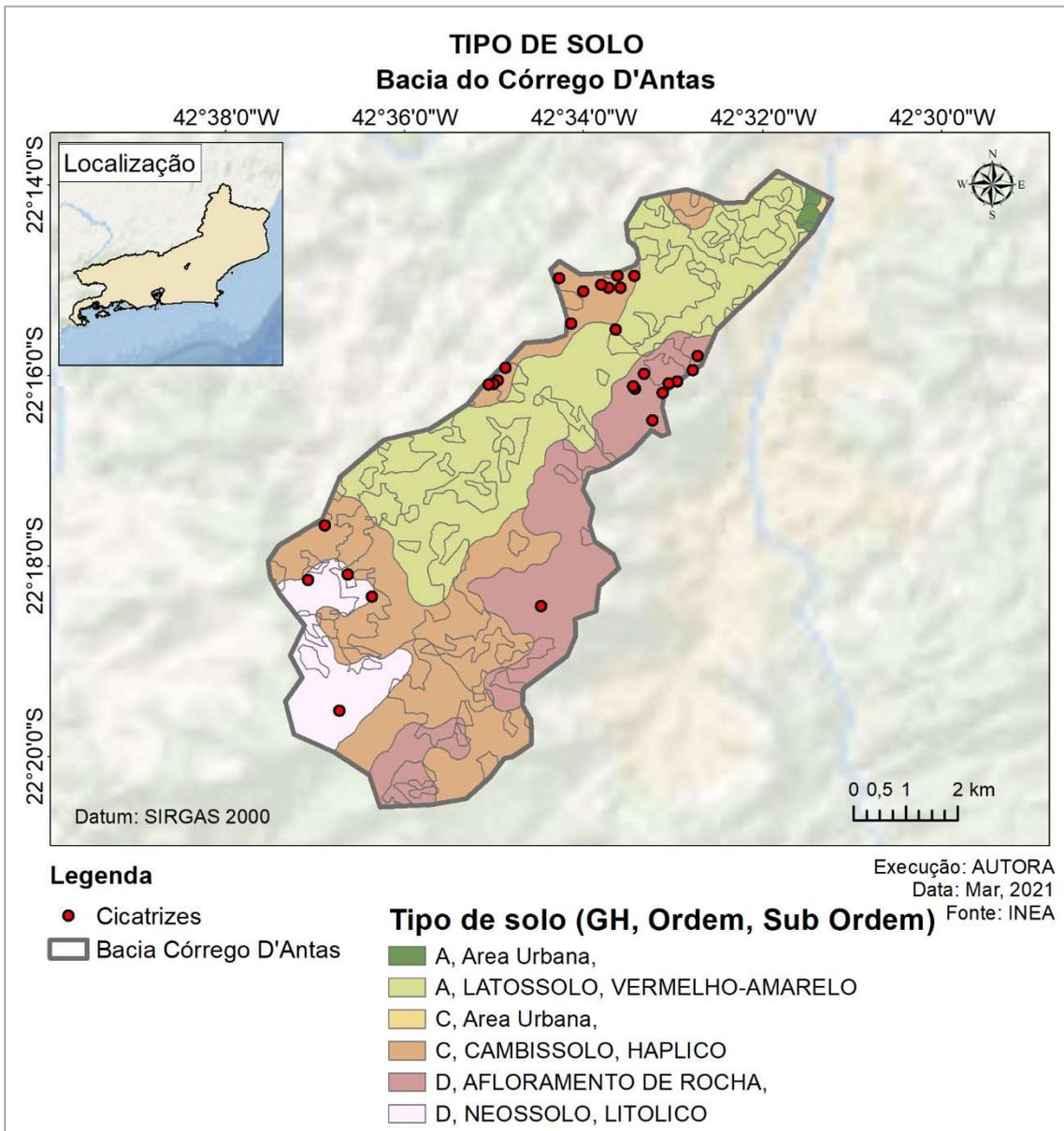


Figura 31 – Mapa de tipo de solo

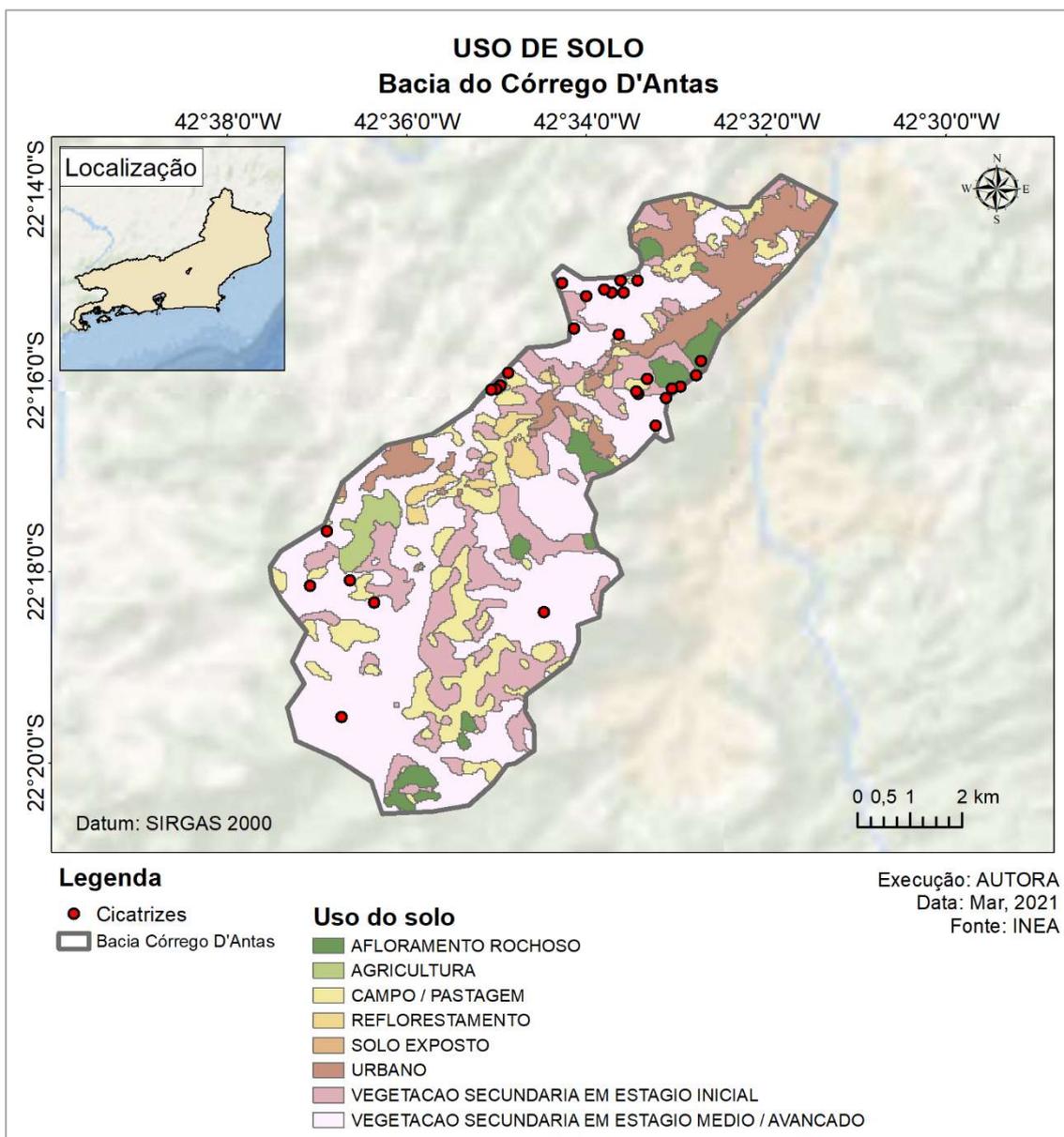


Figura 32 –Mapa de uso do solo

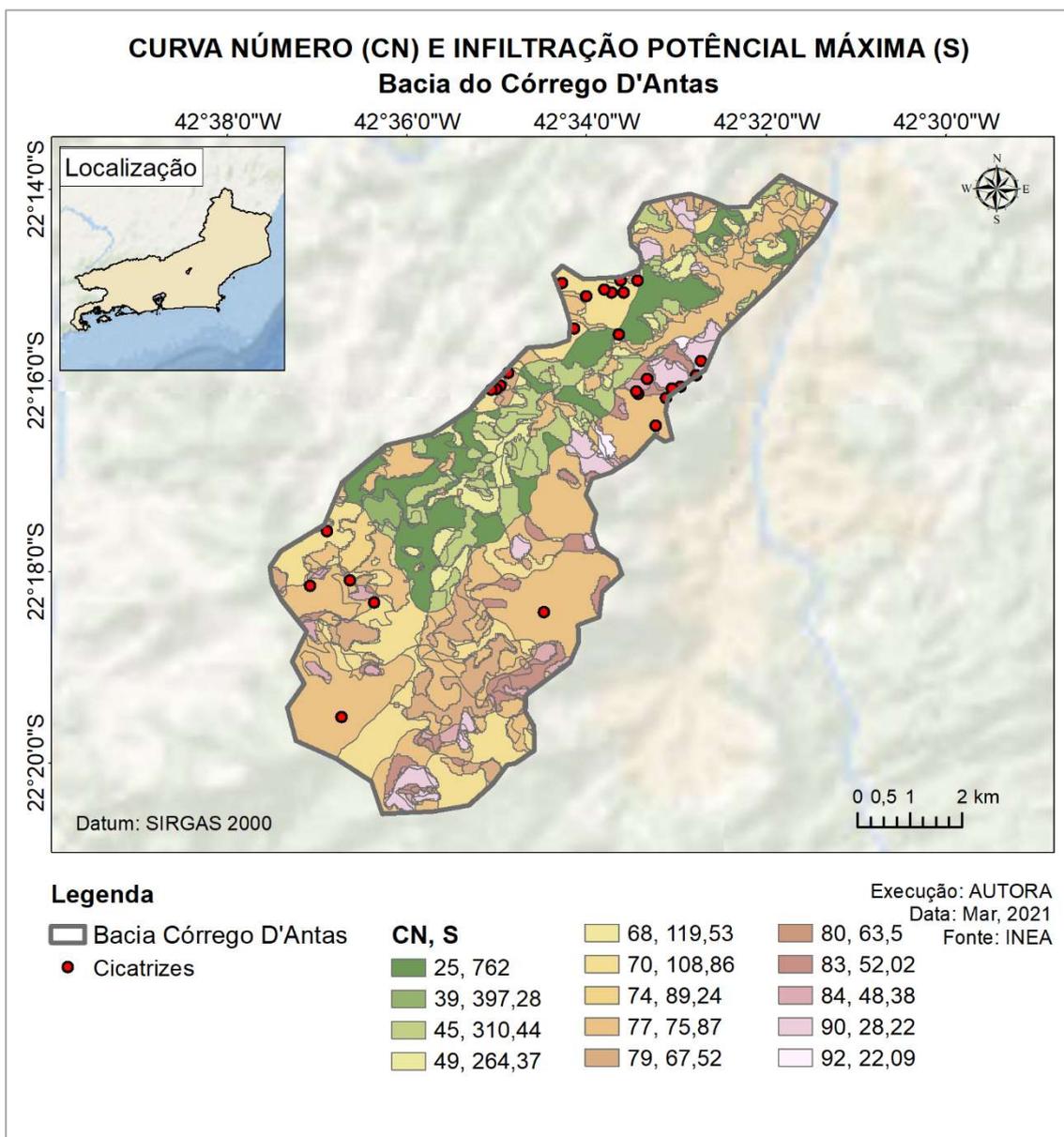


Figura 33 – Mapa de CN

Por fim, extraiu-se para cada cicatriz as características de cada um dos critérios selecionados. Essa análise visa determinar quais as características mais influenciam na formação de fluxos de detritos para então poder criar o mapa de suscetibilidade do meio físico. O resultado dessa extração pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14 – Informação dos critérios qualitativos por cicatriz

Cicatriz	Declividade (°)	Curvatura vertical	Curvatura horizontal	Litologia	CN	S
1	43,75	1,30	-1,06	Granito Nova Friburgo	77	75,87
2	48,17	5,54	-2,32	Granito Nova Friburgo	77	75,87
3	27,62	-0,26	0,04	Granito Nova Friburgo	77	75,87
4	25,45	-0,17	0,05	Granito Nova Friburgo	77	75,87
5	13,34	1,15	-1,23	Cordeiro	70	108,86
6	34,46	-0,46	0,83	Rio Negro	77	75,87
7	26,14	-0,14	0,25	Granito Nova Friburgo	77	75,87
8	19,70	-0,47	1,09	Granito Nova Friburgo	77	75,87
9	35,36	1,63	-1,17	Granito Nova Friburgo	83	52,02
10	26,69	0,02	-0,52	Granito Nova Friburgo	83	52,02
11	35,39	-1,47	1,33	Granito Nova Friburgo	77	75,87
12	30,21	-0,21	-0,14	Granito Nova Friburgo	84	48,38
13	27,23	-3,32	-0,13	Granito Nova Friburgo	90	28,22
14	10,49	-0,44	0,07	Granito Nova Friburgo	83	52,02
15	11,50	0,29	-0,51	Granito Nova Friburgo	70	108,86
16	18,99	0,12	0,44	Granito Nova Friburgo	90	28,22
17	22,72	-1,52	0,39	Granito Nova Friburgo	70	108,86
18	37,68	-1,51	3,02	Granito Nova Friburgo	70	108,86
19	34,73	1,13	-0,73	Granito Nova Friburgo	70	108,86
20	39,65	-0,14	0,68	Granito Nova Friburgo	70	108,86
21	25,52	0,47	-0,11	Granito Nova Friburgo	70	108,86
22	16,57	0,96	-0,66	Granito Nova Friburgo	70	108,86
23	26,41	-1,25	1,20	Granito Nova Friburgo	79	67,52
24	12,37	1,05	-1,10	Granito Nova Friburgo	77	75,87
25	20,41	-0,07	0,25	Granito Nova Friburgo	77	75,87
26	19,28	-1,33	2,12	Granito Nova Friburgo	77	75,87
27	30,53	0,03	0,09	Granito Nova Friburgo	70	108,86
28	21,25	0,75	-1,52	Granito Nova Friburgo	70	108,86

De maneira geral observa-se que os fluxos de detritos da Bacia do Córrego D'Antas ocorrem em áreas onde a declividade varia entre 10,49° e 48,17°, com média igual a 26,47° e mediana igual a 26,27°. Ressalta-se que a área estudada possui declividades entre 0,07° e 69,21°, mostrando que os fluxos de detritos se concentram em áreas de média declividade.

Segundo Souza (2014), deslizamentos ocorrem com mais frequência entre 30° e 60°. Isto é, entre o ponto onde as tensões solicitantes impostas pela topografia passam a ter um valor próximo da capacidade de resistência ao cisalhamento natural do solo (~30°) e o ponto onde o regolito é menos espesso, o que diminui o risco de escorregamentos ($\geq 60^\circ$).

Com relação à curvatura vertical, observa-se que as regiões que apresentaram cicatrizes possuíam valores de curvatura entre -3,32 (convexo) e 5,54 (côncavo), com média igual a 0,06 e mediana igual a -0,10. Ressalta-se que a área estudada possui valores de curvatura vertical entre -8,10 e 11,36, mostrando que as cicatrizes ocorreram em regiões de leve curvatura, indicando que esse tipo de movimento ocorre em áreas predominantemente planas.

Com relação à curvatura horizontal, observa-se que as regiões que apresentaram cicatrizes possuíam valores de curvatura entre -2,32 (convexo) e 3,02 (côncavo), com média igual a 0,02 e mediana igual a 0,04. Ressalta-se que a área estudada possui valores de curvatura vertical entre -8,84 e 6,16, mostrando que as cicatrizes ocorreram em regiões de leve curvatura, indicando que esse tipo de movimento ocorre em áreas predominantemente planas.

A geometria das vertentes atua direta e indiretamente no escoamento superficial e nos desenvolvimentos dos processos erosivos. Enquanto a curvatura vertical relaciona-se com os processos de transporte e acumulação de água, minerais e matéria orgânica no solo (Valeriano, 2008), a curvatura horizontal refere-se ao direcionamento dos fluxos de água orientados pela forma da vertente (Bigarella, 2003). Relevos com curvaturas verticais e horizontais planas indicam valores médios no que diz respeito à concentração e aceleração de fluxos superficiais.

Com relação à litologia, observa-se que 27 das 28 cicatrizes observadas ocorreram em áreas de rochas ígneas e apenas uma em região de rocha metamórfica. Isso indica que o tipo litológico pouco influencia na formação de fluxo de detritos. Por outro, lado o grau de alteração já possui um papel mais importante nos processos de instabilização, uma vez que influencia na variabilidade nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, permeabilidade, além de outras características (Muntohar; Liao, 2010).

Segundo Silva (2016), os granitos das classes litológicas Nova Friburgo e Cordeiro (principais tipos litológicos onde ocorreram fluxos de detritos) mostram um comportamento erosivo, principalmente nos períodos de maior precipitação pluvial. Esse comportamento corrobora com a correlação entre o grau de alteração e a formação de fluxo de detritos.

Por fim, com relação ao potencial máximo de retenção de água no solo, observa-se que as regiões que apresentaram cicatrizes possuíam valores entre 28,22 e 108,86, com média igual a 80,41 e mediana igual a 75,87. Ressalta-se que a área estudada possui valores de infiltração entre 22,09 e 762, mostrando que as cicatrizes ocorreram em regiões de baixa/média infiltração indicando que além da água infiltrada ocorre significativa

influência da água que esco superficialmente contribuindo principalmente para processos de erosão. Essa influência do escoamento superficial e subsuperficial da água sobre fluxos de detritos é evidenciado nos trabalhos de Takahashi (1977;1978) *apud* Takahashi (2009) e Daido (1971) *apud* Takahashi (2009), onde esses escoamentos de água são considerados partes integrantes dos processos de iniciação e movimento do fluxo de detritos.

Uma vez avaliados cada um dos critérios, o próximo passo é ponderar e somar a contribuição de cada um desses mapas para a determinação da suscetibilidade do meio físico. O passo a passo para essa etapa é detalhado no próximo item.

MAPAS DE CRITÉRIOS

Como dito anteriormente, todos os mapas devem possuir a mesma escala de valores, de modo a viabilizar comparações entre eles. Esse escalonamento é feito através da lógica *fuzzy*, onde diferentemente da lógica tradicional de conjuntos, é atribuído a um determinado elemento o seu grau de pertencimento dentro de um conjunto, ao invés da divisão binária onde é atribuído 1 para os elementos pertencentes ao conjunto e 0 para os elementos que não pertencem.

Dessa forma, para cada um dos critérios adotados, o grau de pertencimento igual a 1 (ou seja, total pertencimento) é atribuído aos valores entre o primeiro e o terceiro quartil da distribuição de valores de cada critério. Essa medida foi tomada visando eliminar efeitos de valores extremos que pudessem causar distorções no processo de normalização. Para todos os demais valores de cada critério será atribuído um valor entre 0 e 1 seguindo uma função linear apresentadas nas Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

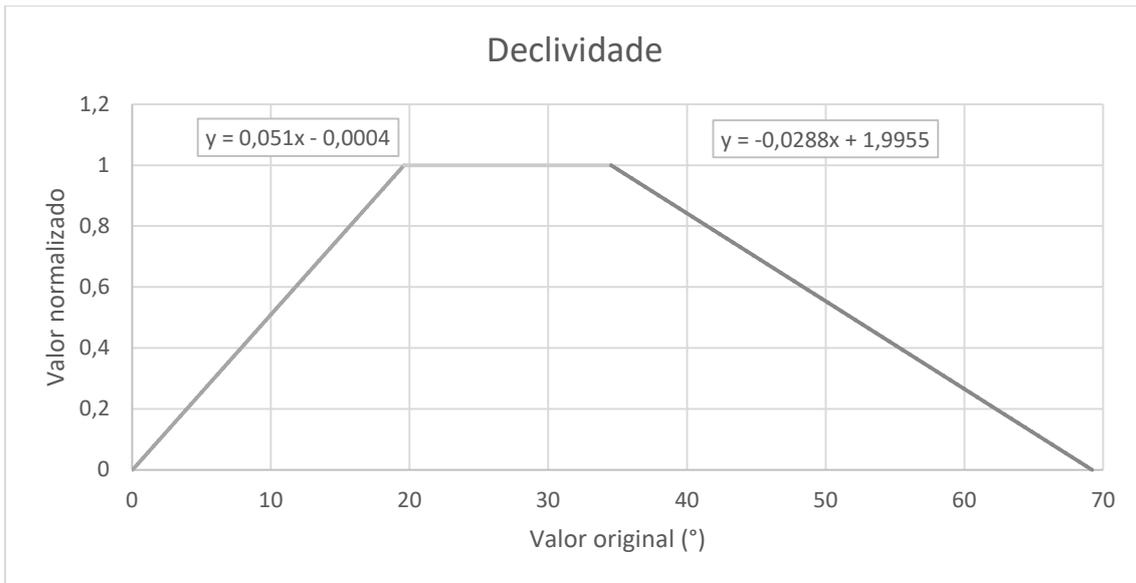


Figura 34 – Função de normalização de declividade

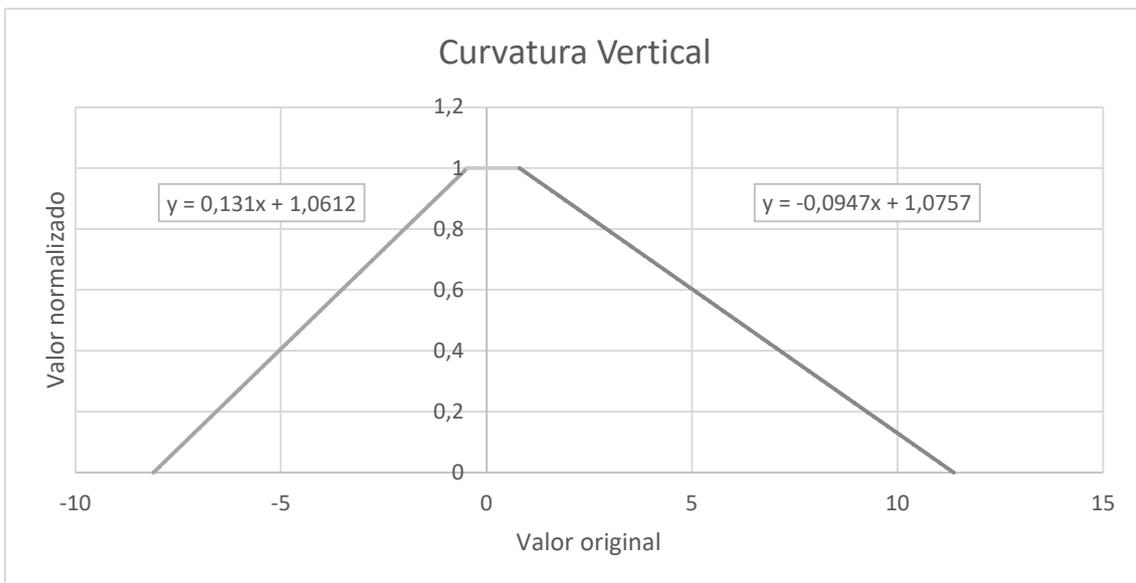


Figura 35 – Função de normalização de curvatura vertical

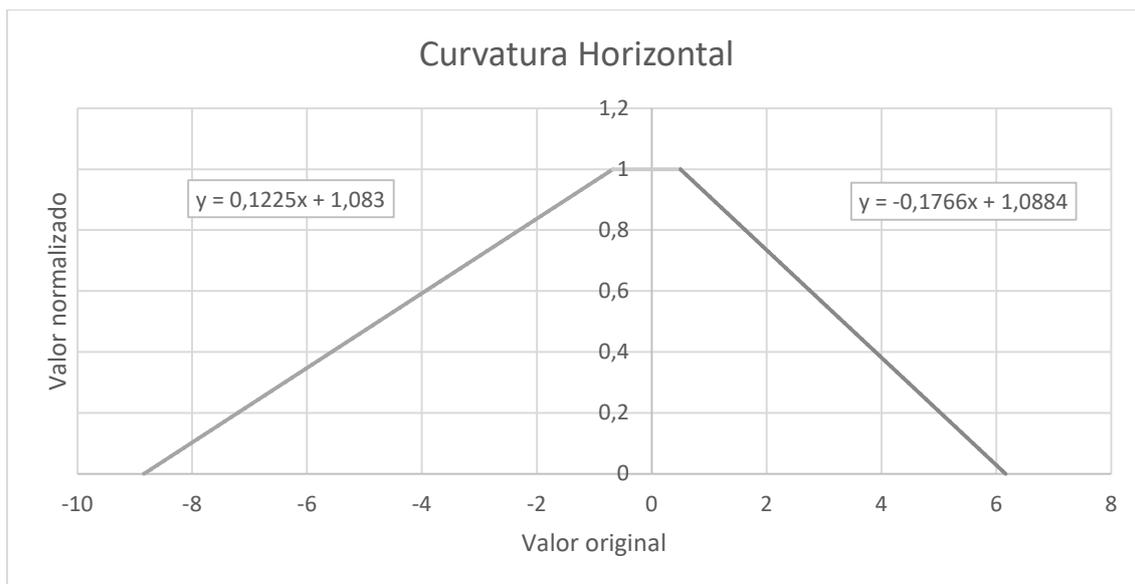


Figura 36 – Função de normalização de curvatura horizontal

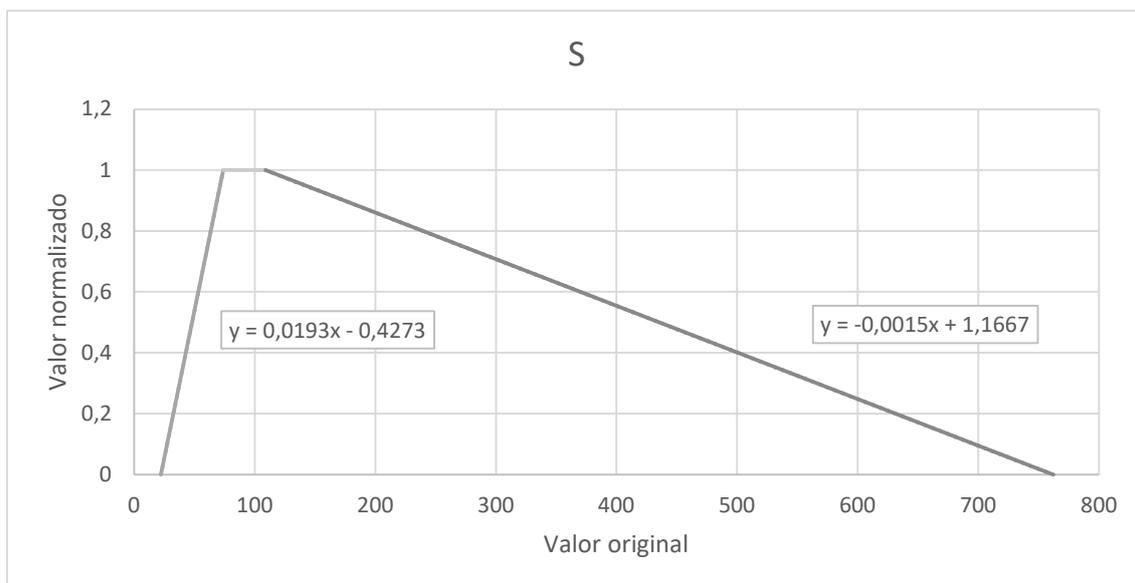


Figura 37 – Função de normalização de infiltração

A normalização da litologia foi feita a partir da definição de valores discretos para cada tipo litológico encontrado na região (Tabela 15). Primeiramente, os tipos litológicos foram separados conforme as características de cada material da região, tomando como base os trabalhos de Pelizoni (2014) e Silva (2016). Em seguida, definiram os valores de pertencimento (ou valores de normalização) com base nas características do material e no número de cicatrizes encontradas.

Tabela 15 - Valores de normalização da litologia

Nome do tipo litológico	Informações sobre o material	Valor de normalização
Depósito Colúvio-Aluvionar	Material de depósito, constituído por colúvio e solo residual	0,0
Depósitos gravitacionais (talús)	Solo residual maduro	0,2
Conselheiro Paulino	Material rochoso pouco fraturado	0,3
Granito Serra da Onça		0,5
Rio Negro	Material de rocha alterada granito- gnaisse fraturado	0,7
Cordeiro		0,8
Granito Nova Friburgo		1,0

Em seguida, a fim de avaliar qual critério é mais influente na formação de fluxo de detritos seguiu-se com a aplicação da técnica AHP. Para cada par de critérios é atribuída uma importância relativa, cujos valores irão compor uma matriz de comparação paritária (Tabela 16).

Tabela 16 – Matriz de comparação paritária

	Declividade	C. Vertical	C. Horizontal	Litologia	S
Declividade	1	5	4	5	5
C. Vertical	0,2	1	0,25	3	3
C. Horizontal	0,25	4	1	4	4
Litologia	0,2	0,333333	0,25	1	1
S	0,2	0,333333	0,25	1	1

Uma vez definidas as importâncias relativas entre os critérios, deve-se avaliar o índice e a razão de consistência (IC e RC respectivamente). Esses valores são considerados aceitáveis quando forem menores do que 10%. Para a matriz de comparação apresentada o IC foi igual a 0,0819% e o RC igual a 0,073%.

É importante também, que o valor do autovalor máximo seja próximo ao valor da ordem da matriz de comparação paritária. A ordem da matriz utilizada é igual a 5 e o autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) foi igual a 5,37.

Os pesos de cada critério vão ser iguais ao autovetor da matriz de comparação associado ao autovalor máximo, cujos valores estão mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 – Autovetor da matriz de comparação, ou seja, os pesos de cada critério – suscetibilidade

Critério	Peso
Declividade	0,51
C. Vertical	0,12
C. Horizontal	0,25
Litologia	0,06
S	0,06

De posse de todos os mapas de critérios já normalizados conforme a lógica *fuzzy* e dos pesos de cada critério obtidos pela técnica AHP, pode-se determinar a suscetibilidade do meio físico. Ela é obtida a partir da média ponderada entre os mapas de critério, e pode ser visto na Figura 38.

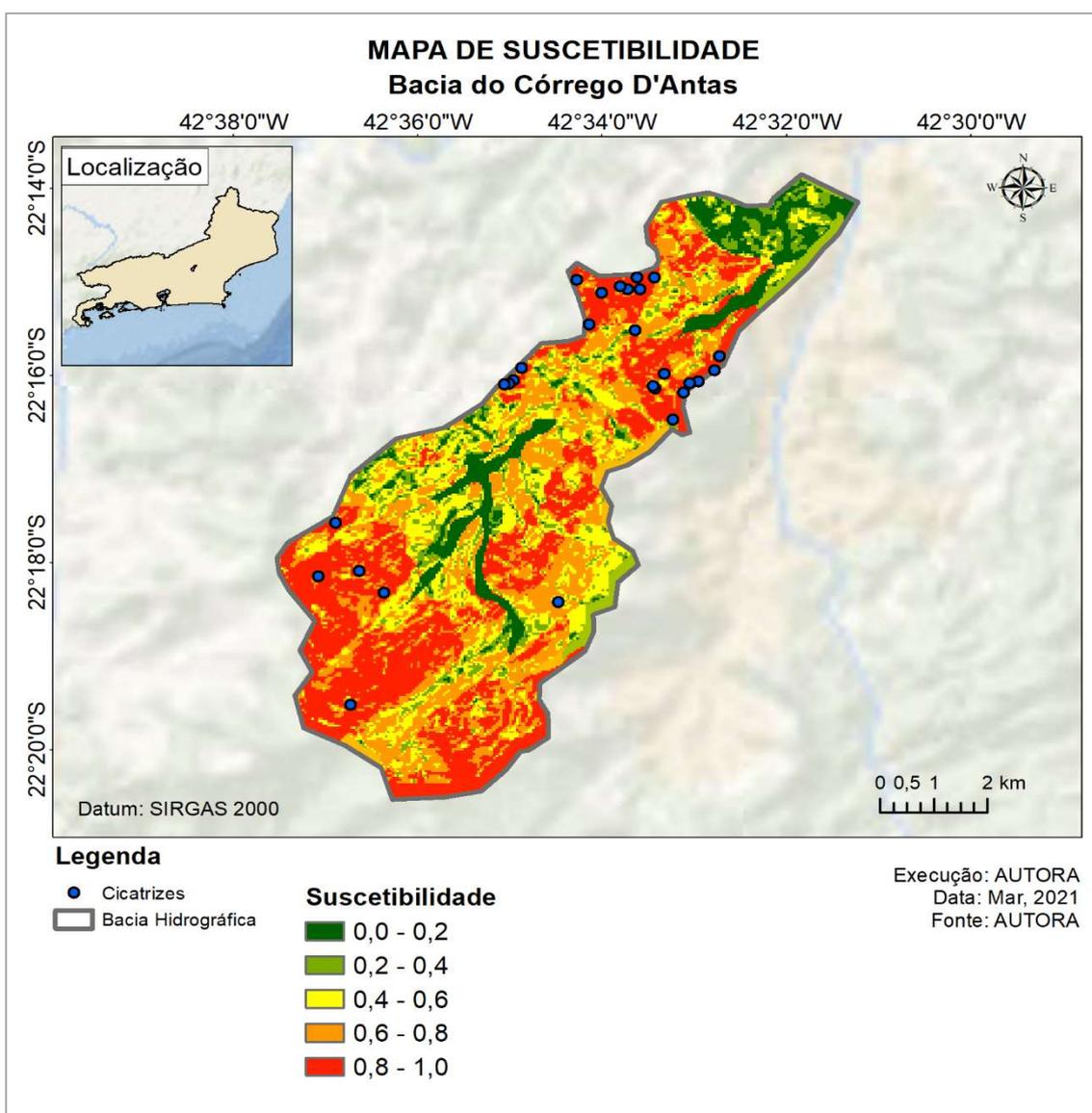


Figura 38 – Mapa de Suscetibilidade

Os valores desse mapa variam de 0 a 1, em que zero significa baixa suscetibilidade do meio físico à formação de fluxo de detritos, e 1 significa alta suscetibilidade. Para fins desse trabalho, entende-se suscetibilidade como a presença das características consideradas relevantes na formação de fluxo de detritos, ou seja, dos critérios selecionados e apresentados.

É importante frisar que o fato de uma região ter sido classificada com alta suscetibilidade não significa dizer que essa região possui problemas de estabilidade, mas tão somente que essa região possui as características necessárias para gerar fluxos de detritos num eventual movimento de massa.

AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS – ETAPA 1

Para saber se esse mapa é (ou não) representativo da área estudada ele foi comparado ao Mapa de Inventário.

Para se avaliar a consistência do Mapa de Suscetibilidade com os fluxos de detritos efetivamente gerados, extraiu-se o valor da suscetibilidade obtida para cada ponto onde foi observada uma cicatriz de fluxo. Se a suscetibilidade para uma dada cicatriz for classificada como “alta” (aqui considerada como acima de 70% (Carrara et al., 1991)) entende-se como “sucesso”, caso contrário como “falha”. Por fim foi avaliada a percentagem de sucesso. Os resultados encontram-se na Tabela 18.

O Mapa de Suscetibilidade apresentou uma percentagem de sucesso de 93%, indicando alta consistência entre os eventos ocorridos e a capacidade de predição do modelo.

Tabela 18 – Avaliação do Mapa de Suscetibilidade

ID	Suscetibilidade	Avaliação
1	0,999714	Sucesso
2	1	Sucesso
3	0,967238	Sucesso
4	0,995837	Sucesso
5	0,930237	Sucesso
6	0,764664	Falha
7	0,990890	Sucesso
8	0,847372	Sucesso
9	0,937690	Sucesso
10	0,924444	Sucesso
11	1	Sucesso
12	0,901761	Sucesso
13	0,862916	Sucesso
14	0,937797	Sucesso
15	0,759157	Falha
16	0,859150	Sucesso
17	0,998558	Sucesso
18	0,990944	Sucesso
19	0,998116	Sucesso
20	0,987107	Sucesso
21	0,985587	Sucesso
22	0,993404	Sucesso
23	0,843975	Sucesso
24	1	Sucesso
25	0,959655	Sucesso
26	0,994906	Sucesso
27	0,999716	Sucesso
28	0,894526	Sucesso
Nº de sucessos		26
Nº total de cicatrizes		28
Porcentagem de acerto		93%

5.3.2.

Etapa 2: Determinação da probabilidade de instabilidade

Fluxos de detritos podem ser simulados como movimentos rasos de solo que apresentam a superfície de ruptura planar e que são deflagrados por eventos chuvosos.

Dessa forma, é viável a aplicação do Método do Talude Infinito para o cálculo da estabilidade (Li et al., 2019; Muntohar; Liao, 2010).

Os parâmetros necessários para a utilização do Método do Talude Infinito são: declividade; carga de água; espessura do solo; coesão; ângulo de atrito; e peso específico dos materiais existentes no local (solo, rocha e água).

Considerando que os parâmetros de resistência do solo não variam ao longo do tempo, o gatilho para a instabilidade das encostas é, normalmente, o acréscimo da saturação (Ray; Smedt, 2009) promovido pelo aumento da carga de água dentro do solo. Considerando que o nível do lençol freático é em nível profundo, portanto não representativo para o cálculo de estabilidade, esse acréscimo da saturação provém, essencialmente, de um processo de infiltração. Dessa forma, a carga de água é o único parâmetro que varia temporalmente.

Nesse sentido, é possível calcular qual a carga de água dentro do solo que levaria a encosta à ruptura, ou seja, que atingisse $FS = 1$. Na posse desse valor é possível calcular qual a chuva que é capaz de promover esse valor de infiltração. Essa chuva, por sua vez, está associada a uma probabilidade de ocorrência (ou a um Tempo de Recorrência (TR)).

Assim, a probabilidade de um determinado ponto dentro da área de estudo se tornar instável está atrelada à probabilidade de ocorrência da chuva que promoverá essa instabilidade, ou seja, está atrelada a probabilidade de ocorrência do processo deflagrador.

O cálculo da carga de água que levaria a encosta à ruptura é realizado pixel a pixel para toda área modelada.

Já o cálculo da probabilidade de ocorrência da chuva é feito pela IDF segundo a Equação do tipo Otto Pfafstetter.

CÁLCULO DA CARGA DE ÁGUA

O cálculo da carga de água pode ser realizado adotando-se, na formulação matemática do Método do Talude Infinito, $FS = 1$ e reescrevendo a equação em função de z_w , de acordo com a Eq. 22.

$$z_w = \frac{-1}{\gamma_w} [\gamma_t * H * (\frac{\text{sen}(\alpha) - c'}{\text{tg}(\varphi')} - \cos(\alpha))] \quad \text{Eq. 22}$$

Onde c' (kPa) é a coesão, φ' (°) ângulo de atrito, γ_t (kN/m³) peso específico do solo saturado, γ_w (kN/m³) peso específico da água, α (°) é a declividade, z_w (m) é a carga de água, H (m) é a espessura de solo.

No que diz respeito à obtenção dos parâmetros, observa-se que a declividade já foi obtida anteriormente durante a determinação da suscetibilidade do meio físico. Lembrando que a declividade foi calculada como um sub-produto derivado do MDE da região.

O próximo parâmetro é a determinação da profundidade do solo. Como esse é um parâmetro de difícil obtenção quando se trabalha com escala regional, principalmente na falta de informações de sondagens, optou-se por usar o modelo desenvolvido por Saulnier, Beven e Obled (1997). Esse modelo assume que a espessura do solo pode ser calculada em função das profundidades máxima e mínima e das altitudes máxima e mínima da área de estudo. A equação referente a esse modelo foi apresentada na Eq. 15 do capítulo 3.

Para estimar os valores de h_{\max} e h_{\min} recorreu-se a alguns valores encontrados na literatura. Áreas de grama e arbusto tem limitação na profundidade de penetração das raízes e, por esse motivo, a profundidade média considerada é de 0,75 m. Áreas de agricultura, de floresta e áreas construídas possuem geralmente uma camada de solo mais espessa, por volta de 2,00 m (Lee; Park, 2016). Dessa forma, assumiu-se que h_{\max} é de 2,00 m e h_{\min} é de 0,75 m. A distribuição das profundidades de solo na área de estudo é apresentada na Figura 39.

É importante ressaltar que esses valores foram obtidos com base em trabalhos de outros autores, não havendo nenhuma verificação efetiva com comparação com perfis de sondagem ou outros ensaios de campo.

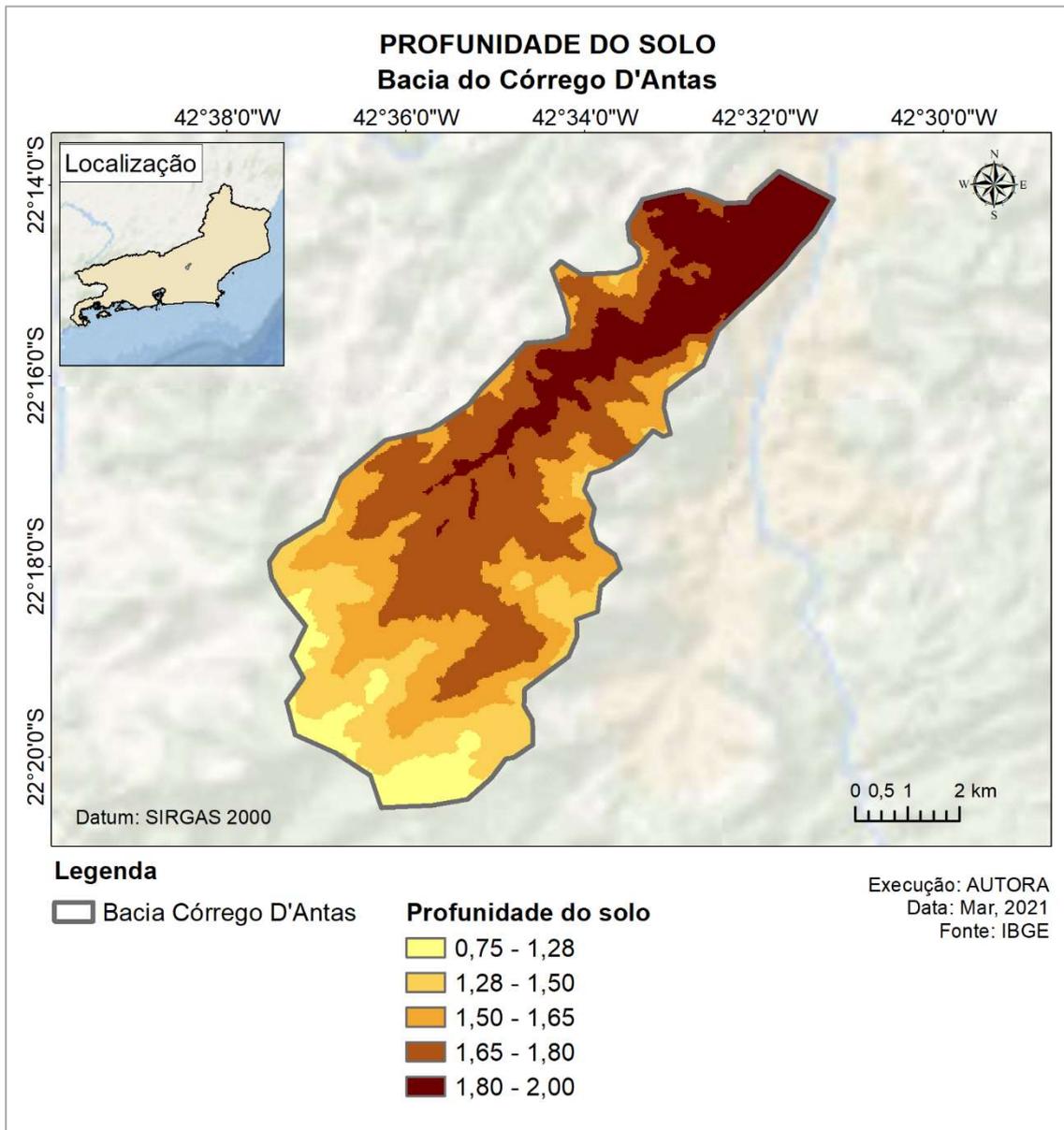


Figura 39 – Mapa de profundidade de solo

Por fim, os dados de coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo/rocha foram obtidos em outros estudos realizados sobre o Córrego D'Antas (Pelizoni, 2014; Silva, 2016). Esses dados podem ser encontrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores de ângulo de atrito e peso específico dos materiais encontrados na bacia do Córrego D’Antas (Pelizoni, 2014; Silva, 2016)

Material	Ângulo de atrito (°)	Peso específico (kN/m³)
Material rochoso pouco fraturado;	35	26
Material de rocha alterada granito- gnaisse fraturado;	30	22
Solo residual maduro.	30	18
Material de depósito, constituído por colúvio e solo residual;	25	16

A coesão foi adotada como igual a zero, simulando uma situação de maior instabilidade. Essa medida também foi adotada na análise de estabilidade das encostas do Córrego D’Antas realizadas por Silva (2016).

Uma vez obtidos todos os parâmetros necessários, pode-se prosseguir com o cálculo de z_w (Figura 40). Para isso, foi criado um arquivo raster para cada um dos parâmetros considerados. Com os dados nesse formato é permitido criar e executar operações algébricas entre várias *layers*, e cujo resultado é um novo *raster* onde o valor de cada pixel corresponde ao resultado daquele ponto específico para as operações realizadas.

Uma vez calculadas as colunas de água capazes de instabilizar os diversos pontos dentro da área de estudo, pode-se determinar qual a chuva capaz de produzir esse valor de infiltração e qual a sua probabilidade de ocorrência.

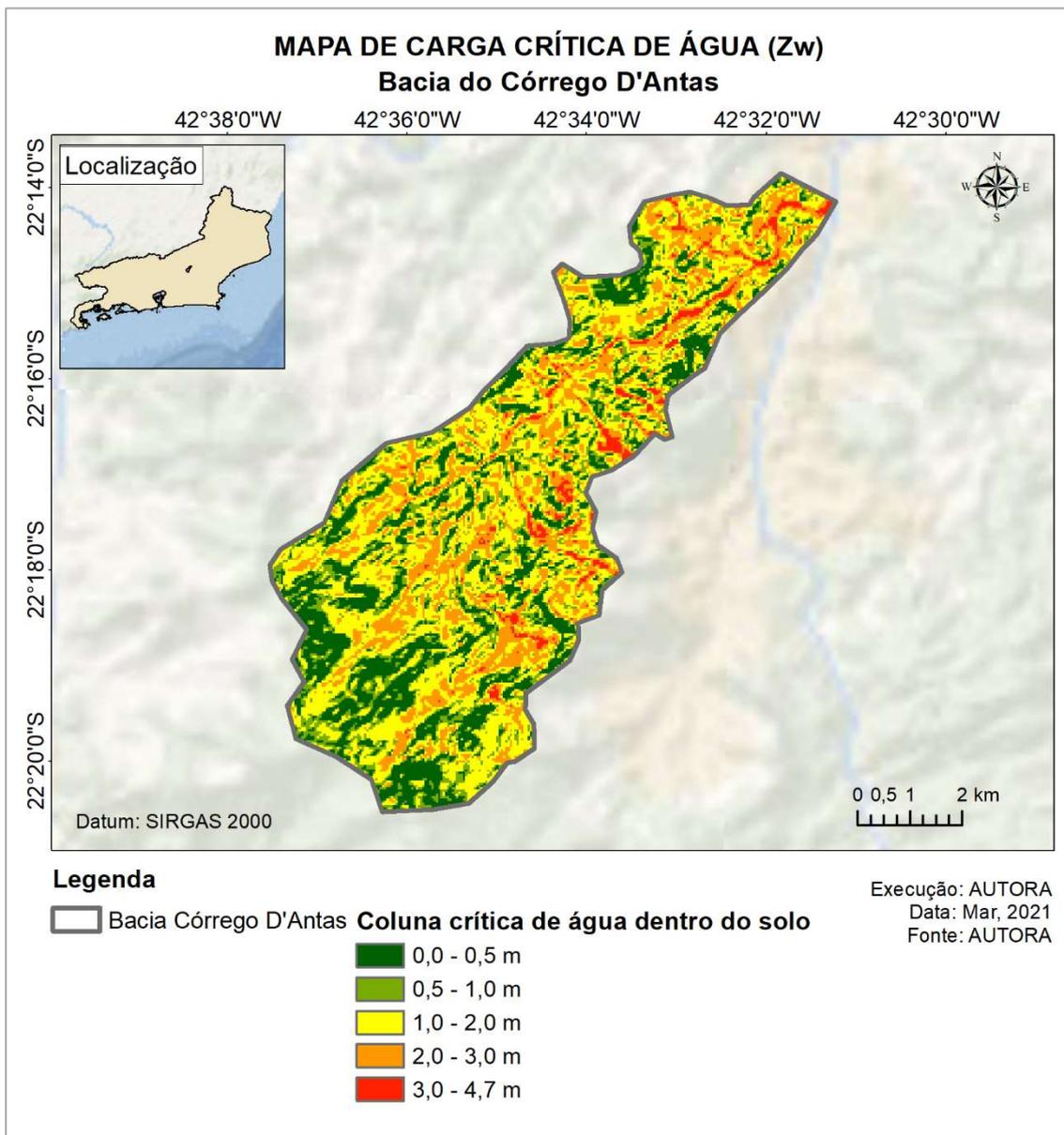


Figura 40 – Mapa de carga crítica de água

CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO PROCESSO DEFLAGRADOR

Na posse do valor de z_w é possível calcular qual a chuva que é capaz de promover esse valor de infiltração. Esse cálculo usou como base o Método CN desenvolvido pelo SCS e descrito com melhor detalhes no item 2.7. Normalmente, com esse método determina-se as parcelas de abstração, infiltração e escoamento superficial para uma dada chuva, contudo pode-

se proceder de maneira inversa e calcular o valor da chuva a partir de um valor de infiltração. A expressão matemática utilizada nessa etapa foi apresentada na Eq. 17 do capítulo 3.

Esse valor de chuva, por sua vez, é associado a um tempo de recorrência ou de retorno (TR), que é o inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou ultrapassado. Dessa forma, a probabilidade de um determinado ponto dentro da área de estudo se tornar instável está atrelada à probabilidade de ocorrência da chuva que promoverá essa instabilidade.

A relação entre chuva e TR é feita a partir de uma curva de Intensidade Duração e Frequência (IDF), para isso escolheu-se a Equação do tipo Otto Pfafstetter (Pfafstetter, 1982) apresentada na Eq. 18 do capítulo 3. Nessa equação, a altura de chuva é dada em função do seu TR, do seu tempo de duração e dos parâmetros dos postos pluviométricos para qual a curva foi ajustada.

Ressalta-se que a duração da chuva foi adotada como sendo igual ao tempo de concentração da bacia, o qual foi calculado de acordo com o método de George Ribeiro (Ribeiro, 1961) apresentada na Eq. 19 do capítulo 3, e o posto pluviométrico selecionado foi o posto de Nova Friburgo, devido à proximidade desse posto a região de estudo.

O produto final desses procedimentos é um mapa (Figura 41) onde cada ponto dentro da área de estudo possui o valor da probabilidade de ocorrer uma chuva capaz de instabilizar aquele ponto.

Ressalta-se que os valores de chuva são comumente associados a um tempo de recorrência ou de retorno (TR), sendo esse definido como o intervalo médio de tempo (geralmente em anos) em que pode ocorrer ou ser superado um dado evento, ou seja, é o inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou ultrapassado: $TR = 1/p$.

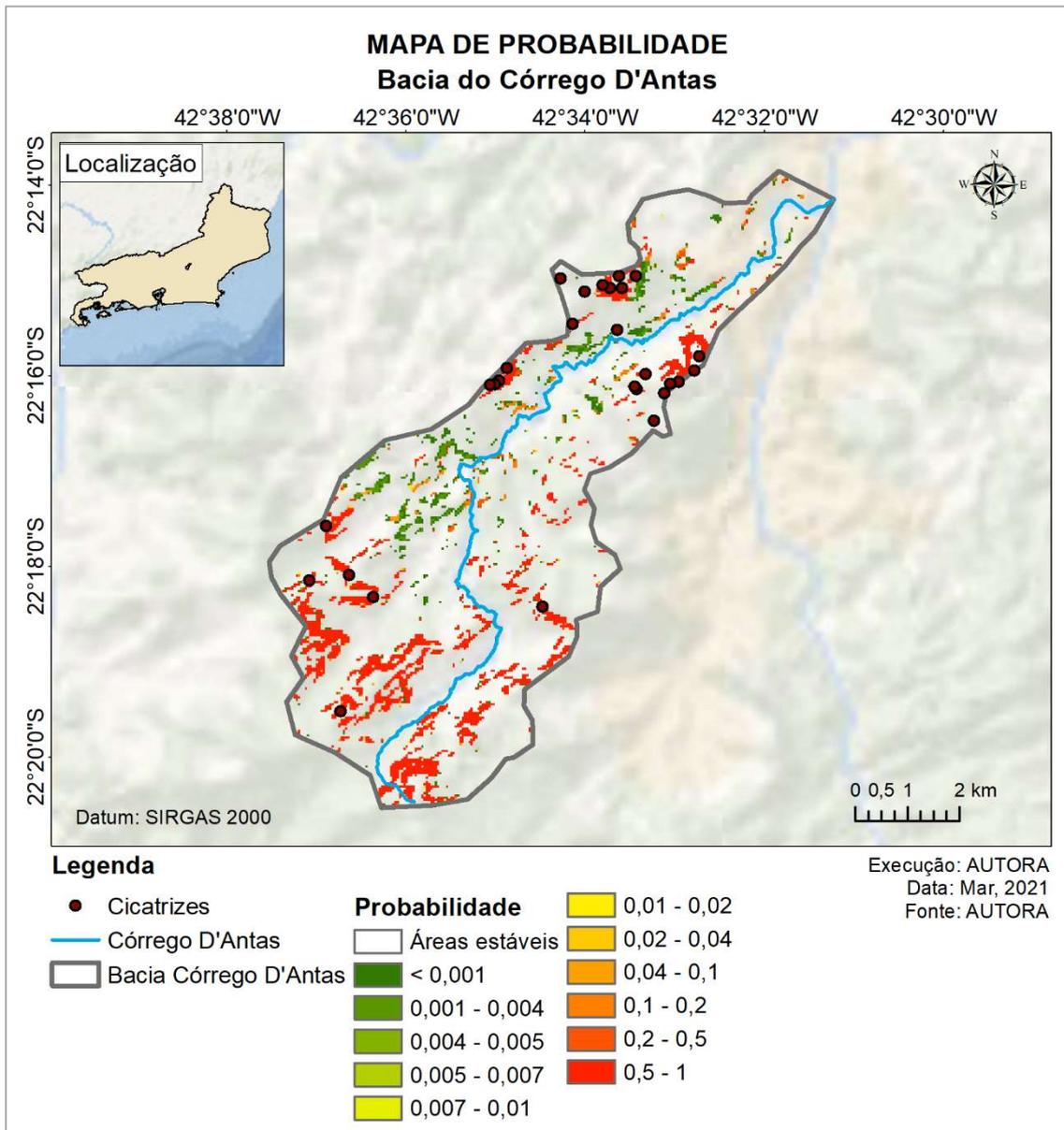


Figura 41 – Mapa de Probabilidade

Em seguida é preciso verificar se esse mapa representa a área estudada. Essa avaliação é feita com base na comparação entre o Mapa de Probabilidade com as cicatrizes de movimentos anteriores presentes no Mapa de Inventário.

Confrontando esse mapa com o Mapa de Suscetibilidade do Meio Físico obtêm-se a probabilidade de instabilidade das áreas que possuem as características físicas para formar fluxos de detritos, sendo esse o Mapa de Perigo (Figura 42).

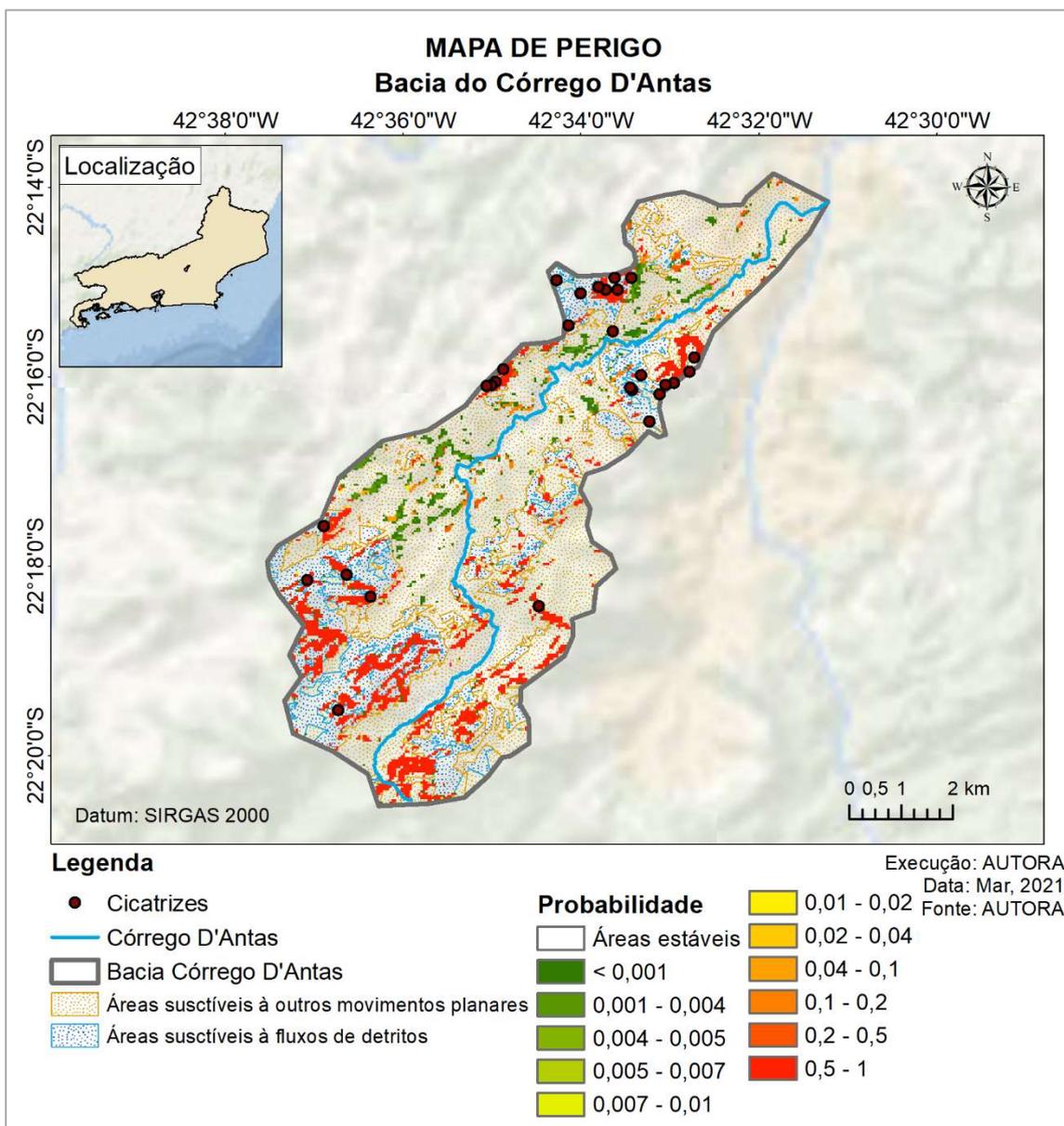


Figura 42 – Mapa de Perigo

No Mapa de Perigo, as áreas sombreadas em azul são aquelas que apresentam uma suscetibilidade do meio físico de gerar fluxos de detritos maior do que 70% (alta suscetibilidade), sendo essas as áreas de interesse para este estudo. Já os pontos da escala de cores entre verde e vermelho representam, efetivamente, as probabilidades de ocorrência de fluxo de detritos.

AValiação DOS RESULTADOS – ETAPA 2

Dentre todos os parâmetros utilizados no modelo (declividade; coluna de água dentro do solo; espessura do solo; coesão; ângulo de atrito; e peso específico do solo/rocha e da água), o único que se considerou passível de modificações é a coluna de água dentro do solo.

Embora os parâmetros de resistência dos materiais não sejam constantes ao longo de toda a superfície, foram adotados valores encontrados na literatura. Uma vez considerado que esses valores são representativos, adotou-se a hipótese de que eles não apresentam alteração temporal suficiente para que possam ser considerados como variáveis.

Dessa forma, o único parâmetro modificável é a carga de água, que vai depender da chuva considerada na análise. Segundo dados obtidos no posto pluviométrico Fazenda Mendes em Nova Friburgo, entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2011 foram registrados 100,5 mm e 225,4 mm de chuva respectivamente, sendo esses valores de 25 e 350 anos de tempo de recorrência. A Figura 43 apresenta os registros de chuva diária do posto acima citado para todo o mês de janeiro. Em amarelo encontra-se o registro do dia 11 e em laranja o registro do dia 12.

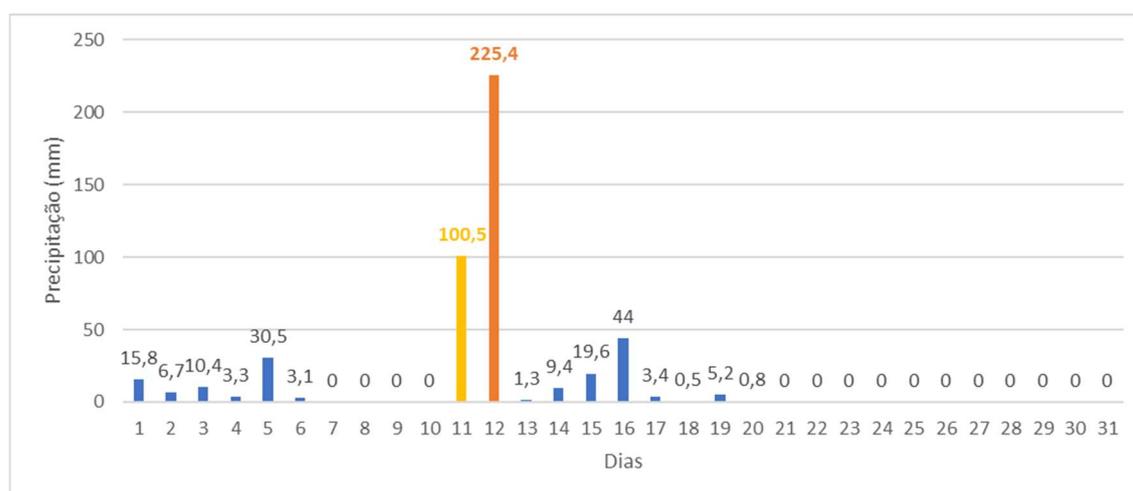


Figura 43 – Valores de precipitação registrados no posto pluviométrico Fazenda Mendes para janeiro de 2011

Para fins de avaliação do modelo utilizado, confrontou-se as cicatrizes apresentadas no Mapa de Inventário com as áreas indicadas pelo Mapa de Probabilidade. Para essa avaliação, extraiu-se o valor de probabilidade da chuva que instabilizaria aquele ponto para cada lugar onde foi observada uma cicatriz de fluxo. Se o valor da probabilidade

para aquele local fosse maior ou igual ao valor da probabilidade da chuva do dia 12 de janeiro era computado como “sucesso”, caso contrário como “falha”. Por fim foi avaliada a percentagem de sucesso, cujos resultados encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 – Avaliação do Mapa de Probabilidade

ID	Probabilidade	Avaliação
1	1	Sucesso
2	1	Sucesso
3	1	Sucesso
4	1	Sucesso
5	0,1	Sucesso
6	0,001	Falha
7	0,001	Falha
8	1	Sucesso
9	0,001	Falha
10	0,5	Sucesso
11	0,2	Sucesso
12	0,5	Sucesso
13	0,2	Sucesso
14	1	Sucesso
15	0,2	Sucesso
16	1	Sucesso
17	1	Sucesso
18	0,04	Sucesso
19	1	Sucesso
20	1	Sucesso
21	0,001	Falha
22	0,04	Sucesso
23	0,1	Sucesso
24	1	Sucesso
25	0,2	Sucesso
26	1	Sucesso
27	1	Sucesso
28	0,1	Sucesso
N° de sucessos		24
N° total de cicatrizes		28
Percentagem de acerto		86%

O Mapa de Probabilidade apresentou uma percentagem de sucesso de 86%, indicando alta consistência entre os eventos ocorridos e a capacidade de predição do modelo.

5.4. Mapa de Vulnerabilidade e Exposição

O Mapa de Vulnerabilidade e Exposição representa o grau de exposição e fragilidade da população dentro da área de estudo frente a um evento de fluxo de detritos. A análise adotada possui uma dimensão socioeconômica, e seus valores são apresentados em uma escala entre 0 e 1, em que quanto mais próximo de 1 esse valor for, mais vulnerável e exposto é o elemento.

Para a determinação da Vulnerabilidade e Exposição foram usados como unidade de cálculo a grade estatística do IBGE. Essa é uma base cartográfica, onde a superfície do território brasileiro é dividida em quadrados de 200 m por 200 m em áreas urbanas e quadrados de 1000 m por 1000 m em áreas rurais. Todos os parâmetros necessários para esse cálculo são provenientes do Censo do IBGE de 2010, sendo esse o mais recente (IBGE, 2010).

O cálculo da Vulnerabilidade e Exposição segue a formulação matemática apresentada na Eq. 20 do capítulo 3.

A parcela de Exposição (I_E) é dada pela densidade de pessoas por quilômetro quadrado. Essa informação é obtida diretamente na grade estatística do IBGE, onde são fornecidas as informações de área, população masculina e feminina para cada quadricula.

Contudo, não estão disponíveis para cada quadricula as informações necessárias para a determinação da vulnerabilidade (dada pela percentagem de crianças e idosos e pela percentagem de pessoas não-alfabetizadas) e da resiliência (dada pela capacidade de recuperação em termos financeiros no pós-desastre). Então, a estimativa desses parâmetros se deu através do confronto das informações populacionais e espaciais de cada quadricula com as informações de percentagem de crianças e idosos, percentagem de pessoas não-alfabetizadas e rendimento nominal médio do setor censitário no qual ela está inserida.

Os setores censitários representam a menor porção territorial utilizada pelo IBGE para planejar e realizar levantamentos de dados do Censo e Pesquisas Estatísticas. Eles correspondem a um recorte do território nacional, considerando a Divisão Político-Administrativa e outras estruturas territoriais, que permite o levantamento das informações estatísticas dentro do prazo determinado para a coleta.

Na Figura 44 é apresentada a densidade populacional das quadrículas da grade estatística e os setores censitários nos quais elas estão inseridas. Já na Tabela 21 são apresentados os valores de percentagem de crianças e idosos, percentagem de pessoas não-alfabetizadas, rendimento nominal médio e capacidade de recuperação para cada setor censitário da área de estudo.

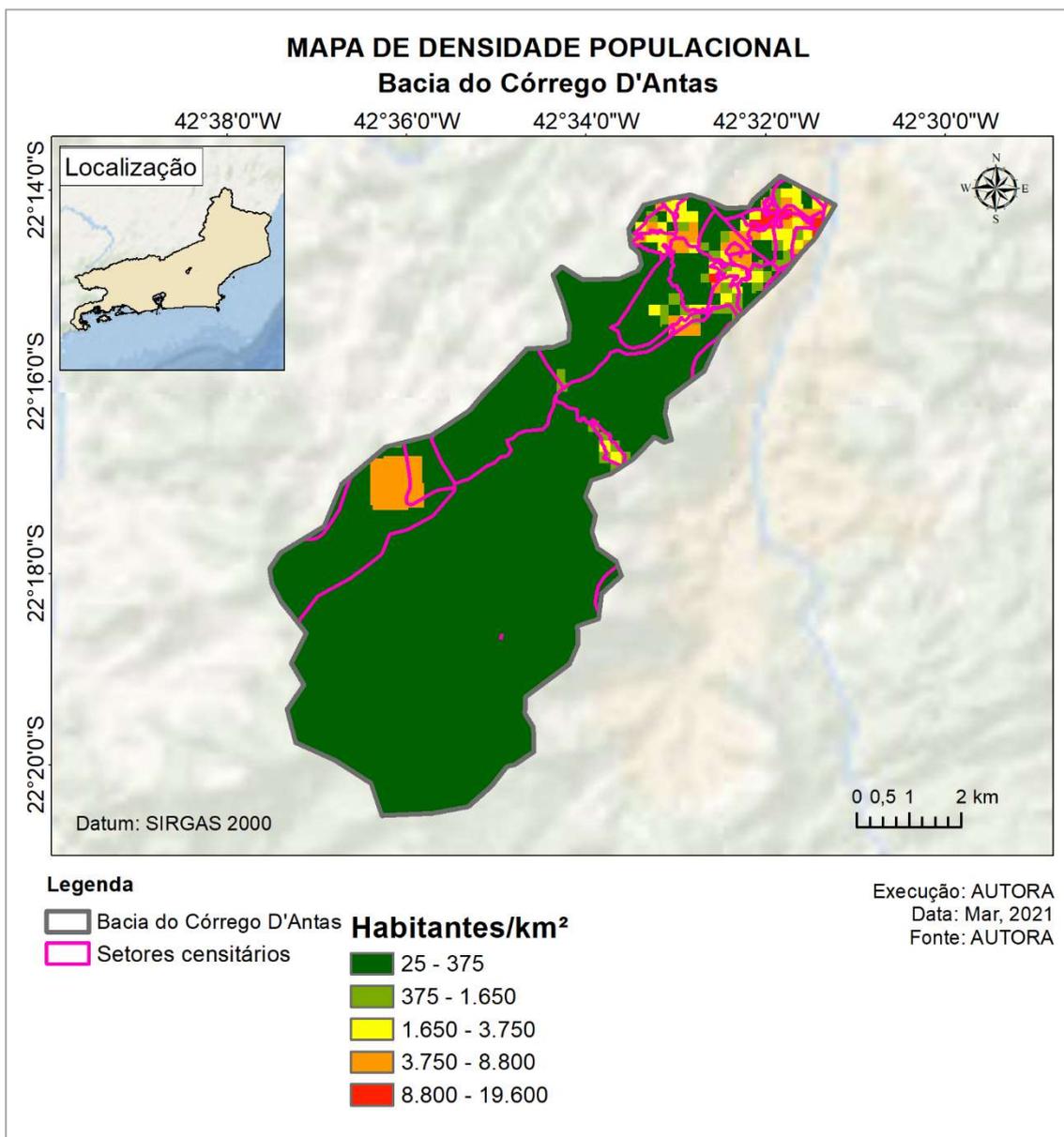


Figura 44 – Densidade populacional

Tabela 21 – Informações de vulnerabilidade e resiliência por setor censitário

Código do Setor Censitário	% de não alfabetizados	% de crianças e idosos	Rendimento médio em salários mínimos	CR
330340105000057	11,5%	11,5%	4,0	0,0768
330340105000088	14,3%	10,2%	-	-
330340105000124	16,4%	10,8%	3,4	0,0420
330340105000125	13,5%	12,8%	4,9	0,0768
330340105000126	12,8%	10,9%	3,6	0,0420
330340105000127	6,3%	10,1%	3,7	0,0768
330340105000147	11,9%	9,5%	3,5	0,0420
330340105000148	8,2%	11,5%	5,2	0,0768
330340105000152	13,8%	12,7%	2,9	0,0420
330340105000153	12,9%	10,8%	2,9	0,0420
330340105000154	12,4%	10,2%	3,4	0,0420
330340105000155	10,0%	10,2%	-	-
330340105000156	10,5%	9,3%	3,9	0,0768
330340105000157	11,3%	14,0%	2,9	0,0420
330340105000158	15,1%	11,6%	3,5	0,0420
330340105000159	11,9%	8,9%	-	-
330340105000160	11,0%	9,3%	3,3	0,0420
330340105000161	13,8%	10,1%	-	-
330340105000189	16,3%	11,8%	-	-
330340105000194	11,5%	7,1%	-	-
330340105000195	11,9%	9,0%	4,3	0,0768
330340105000196	8,3%	13,6%	4,3	0,0768
330340105000197	11,9%	12,3%	-	-
330340115000004	18,0%	5,8%	3,2	0,0420
330340115000006	17,2%	10,0%	3,9	0,0768
330340115000007	22,7%	11,9%	3,1	0,0420
330340115000008	13,8%	11,0%	2,7	0,0000
330340120000002	10,7%	11,1%	3,3	0,0420
330340120000004	9,8%	8,1%	3,6	0,0420
330340120000007	11,0%	9,4%	-	-
330340120000008	12,3%	10,7%	2,9	-
330340120000009	9,9%	11,1%	3,1	0,0420
330340120000010	12,8%	10,3%	-	-
330340120000011	9,2%	10,7%	3,7	0,0768
330340120000012	8,5%	10,8%	8,6	0,1996
330340120000013	11,4%	9,8%	3,9	0,0768
330340120000014	8,2%	10,0%	3,5	0,0420
330340120000015	7,0%	8,1%	4,0	0,0768
330340120000016	8,5%	7,7%	3,1	0,0420
330340120000017	11,0%	7,7%	3,8	0,0768
330340120000035	12,8%	10,0%	-	-
330340120000036	18,1%	12,0%	-	-
330340120000043	12,9%	10,3%	-	-
330340120000044	12,5%	9,3%	3,7	0,0768

Observa-se que alguns setores censitários não apresentavam dados de rendimento. Dessa forma, optou-se por uma medida mais conservadora e considerou-se que esses setores apresentavam o valor máximo de Vulnerabilidade e Exposição.

Por fim, para a determinação do Mapa de Vulnerabilidade e Exposição deve-se prosseguir com a normalização para o terceiro quartil da vulnerabilidade final. O Mapa de Vulnerabilidade e Exposição pode ser visto na Figura 45.

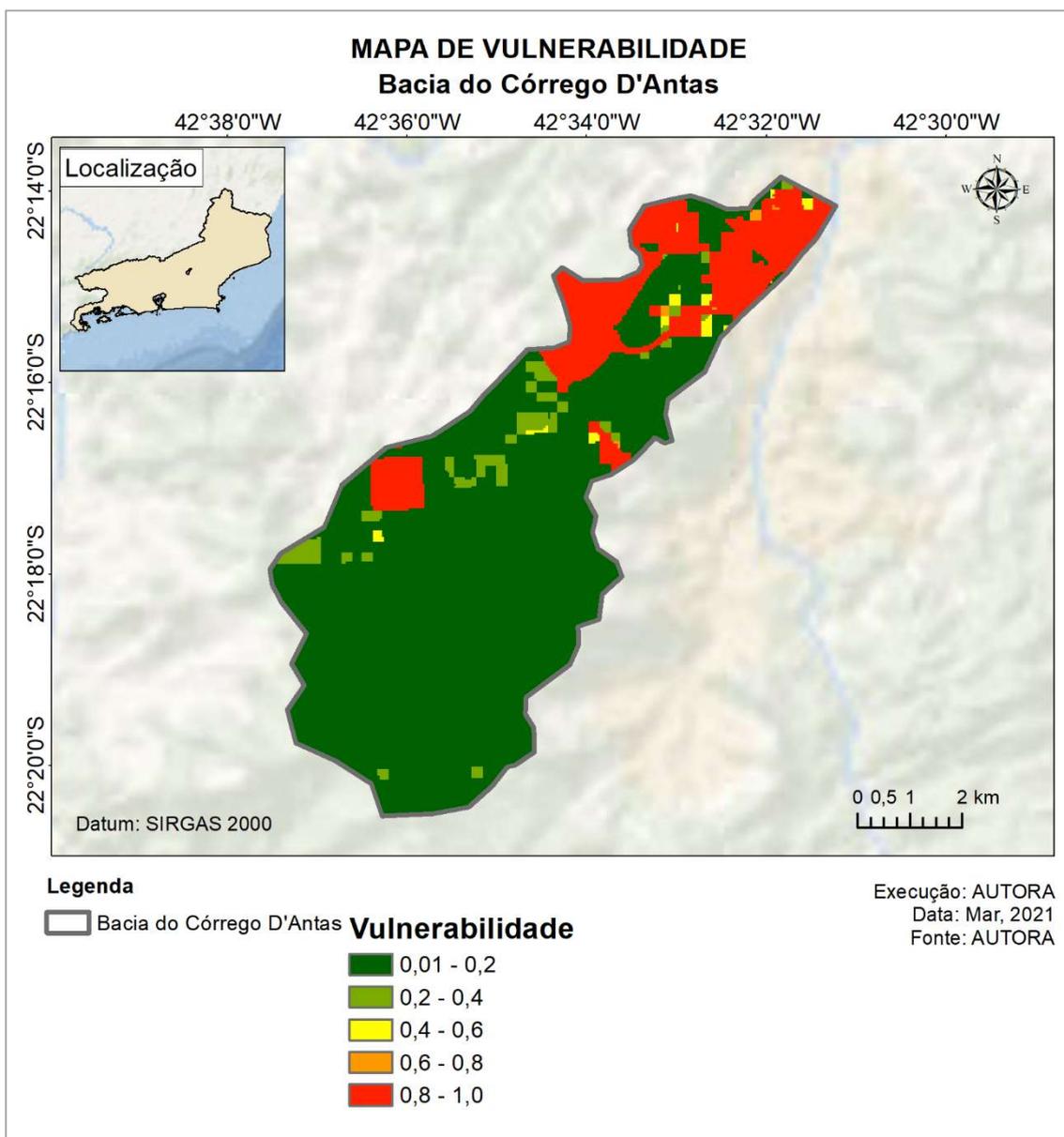


Figura 45 – Mapa de Vulnerabilidade

Ressalta-se que os valores desse mapa variam de 0 a 1, em que “zero” significa baixa Vulnerabilidade e Exposição e “um” significa alta Vulnerabilidade e Exposição.

Com relação a esse mapa, observou-se que os indicadores de exposição (I_E) e de capacidade de recuperação (I_{CR}) foram os que apresentaram maior variabilidade dentro

da área de estudo e sendo assim, foram os que mais influenciaram no cálculo da “Vulnerabilidade e Exposição”.

Observou-se também que a percentagem de crianças e idosos, e de pessoas não-alfabetizadas variou pouco para essa área de estudo. Dentre os fatores que podem explicar esse comportamento, destacam-se dois, a saber:

- a) o tamanho da área estudada, que pode ser suficientemente pequeno de modo a estar compreendida em uma área relativamente homogênea dentro do município de Nova Friburgo;
- b) boa parte de área estudada apresentava baixa densidade populacional, fazendo com que as percentagens dos grupos vulneráveis tenham pouca variabilidade.

5.5. Mapa de Risco

O Mapa de Risco representa a relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade.

No caso desse trabalho, o Mapa de Risco apresentado mede a possibilidade de ocorrência de um fluxo de detritos e a magnitude dos danos causados por ele são medidos em termos de consequências sociais e econômicas.

O Mapa de Risco é obtido pela multiplicação dos Mapas de Perigo e Vulnerabilidade e Exposição, e é apresentado na Figura 46.

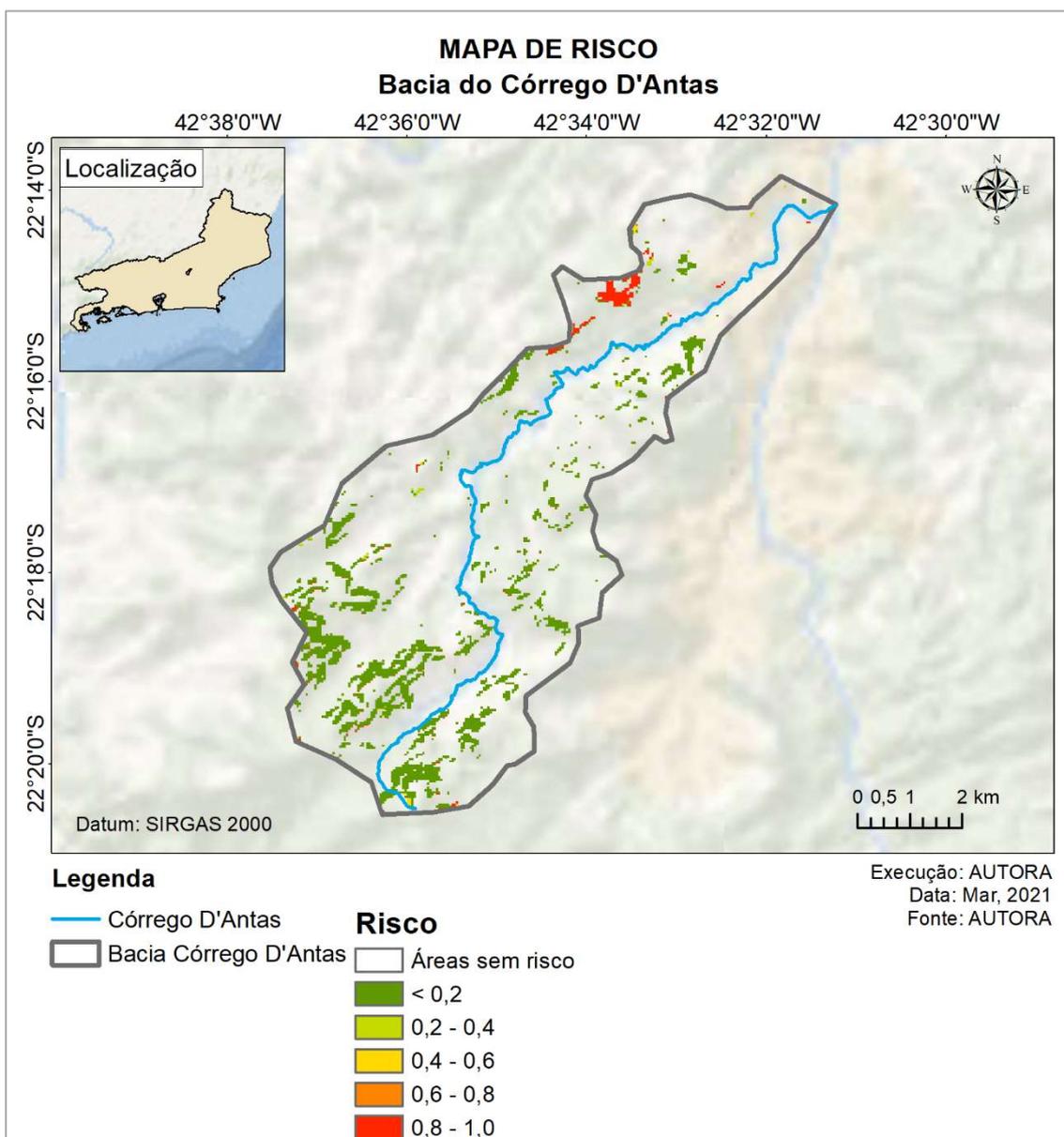


Figura 46 – Mapa de Risco

Os valores desse mapa variam de 0 a 1, em que “zero” significa baixo risco e “um” significa alto risco.

Observa-se que em algumas das áreas que apresentavam alto perigo não são computadas como áreas de risco. Isso se deve pela própria definição de risco, onde a sua existência é condicionada não só pela existência do perigo, que é a sua fonte de origem, como também da avaliação de como esse evento afeta o sistema considerado. Sem uma dessas parcelas (ou perigo ou vulnerabilidade ou exposição) o risco se anula.

6. Conclusões

Esse estudo teve por objetivo propor uma metodologia para o mapeamento de áreas de risco de fluxo de detritos, considerados como um dos acidentes que mais provocam mortes e perdas materiais. Em particular, esse estudo buscou identificar a probabilidade de ocorrência desses eventos, e principalmente, promover a identificação de áreas vulneráveis.

Como objeto de estudo, foi utilizada a Bacia do Córrego D'Antas, localizada no município de Nova Friburgo-RJ, onde foram identificadas 28 cicatrizes de fluxos de detritos após as chuvas do dia 12 de janeiro de 2011.

Com relação aos resultados obtidos durante a confecção da Etapa 1 do Mapa de Perigo (determinação da suscetibilidade do meio físico) observou-se que 93% das cicatrizes identificadas encontravam-se numa área classificada como “alta suscetibilidade”. Nessa etapa, pretendeu-se determinar quais as combinações de características topográficas, litológicas, de tipo e de uso do solo mais influenciam na formação de fluxos de detritos. Assim, a alta concordância (93%) entre os locais classificados como “alta suscetibilidade” e a efetiva presença de uma cicatriz indicaram que a metodologia proposta respondeu bem ao caso em estudo e que a escolha e a ponderação dessas características refletem bem a realidade.

Já com relação a Etapa 2 do Mapa de Perigo (determinação da probabilidade de instabilidade) observou-se que 86% das cicatrizes identificadas encontravam-se em uma área determinada como instável para uma chuva de TR menor ou igual ao da chuva que ocorreu em janeiro de 2011. Embora a percentagem de assertividade tenha sido ligeiramente inferior (86%) em relação à obtida na Etapa 1, observa-se ainda uma elevada concordância entre os resultados obtidos com a metodologia e os observados em campo.

No que diz respeito ao Mapa de Vulnerabilidade e Exposição, observou-se que os indicadores de exposição (I_E) e de capacidade de recuperação (I_{CR}) foram os que mais influenciaram no cálculo da “Vulnerabilidade e Exposição”, tendo em vista que a percentagem de crianças e idosos, e de pessoas não-alfabetizadas varia pouco no interior da área de estudo.

Diversas causas podem explicar esse comportamento. Entre elas destaca-se duas, a saber:

- a) o tamanho da área estudada, que pode ser suficientemente pequeno de modo a estar compreendida em uma área relativamente homogênea dentro do município de Nova Friburgo;
- b) boa parte de área estudada apresentava baixa densidade populacional, fazendo com que as percentagens dos grupos vulneráveis tenham pouca variabilidade.

Por fim, com relação ao Mapa de Risco, observaram-se resultados bastante coerentes, que ajudaram a validar a aplicação da metodologia no caso em estudo. Percebe-se que muitas das áreas classificadas, ou com alto “Perigo” ou com alta “Vulnerabilidade e Exposição”, não apresentavam alto “Risco”. Isso se deu pela própria definição de risco, pois não havendo concomitância entre o evento perigoso e o grupo que irá sofrer as consequências desse evento, o risco se anula. Dessa forma, o Mapa de Risco, coerentemente, apresenta valores muito mais modestos em relação aos Mapas de Perigo, e Vulnerabilidade e Exposição, uma vez que muitas das áreas classificadas como alto “Perigo” apresentavam baixa “Vulnerabilidade e Exposição” e vice-versa.

Dessa forma, conclui-se que os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, indicando que a metodologia apresentada foi adequada para atingir os objetivos propostos, qualificando-a como viável e promissora para estudos futuros.

Uma grande vantagem da metodologia proposta é a utilização do Método CN como modelo de infiltração. A escolha desse método se deu pelo fato dele ser simples e consagrado na hidrologia, sendo largamente utilizado na maioria dos países. Além disso, estudos de fluxos de detritos estão, em geral, acompanhados de análise hidrológica, portanto, uma metodologia que conecte essas duas análises é muito conveniente.

Outras vantagens dessa metodologia é a possibilidade de ser replicada para outras áreas de estudo, além de possuir uma sequência simples de cálculos, com dados de entrada de fácil obtenção. Ela também apresenta baixo custo computacional e pode ser realizada em qualquer *software* GIS.

Contudo, a metodologia apresentada realiza uma análise de estabilidade em escala regional e para isso algumas simplificações foram adotadas para se prosseguir com os cálculos. A adoção de parâmetros de resistência homogêneos, bem como a estimativa da profundidade da camada de solo são algumas delas.

6.1. Sugestões para pesquisas futuras

Diante das questões levantadas ao longo da pesquisa, sugere-se como proposta para novos trabalhos:

- Aplicação desta metodologia a outros eventos de fluxos de detritos para verificação do desempenho e representatividade - A metodologia apresentou bons resultados para o Córrego D'Antas, indicando que ela é promissora. Mas para comprovar sua efetividade, sugere-se que ela seja aplicada em outros lugares. Sugere-se locais onde os eventos chuvosos não tenham sido tão incomuns, com TR < 100 anos;
- Avaliação da necessidade de incorporação de outras características usadas na determinação da suscetibilidade do meio físico – Embora a escolha dessas características tenha sido feita com base em pesquisa bibliográfica e tenha sido obtido um bom resultado, sugere-se que seja avaliada a eventual conveniência de incorporação de novas variáveis;
- Comparação com resultados produzidos pela metodologia proposta com outros modelos de estabilidade já existentes tais como SHALSTAB, TRIGRS e PISA-m - Existem alguns modelos de cálculo de estabilidade já adaptados para GIS. Sugere-se, então, a aplicação desses métodos para a comparação de resultados com a metodologia proposta.
- Avaliação da necessidade de incorporação e/ou substituição de outros indicadores na determinação da vulnerabilidade – Embora a escolha desses indicadores tenha produzido bons resultados, observa-se que não houve muita variação para as percentagens de crianças, idosos e pessoas não-alfabetizadas.

Referências

ABAY, A.; BARBIERI, G.; WOLDEAREGAY, K. GIS-based Landslide Susceptibility Evaluation Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach: The Case of Tarmaber District, Ethiopia. **Momona Ethiopian Journal of Science**, v. 11, n. 1, p. 14, 2019.

ABNT. **NBR-11.682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: Efeito sobre a forma de estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas.**, v. 19, n. 1, p. 115–119, 1993.

ALEXANDER, D. E. A survey of the field of natural hazards and disaster studies. In: CARRARA, A.; GUZZETTI, F. (Eds.). . **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. p. 1–19.

ALEXANDER, D. E. A brief survey of GIS in mass-movement studies , with reflections on theory and methods. **Geomorphology**, v. 94, p. 261–267, 2008.

ALVARADO, L. A. S. **Simulação bidimensional de corridas de detritos usando o Método de Elementos Discretos**. 2006. 152 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2006.

AMARAL, C.; PORTO, J. Condicionantes geológicas na instabilidade de encostas, o exemplo da Estrada do Soberbo, Alto da Tijuca, Rio de Janeiro. **1º Simpósio de Geologia do Sudeste. Rio de Janeiro**, 1989.

ANBALAGAN, R. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. **Engineering Geology**, v. 32, n. 4, p. 269–277, 1992.

ANBALAGAN, R.; SINGH, B. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains- a case study from Kumaun Himalaya, India. **Engineering Geology**, v. 43, n. 1996, p. 237–246, 1996.

ARMAS, I. et al. Landslide susceptibility deterministic approach using geographic information systems : application. **Natural Hazard**, p. 23, 2013.

ARON, G.; LAKATOS, D. F.; MILLER, A. C. Infiltration formula based on SCS curve number. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 103, p. 419–427, 1977.

AVELAR, A. DE S.; LACERDA, W. A.; NETTO, A. L. C. Mecanismos de iniciação de fluxos detriticos no maciço da Tijuca, Rio de Janeiro (RJ): o caso da encostra do soberbo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 1, p. 73–83, 2006.

BATHURST, J. C.; BURTON, A.; WARD, T. J. Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 123, n. 5, p. 410–419, 1997.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS — A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0.Open-file Report**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008. 81 p.

BELL, R.; GLADE, T. Quantitative risk analysis for landslides - Examples from BÍldudalur, NW-Iceland. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 4, n. 1, p. 117–131, 2004.

BHUYAN, S. J.; MANKIN, K. R.; KOELLIKER, J. K. Watershed-scale AMC selection for hydrologic modeling. **Transactions of the ASABE**, v. 46, n. 2, p. 303–310, 2003.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2ª ed. Florianópolis, SC: UFSC, 2003. v. 3

BOBROWSKY, P.; HERVÁS, J. Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. In: SASSA, K.; CANUTI, P. (Eds.). . **Landslides - Disaster Risk Reduction**. 1ª ed. Tokyo: Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 321–349.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. **Principles of geographical information system**. 3ª ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

BURTON, A.; BATHURST, J. C. Physically based modeling of shallow landslides sediment yield at catchment scale. **Environmental Geology**, v. 35, p. 89–99, 1998.

CANEDO, P.; EHRLICH, M.; LACERDA, W. A. **Chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro: Sugestões para ações de engenharia e planejamento**. Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ, 2011.

CARRARA, A. et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 16, n. 5, p. 427–445, 1991.

CEPED UFSC. **ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS 1991 A 2012 - Volume Rio de Janeiro**. 2ª ed. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisa Sobre Desastres, 2013.

CETESB. Risco de acidente de origem tecnológica. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**, n. 2.ed, revisada., p. 1–140, 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. In: EDUSP (Ed.). . **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

CIRIA. **Flood resilience and resistance for critical infrastructure**. C688. ed. Londres: Project RP913, 2010.

COELHO NETTO, A. L. et al. January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil. In: MARGOTTINI, C.; CANUTI, P.; SASSA, K. (Eds.). . **Landslide Science and Practice. Volume 6 - Risk Assessment, Management and Mitigation**. 1ª ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 377–384.

COLE, R. A. **Map-based Probabilistic Infinite Slope Analysis of the Stephens Creek Watershed, Portland, Oregon**. 2013. 90 f. MSc. Dissertation. Portland State University, 2013.

COROMINAS, J. et al. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra. **Natural Hazard**, v. 30, p. 421–435, 2003.

CORREIA, E. F. G. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, 2011.

COSTA, J. E.; FLEISHER, P. J. **Developments and Applications in Geomorphology**. 1st. ed. New York: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984.

CRICHTON, D. The Risk Triangle. In: INGLETON, J. (Ed.). . **Ed., Natural Disaster Management**. London: Tudor Rose, 1999. p. 102–103.

CROSTA, G. B. et al. **Granular Flows and Numerical Modelling of Landslides**.

Aug 2001 ed. Milano (Italy): DAMOCLES, 2001.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; TURNER, A. K. (Eds.). . **Landslides: investigation and mitigation**. Chapter 3: Transportation Research Board, 1996. p. 36–75.

DEOJA, B. et al. **Mountain risk engineering handbook**. 1st. ed. Kathmandu, Nepal: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 1991.

DHAKAL, A.; AMADA, T.; ANIYA, M. Landslide mapping and the application of GIS in the Kulekhani watershed, Nepal. **Mountain Research and Development**, v. 19, n. 1, p. 3–16, 2004.

DRM-RJ. **Diagnóstico sobre o Risco a Escorregamentos no Estado do Rio de Janeiro e Plano de Contingência para Atuação do NADE/DRM-RJ**. Rio de Janeiro, RJ. Departamento de Recursos Minerais – DRM-RJ. Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2012.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. **Water in environmental planning**. New York: W.H. Freeman, 1978.

FERNANDES, C. P.; AMARAL, C. P. Movimento de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. (Ed.). . **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1996.

FREY, H. et al. A robust debris-flow and GLOF risk management strategy for a data-scarce catchment in Santa Teresa, Peru. **Landslides**, v. 13, n. 6, p. 1493–1507, 2016.

GENOVEZ, A.; NETO, F.; SARTORI, A. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

GERENTE, J.; LUIZ, E. L.; SANTO, M. A. D. Use the SHALSTAB as a tool for preliminary diagnosis of susceptibility to shallow landslides on the low valley of Luis Alves river, Santa Catarina - Brazil. **Ambiência**, v. 10, n. 1, p. 333–350, 2014.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS JR., E. A.; CAMPOS, T. M. P. Estabilidade de taludes. In: COMITÊ DE SOLOS NÃO SATURADOS. COMISSÃO TÉCNICA PARA A EDUCAÇÃO (Ed.). . **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 9ª ed. São

Paulo, SP: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2015. p. 613–632.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 19, 1994.

GONG, L. et al. Debris Flow Generation Based on Critical Discharge : A Case Study of Xiongmao Catchment , Southwestern China. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 552, 2020.

GRAMANI, M. F. **Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos no Brasil e comparação com alguns casos internacionais**. 2001. 372 f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, 2001.

GRANGER, K. et al. Community risk in Cairns: A multi-hazard risk assessment. **Australian Journal of Emergency Management**, v. 14, n. 2, p. 25–26, 1999.

HEWITT, K. Geomorphic hazards in mountain environments. In: OWENS, P.; SLAYMAKER, O. (Eds.). **Mountain geomorphology**. London: Hodder Scientific, 2004. p. 187–218.

HILLEL, D. Infiltration and surface runoff. In: HILLEL, D. (Ed.). . **Applications of soil physics**. 1ª ed. Eua: Academic Press, 1980.

HJELMFELT, J. A. T. Curve number procedure as infiltration method. v. 106, p. 1107–1111, 1980.

HUAT, B. B. K.; ALI, F. H. J.; LOW, T. H. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 24, p. 1293–1306, 2006.

HUNGR, O. et al. A review of the classification of landslides of the flow type. **The Geological Society of America**, v. 7, n. 3, p. 221–238, 2001.

HUNGR, O. Flow slides and flows in granular soils. **International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earth Fills**, 2003.

HUTCHINSON, J. N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. **General Report, Proceedings, 50º International Symposium on Landslides**, v. 1, p. 3–35, 1988.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2010.

IVERSON, R. M. The physics of debris flows. **Review of Geophysics**, v. 35, n. 3, p. 245–296, 1987.

JAKOB, M. **Morphometric and geotechnical controls of debris flow frequency and magnitude in southwestern British Columbia**. 1996. Ph.D. Thesis. University of British Columbia, 1996.

JAKOB, M.; HUNGR, O. **Debris flow Hazards and Related Phenomena**. Chichester, UK: Praxis Publishing e Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.

JOSHI, J. et al. Landslide hazard mapping in the Nallu Khola watershed, Central Nepal. **Nepal Geological Society**, v. 21, p. 21–28, 2000.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P. Histórico de ocorrência de fluxos de detritos e seus estudos no Brasil. **XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos - Brasília/DF**, 2010.

KOBIYAMA, M.; REGINATTO, G. M. P.; MICHEL, G. P. Contribuição da Engenharia de Sedimentos ao Planejamento Territorial com Ênfase em Redução de Desastres Hidrológicos. **IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. João Pessoa - PB**, 2014.

LACERDA, M. P. C. .; BAHIA, V. G. Material de Origem x Erodibilidade dos Solos. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 191, p. 10–18, 1998.

LEE, J. H.; PARK, H. J. Assessment of shallow landslide susceptibility using the transient infiltration flow model and GIS-based probabilistic approach. **Landslides**, v. 13, n. 5, p. 885–903, 2016.

LI, Q. et al. Debris Flow Risk Assessment Based on a Water – Soil Process Model at the Watershed Scale Under Climate Change : A Case Study in a Debris-Flow-Prone Area of Southwest China. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 3199, p. 1–15, 2019.

LI, T.; AL, E. Surge termination and deposition of debris-flow. **Landslides: Evaluation and Stability, Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil**, v. 2, p. 1451–1456, 2004.

LIN, J.; CHENG, C.; PENG, C. Potential hazard analysis and risk assessment of

debris flow by fuzzy modeling. **Natural Hazards**, v. 64, p. 273–282, 2012.

LIU, X.; LEI, J. A method for assessing regional debris flow risk: An application in Zhaotong of Yunnan province (SW China). **Geomorphology**, v. 52, n. 3–4, p. 181–191, 2003.

MAGALHÃES, P. C. et al. Eventos Hidrológicos Extremos: Região Serrana Fluminense 12/01/2011. **X ENAU**, 2014.

MEDEIROS, V. S.; BARROS, M. T. L. Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na região serrana do Estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de Janeiro de 2001. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 19, 2011.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Glossário de Defesa Civil - Estudos de Riscos e Medicina de Desastres**. 5ª ed. Brasília - DF: Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2009.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Mapeamento de risco em encostas e margens de rios**. 2007. ed. Brasília: Brasil. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

MISHRA, S. K.; PANDEY, A.; SINGH, V. P. Special issue on Soil Conservation Service curve number (SCS-CN) methodology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 11, p. 1157, 2012.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 17, p. 3323–3345, 2004.

MOREIRAS, S. M. Landslides incidence zonation in the rio Mendoza valley, Mendoza Province, Argentina. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 29, p. 255–266, 2004.

MOTTA, H. P. G. DA. **Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros**. 2014. 263 f. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MUNTOHAR, A. S.; LIAO, H. J. Rainfall infiltration: Infinite slope model for landslides triggering by rainstorm. **Natural Hazards**, v. 54, n. 3, p. 967–984, 2010.

NAKANO, T. Natural hazards: Report from Japan. In: **Natural hazards: local, regional, global**. Oxford: Oxford Press, 1974. p. 231–243.

NETTLETON, I. M.; MARTIN, S.; HENCHER, S. **Debris flow types and mechanisms**. Edinburgh: Crown press, 2005.

NUNES, A. L. L. S. Convivência Com Rupturas - Barreiras Contra Quedas de Blocos. **COPPE, Rio de Janeiro, Brasil**, n. 5, p. 2013, 2013.

NUNES, A. L. L. S.; SAYÃO, A. Debris flows e técnicas de mitigação e convivência. **14 Congresso Nacional de Geotecnia. Covilhã, Portugal**, p. 83–123, 2014.

OTTERO, C. R.; CHARGEL, L. T.; HORA, M. DE A. G. M. Análise de Frequência dos Dados Pluviométricos Observados em 2011 e 2013 na Região Serrana , Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 131–139, 2018.

PALIAGA, G. et al. A spatial multicriteria prioritizing approach for geo-hydrological risk mitigation planning in small and densely urbanized Mediterranean basins. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 53–69, 2019.

PATHAK, S.; NILSEN, B. Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition. **Bulletin of Engineering Geology Environment**, v. 63, p. 25–32, 2004.

PELIZONI, A. **Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense**. 2014. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

PETLEY, D.; HEARN, G.; HART, A. Towards the development of a landslide risk assessment for rural roads in Nepal. In: GLADE, T.; CROZIER, M. J. (Eds.). **Landslide hazard and risk**. London: Wiley and Sons, 2004. p. 597–679.

PPAFSTETTER, O. **Chuvas Intensas no Brasil**. 2a. edição ed. Rio de Janeiro: DNOS, 1982.

PINHO, G. M.; FRANCISCO, C. N.; SALGADO, C. M. Análise Espacial dos Movimentos de Massa em Nova Friburgo/RJ: O Caso do Desastre Natural de Janeiro de 2011. **Rev. Tamoios, São Gonçalo (RJ)**, 2013.

POCHAMPALLY, K. K.; GUPTA, S. M.; KAMARTHI, S. V. Evaluation of production facilities in a closed-loop supply chain: a fuzzy TOPSIS approach. **III SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing**.

Providence, Rhode Island., 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NOVA FRIBURGO. **A cidade**. Disponível em: <https://pnmf.rj.gov.br/pagina/1_A-Cidade.html>. Acesso em: 17 dez. 2020.

PROJETO GIDES. **Manual Técnico para Concepção de Intervenções para Fluxo de Detritos**. 2018. ed. Brasília: Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2018.

PRUSKI, F. F. Processo Físico de Ocorrência da Erosão Hídrica. In: **Conservação de Solo e Água**. Viçosa: Editora UFV, 2008.

RAWLS, W. J. et al. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. (Ed.). . **Handbook of Hydrology**. New York, NY: McGraw-Hill, 1993. p. 1–51.

RAY, R. L.; SMEDT, F. DE. Slope stability analysis on a regional scale using GIS : a case study from Dhading , Nepal. **Environmental Geology**, p. 1603–1611, 2009.

REZENDE, O. M. **Análise quantitativa da resiliência a inundações para o Planejamento urbano: caso da bacia do canal do mangue no rio de janeiro**. 2018. 282 f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

RIBEIRO, G. Acerca do calculo da vasão de obras d'arte : tempo de concentração. **Revista do Clube de Engenharia**, v. 294, n. 1, p. 16–19, 1961.

RIBEIRO, L. B. DE F. **Avaliação do Processo Hidráulico de Ocorrência de Enxurradas e Proposição de um Mapeamento de Áreas de Risco para Apoio ao Planejamento do Uso do Solo**. 2015. 298 f. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

RICKENMANN, D. Empirical relationships for Debris Flow. **Natural hazards**, v. 19, n. 47, p. 47–77, 1999.

RIGNEL, D. G. S. ; CHENCI, G. P. ; LUCAS, C. A. Uma introdução a lógica fuzzy. **Revista eletrônica de sistemas de informação e gestão tecnológica**, v. 1, n. 1, p. 17–28, 2011.

RODINE, J. D. **Analysis of mobilization of debris flows**. 1974. PhD Thesis. ed. California: Stanford University, 1974.

ROGELIS, M. C.; WERNER, M. Regional debris flow susceptibility analysis in mountainous peri-urban areas through morphometric and land cover indicators. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 11, p. 3043–3064, 2014.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **Journal of operational reserarch, Amsterdam**, v. 48, p. 9–26, 1990.

SACOTO, C. A. G. **Análise dos Esforços de Impacto de Debris Flows**. 2017. 186 f. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SAHA, A.; GUPTA, R.; ARORA, M. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. **Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 2, p. 357–369, 2002.

SAMUELS, P.; GOULDBY, B. **Language of Risk – Project Definitions (Second Edition). Integrated Flood Risk**. Disponível em: <www.floodsite.net>. Acesso em: 5 mar. 2021.

SANTI, P. M. et al. Debris-flow impact, vulnerability, and response. **Natural Hazards**, v. 56, n. 1, p. 371–402, 2011.

SAULNIER, G.; BEVEN, K.; OBLED, C. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 202, n. 1–4, p. 158–172, 1997.

SAYERS, P. et al. **Flood Risk Management: A strategic Approach**. Paris: Asian Development Bank, GIWP, UNESCO and WWF-UK, 2013.

SCHUSTER, R.; SALCEDO, D.; VALENZUELA, L. Overview of catastrophic landslides of South America in the twentieth century. In: EVANS, S.; DEGRAFF, J. (Ed.). **Catastrophic landslides: effects, occurence and mechanisms**. Boulder: General Society of America, 2002. p. 1–34.

SCS. **National engineering handbook**. Washington: Soil Conservation Service, 1964.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and processes**. Oxford: Oxford Press, 1993.

SIDLE, R. C. .; PEARCE, A. J.; O'LOUGHLIN, C. L. Natural factors affecting slope stability. In: **Hillslope stability and land use**. Washington: In: American Geophysical Union, 1985.

SILVA, D. T. **Contribuições sobre Previsão de Fluxo de Detritos**. 2016. 125 f. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, J. X. **Análise numérica 3D do fluxo de detritos do Córrego D'Antas**. 2015.

Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SKEMPTON, A. W.; DELORY, F. A. Stability of natural slopes in London clay. **Proceedings 4th international conference on soil mechanics and foundation engineering**, v. 2, p. 378–381, 1957.

SOUZA, J. M. DE. **Análise física e química de um perfil de intemperismo no município de São Gonçalo – RJ com movimentação de massa**. 2009. UERJ – FFP, 2009.

SOUZA, J. M. DE. **Características do meio físico em um escorregamento em São Pedro da Serra e suas influências na transformação da paisagem em Nova Friburgo, RJ**. 2014. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2014.

STARKEK, L. The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief. **Geographia Polonica**, v. 41, p. 13–203, 1979.

TAKAHASHI, T. Debris flow. **Annual review of fluid mechanics, volume 13**, v. 13, p. 57–77, 1981.

TAKAHASHI, T. **Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures**. 2nd. ed. London: Taylor & Francis Group, 2007.

TAKAHASHI, T. A Review of Japanese Debris Flow Research. **International Journal of Erosion Control Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2009.

TELLES, W. R. .; RODRIGUES, P. P. G. .; NETO, A. J. S. Calibração automática de um simulador aplicado a um rio de montanha empregando dados experimentais de precipitação e nível - Estudo de caso: Córrego D'Antas, RJ. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 143–151, 2015.

TERZAGHI, K. **Mecanismos de escorregamentos de terra**. Tradução Ernesto Pichler. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1952.

THAPA, P.; DHITAL, M. Landslide and debris flows of 19–21 July 1993 in the Agra Khola Watershed of Central Nepal. **Journal of Nepal Geological Society**, v. 21, p. 5–20, 2000.

TOMINAGA, L. K. Análise e mapeamento de risco. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Ed.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: SP, 2009.

UNDRR. **Human cost of disasters - An overview of the last 20 years the last 20 years 2000-2019** LouvainUN Office for Disaster Risk Reduction, , 2020a.

UNDRR. **Risks and Disasters - Knowledge Portal**. Disponível em: <<http://www.un-spider.org/risks-and-disasters#:~:text=As stated by the United,the affected community or society>>. Acesso em: 29 set. 2020b.

UNISDR. **Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives**. New York and Geneva: United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR), 2004. v. I

UNISDR. **Terminology on disaster risk reduction**. Geneva: United Nations International k reduction Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2009.

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, São Paulo: INPE, 2008.

VALVERDE SANCHO, A. M. **Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais**. 2016. 160 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2016.

VANDINE, D. F. **Debris flow control structures for forest engineering**. Victoria, British Columbia, Canadá: Ministry of Forests Research Program, 1996.

VARNES, D. J. Slope movement types and process. **Special Report 176, Transportation Research Board, Washington, USA**, p. 11–33, 1978.

VENTURIM, R. P. .; BAHIA, V. G. Considerações Sobre os Principais Solos de Minas Gerais e Sua Susceptibilidade à Erosão. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 191, p. 7–9, 1989.

VERÓL, A. P. **Requalificação Fluvial Integrada ao Manejo de Águas Urbanas para Cidades Mais Resilientes**. 2013. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

WAGNER, A. **Extração de Conhecimento a partir de Redes Neurais aplicada ao problema da Cinemática Inversa na Robótica**. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2003.

WANG, J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-

making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2263–2278, 2009.

WILLIAMS, J. R.; LASEUR, W. V. Water yield model using SCS curve numbers. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 102, n. 9, p. 1221–1253, 1976.

WOLLE, C. .; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar- Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, p. 27–36, 1989.

XIMENES, E. F.; MONTEZUMA, R.; SATO, A. M. Gestão participativa de riscos de desastres: o sistema de alerta e alarme de base comunitaria do Cardinót, Nova Friburgo, RJ. **XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Aplicada I Congresso Nacional de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 3904–3916, 2017.

XU, Q.; ZHANG, S.; LI, W. Spatial distribution of large-scale landslides induced by the 5.12 Wenchian Earthquake. **Journal of mountain science**, v. 8, p. 246–260, 2011.

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

ZHANG, P. et al. Simulating debris flow deposition using a two-dimensional finite model and Soil Conservation Service-curve number approach for Hanlin gully of southern Gansu (China). **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 10, p. 6417–6426, 2014.

ZHOU, S. et al. Modified CN Method for Small Watershed Infiltration Simulation. **Journal of Hydrology**, v. 4, n. 14, p. 1–9, 2014.

ZONENSEIN, J. **Índice De Risco De Cheia Como Ferramenta De Gestão De Enchentes**. 2007. Dissertação de Mestrado, COPPE/ UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.