



Ministério da  
Ciência, Tecnologia  
e Inovação



[sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.03.20.54-TDI](http://sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.03.20.54-TDI)

## MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS DE NOVA FRIBURGO-RJ POR MEIO DE INFERÊNCIA FUZZY E ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS DE ALERTA COM USO DO TERRAMA2

Carina de Sousa Rodrigues

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Sensoria-  
mento Remoto, orientada pelos  
Drs. Teresa Gallotti Florenzano e  
Laércio Massaru Namikawa, apro-  
vada em 26 de agosto de 2013.

URL do documento original:  
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EJD3FL>

INPE  
São José dos Campos  
2013

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Gabinete do Diretor (GB)  
Serviço de Informação e Documentação (SID)  
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/6921  
Fax: (012) 3208-6919  
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO  
INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência, Tecnologia  
e Inovação



[sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.03.20.54-TDI](http://sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.03.20.54-TDI)

## MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS DE NOVA FRIBURGO-RJ POR MEIO DE INFERÊNCIA FUZZY E ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS DE ALERTA COM USO DO TERRAMA2

Carina de Sousa Rodrigues

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Sensoria-  
mento Remoto, orientada pelos  
Drs. Teresa Gallotti Florenzano e  
Laércio Massaru Namikawa, apro-  
vada em 26 de agosto de 2013.

URL do documento original:  
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EJD3FL>

INPE  
São José dos Campos  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Rodrigues, Carina de Sousa.

R618m Mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo-RJ por meio de inferência fuzzy e elaboração de cenários de alerta com uso do TerraMA2 / Carina de Sousa Rodrigues. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxii + 113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.03.20.54-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Teresa Gallotti Florenzano e Laércio Massaru Namikawa .

1. desastres naturais. 2. escorregamentos. 3. inferência espacial.  
4. cenários de alerta. I.Título.

CDU 528.8:624.131.357

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Sensoriamento Remoto**

Dra. Cláudia Maria de Almeida

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Laércio Massaru Namikawa

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Marcio de Morisson Valeriano

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Cristiane Nunes Francisco

Convidado(a) / UFF / Rio de Janeiro - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

- maioria simples  
 unanimidade

Aluno (a): **Carina de Sousa Rodrigues**

São José dos Campos, 26 de Agosto de 2013



*“Para chegar ao topo, obstáculos não faltarão; mas quando chegar lá terá a certeza que faria tudo novamente”.*

*Autor desconhecido*



*Ao Edson, companheiro de todos os momentos, e  
a meus pais, todos os seis!*



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelas oportunidades e pessoas que colocou em meu caminho, e à minha família e amigos, que sempre me apoiaram nessa trajetória e souberam entender minhas ausências.

Aos meus orientadores, Dra. Teresa Gallotti Florenzano e Dr. Laércio Massaru Namikawa, pela confiança depositada e pela liberdade e diálogo durante toda a pesquisa, o que contribuiu muito para meu crescimento profissional.

Ao Eymar Lopes, pela imensa ajuda desde o início, e em todos os momentos (e não foram poucos) que o procurei para pedir “socorro!”.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela infraestrutura e apoio oferecidos desde o início.

Aos professores do curso de Sensoriamento Remoto, por suas valiosas contribuições em minha formação; também aos professores da graduação em Geografia da Unesp-Ourinhos, em especial a Jonas Teixeira Nery, Rodrigo Lilla Manzione e Luciene Cristina Risso, pelo apoio e incentivo mesmo antes do meu ingresso no Mestrado.

Aos professores Cláudia Almeida, Márcio Valeriano, pela ajuda, dicas e ideias que tanto enriqueceram esta pesquisa; à Cristiane Nunes Francisco, da Universidade Federal Fluminense, pelas inúmeras contribuições e materiais que possibilitaram a execução deste trabalho.

Ao Núcleo de Análise e Diagnóstico a Escorregamentos (NADE) do Serviço Geológico do estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ), em especial à Ingrid Lima e Joana Ramalho, que gentilmente me receberam e compartilharam seu trabalho comigo.

À Michelle Lima, do Sistema de Meteorologia do estado do Rio de Janeiro (SIMERJ) pelos valiosos dados disponibilizados; à Professora Telma Mendes pela gentil colaboração e interesse.

À Polyana Bispo e Vanessa Canavesi, pela fundamental ajuda em vários momentos.

Aos amigos do Inpe, em especial à Graziela Meneghetti, Talita Assis, Fernanda Batista, Felipe Marques, Daniela Anjos, Aline Castro. Um agradecimento muito especial ao André Gavlak, que esteve comigo desde a inscrição para o processo seletivo até o fechamento deste documento, auxiliando e incentivando-me em diversos momentos.

Aos amigos de trabalho, Joyce Camacho, Marcos Freitas, Fabiana Jungers, Fabrício Ferreira, pelo carinho e compreensão.

A toda minha família, meus pais Evanir e Fernando, meus avós Therezinha e João, meus “novos” pais, Silvia e Edson, a meu irmão Luis Fernando, por acreditarem em mim e sempre me apoiarem. A meu esposo, companheiro de todos os momentos, Edson, por estar sempre a meu lado, tornando tudo mais fácil! À Molly Maria, por todas as alegrias e por me ensinar a continuar e acreditar sempre, não importando o que vem pela frente.

Enfim, a todos que torceram por mim, muito obrigada!

## RESUMO

No Brasil, os tipos de desastres naturais mais frequentes são as inundações e os escorregamentos, com 61,8% e 15% dos registros, respectivamente. Os escorregamentos, abordados neste trabalho, são definidos como rápidos movimentos de massa, que apresentam um plano de ruptura bem definido. Eles são processos naturais que causam anualmente grandes danos sociais e econômicos. As ações de prevenção, como o estabelecimento de áreas suscetíveis a esses processos e um efetivo sistema de alerta são importantes, pois podem minimizar as perdas e danos desses desastres naturais. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi elaborar um mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos por meio de inferência *fuzzy* e estabelecer os limiares críticos de precipitação para gerar cenários de alerta a escorregamentos utilizando o software TerraMA<sup>2</sup>, para o município de Nova Friburgo/RJ. Os procedimentos para mapeamento de suscetibilidade foram realizados no ArcGIS 10.0 e no SPRING 5.1.8, utilizando dados de declividade, curvatura vertical e curvatura horizontal, que tiveram pesos atribuídos de acordo com sua influência nos processos de escorregamentos. Com o mapa de suscetibilidade e dados de precipitação de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, estabeleceram-se os limiares críticos a escorregamentos utilizados para gerar os cenários de alerta no TerraMA<sup>2</sup>. O uso do operador *fuzzy gama* possibilitou a integração de diversos dados, não tratando os limites entre as classes de maneira rígida, além de permitir a análise de diferentes cenários por meio da variação do índice gama. A análise dos mapas de cicatrizes dos escorregamentos de 2011 e de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo, obtido com o método aplicado, mostra coerência parcial entre os dois resultados obtidos. Os dados analisados indicam que a grande quantidade de chuva concentrada em poucas horas foi o fator determinante nos escorregamentos de 2011. Entre as demais variáveis, a declividade (20 a 50%) e a forma do terreno (côncavo-convergente) foram as que tiveram maior influência nos escorregamentos ocorridos em Nova Friburgo em janeiro de 2011. A definição dos limiares e a geração dos cenários de alerta foram limitadas pela distribuição e resolução espacial dos dados disponíveis, além de problemas de escala e atualização.



**LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING OF NOVA FRIBURGO/RJ  
OBTAINED WITH FUZZY INFERENCE AND FORMULATION OF ALERT  
SCENARIOS WITH TERRAMA<sup>2</sup>**

**ABSTRACT**

In Brazil, floods and landslides are the most frequent types of natural disasters, with 61.8% and 15% of the records, respectively. In this paper, landslides are considered as rapid mass movements, which have a defined rupture plane. They are determined as a natural process that annually cause huge social and economic damages. Preventive actions such as the establishment of areas susceptible to these processes and an effective early warning system are important, since they can minimize the damages and losses from these natural disasters. Accordingly, the aim of this study is to develop a landslide susceptibility map using fuzzy inference. This work established the critical thresholds of precipitation scenarios to generate warnings to landslides using TerraMA<sup>2</sup> software for Nova Friburgo/RJ municipality. Procedures for susceptibility mapping were performed in ArcGIS 10.0 and SPRING 5.1.8, using slope, horizontal curvature and vertical curvature data, which had weights assigned according to their influence on the landslides processes. With the susceptibility map and precipitation data for December 2010 and January 2011, the critical landslide thresholds scenarios used to generate warnings in TerraMA<sup>2</sup> were set. The use of fuzzy gamma operator enabled the integration of various data and did not treat the class boundaries as fixed limits, allowing the analysis of different scenarios by the variation of the gamma index. The map analysis of the 2011 landslide scars and landslide susceptibility of Nova Friburgo, obtained with the applied method, shows partial consistency between the two results. The analyzed data indicate that the large amount of rainfall concentrated in a few hours was the determining factor in the 2011 landslide. Among other variables, the slope (20-50%) and terrain shape (concave-convergent) were the ones with greatest influence on the landslides occurred in Nova Friburgo in January 2011. The definition of the thresholds and the generation of warnings scenarios were limited by the distribution and spatial resolution of the available data, in addition to problems of updated data and scale.



## **LISTA DE FIGURAS**

Pág.

Figura 1.1 – Frequência mensal de movimentos de massa no estado do Rio de Janeiro, entre 1991 e 2010.....	2
Figura 2.1 – Subdivisões dos desastres naturais.....	6
<u>Figura 2.2 – Desastres naturais no estado do Rio de Janeiro entre 1991 e 2010.</u> .....	8
Figura 2.3 – Desastres naturais no estado do Rio de Janeiro registrados das décadas de 1990 e 2000.....	8
Figura 2.4 – Fatores envolvidos na análise da vulnerabilidade.....	13
Figura 2.5 – Esquema de uma corrida.....	15
Figura 2.6 – Esquema de um rastejo .....	16
Figura 2.7 – Escorregamento rotacional.....	17
Figura 2.8 – Escorregamento translacional.....	18
Figura 2.9 – Queda de blocos.....	19
Figura 2.10 – Desmoronamentos.....	19
Figura 2.11 – Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.....	23
Figura 2.12 – Distribuição da função Fuzzy Gama.....	34
Figura 3.1 – Localização do município de Nova Friburgo .....	36
Figura 3.2 – Distritos de Nova Friburgo.....	37
Figura 3.3 – Precipitação horária em mm dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011.....	39
Figura 4.1 – Área de recobrimento das imagens GeoEye.....	45
Figura 4.2 – Cicatriz de escorregamento no Bairro Village. ....	46

Figura 4.3 – Mapa de declividade de Nova Friburgo .....	49
Figura 4.4 – Mapa de curvatura horizontal de Nova Friburgo. ....	50
Figura 4.5 – Mapa de curvatura vertical de Nova Friburgo.....	51
Figura 4.6 - Mapa geológico de Nova Friburgo. ....	53
Figura 4.7 – Mapa geomorfológico de Nova Friburgo. ....	54
Figura 4.8 – Mapa pedológico de Nova Friburgo. ....	55
Figura 4.9 – Procedimentos metodológicos. ....	57
Figura 4.10 – Precipitação acumulada entre os dias 10 e 16 de janeiro de 2011 em Nova Friburgo.....	61
Figura 5.1 – Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos .....	65
Figura 5.2 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo...	66
Figura 5.3 – Mapa das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 por Distrito em Nova Friburgo.....	68
Figura 5.4 – Quantidade de cicatrizes por distrito .....	69
Figura 5.5 – Quantidade de cicatrizes por unidade litológica.....	70
Figura 5.6 – Características geomorfológicas das cicatrizes. ....	71
Figura 5.7 – Ocorrências das cicatrizes com relação à declividade.....	71
Figura 5.8 – Ocorrências das cicatrizes com relação à curvatura vertical.....	72
Figura 5.9 – Ocorrências das cicatrizes com relação à curvatura horizontal. ..	72
Figura 5.10 – Ocorrência das cicatrizes com relação à forma das vertentes..	73
Figura 5.11 – Tipos de solo predominantes no local dos escorregamentos....	74
Figura 5.12 – Mapa de cobertura e uso da terra de Nova Friburgo.....	75
Figura 5.13 – <u>Quantidade de cicatrizes em cada tipo de uso ou cobertura da</u> <u>terra.....</u>	76

Figura 5.14 – Quantidade de cicatrizes por km <sup>2</sup> nas diferentes coberturas e usos da terra .....	76
Figura 5.15 – Precipitação diária para o período de 22 a 25 de dezembro de 2010. ....	79
Figura 5.16 – Precipitação diária no período de 06 a 16 de janeiro de 2011... ..	81
Figura 5.17 – Suscetibilidade por setor censitário.....	84
Figura 5.18 – Resultado da análise que utilizou o modelo BRAMS (precipitação acumulada em 24 horas) para o dia 11/01/11.....	85
Figura 5.19 – Resultado da análise que utilizou o modelo BRAMS (precipitação acumulada em 24 horas) para o dia 12/01/11.....	85
Figura 5.20 – Precipitação em mm entre os dias 05 e 15 de janeiro de 2011..	86
Figura A.1 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.60).....	99
Figura A.2 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.65).....	100
Figura A.3 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.75).....	101
Figura A.4 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.80).....	102
Figura A.5 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.85).....	103
Figura A.6 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.90).....	104
Figura A.7 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.95).....	105
Figura B.1 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.60) .....	107

Figura B.2 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.65).....	108
Figura B.3 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.75).....	108
Figura B.4 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.80).....	109
Figura B.5 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.85).....	109
Figura B.6 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.90).....	110
Figura B.7 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.95).....	110
Figura C.1 – Precipitação acumulada para o dia 10 de janeiro de 2011 (em mm).....	111
Figura C.2 – Precipitação acumulada para o dia 11 de janeiro de 2011 (em mm).....	111
Figura C.3 – Precipitação acumulada para o dia 12 de janeiro de 2011 (em mm).....	112
Figura C.4 – Precipitação acumulada para o dia 13 de janeiro de 2011(em mm). .....	112

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Avaliação de risco .....	11
Tabela 2.2: Classificação da intensidade de precipitação.....	27
Tabela 2.3 – Classificação da precipitação acumulada em 24 horas estabelecida pela CEDEC .....	28
Tabela 4.1 – Classes de declividade.....	47
Tabela 4.2 – Classes de curvatura vertical e curvatura horizontal.....	47
Tabela 4.3: Níveis de suscetibilidade.....	58
Tabela 4.4 – Limiares críticos de precipitação do Sistema Alerta Rio.....	61
Tabela 4.5 – Limiares críticos de precipitação acumulada em 24 horas.....	61
Tabela 4.6 – Teste dos limiares críticos de precipitação.....	62
Tabela 5.1 – Limiares para precipitação acumulada em 24 horas.....	77
Tabela 5.2 – Limiares para precipitação acumulada em 1 hora.....	78
Tabela 5.3 – Escala de cores dos níveis de alerta do TerraMA <sup>2</sup> .....	78
Tabela 5.4 – Resultados da análise realizada para o dia 22/12/2010 .....	79
Tabela 5.5 – Resultados da análise realizada para os dias 23/12/2010 e 24/12/2010 .....	80
Tabela 5.4 – Resultados da análise realizada para o dia 25/12/2010 .....	80
Tabela 5.5 – Resultados da análise realizada para o dia 11/01/2011.....	82
Tabela 5.6 – Resultados da análise realizada para o dia 12/01/2011.....	83
Tabela 5.7 – Resultados da análise realizada para o dia 13/01/2011.....	83
Tabela D.1– Tabela de pesos das classes da variável curvatura vertical. ....	113
Tabela D.2 – Tabela de pesos das classes da variável curvatura horizontal. 113	113
Tabela D.3 – Tabela de pesos das classes da variável declividade.....	113



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO .....
1.1.	Objetivo Geral .....
1.2.	Objetivos Específicos .....
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....
2.1.	Desastres naturais .....
2.2.	Suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco.....
2.3.	Movimentos de massa .....
2.3.1.	Condicionantes dos movimentos de massa .....
2.3.2.	Correlação entre precipitação e escorregamentos.....
2.4.	Sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas na análise e avaliação de desastres naturais.....
2.4.1.	Inferência espacial .....
3	ÁREA DE ESTUDO.....
3.1.	Localização e caracterização .....
3.2.	Clima e Hidrografia.....
3.3.	Aspectos Geológicos e Geomorfológicos.....
3.4.	Megadesastre da Região Serrana do estado do Rio de Janeiro ...
4	MATERIAL E MÉTODOS.....
4.1.	Material e <i>Softwares</i> .....
4.1.1.	Material .....
4.1.2.	<i>Softwares</i> .....
4.2.	Procedimentos metodológicos .....
4.2.1.	Fusão das imagens ALOS.....

4.2.2.	Mapa de cobertura e uso da terra .....	44
4.2.3.	Mapeamento das cicatrizes.....	44
4.2.4.	Variáveis Geomorfométricas .....	47
4.2.5.	Dados de geologia, geomorfologia e solos .....	52
4.2.6.	Mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos .....	56
4.2.7.	Cenários de alerta com a Plataforma de Monitoramento, Análise e Alerta – TerraMA <sup>2</sup> .....	59
4.2.8.	Limiares críticos a escorregamentos .....	60
4.2.9.	Avaliação dos resultados .....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
5.1.	Suscetibilidade a escorregamentos em Nova Friburgo .....	65
5.2.	Limiares críticos a escorregamentos.....	77
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	87
6.1.	Recomendações .....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89
	<b>APÊNDICE A – MAPAS DE SUSCETIBILIDADE COM DIFERENTES VALORES DE GAMA.....</b>	99
	<b>APÊNDICE B – OCORRÊNCIA DE CICATRIZES NAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE, NOS MAPAS COM DIFERENTES VALORES DE GAMA.....</b>	107
	<b>APÊNDICE C – PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA OS DIAS 10 A 13 DE JANEIRO, SEGUNDO DADOS DO BRAMS .....</b>	111
	<b>APÊNDICE D – PESOS DAS CLASSES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA COMPOR O MAPA DE SUSCETIBILIDADE.....</b>	113

## **1 INTRODUÇÃO**

Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU), no período entre 1900 e 2000, o crescimento no número de desastres naturais foi de 56% (UN-ISDR, 2004). No Brasil, os tipos de desastres mais frequentes são as inundações e os escorregamentos, com 61,8% e 15% dos registros, respectivamente. Os bancos de dados globais indicam que houve um significativo aumento na frequência de desastres naturais, principalmente depois da década de 1950, e há um consenso de que esse fato deve-se à grande vulnerabilidade e exposição da população a esses eventos (MARCELINO et al., 2006). A quantidade de grandes desastres naturais ocorridos na década de 1990 superou em três vezes os eventos na década de 1960 (UN-ISDR, 2004).

Para Tominaga (2009), a teoria de que os desastres ameaçam da mesma maneira todas as pessoas não funciona na prática, uma vez que a população de classe social mais baixa normalmente vive em áreas mais densamente ocupadas, em locais de risco e em construções mais frágeis do que a população de alta renda, deixando-a assim, mais vulnerável aos perigos.

Os escorregamentos são processos naturais que se destacam pelos grandes danos sociais e econômicos causados anualmente. Esse fenômeno natural é influenciado por fatores geomorfológicos, geológicos, pedológicos, hidrológicos, climáticos e pela cobertura e uso da terra. Entre as variáveis geomorfológicas, a declividade e as curvaturas vertical e horizontal são consideradas importantes condicionantes para a ocorrência desse processo, uma vez que estão diretamente relacionadas com a velocidade de deslocamento e à concentração/dispersão de sedimentos (LOPES et al., 2011).

De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2011), o município de Nova Friburgo não registrou oficialmente nenhum desastre natural causado por movimentos de massa entre 1991 e 2010. No mesmo período,

Petrópolis/RJ e Teresópolis/RJ registraram 17 e 7 eventos, respectivamente (Figura 1.1).

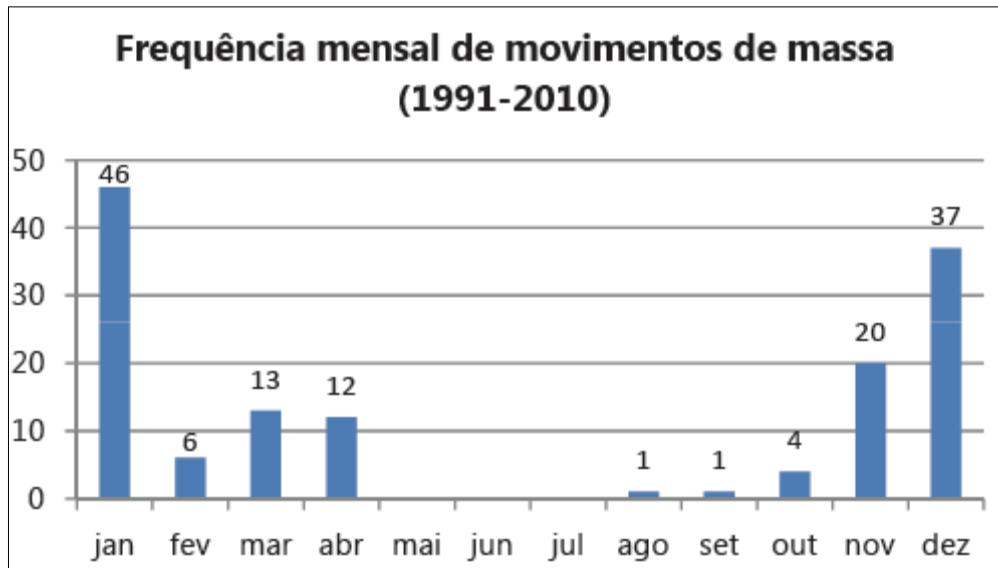


Figura 1.1 – Frequência mensal de movimentos de massa no estado do Rio de Janeiro, entre 1991 e 2010.

Fonte: UFSC (2011).

Barbosa et al. (2011) destacam os escorregamentos ocorridos no início do ano de 2010 no município de Angra dos Reis (RJ), que causaram inúmeras perdas de vidas e propriedades em áreas do município, suscetíveis a esse tipo de evento e ocupadas por hotéis e pousadas.

Outro desastre natural de grande proporção que atingiu a Região Serrana do estado do Rio de Janeiro – principalmente as cidades de Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, Sumidouro e São José do Vale do Rio Preto – ocorreu em janeiro de 2011, quando mais de 900 pessoas perderam a vida e outras 18.000 ficaram desabrigadas. Nas semanas que antecederam os eventos, atuava sobre o Brasil uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a região afetada teve um total acumulado em 24 horas de 300 mm de chuva, enquanto que o esperado para o mês de janeiro é de 209 mm (BAGGIO; HORN, 2011).

Segundo Engelbrecht et al. (2011), principalmente em países como o Brasil, onde o crescimento das cidades também ocorre em áreas de risco, as ações de prevenção, como o estabelecimento de áreas de suscetibilidade e um efetivo sistema de alerta, se tornam ainda mais importantes, pois podem minimizar os danos dos desastres naturais, tanto em termos financeiros, quanto em perdas de vidas humanas. Além disso, o posterior mapeamento e avaliação da extensão e gravidade do evento são fundamentais para auxiliar os órgãos governamentais no processo de identificação da população afetada e das áreas prioritárias. A partir dos dados de sensoriamento remoto, é possível obter informações importantes na definição das áreas suscetíveis e na avaliação das áreas atingidas por esse e outros tipos de desastres. Dessa forma, foram estabelecidos os objetivos destacados a seguir.

### **1.1. Objetivo Geral**

Elaborar um mapa de suscetibilidade a escorregamentos por meio de inferência *fuzzy*, integrando dados de declividade, curvatura vertical e curvatura horizontal do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), bem como gerar cenários de alerta a escorregamentos utilizando o software TerraMA<sup>2</sup>. Para o desenvolvimento da metodologia, foi selecionado como área-teste o município de Nova Friburgo/RJ.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Obter o mapa das cicatrizes dos escorregamentos de 2011, por meio da interpretação de imagens de alta resolução espacial Geoeye.
- Analisar as características geológicas, geomorfológicas e de cobertura e uso da terra das cicatrizes dos escorregamentos de 2011.
- Estabelecer os limiares de precipitação para acionar o sistema de alerta, usando o software TerraMA<sup>2</sup>.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Desastres naturais**

Para a ONU, desastres naturais são definidos como um sério rompimento no funcionamento de uma comunidade ou uma sociedade, causando perdas humanas, materiais, econômicas e ambientais generalizadas, que excedem a capacidade da comunidade afetada em lidar com o problema com recursos próprios. É uma combinação de condições de suscetibilidade, vulnerabilidade e capacidade insuficiente de reduzir as consequências negativas do evento (UN-ISDR, 2004).

Os desastres são fenômenos complexos que envolvem a população e os fenômenos naturais que fazem parte da dinâmica terrestre (como movimentos de massa, terremotos, tsunamis e furacões), podendo causar mortes, perdas materiais e prejuízos financeiros consideráveis (UN-ISDR, 2004; MOURA, 2011).

De acordo com o Centro para Pesquisa em Epistemologia de Desastres (CRED - Center for Research on the Epidemiology of Disasters), para que um evento seja considerado um desastre, pelo menos uma das seguintes características deve ser atendida (GUHA-SAPIR, et al. 2010):

- morte de 10 ou mais pessoas;
- 100 ou mais pessoas devem ter sido afetadas;
- declaração de estado de emergência,
- pedido de ajuda internacional.

Desde 1988, os Estados Unidos por meio da Agência do Escritório de Desenvolvimento Internacional de Assistência a Desastres (Agency for International Development's Office of Foreign Disaster Assistance - USAID/OFDA) patrocina junto ao CRED a manutenção de um sistema mundial

de dados sobre desastres, o Banco de Dados Internacional de Desastres (The International Disaster Database - EM-DAT), que contém informações importantes sobre a ocorrência e os impactos provocados por desastres ocorridos desde 1900 (GUHA-SAPIR et al., 2010).

Dentro de sua base de dados, o EM-DAT diferencia os desastres em tecnológicos e naturais, sendo este último tipo classificado conforme a Figura 2.1:

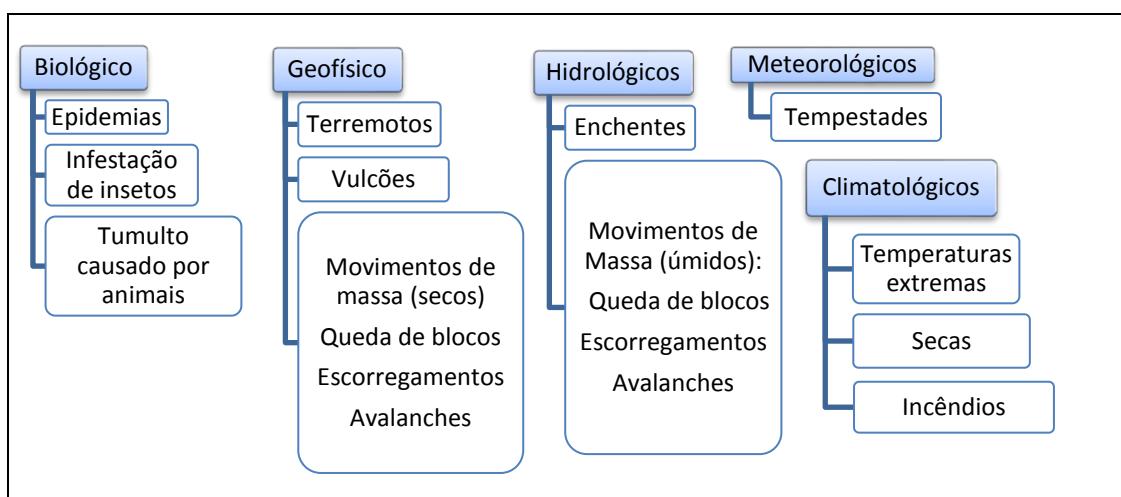


Figura 2.1 – Subdivisões dos desastres naturais.  
Fonte: Adaptado de Guha-Sapir et al. (2010).

O desastre depende de fatores como probabilidade, característica e intensidade do perigo, além da suscetibilidade dos elementos expostos, baseado em condições físicas, sociais, ambientais e econômicas. Destaca-se que perigos naturais são inevitáveis, enquanto que os desastres podem ser prevenidos ou minimizados através do estudo de eventos anteriores e monitoramento de situações presentes (UN-ISDR, 2004).

Segundo o EM-DAT, no período entre 1990 e 1999, uma média mundial aproximada de 188 milhões de pessoas foram afetadas anualmente por algum tipo de desastre. Guha-Sapir et al. (2010) apontam que o número de vítimas de desastres hidrológicos aumentou 98,9% se comparada com a média anual da

última década, sendo esses os desastres mais representativos em 2010, perfazendo 56,1% do total de eventos ocorridos no mundo.

Além do aumento global dos desastres naturais, a população está se tornando mais vulnerável a esses fenômenos, principalmente em países em desenvolvimento, onde uma parcela considerável das pessoas possui um baixo poder aquisitivo, vivem em moradias frágeis e em áreas densamente povoadas (TOMINAGA, 2007).

As ações devem ser voltadas para minimizar a exposição das comunidades ao risco, pois, de acordo com a ONU (UN-ISDR, 2004), os desastres naturais podem ser evitados por meio da investigação dos perigos passados e monitoramento da situação atual, para que o poder público possa tomar medidas para a população em tempo hábil.

Devido a esse aumento no número de eventos, a ONU estabeleceu a Década Internacional para Redução de Desastre Natural (International Decade for Natural Disaster Reduction - IDNDR) entre 1990 e 1999, que se baseava no tema “Construindo uma Cultura de Prevenção”, objetivando estabelecer um amplo comprometimento na tentativa de redução de desastres. As estratégias incluíam, principalmente, avaliações de risco e vulnerabilidade, o uso de sistemas de alerta efetivos, além de contar com um grande número de instituições com capacidade operacional (UN-ISDR, 2004).

Para suceder a IDNDR, em dezembro de 1999, foi criada a Estratégia Internacional para Redução de Desastres (International Strategy for Disaster Reduction - ISDR), que tem como objetivos principais coordenar junto à ONU um sistema de redução de desastres, por meio de trabalhos de adaptação às mudanças climáticas, aumento nos investimentos para redução de desastres e auxílio na construção de cidades resilientes.

No Brasil, verificou-se nas últimas décadas um aumento na quantidade e intensidade dos desastres naturais, principalmente devido a eventos

relacionados à frequência e intensidade de chuvas (MARCELINO et al., 2006). Segundo a UFSC (2011), os desastres mais frequentes no Rio de Janeiro são as inundações bruscas e graduais, sendo que 94% dos registros deram-se na última década (Figuras 2.2 e 2.3).

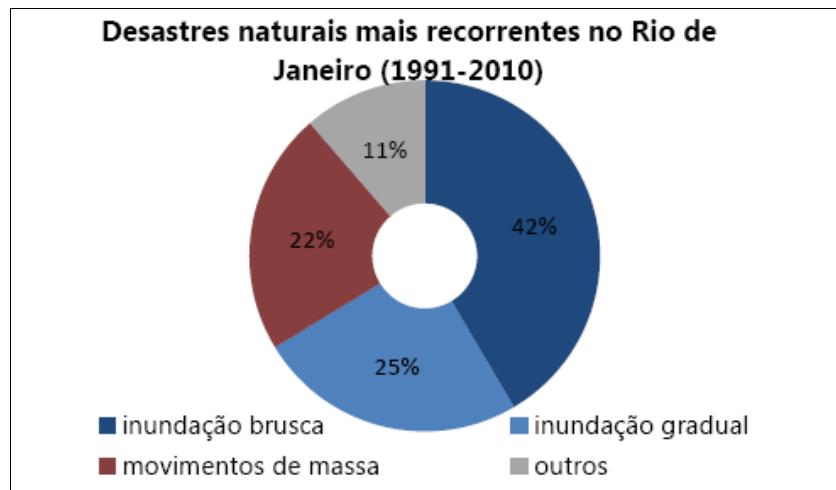


Figura 2.2 – Desastres naturais no estado do Rio de Janeiro entre 1991 e 2010.  
Fonte: UFSC (2011).

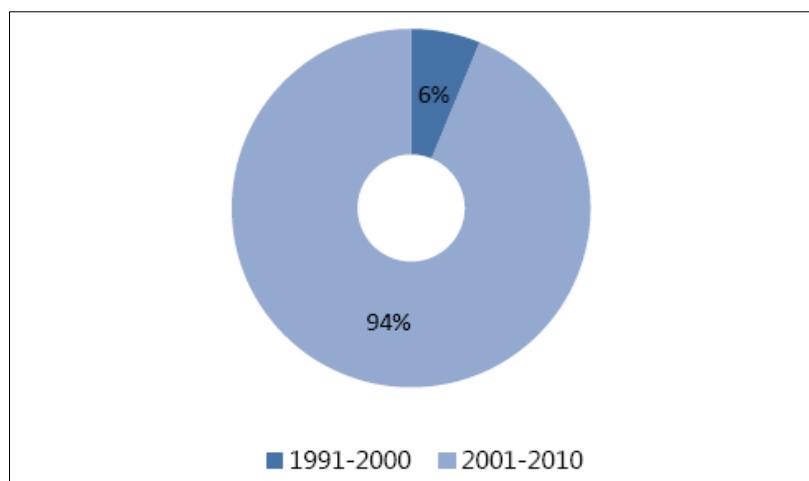


Figura 2.3 – Desastres naturais no estado do Rio de Janeiro registrados das décadas de 1990 e 2000.  
Fonte: UFSC (2011).

Os escorregamentos representam grande parte dos desastres naturais em todo o mundo, e a tendência é que ocorra um aumento em sua frequência. O número de vítimas atingidas por esse processo é subestimado, mascarado pela

estatística de vítimas de enchentes e terremotos, que muitas vezes os precedem (UN-ISDR, 2004). Com a população ocupando locais suscetíveis a escorregamentos, ocorre a retirada de vegetação, a impermeabilização do solo e os cortes no manto de alteração para facilitar a construção das edificações, agravando ainda mais a exposição dessas pessoas a esse tipo de evento (BARNETCHE; MORETTI, 2004).

Ações de prevenção são de grande importância, uma vez que é esperado que o número de ocorrências de desastres naturais se eleve, assim como sua magnitude. Isso especialmente em países em desenvolvimento, devido a maior vulnerabilidade da população frente aos desastres (em virtude do próprio aumento no número de pessoas, sobretudo nas áreas urbanas) (GARATWA; BOLLIN, 2002).

## **2.2. Suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco**

Um dos principais problemas nas pesquisas sobre desastres naturais é a existência de múltiplas definições sobre importantes conceitos, como suscetibilidade, perigo, risco e vulnerabilidade.

Segundo Martini et al. (2006), para realizar uma avaliação quanto à suscetibilidade a escorregamentos, não existe uma metodologia que se aplique como modelo a ser seguido em todas as situações, mas sim algumas orientações que podem ser utilizadas. Para eles, é possível utilizar uma metodologia que avalie o histórico do local, através do levantamento de eventos anteriores, associando-os aos fatores condicionantes, magnitude e o tempo de recorrência, para determinar a suscetibilidade à ocorrência de novos escorregamentos. Os autores utilizaram a abordagem multicriterial para combinar de maneira coerente os diversos fatores condicionantes utilizados para estabelecer a suscetibilidade a escorregamentos.

De acordo com Guzzetti et al. (2007), termos como suscetibilidade e propensão têm sido utilizados de diferentes maneiras e contendo significados divergentes

em trabalhos sobre o tema. Eles preferem utilizar o termo “risco” para definir áreas que têm predisposição à ocorrência de escorregamentos. Segundo Thiery et al. (2006), a avaliação de suscetibilidade pode ser definida como a probabilidade espacial de ocorrência de um evento em uma determinada área.

Segundo Fernandes e Amaral (1996), a suscetibilidade envolve, além do mapeamento de perigo ao escorregamento, as probabilidades espaciais e temporais, tipos, magnitudes e velocidade de avanço dos escorregamentos em uma área. Segundo os autores, existem quatro métodos utilizados em estudos sobre previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos, descritos a seguir:

- Análise baseada em escorregamentos anteriores identificados em campo: nessa metodologia, a teoria é que o padrão de suscetibilidade acompanha as cicatrizes de deslizamentos anteriores, pois os fatores que causaram a instabilidade em determinado local, possivelmente também serão responsáveis por futuros escorregamentos.
- Análise baseada em mapeamentos geomorfológicos/geotécnicos: os mapas de vulnerabilidade são obtidos pela combinação de outros dados, e é o pesquisador quem determina quais “pesos” cada parâmetro irá apresentar, o que também possibilita uma padronização.
- Análise com bases estatísticas: baseia-se na relação entre os fatores condicionantes da instabilidade e a distribuição espacial dos escorregamentos (atuais e anteriores).
- Análise baseada em modelos determinísticos: essa metodologia utiliza modelos matemáticos em bases físicas, que descrevem certos processos e leis físicas que controlam a estabilidade da encosta.

Com relação ao risco, Tominaga (2007) estabelece que seu mapeamento indica a probabilidade de ocorrência de escorregamentos em função do mapa da suscetibilidade, precipitação e características de uso do solo.

Para a ONU (UN-ISDR, 2004), o risco é definido como a probabilidade da ocorrência de consequências prejudiciais resultante da interação entre perigos naturais (ou induzidos por ação antrópica) e as condições de vulnerabilidade e suscetibilidade, podendo ser expresso como:

$$\text{RISCO} = \text{PERIGOS} \times \text{VULNERABILIDADE}$$

As consequências prejudiciais podem ser morte, danos a propriedades, degradação ambiental e interrupção de atividades econômicas. Sua gestão consiste em uma série de ações com objetivo de reduzir tais riscos em regiões suscetíveis, além de dimensionar a extensão do desastre, por meio de avaliações, prevenção e mitigação de desastres (Tabela 2.1) (GARATWA; BOLLIN, 2002).

Tabela 2.1 - Avaliação de risco.

Análise de Risco	Identificação do fator de risco		Avaliação de Risco	
	Perigo	Vulnerabilidade		
	Estabelecimento da probabilidade, intensidade e localização.	Estabelecimento da suscetibilidade.		
	Estimativa no nível de risco.			
	Avaliar riscos.			
	Análise dos custos sócio econômicos; estabelecimento de níveis aceitáveis de risco e prioridades, elaboração de cenários.			

A avaliação do risco é um processo sistemático de utilizar decisões administrativas, organização e habilidades operacionais nas políticas e estratégias de reação para a sociedade/comunidade, visando diminuir os impactos dos desastres naturais (UN-ISDR, 2004).

Muñoz (2005) define por zoneamento de risco a elaboração de mapeamentos que delimitem as áreas expostas a desastres naturais, que podem causar danos materiais e perdas humanas.

Os perigos (*hazards*) correspondem à probabilidade de um evento natural danoso ocorrer e podem ser classificados em primários e secundários, sendo que em muitos casos, os últimos representam ameaças maiores que os primeiros (UN-ISDR, 2004). O objetivo da avaliação de perigo é identificar sua probabilidade de ocorrência, em uma área, em um determinado período de tempo, visando à proteção das pessoas, como, por exemplo, através da delimitação de áreas onde escorregamentos podem eventualmente ocorrer (UN-ISDR, 2004).

A vulnerabilidade é uma condição determinada por fatores ou processos físicos, ambientais, sociais e econômicos, que expõe uma comunidade ao risco (UN-ISDR, 2004). Para Marcelino et al. (2006), o mapeamento das áreas vulneráveis se configura como um importante instrumento na análise de risco, uma vez que, baseado nesse mapa, o poder público pode tomar uma série de medidas preventivas, como a implantação de obras de engenharia e planejamento do uso da terra, com o objetivo de evitar ou minimizar os danos decorrentes de desastres naturais.

Segundo Tominaga (2007), a vulnerabilidade refere-se a uma condição determinada pelas condições sociais, econômicas, físicas e ambientais de uma comunidade frente ao impacto de um evento natural (Figura 2.4).

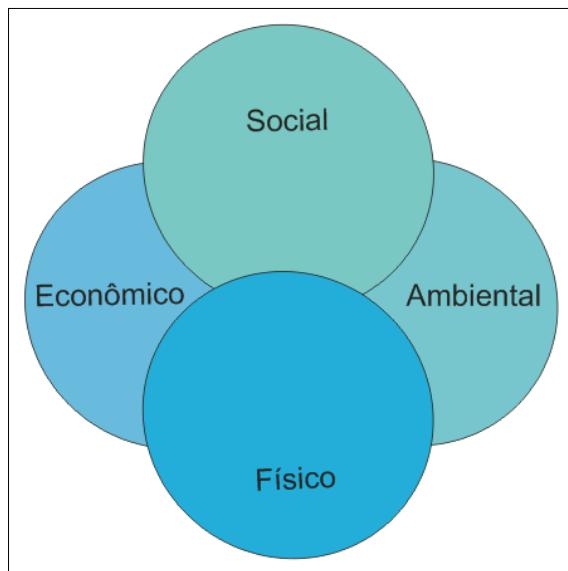


Figura 2.4 – Fatores envolvidos na análise da vulnerabilidade.  
Fonte: Adaptada de Tominaga (2007).

Para Ayala (2002), a presença dos seres humanos transformou os eventos geofísicos em desastres naturais. Para ele, o risco proporcionado pelos desastres naturais não se deve apenas à vulnerabilidade natural, mas também à vulnerabilidade humana. Moura (2011) acredita que a noção de vulnerabilidade é relativa e normalmente está relacionada à exposição das pessoas a um determinado risco, que depende da suscetibilidade de uma área a algum desastre.

Segundo Blahut (2010), a análise de vulnerabilidade é um importante indicador que depende de muitos fatores, entre eles o desenvolvimento econômico e social da região afetada, que poderá determinar como aquela sociedade irá lidar com o evento.

Dessa forma, essa pesquisa será norteada pelos seguintes conceitos:

- Suscetibilidade a escorregamentos: probabilidade de ocorrência de escorregamentos em função das características da área, como cobertura e uso, geologia, geomorfologia e pedologia (baseado em Tominaga (2007));

- Vulnerabilidade: condição determinada por fatores sociais, econômicos, físicos e ambientais de uma população, que pode definir a capacidade dessas pessoas em suportarem os impactos de um desastre natural (baseado em Marcelino et al. (2006) e UN-ISDR (2004));
- Risco: probabilidade de ocorrência de um desastre natural em uma determinada área e suas consequências prejudiciais, sendo uma interação entre a suscetibilidade e a vulnerabilidade (adaptado de Muñoz (2005) e UN-ISDR (2004)).

### **2.3. Movimentos de massa**

Os movimentos de massa são importantes fenômenos que atuam no modelamento do relevo, sendo o evento relacionado aos desastres naturais que mais causa mortes e prejuízos financeiros em todo o mundo. Os tipos de movimentos de massa estão associados a diferentes características, como tipo de material, geologia do local, declividade, forma e orientação da vertente, área de contribuição e intensidade/distribuição da precipitação (GUIMARÃES et al., 2008).

Esses processos não são facilmente identificados na paisagem, o que dificulta sua classificação, devido à complexidade dos fenômenos, as atividades antrópicas no entorno das cicatrizes e a dinâmica do próprio movimento de massa, que, em alguns casos, por exemplo, pode começar como um escorregamento translacional e se transformar em uma corrida de massa, em virtude do excesso de água no material movimentado (SILVA, 2008). Para Gomes (2006), essa dificuldade em determinar corretamente o tipo de movimento de massa dificulta o entendimento dos mecanismos deflagradores desses processos.

A grande variedade de definições e termos utilizados na caracterização dos movimentos de massa reflete a complexidade envolvida nesse fenômeno. Neste trabalho, serão utilizadas as definições, descritas a seguir, que dividem

os movimentos de massa em escoamentos, escorregamentos, quedas e desmoronamentos (GUIDICINI; NIEBLE, 1976; FERNANDES; AMARAL, 1996; VIEIRA, 2007; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008; SILVA, 2008; SUERTEGARAY et al., 2003):

- a) Escoamentos – Corridas (*Debris-flow*) e Rastejos (*Creep*).

As corridas são movimentos rápidos que apresentam velocidade superior a 10km/h. O material movimentado se comporta como um fluido viscoso devido ao excesso de água que proporciona a perda de atrito interno. Conforme o tipo de material, pode ser classificado como corrida de lama, solo ou de blocos. As corridas ocorrem ao longo de canais de drenagem e têm sua velocidade gradativamente reduzida ao chegar a setores com declividades mais baixas, onde ocorre a deposição do material (Figura 2.5).

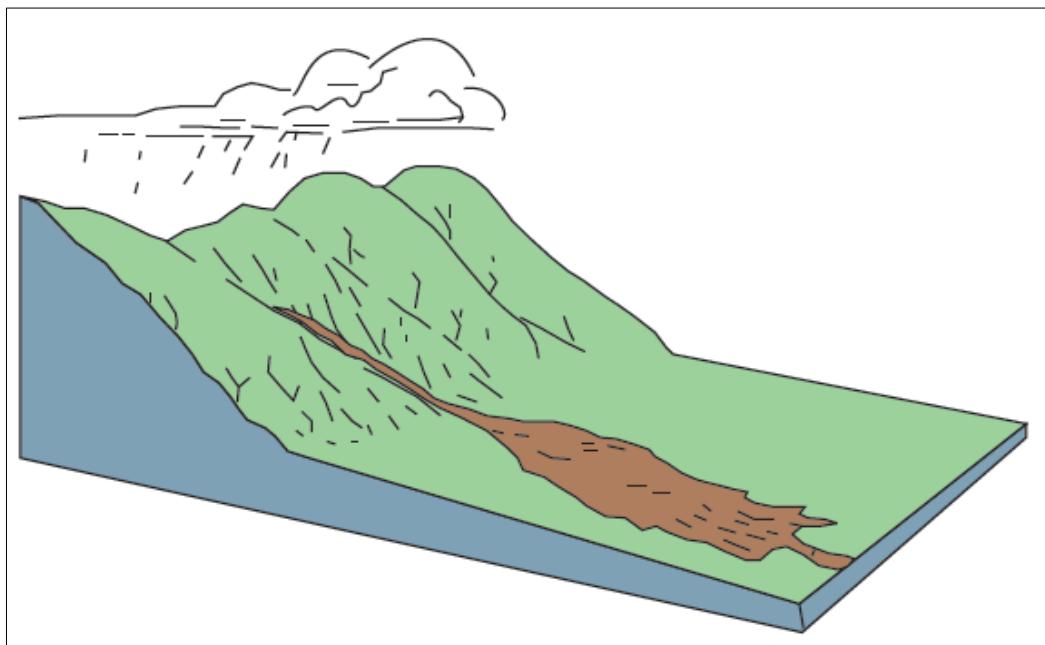


Figura 2.5 – Esquema de uma corrida.

Fonte: Highland; Bobrowsky (2008).

Os rastejos são os movimentos mais lentos e contínuos, que deslocam o material alguns centímetros por ano (a velocidade tende ao decréscimo com a profundidade), sendo uma deformação de caráter plástico, sem uma superfície

de ruptura definida. Esses movimentos podem ser causados por pisoteio de gado e crescimento de raízes, auxiliados pela presença de água no solo. Um indício do rastejo é a presença de árvores, postes e troncos de árvores inclinados (Figura 2.6).

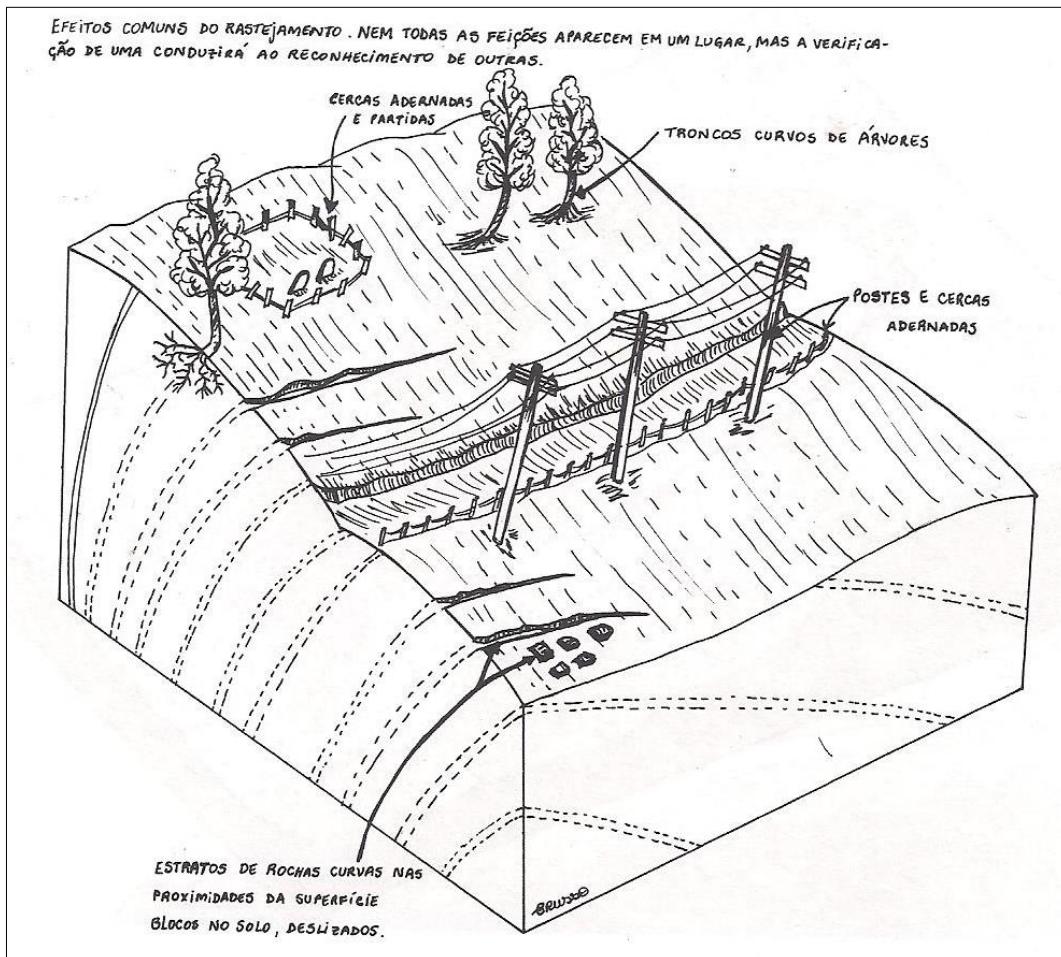


Figura 2.6 – Esquema de um rastejo

Fonte: Suertegaray et al. (2003).

- b) Escorregamentos (*Slides*) – Translacionais (*Shallow landslide*) ou Rotacionais (*Slumps*).

Os escorregamentos podem ser classificados quanto à forma do plano de ruptura (rotacionais e translacionais) e o tipo de material em movimento (solo, rocha, tálus, colúvio, detritos). São movimentos rápidos, que apresentam um plano de ruptura bem definido, que permite a distinção entre o material

deslizado e aquele que não foi movimentado. O processo de escorregamento pode envolver outros tipos de movimentos no momento de sua falha ou posteriormente, conforme o material deslocado se movimenta pela encosta.

Os escorregamentos rotacionais possuem a superfície de ruptura curva, côncava para cima, onde se dá um movimento rotacional de massa de solo, sendo seu principal fator condicionante a existência de solos espessos e homogêneos, muitas vezes vinculados a cortes na base do material. As fraturas em forma de cunha funcionam como um plano de cisalhamento, fazendo com que o material deslizado pela encosta não sofra alterações significativas em sua estrutura (Figura 2.7).

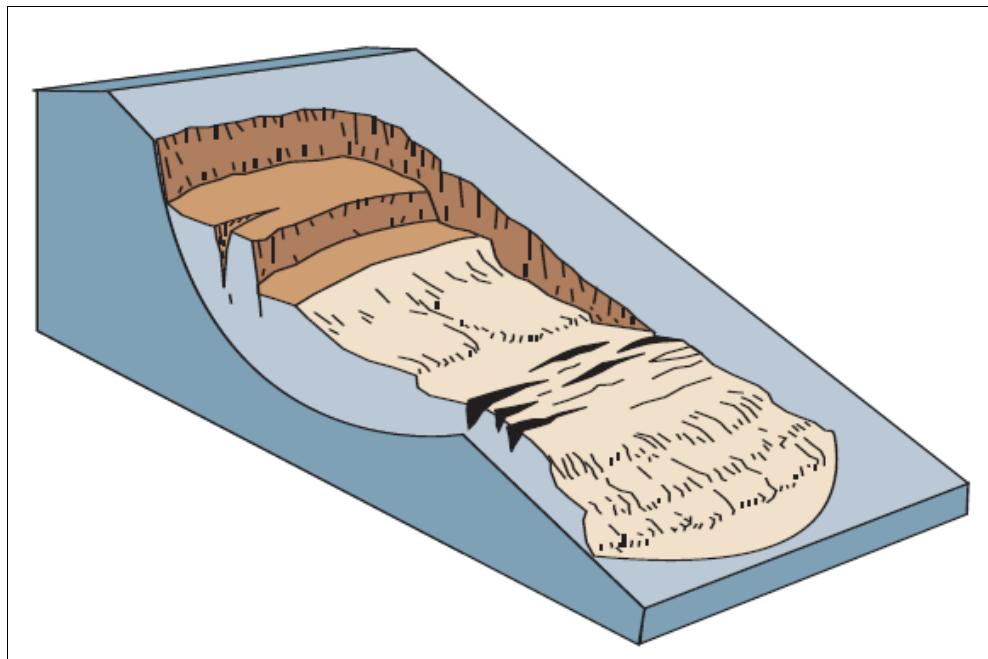


Figura 2.7 – Escorregamento rotacional.  
Fonte: Highland; Bobrowsky (2008).

Os escorregamentos translacionais são mais frequentes que os primeiros e ocorrem normalmente durante períodos de chuva intensa. Possuem a superfície de ruptura plana e normalmente acompanham as descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no material. Normalmente, são deflagrados em encostas íngremes, com presença de solos delgados, com o plano de ruptura variando entre 0,5 e 5 m de profundidade (Figura 2.8).

Segundo Passarela et al. (2008), os escorregamentos translacionais da Serra do Mar ocorrem principalmente em encostas retilíneas e com declividade acima de 30º. São escorregamentos rasos, com larguras medianas (10 a 20 m), podendo atingir grandes comprimentos (até 100 m).

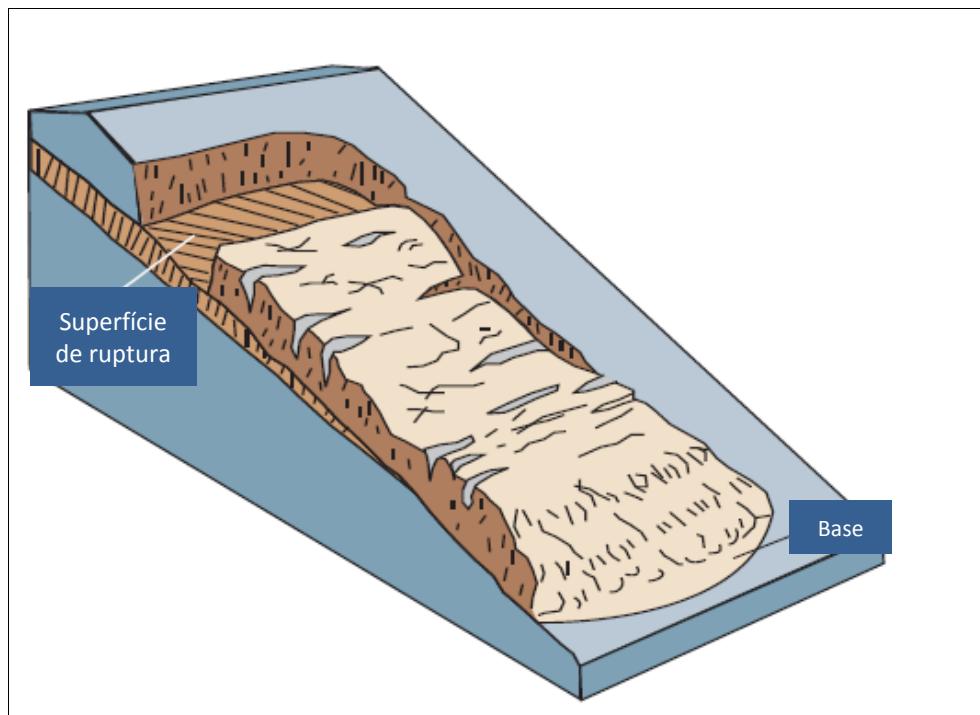


Figura 2.8 – Escorregamento translacional.  
Fonte: Adaptado de Highland; Bobrowsky (2008).

c) Queda de blocos (Rockfall)

As quedas de blocos são processos que ocorrem normalmente em encostas íngremes. O desprendimento dos blocos pode ocorrer por alívio de pressão, favorecido pela presença de descontinuidades que podem contribuir para a infiltração de água, o que ocasionará um aumento de pressão dentro do maciço, podendo causar a ruptura da encosta. O material de origem pode se quebrar com o impacto ou rolar pela encosta até um terreno plano (Figura 2.9).

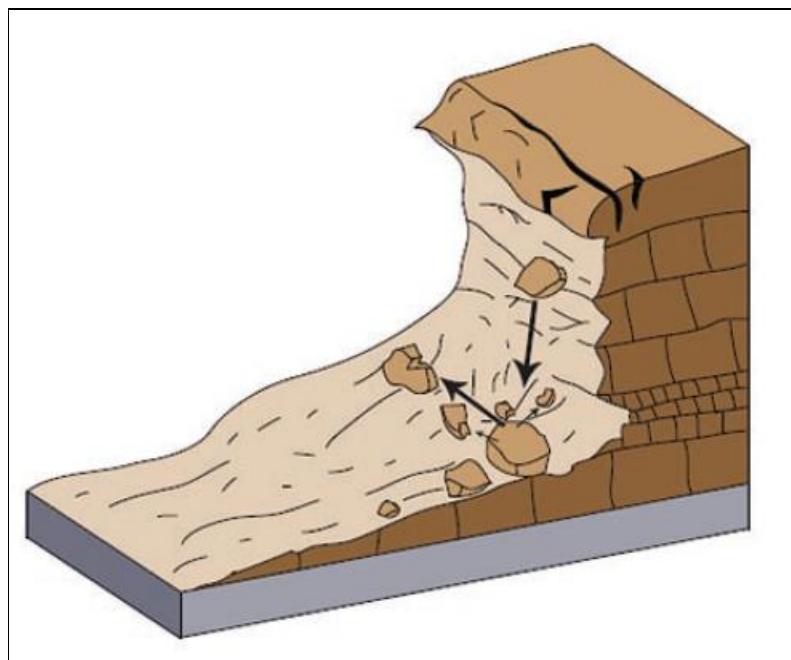


Figura 2.9 – Queda de blocos.

Fonte: Highland; Bobrowsky (2008).

- d) Desmoronamentos (*Topple*) – são processos que também ocorrem em encostas íngremes e em cortes de rodovias e ferrovias, podendo deslocar solo ou rochas, com uma velocidade que pode variar de extremamente rápida a extremamente lenta (Figura 2.10).

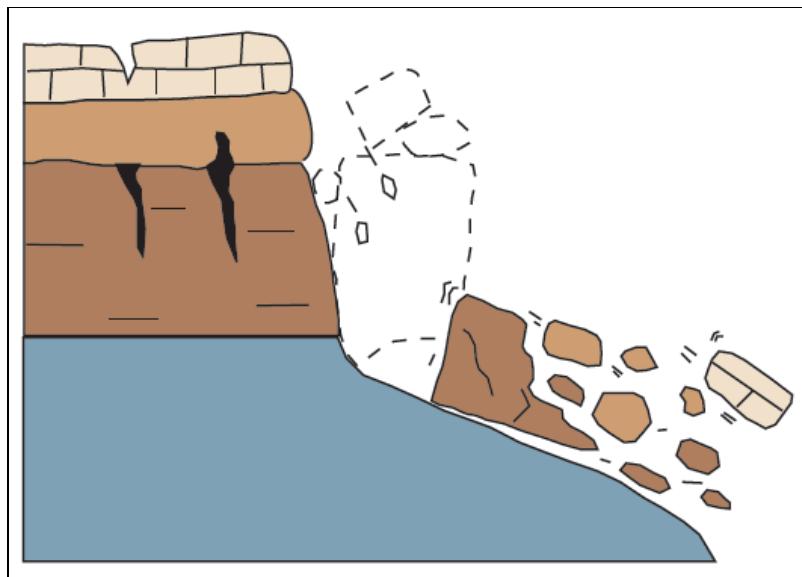


Figura 2.10 – Desmoronamentos.

Fonte: Highland; Bobrowsky (2008).

Esse processo ocorre devido a um vazio na parte inferior da vertente, o que acaba provocando seu solapamento.

### **2.3.1. Condicionantes dos movimentos de massa**

No Brasil, observam-se muitas áreas suscetíveis a movimentos de massa em virtude das condições climáticas, geológicas, geomorfológicas e pedológicas. Tais fatores, aliados à interferência antrópica, como o desmatamento e a ocupação de encostas, proporcionam inúmeros desastres, principalmente no período chuvoso, entre outubro e março (GOMES, 2006).

Entre os fatores condicionantes dos movimentos de massa, destacam-se a elevada pluviosidade, a declividade e, entre os fatores antrópicos, a retirada de vegetação, construção de edificações em encostas, corte de talude e aterros (UFSC, 2011). Apesar de não serem comuns no Brasil, os escorregamentos também podem ser desencadeados por erupções vulcânicas e terremotos. Para Fernandes e Amaral (1996), muitos dos escorregamentos nas grandes metrópoles brasileiras, como o Rio de Janeiro, ocorrem induzidos por cortes e terraços para construção de aterros, rodovias, ferrovias e residências.

Guidicini e Nieble (1976) dividiram os agentes condicionantes de movimentos de massa em dois grupos: agentes predisponentes e agentes efetivos. Os primeiros são aqueles que predispõem o movimento de massa, deixando a encosta mais suscetível a esses processos. Trata-se de um conjunto de características físicas, intrínsecas de uma determinada área, que depende apenas das condições naturais, sem qualquer interferência antrópica. Os autores destacam como fatores predisponentes as condições geológicas, morfológicas, climático-hidrológicas, além da gravidade, calor solar e vegetação.

Os agentes efetivos iniciam o movimento e são subdivididos em preparatórios e imediatos. Os agentes preparatórios são: pluviosidade, erosão pela água, vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química,

oscilação do nível de lagos, mares e do lençol freático, ação antrópica (desmatamento, ocupação de encostas, impermeabilização, cortes e aterros). Os agentes imediatos são: chuvas intensas, fusão do gelo e neves, erosão, terremotos, ondas, vento e ação do homem (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Com relação ao clima, a precipitação é a variável que mais tem influência nos processos morfogenéticos. A intensidade da chuva relaciona-se à energia cinética, que influencia a erosividade do solo. Em caso de chuvas prolongadas, ocorre a saturação do solo, que promove a redução da coesão entre as partículas e a resistência à erosão (SILVA, 2008).

Segundo Guidolini et al. (2012), a causa primária dos escorregamentos ocorridos nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro foi a anômala precipitação em um curto período de tempo. Na sub-bacia do Córrego d'Antas em Nova Friburgo, em um período de 24 horas, foi registrada uma precipitação que variou entre 180mm e 220mm (RAPHAEL, 2012).

A vegetação protege o solo, pois além de interceptar a água das chuvas (diminuindo o impacto direto e a erosão superficial), o sistema radicular das árvores mantém a agregação do solo, sendo importante para o processo de estabilidade de taludes e encostas naturais (SILVA, 2008).

Entretanto, os trabalhos desenvolvidos por Raphael (2012) e Pinho et al. (2012) apontam que mais de 50% dos movimentos de massa no Córrego d'Antas ocorreram em áreas com cobertura de florestas, o que, segundo o primeiro autor citado, indica que, nesse caso, os movimentos de massa estão associados ao processo de saturação do solo.

O papel da geologia como condicionante a movimentos de massa refere-se à litologia, estrutura (falhas e fraturas), propriedades internas (mineralogia), permeabilidade e ao manto de intemperismo (NERY, 2011). O tipo de rocha define a permeabilidade de uma área e sua resistência ao intemperismo.

Rochas muito fraturadas, por exemplo, podem gerar pontos de descontinuidade e menor resistência a processos erosivos (SILVA, 2008).

Entre os condicionantes geomorfológicos, destacam-se a forma das vertentes e as variáveis morfométricas dissecação, declividade, orientação de vertente e amplitude do relevo. Fernandes et al. (2001) ressaltam que a declividade vem sendo utilizada como único parâmetro topográfico em vários estudos de previsão e estabelecimento de áreas instáveis, o que gera resultados equivocados, uma vez que mesmo em encostas com declividades menos acentuadas frequentemente ocorrem escorregamentos.

Esses autores demonstraram no estudo realizado nas bacias dos rios Quitite e Papagaio o importante papel da morfologia do terreno como condicionante de movimentos de massa, além da percepção que a área de contribuição deve ser incorporada às metodologias de previsão de risco a escorregamentos, por se tratar de um importante parâmetro morfológico, destacando que a análise da topografia não deve se restringir à determinação da declividade do terreno.

A curvatura (vertical e horizontal) é uma variável importante nos processos de movimentos de massa. A curvatura vertical expressa a forma da vertente quando observada em perfil, podendo ser côncava, convexa ou retilínea. Essa variável, segundo Valeriano (2008), relaciona-se aos processos de migração e acúmulo de material através da superfície.

A curvatura horizontal expressa a forma da vertente quando observada em projeção horizontal, podendo ser divergente, convergente ou planar. Essa está relacionada à intensidade dos processos de migração e acúmulo no solo e desempenha um importante papel sobre o balanço hídrico (VALERIANO, 2008).

A combinação dessas classes de curvaturas indica a forma do terreno (Figura 2.11).

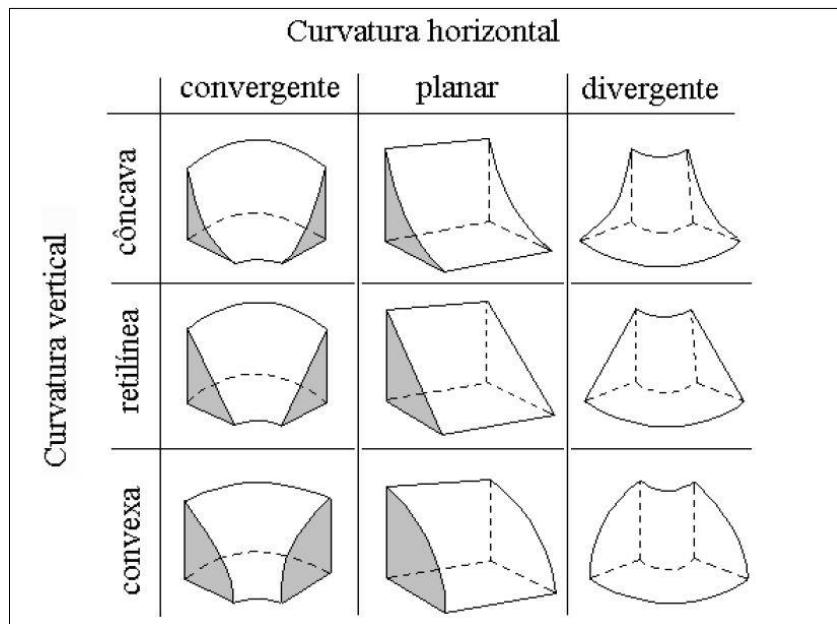


Figura 2.11 – Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.  
Fonte: Adaptada de Dikau (1990) citado por Valeriano (2008).

Observa-se que a combinação côncavo-convergente representa a máxima concentração e acúmulo do escoamento, enquanto que na forma convexa-divergente ocorre a máxima dispersão do escoamento.

Segundo Silva (2008), a intervenção humana em encostas normalmente contribui para acelerar os processos de denudação. Em casos de construções, como estradas e rodovias, pode haver desestabilização das vertentes devido ao aumento do peso na encosta, alteração da declividade do corte e preenchimento do talude, além da reorganização da rede de drenagem (SIDLE et al., 1985 apud VIEIRA, 2007). Para Vieira (2007), o papel das atividades humanas como agente deflagrador de escorregamentos é muito significativo, principalmente em períodos de precipitação mais intensa, seja devido às ocupações desordenadas nas encostas, cortes para construção de estradas e aterros, ou mesmo através dos desmatamentos.

### 2.3.2. Correlação entre precipitação e escorregamentos

Em estudos sobre movimentos de massa, muitos pesquisadores procuram estabelecer os limites críticos que deflagram os escorregamentos. Em áreas

pequenas, com taludes bem delimitados, é possível associar o aumento da velocidade de deslocamento da massa monitorada com o risco de ruptura, por meio da utilização de instrumentação geotécnica, que inclui piezômetros, medidores de nível de água, inclinômetros e indicadores de deslocamento superficial.

Já para áreas extensas, onde os movimentos de massa são rápidos, o melhor método para avaliar a probabilidade de ocorrência de um escorregamento é o monitoramento da intensidade e de acúmulo da precipitação (D'ORSI, 2011). Nesse sentido, pesquisadores de diversos países, como Hong Kong, Estados Unidos, Reino Unido, Japão, Suíça, Nova Zelândia e principalmente a Itália, vêm desenvolvendo trabalhos sobre a relação entre precipitação e escorregamentos.

Segundo d'Orsi (2011) e Bortoloti (2012), a pesquisa de Peter Lumb (1975) foi precursora nos estudos sobre correlação entre precipitação e escorregamentos. Lumb analisou os escorregamentos no período entre 1950 e 1973, conseguindo correlacionar os eventos com a precipitação acumulada em 15 dias, estabelecendo os limiares críticos a esses movimentos de massa.

Na Itália, pesquisadores do Grupo de Pesquisa Geomorfológica (*Geomorphology Research Group - GRG*) do Instituto de Pesquisa para Proteção Hidrogeológica (*Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica - IRPI*) criaram o site Limiares de Precipitação para Iniciar Escorregamentos (*Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides*), que reúne uma base de dados com pesquisas empíricas sobre limiares de precipitação para ocorrência de escorregamentos, desenvolvidas entre 1970 e 2006, em seis continentes. Entre os limiares disponíveis nesse banco de dados, encontram-se aqueles obtidos no Brasil pelos estudos de Guidicini e Iwasa (1977) e Tatizana et al. (1987) (BALDUCCI, 2013). Uma das dificuldades para as pesquisas nessa área é a divergência nos termos utilizados (como os limites pluviométricos mínimos e máximos, por exemplo) no estabelecimento das variáveis que tem influência

na ocorrência dos escorregamentos e os valores críticos de precipitação (BALDUCCI, 2013).

Segundo Guzzetti et al. (2007), os limites pluviométricos mínimos (*minimum threshold*) definem os menores níveis, abaixo dos quais, não ocorrem processos de escorregamentos. Já o limite pluviométrico máximo (*maximum threshold*) estabelece o nível acima do qual os movimentos de massa ocorrem.

Os limites de precipitação podem ser definidos por modelos baseados em processos físicos ou empíricos. Os limiares baseados em modelos de processos físicos incorporam modelos de infiltração às modelagens de estabilidade de talude, pois através da medição da pluviometria e do cálculo das taxas de infiltração, é possível determinar o momento da ruptura (D'ORSI, 2011). Guzzetti et al (2007) afirmam que esses modelos podem determinar a quantidade de precipitação necessária para deflagrar um escorregamento, bem como sua localização. Entretanto, além de serem modelos que necessitam de uma grande quantidade de dados detalhados, como hidrologia, litologia, geomorfologia, características pedológicas, localização e o momento dos escorregamentos anteriores, produzem bons resultados apenas na previsão de escorregamentos rasos, não sendo muito eficientes em escorregamentos profundos (GUZZETTI et al., 2007).

Os limites empíricos de precipitação podem ser estabelecidos por meio da combinação de medidas de precipitação ocorridas em um determinado evento ou considerando condições antecedentes do local (BALDUCCI, 2013). Para d'Orsi (2011) não há um intervalo de tempo único capaz de caracterizar as condições pluviométricas que poderiam deflagrar movimentos de massa para diferentes regiões. Algumas pesquisas tentaram estabelecer índices pluviométricos globais mínimos, independente das características físicas de cada região, mas não obtiveram bons resultados, gerando um grande número de falso-positivos (GUZZETTI et al., 2007).

Dai e Lee (2001) analisaram a relação entre precipitação e escorregamentos em Hong Kong em dois períodos (de 1984 a 1997 e de 1992 a 1997) e concluíram que para a previsão desses fenômenos é melhor utilizar dados de precipitação de 12 horas, sendo que para prever os escorregamentos maiores, dados de 24 horas produzem melhores resultados. Para os autores, chuvas de mesmo padrão e intensidade podemoccasionar ou não escorregamentos, dependendo das características da área, como tipo de cobertura e uso da terra e a presença de cortes e aterros nas encostas. Devido à falta de dados mais detalhados, Dai e Lee (2001) não estabeleceram limiares de precipitação para deflagração de escorregamentos.

No Brasil, pesquisadores e instituições buscam estabelecer esses limiares analisando as características locais de algumas regiões. Segundo a pesquisa de Tavares et al. (2004), os registros de ocorrência de movimentos de massa demonstram que em 69% dos casos foi necessário um total acumulado de 120mm de chuva em 72 horas, e 21% dos eventos ocorreram abaixo dos 80mm acumulados no mesmo período de tempo. Os autores destacam ainda que uma pesquisa realizada nas cidades de Ubatuba e São Sebastião demonstrou que, em caso de evento pluvial intenso em um período de 24 horas (acima de 50mm), já é possível a ocorrência de escorregamentos. Segundo Marcelino (2004), tanto precipitações anômalas quanto as contínuas podem contribuir para deflagrar os escorregamentos, pois ambas podem promover o encharcamento do solo.

O Departamento de Recursos Minerais do estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ) trabalha com limiares de precipitação para o estado do Rio de Janeiro baseado em dados de chuva e previsão do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) e do SIMERJ (Sistema de Meteorologia do estado do Rio de Janeiro), respectivamente. Esses valores fazem parte do Plano de Contingência, estabelecido em dezembro de 2011. Segundo esse plano, a equipe técnica do DRM-RJ é mobilizada quando:

- Os valores de precipitação acumulados em 72 horas, somados à chuva prevista para as próximas 24 horas, chegarem a 115 mm;
- os valores de precipitação acumulados em um mês, somados à chuva prevista para as próximas 24 horas chegarem a 270 mm;

Quando as chuvas ultrapassam 70 mm em 23 horas e a previsão for superior a 30 mm por hora, o Centro Estadual de Gestão de Desastres (CESTAD) é informado sobre o posicionamento do DRM-RJ com relação ao acionamento do sistema de alarmes nas cidades monitoradas (XAVIER; SILVA, 2004).

Outro sistema em funcionamento no Brasil é o Alerta Rio, da prefeitura do Rio de Janeiro. Criado em 1996, tem por objetivo emitir boletins de alerta à população em casos de previsão de chuvas intensas que possam causar inundações e movimentos de massa. Trata-se de uma rede com 33 estações pluviométricas, distribuídas pelo município, que enviam dados a cada 15 minutos (ALERTA RIO, 2013). Nesse sistema, foi estabelecida a seguinte classificação para a intensidade de chuvas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Classificação da intensidade de precipitação.

<b>Classificação</b>	<b>Intensidade da precipitação (em mm/h)</b>
<b>Leve</b>	1,1 a 5,0
<b>Moderada</b>	5,1 a 25,0
<b>Forte</b>	25,1 a 50,0
<b>Muito forte</b>	> 50,0

Fonte: Alerta Rio (2013).

No estado de São Paulo, a Defesa Civil possui um serviço de meteorologia que utiliza dados do modelo BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*), dados de precipitação por satélite e radar que indicam a localização e intensidade da chuva, com uma resolução espacial e temporal que permite

maior e melhor detalhamento no monitoramento diário (XAVIER; SILVA, 2004). No verão, a Coordenadoria Estadual de Defesa Civil (CEDEC) emite boletins especiais para regiões que apresentam riscos de enchentes e movimentos de massa. A CEDEC determinou limiares-padrão de duração e intensidade de chuvas para um período de 24 horas que determina as ações a serem tomadas pelos municípios (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Classificação da precipitação acumulada em 24 horas estabelecida pela CEDEC.

Intensidade	Acumulado em 24 horas (em mm)
<b>Leve a fraca</b>	0,1 a 9,0
<b>Fraca a moderada</b>	9,1 a 17,0
<b>Moderada</b>	17,1 a 26,0
<b>Moderada a forte</b>	26,1 a 32,0
<b>Forte</b>	> 32,0

Fonte: Xavier e Silva (2004).

#### 2.4. Sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas na análise e avaliação de desastres naturais

A partir do ano 2000, houve uma mudança na forma de mapeamento, avaliação e alerta na ocorrência de desastres naturais. Isso, devido ao uso de imagens orbitais com resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal mais refinadas, adquiridas por novos sensores como aqueles a bordo dos satélites QuickBird-2, IKONOS-2, GeoEye-1 e WorldView-2. Com a utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), foi possível integrar dados e quantificar fenômenos associados a terremotos, alagamentos e movimentos de massa (GILLESPIE et al., 2007).

Os dados provenientes de imagens de satélite e fotografias aéreas são importantes para o mapeamento e monitoramento dos movimentos de massa,

pois possibilitam a extração de cicatrizes de escorregamentos, trajetória, leques de deposição e área de abrangência do evento (GUIMARÃES et al., 2008). Mesmo que um dos principais fatores condicionantes de escorregamentos seja a ocorrência de chuvas de forte intensidade ou por períodos prolongados, o aumento na ocupação de áreas impróprias pela atividade antrópica contribui com a ocorrência deste tipo de evento (GUERRA et al., 2007). Dessa forma, o uso de imagens no mapeamento da cobertura e uso da terra também é importante nos estudos sobre escorregamentos.

Para Van Westen et al. (2006), atualmente, quase a totalidade dos estudos sobre movimentos de massa, mapeamentos de suscetibilidade e vulnerabilidade utiliza sensoriamento remoto. Para o autor, outro fator que possibilitou o aumento das pesquisas sobre áreas suscetíveis a esses processos foi o desenvolvimento dos SIG e dos métodos de modelagem espacial.

Sausen et al. (2011) utilizaram dados de sensoriamento remoto e SIG para estudar áreas afetadas por inundações no Rio Grande do Sul, entre setembro de 2009 e janeiro de 2010. Com o uso de imagens MODIS, dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e o software SPRING, os autores mapearam os locais afetados pela inundação, calcularam sua área e determinaram que a cultura de arroz foi a mais afetada pelas enchentes.

Soeters e Van Westen (1996) trabalharam com detecção automática de escorregamentos, baseado em características espectrais das cicatrizes e da vegetação, tipos de encostas e das superfícies de drenagem.

Restrepo e Alvarez (2006) utilizaram imagens multiespectrais para identificar visualmente os escorregamentos localizados em áreas sem vegetação, após um evento de precipitação intensa. Destaca-se que, mesmo com os bons resultados obtidos nas pesquisas, a identificação de cicatrizes com o uso de sensoriamento remoto óptico, principalmente em áreas tropicais, pode ser dificultada pela presença de nuvens (VAN WESTEN et al., 2008) – situação que ocorreu na ocasião dos escorregamentos de 2011 em Nova Friburgo,

quando as imagens só foram tomadas oito dias após os eventos. Segundo Van Westen et al. (2008) uma base de dados que contenha informações sobre cicatrizes de eventos anteriores é importante para obter mapas confiáveis de probabilidade espacial e temporal de ocorrência de escorregamentos.

Os dados de sensoriamento remoto são tão importantes para a avaliação e gerenciamento de desastres naturais, que no ano 2000 foi criado um consórcio entre instituições e agências espaciais de diferentes países, *The International Charter Space and Major Disasters*, que fornece dados de satélite para o gerenciamento de desastres naturais no mundo (INPE, 2011). A ideia desse consórcio é priorizar a aquisição de imagens em áreas atingidas por desastres naturais, possibilitando a análise de como a paisagem e infraestrutura locais foram afetadas, principalmente para avaliar áreas de difícil acesso, contribuindo assim com o trabalho de ajuda às comunidades atingidas (DISASTERS CHARTER, 2013).

#### **2.4.1. Inferência espacial**

De acordo com Camargo et al. (2007), os SIG têm sido utilizados no mapeamento e modelagem de áreas suscetíveis a movimentos de massa por sua capacidade de manipulação de uma série de dados geográficos, que fornecem importantes informações que auxiliam na tomada de decisão, como, por exemplo, na questão da ocupação urbana ou na construção de obras de engenharia. Os modelos de processos ambientais, aplicáveis para esse tipo de estudo, são uma combinação de um conjunto de dados que, por meio de uma função  $f$ , produzem um novo dado de saída (CÂMARA, et al., 2001) (Equação 2.1).

$$\text{Saída} = f(\text{dados de entrada}) \quad (2.1)$$

Os relacionamentos expressados pela função  $f$  baseiam-se em modelos teóricos ou empíricos. Nos modelos empíricos (como os modelos estatísticos

ou heurísticos, por exemplo), a relação espacial existente entre as variáveis de um estudo é determinada por critérios estatísticos por meio de um conjunto de classes, cujos limiares são estabelecidos por especialistas ou a partir de amostras (CÂMARA et al., 2001).

Dessa forma, para trabalhar com conceitos inexatos, Zadeh introduziu em 1965 os conjuntos *fuzzy*. Essa concepção surgiu da preocupação do autor com a considerável diminuição da qualidade da informação obtida por modelos matemáticos tradicionais, conforme aumentava a complexidade do sistema (MOREIRA, 2001).

Os conjuntos *fuzzy* podem ser entendidos como uma forma de caracterização de classes, que não têm ou não podem definir limites rígidos (bordas) (MOREIRA, 2001). Esses conjuntos são na prática, funções que indicam o grau de relacionamento de um valor de entrada (atributo) para com um conjunto *fuzzy* (MOREIRA, 2001; CÂMARA el al., 2001; MUÑOZ, 2005).

Matematicamente, tem-se um espaço de objetos  $Z$  e, sendo o conjunto *fuzzy*  $A$  em  $Z$  um conjunto definido pelo par ordenado (Equação 2.2):

$$A = (z, MF_A(z)), \text{ para todo } z \in Z \quad (2.2)$$

Pode-se dizer que a função de pertinência  $MF_A(z)$  avalia o quanto de  $z$  pode pertencer ao conjunto  $A$ . Normalmente,  $MF_A(z)$  é um número que varia de 0 a 1, sendo que 0 representa o membro que não pertence ao conjunto, e 1, o membro que se encaixa completamente a esse conjunto (MOREIRA, 2001; BURROUGH, McDONNELL, 1998).

Os operadores *fuzzy* determinam a função de pertinência *fuzzy* sem apresentar ambiguidade, sendo os principais: *fuzzy AND* (1); *fuzzy OR* (2); soma algébrica (3); produto algébrico (4) e operador gama (5) (BONHAM-CARTER, 1994; MOREIRA, 2001; MUÑOZ, 2005; CÂMARA et al., 2001; BISPO et al., 2011).

- 1) *Fuzzy AND* (interseção) – É expresso por:  $\mu = \text{Min}(\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots, \mu_i)$ , sendo  $\mu_i$  o valor de pertinência de um mapa I, para uma dada localização. O resultado é um mapa de saída controlado pelo menor valor de pertinência fuzzy que ocorre em cada lugar. É um operador indicado para situações muito restritivas, onde são necessárias duas ou mais evidências para satisfazer uma hipótese.
- 2) *Fuzzy OR* (união) – É expresso por:  $\mu = \text{Max}(\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots, \mu_i)$ , sendo  $\mu_i$  o valor de pertinência de um mapa I, para uma dada localização. O resultado é um mapa de saída controlado pelo maior valor de pertinência fuzzy que ocorre em cada lugar. É indicado quando basta apenas uma evidência para ocorrência de determinada hipótese, sendo o mais “otimista” entre os operadores.
- 3) Soma algébrica – O efeito sobre os resultados é o de incremento, aumentando o valor de pertinência limitado a 1, sendo sempre maior ou igual ao maior valor de pertinência fuzzy. É expresso por (Equação 2.3):

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n \mu_i (1 - \mu_i) \quad (2.3)$$

Sendo  $\mu_i$  a função de pertinência fuzzy para o  $i$ -ésimo mapa que deverão ser combinados.

- 4) Produto algébrico – Todos os valores de pertinência têm efeito sobre os resultados. É expresso por (Equação 2.4):

$$\mu = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (2.4)$$

Sendo  $\mu_i$  a função de pertinência *fuzzy* para o *i*-ésimo mapa. Tais valores tendem a ser muito pequenos, sendo sempre menor ou aproximadamente igual ao menor fator do conjunto de dados.

- 5) Operador Gama – O operador gama é definido por um produto entre a soma algébrica *fuzzy* e o produto algébrico *fuzzy*, sendo expresso pela função (Equação 2.5) (CÂMARA et al., 2001):

$$\mu = (\text{soma algébrica fuzzy})^\gamma \times (\text{produto algébrico fuzzy})^{1-\gamma}, \quad (2.5)$$

ou seja (Equação 2.6):

$$\mu = \left( 1 - \prod_{i=1}^n \mu_i (1 - \mu_i) \right)^\gamma * \left( \prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma} \quad (2.6)$$

em que  $\mu$  é o valor da operação de *fuzzy gama*,  $\gamma$  é o índice gama (que define a importância de cada termo),  $\mu_i$  representa o valor de cada variável em um plano de informação “*i*”. Quando  $\gamma = 0$  a combinação *fuzzy* é igual ao produto algébrico e, para  $\gamma = 1$  é igual a soma algébrica. Quando os valores encontram-se no intervalo  $0 < \gamma < 0,35$ , estes apresentam um caráter “diminutivo” do fenômeno avaliado, sendo o valor de saída sempre menor ou igual ao menor membro *fuzzy* de entrada. Já no intervalo  $0,80 < \gamma < 1,0$ , os valores têm um caráter “aumentativo”, sendo o valor de saída sempre maior ou igual ao menor membro *fuzzy* de entrada (Figura 2.12).

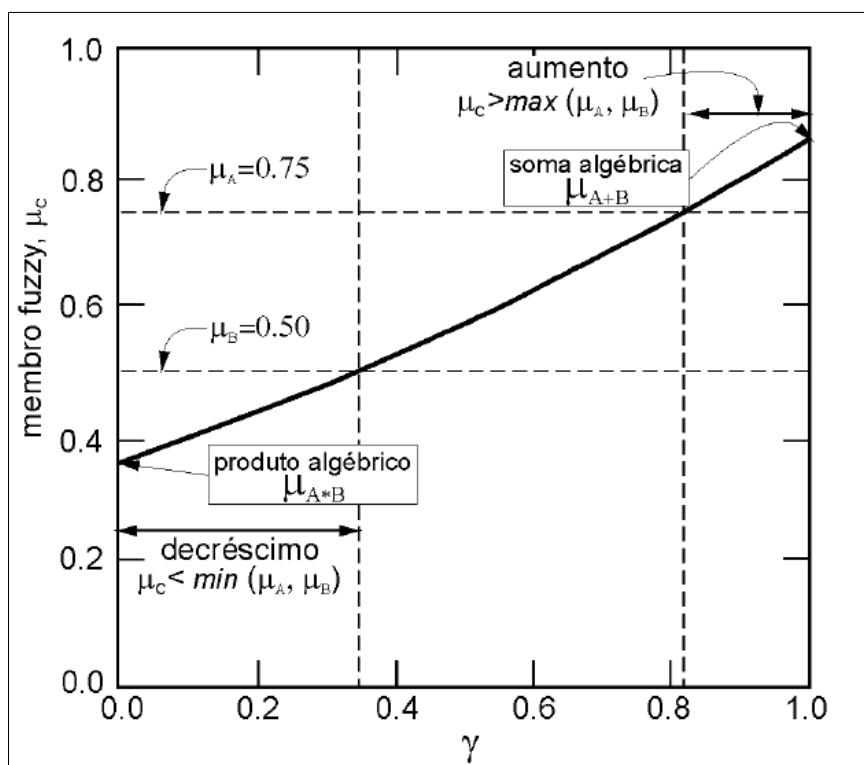


Figura 2.12 – Distribuição da função Fuzzy Gama.

Fonte: Moreira (2001).

Segundo Pradhan (2010), a ideia da lógica *fuzzy* é considerar os objetos espaciais em um mapa como membros de um conjunto. Dessa forma, quando um objeto faz parte de um conjunto, seu valor é 1, e quando não faz parte, seu valor é 0, sendo que cada membro pode assumir qualquer valor entre 0 e 1, dependendo do seu grau de pertinência.

### **3 ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1. Localização e caracterização**

Nova Friburgo localiza-se na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro a uma altitude de 846 m, entre as coordenadas 22º16'S e 42º31'O (Figura 3.1). Segundo o IBGE (2010), possui 182.082 habitantes, distribuídos em uma área de 933,4 km<sup>2</sup>. O município é formado por oito distritos: Sede (Nova Friburgo), Riograndina, Campo do Coelho, Amparo, Lumiar, Conselheiro Paulino, São Pedro da Serra e Mury (Figura 3.2).

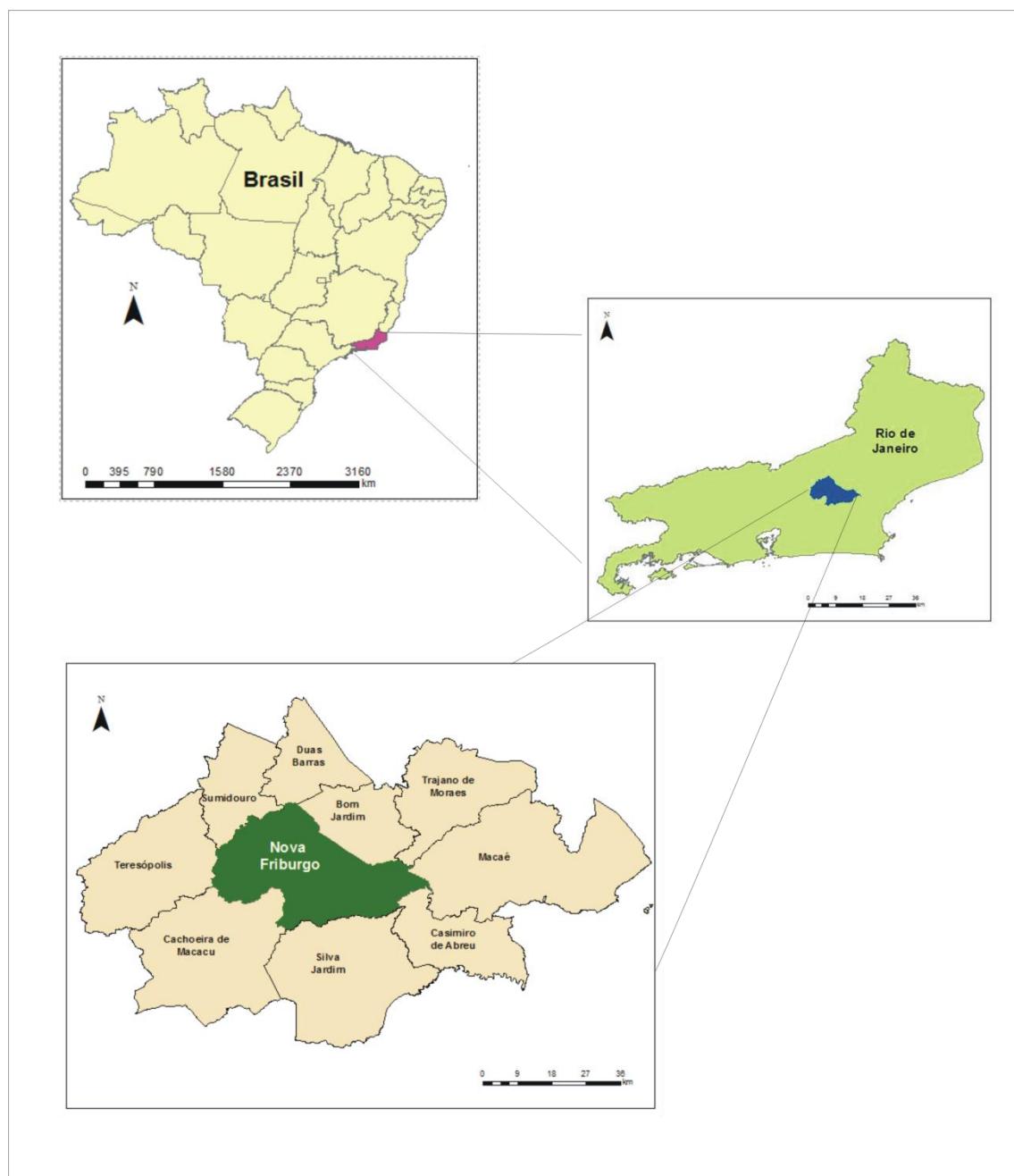


Figura 3.1 – Localização do município de Nova Friburgo

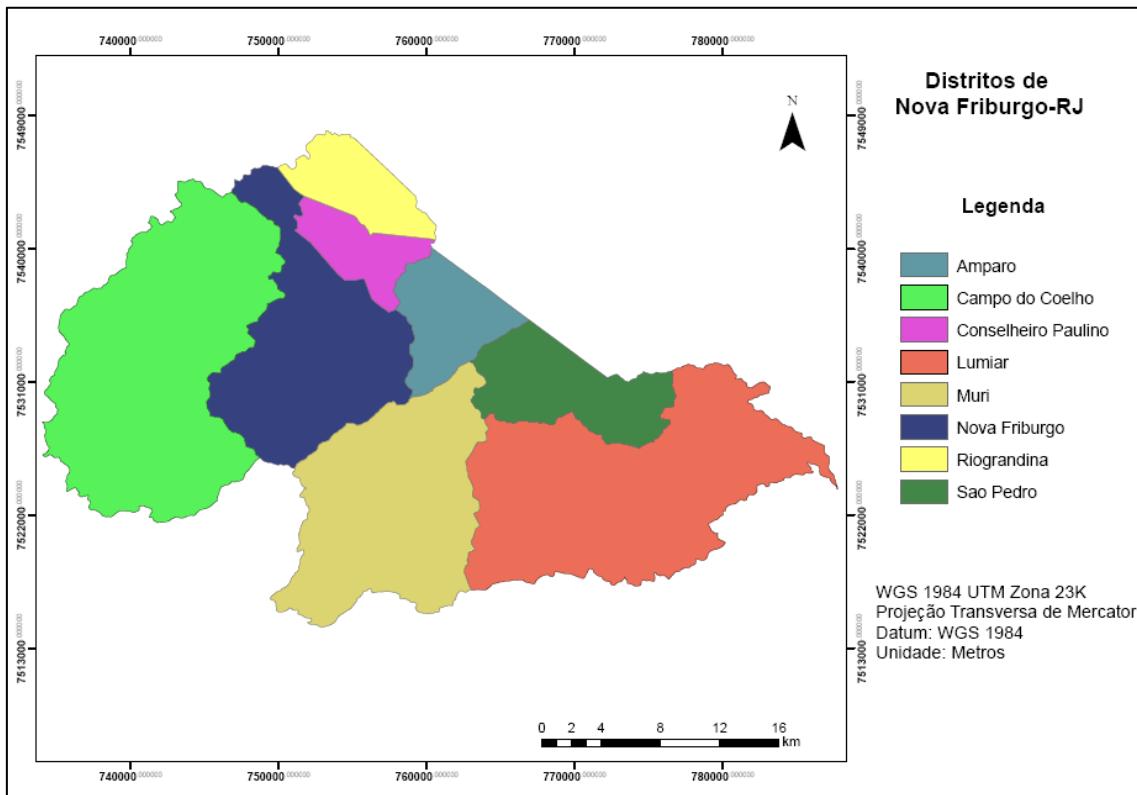


Figura 3.2 – Distritos de Nova Friburgo.

Sua economia é baseada no turismo e serviços e, seguindo a tendência das cidades brasileiras, o município viu sua população crescer a altas taxas durante as décadas de 1970 e 1980. Isso gerou problemas decorrentes das deficiências na infraestrutura, como o crescimento desordenado de diversas áreas, loteamentos e ocupações irregulares do solo (BAGGIO; HORN, 2011).

### 3.2. Clima e Hidrografia

A cidade caracteriza-se pelo clima mesotérmico brando superúmido, segundo classificação proposta por Nimer (1979), com temperaturas amenas durante todo o ano. A temperatura média anual oscila entre 18°C e 20°C, principalmente devido à orografia, e a precipitação média anual varia entre 1.200 e 1.500 mm, estando concentrada entre os meses de outubro a março, com a maior intensidade ocorrendo no mês de dezembro. A cidade é banhada pelos rios Grande, Bengalas, Macaé, dos Ribeirões de São José e do Capitão.

### **3.3. Aspectos Geológicos e Geomorfológicos**

Nova Friburgo faz parte da Serra Fluminense, que cobre a parte central do estado, com uma área de 1.552 km<sup>2</sup> e uma população de 641.000 pessoas. Segundo o Mapeamento Geomorfológico do estado do Rio de Janeiro, o município localiza-se no sistema de relevos de degradação em áreas montanhosas, no reverso da Serra do Mar, com terrenos muito acidentados. As vertentes são predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas, com topes de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. As cidades do reverso da Região Serrana, como Nova Friburgo, Petrópolis e Teresópolis, passaram a ocupar os alvéolos intramontanos ainda no século XIX, sendo áreas de solos pouco espessos e lixiviados (DANTAS, 2001).

A área possui alta densidade de drenagem, com padrão variável (com maiores ocorrências dos tipos dendrítico a treliça ou retangular). Ali predominam amplitudes topográficas superiores a 400 metros, solos rasos (litólicos) com afloramento rochoso e presença de colúvios e depósito de tálus. A vegetação original era composta por formações rupestres, floresta perenifólia e campos de altitude (nos altos cumes da Região Serrana, onde ainda estão presentes), e as atividades agrícolas ocupam as planícies pluviais e as vertentes com declividades menos acentuadas (DANTAS, 2001).

### **3.4. Megadesastre da Região Serrana do estado do Rio de Janeiro**

Nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011, uma precipitação anômala desencadeou uma série de movimentos de massa na Região Serrana do Rio de Janeiro. Esses movimentos de massa, denominados pelo DRM e pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) como “Megadesastre ‘11 da Região Serrana do estado do Rio de Janeiro”, promoveram significativas alterações na geomorfologia da paisagem em Nova Friburgo, como, por exemplo, na região do Córrego d’Antas, que teve um alargamento de sua calha (de 3,50 metros para 8,0 metros) e sofreu um forte assoreamento (DIAS; LIMA, 2012).

Em um período de 24 horas, na sub-bacia do Córrego d'Antas foi registrada uma precipitação que variou entre 180 mm e 220 mm (RAPHAEL, 2012). O grande volume de precipitação concentrado em poucas horas desencadeou movimentos de massa em diferentes tipos de cobertura e uso da terra. A chuva teve início por volta das 3h do dia 11 (Figura 3.3), tendo seu pico às 3 h do dia 12 (segundo dados de pluviômetro do SIMERJ).

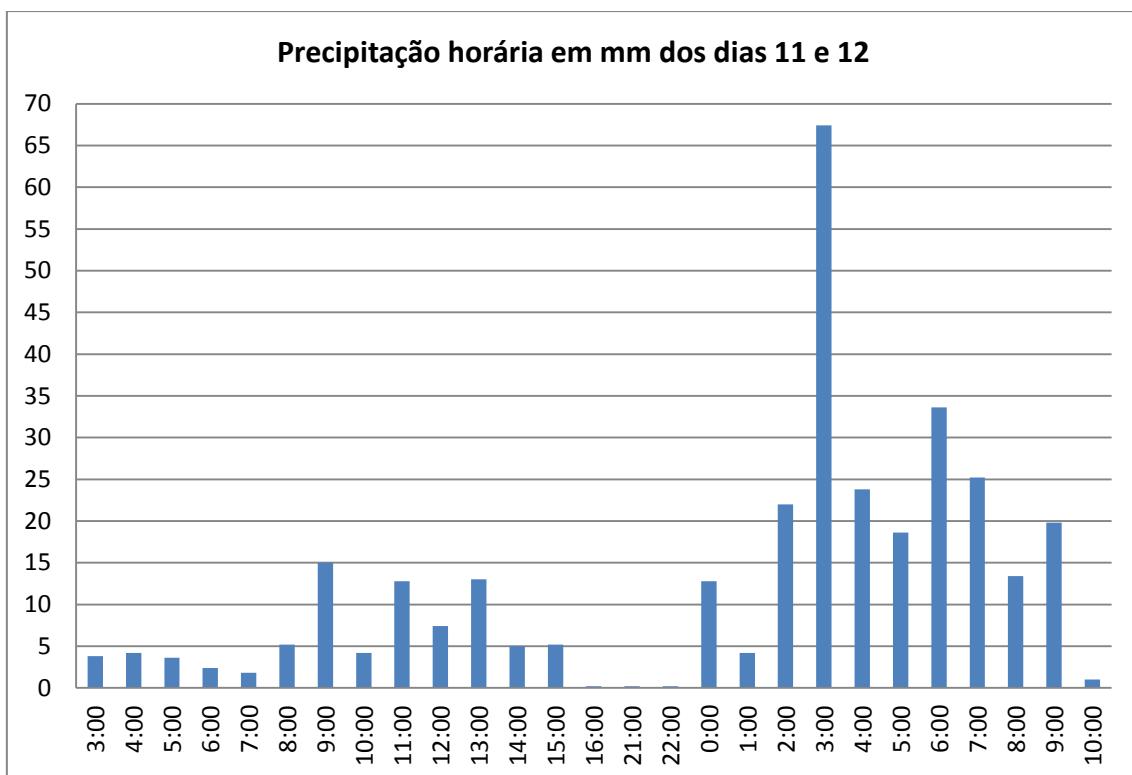


Figura 3.3 – Precipitação horária em mm dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011.

Segundo Dias e Lima (2012), não é possível estabelecer parâmetros da causa dos movimentos de massa em virtude das singularidades paisagísticas do local. Para os autores, os solos rasos em encostas longas e íngremes de fato tornam o local mais sujeito a movimentos de massa, mas que, no caso dos escorregamentos de 2011, a chuva foi um fator determinante. Segundo Pinho et al. (2012), as características fisiográficas da região, como encostas íngremes, vales estreitos, rochas altamente intemperizadas, litologia com

fraturas e o abrupto contato entre a rocha e o solo, contribuíram para a deflagração desses movimentos.

Dias e Lima (2012) apontam que as áreas com maior quantidade de escorregamentos encontram-se na zona rural do município, mas que foi na área urbana que o número de vítimas fatais foi significativamente maior, em virtude, principalmente, da densidade de ocupação do solo. Eles destacam que nas últimas informações oficiais, foram identificados 426 mortos no município, mas que há divergência entre os dados apresentados.

Coelho Netto et al. (2011) estabeleceram um mapa de precipitação do dia 12 de janeiro de 2011 e detectaram que, conforme a intensidade de chuva diminuía na Região Serrana, o tamanho das cicatrizes dos escorregamentos era menor, sendo que 40% das cicatrizes mapeadas pelos autores encontravam-se em áreas com precipitação maior que 200 mm, e apenas 2,7% em áreas com precipitação entre 140 e 160 mm. Os valores observados em 10 horas, entre os dias 11 e 12, aproximam-se da média esperada para todo o mês de janeiro.

Segundo Amaral et al. (2011), nessa ocasião ocorreram na cidade de Nova Friburgo aproximadamente 800 movimentos de massa, deixando 970 vítimas fatais, inúmeros feridos, desabrigados e desaparecidos. Uma força-tarefa composta por profissionais do CPRM e do DRM-RJ atuou na região durante dois meses, delimitando os locais atingidos e áreas de risco remanescente.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Material e Softwares**

#### **4.1.1. Material**

Na realização desta pesquisa, o seguinte material foi utilizado:

- a) mapeamento geológico de Nova Friburgo, na escala 1:100.000 (TUPINAMBÁ, 2012)
- b) mapeamento geomorfológico, na escala 1:500.000 (DANTAS, 2001);
- c) mapeamento pedológico, na escala 1:250.000 (CARVALHO FILHO et al., 2003)
- d) mapeamento de risco a escorregamentos, elaborado pelo Núcleo de Análise a Escorregamentos (NADE) do DRM-RJ, na escala 1:10.000;
- e) imagens e relatórios do “Megadesastre” da Região Serrana do Rio de Janeiro do DRM-RJ;
- f) classificação da cobertura e uso da terra elaborado por Francisco e Almeida (2012), com base em imagens ALOS e classificação baseada em objeto, na escala 1:400.000;
- g) mapa de cobertura e uso da terra do INEA (escala 1:500.000);
- h) dados demográficos (IBGE);
- i) dados geomorfométricos do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), com 30 m de resolução espacial contendo: altimetria, curvatura vertical, curvatura horizontal, declividade, orientação de vertentes e forma do terreno;

- j) dados de precipitação do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e do SIMERJ (precipitação em pluviômetro);
- k) imagens de satélite de alta resolução ALOS de 2009: sensor pancromático PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping*) com 2,5 m de resolução espacial, e sensor AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2*), com 10 m de resolução espacial, três bandas do visível e uma do infravermelho próximo;
- l) imagens de satélite de alta resolução GeoEye (sensor pancromático com 41 cm, e sensor multiespectral com 1,65 m de resolução espacial) de 19 de janeiro de 2011, disponíveis no Google Earth.

#### **4.1.2. Softwares**

- a) SPRING 5.1.8, utilizado para organização do banco de dados, tratamento das informações, criação do mapa de suscetibilidade e análise das variáveis nas cicatrizes dos escorregamentos;
- b) ENVI 4.8, para fusão das imagens;
- c) ArcGIS 10.0, usado para edição vetorial, mapeamento das cicatrizes, edição do mapa de cobertura e uso da terra, edição e finalização dos mapas;
- d) TerraView 4.1.0 e TerraMA<sup>2</sup> 3.0, para configurar o banco de dados e gerar os cenários de alerta a escorregamentos.

#### **4.2. Procedimentos metodológicos**

##### **4.2.1. Fusão das imagens ALOS**

Uma técnica muito utilizada em pesquisas com sensoriamento remoto é a fusão de imagens, a qual aumenta a resolução espacial de imagens através de

um algoritmo que possibilita a combinação de uma imagem multiespectral com uma pancromática, apresentando uma imagem final com resolução espacial mais detalhada (SCHOWENGERDT, 2007).

Nesse trabalho, foram utilizadas as imagens dos sensores PRISM e AVNIR 2, do satélite ALOS. O PRISM é um sensor pancromático ( $0,52\text{ }\mu\text{m}$  a  $0,77\text{ }\mu\text{m}$ ) que tem capacidade de adquirir imagens tridimensionais da superfície terreste. Possui resolução espacial de 2,5 m e três sistemas ópticos independentes para imageamento, com visadas ao nadir, dianteira (*forward*) e traseira (*backward*). No nadir, a faixa imageada é de 70 km, enquanto que as outras duas visadas recobrem uma faixa de 35 km.

O sensor AVNIR-2 opera na região do visível ( $0,42\text{ }\mu\text{m}$  a  $0,69\text{ }\mu\text{m}$ ) e infravermelho ( $0,76\text{ }\mu\text{m}$  a  $0,89\text{ }\mu\text{m}$ ), sendo muito utilizado para estudos de monitoramento de cobertura e uso da terra. Esse sensor é o sucessor do AVNIR, que estava a bordo do ADEOS (*Advanced Earth Observing Satellite*), lançado em 1996. Tem resolução espacial de 10 m e a faixa imageada é de 70 km no nadir.

Entre os métodos de fusão, podem-se citar Gram-Schmidt, IHS e Componentes Principais (CHAVEZ et al., 1991). Para realizar a fusão das imagens AVNIR-2 e PRISM, os métodos Gram-Schmidt e Componentes Principais foram testados, e os procedimentos foram realizados no ENVI 4.7 (ITT, 2009).

Visualmente, a fusão Gram-Schmidt apresentou melhores resultados e, por isso, esse método foi utilizado para realizar a fusão das imagens ALOS. A fusão Gram-Schmidt consiste numa simulação da banda pancromática, de alta resolução, a partir de bandas multiespectrais, que possuem uma resolução mais baixa. Uma transformação Gram-Schmidt é aplicada sobre as bandas multiespectrais e a banda simulada, onde a pancromática é empregada como primeira banda. Ao final do procedimento, aplica-se uma transformação inversa, que substitui a primeira banda pela pancromática, formando uma imagem com uma resolução mais detalhada (RSI, 2003).

#### **4.2.2. Mapa de cobertura e uso da terra**

Nessa pesquisa foi utilizado o resultado da classificação de cobertura da terra de Francisco e Almeida (2012) e o mapa de cobertura e uso da terra do INEA (2011). Esses dados foram inseridos no ArcGIS 10.0 para a elaboração do mapa final de cobertura e uso de Nova Friburgo.

A classificação de Francisco e Almeida (2012) foi obtida por meio de análise de imagens baseada em objetos geográficos (*Geographic Object-Based Image Analysis – GEOBIA*) com descriptores estatísticos e texturais, utilizando imagens ALOS de 2009. Essa classificação, em virtude da sua elevada acurácia global, foi adotada como base para a confecção do mapa inserido no banco de dados.

Inicialmente, foi realizado um recorte da imagem ALOS (fusionada) baseado no polígono do limite municipal. Através da interpretação visual, foram retirados da base os polígonos que coincidiam com os polígonos de agricultura e pastagem do mapa do INEA e realizadas algumas edições para melhor atender às necessidades desta pesquisa.

Assim, os polígonos das classes herbácea e herbácea rala foram agrupados na classe vegetação rasteira e foram inseridos novos polígonos da classe água e solo exposto (neste último, foram adicionados os polígonos de queimadas). A união das classes floresta e reflorestamento originou a classe vegetação arbórea.

Dessa forma, para o mapa de cobertura e uso de Nova Friburgo, foram definidas as seguintes classes: água, afloramento rochoso, sombra, agricultura, solo exposto, área urbana, pastagem, vegetação rasteira, vegetação arbórea.

#### **4.2.3. Mapeamento das cicatrizes**

Durante as chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011, inúmeros movimentos de massa ocorreram em Nova Friburgo. Segundo Guidolini et al. (2012), a principal causa desses eventos na Região Serrana do Rio de Janeiro foi a

anômala precipitação em um curto período de tempo. Em toda a Região Serrana, os autores mapearam 3.631 movimentos de massa em encostas, cujas orientações ocorreram em todas as direções.

As cicatrizes dos escorregamentos de 2011 foram extraídas do mosaico de imagens GeoEye, obtidas em 19 de janeiro de 2011, disponíveis no Google Earth. Destaca-se que, devido à grande concentração de nuvens no período que as imagens foram obtidas, o mosaico utilizado não recobre a totalidade do município (Figura 4.1). Porém, de acordo com os relatórios do DRM-RJ, não ocorreram movimentos de massa em outras áreas do município.

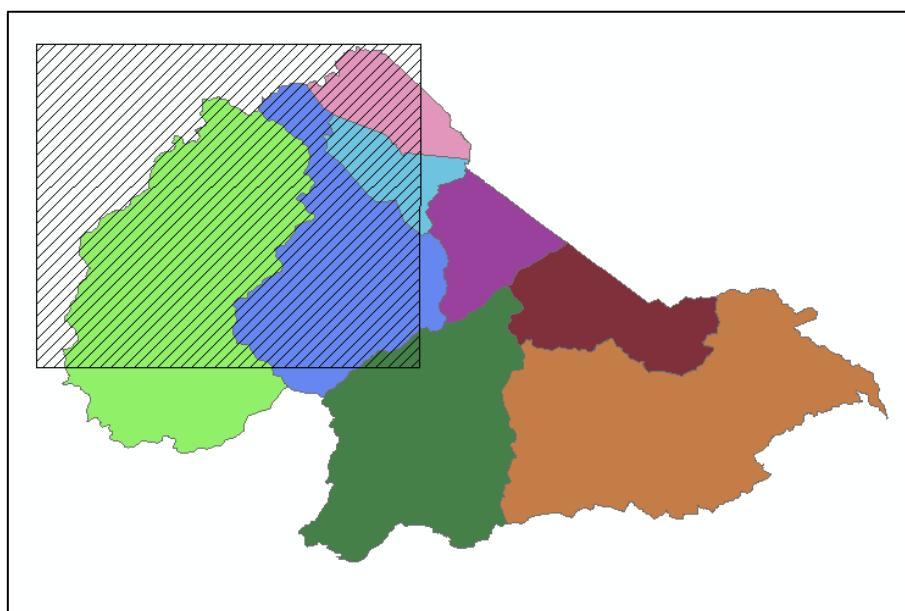


Figura 4.1 – Área de recobrimento das imagens GeoEye.

Os polígonos das cicatrizes foram digitalizados através da análise interpretativa das feições erosivas observadas nas imagens. Nas áreas delimitadas como cicatrizes, foi observada existência ou não de vegetação, bem como sua forma e posição na encosta, com o auxílio do dado de altimetria (TOPODATA). Esses dados foram importantes, pois, como as imagens foram adquiridas poucos dias após o evento, havia pouca distinção entre a cicatriz e o material movimentado (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Cicatriz de escorregamento no Bairro Village.  
Fonte: DRM (2011).

Esse mapeamento é importante para o município, uma vez que destaca os locais com maiores problemas e, desse modo, pode ajudar na tomada de decisão por parte do poder público. Além disso, com esses polígonos é possível estabelecer quais as características da vertente atingida, como tipo de solo, relevo, (forma da encosta, declividade, etc.) rocha, uso e cobertura, utilizando operadores zonais do LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) no SPRING, que possibilitam o estabelecimento de relações espaciais entre regiões de mapas distintos. As operações zonais são definidas sobre determinadas regiões de um mapa de entrada, onde as restrições são fornecidas por outro mapa (BARBOSA et al., 1998). Neste trabalho, foi utilizada a operação maioria zonal, que apresenta como resultado o valor que ocorre com maior frequência dentro da mesma região em um mapa de origem.

#### 4.2.4. Variáveis Geomorfométricas

No projeto TOPODATA (Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil), os dados do SRTM, disponíveis para a América do Sul com uma resolução horizontal de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 m), foram refinados por krigagem, passando para 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m). Assim, foram gerados o Modelo Digital de Elevação (MDE) e as variáveis geomorfométricas derivadas (declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal) (VALERIANO, 2008). Essas variáveis geomorfométricas são fundamentais na interpretação e análise do relevo.

Os dados de declividade foram inseridos no SPRING e submetidos a uma análise estatística para avaliar os valores de média, desvio-padrão, variância, valor mínimo, valor máximo, mediana, quartis inferior e superior, com a finalidade de estabelecer as classes de declividade (Tabela 4.1). As classes de curvaturas, vertical e horizontal, foram determinadas de acordo com Valeriano (2008) (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 – Classes de declividade.

**Classes de declividade (%)**

<b>0 a 2</b>
<b>2 a 6</b>
<b>6 a 20</b>
<b>20 a 50</b>
<b>&gt; 50</b>

Tabela 4.2 – Classes de curvatura vertical e curvatura horizontal.

Curvatura horizontal		Curvatura vertical	
Divergente	Valores positivos	Convexa	Valores positivos
Convergentes	Valores negativos	Côncava	Valores negativos
Planar	Valores próximos a zero (-0,038°/m a + 0,051°/m)	Retilínea	Valores próximos a zero (-0,010°/m a + 0,010°/m)

Com as classes estabelecidas para cada variável, foi realizado o fatiamento dos dados e gerados os mapas de declividade (Figura 4.3), curvatura vertical (Figura 4.4) e curvatura horizontal (Figura 4.5).

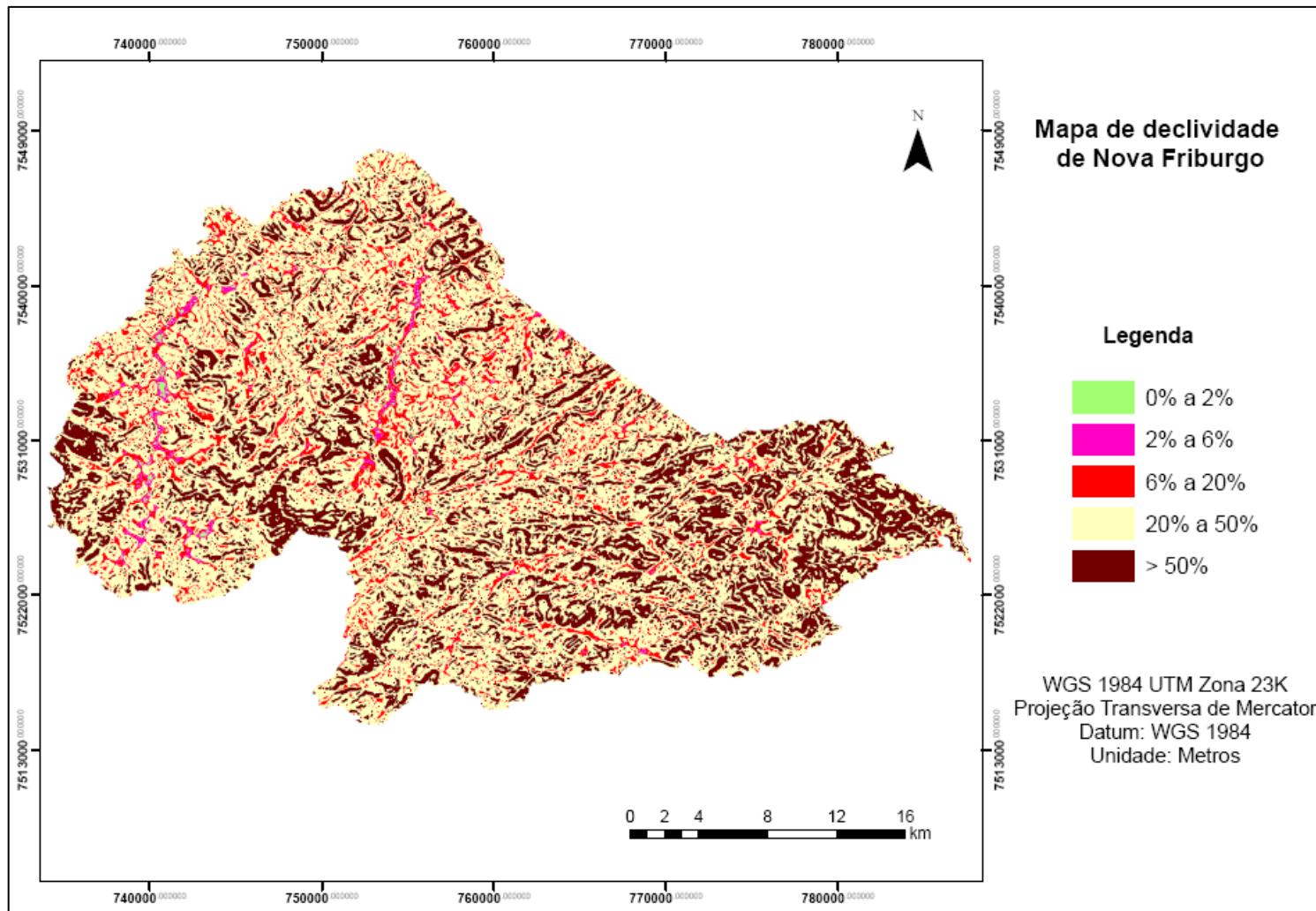


Figura 4.3 – Mapa de declividade de Nova Friburgo

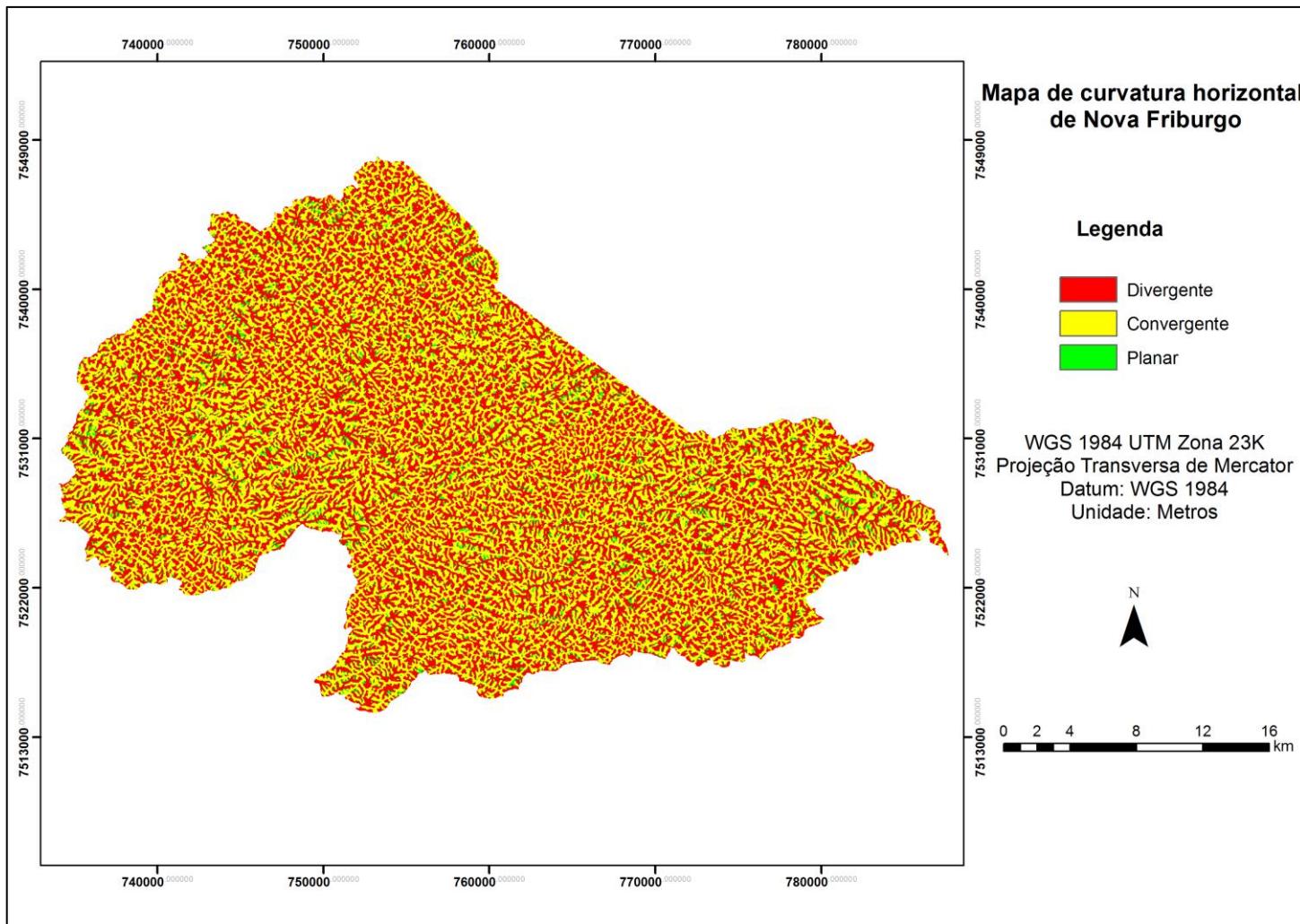


Figura 4.4 – Mapa de curvatura horizontal de Nova Friburgo.

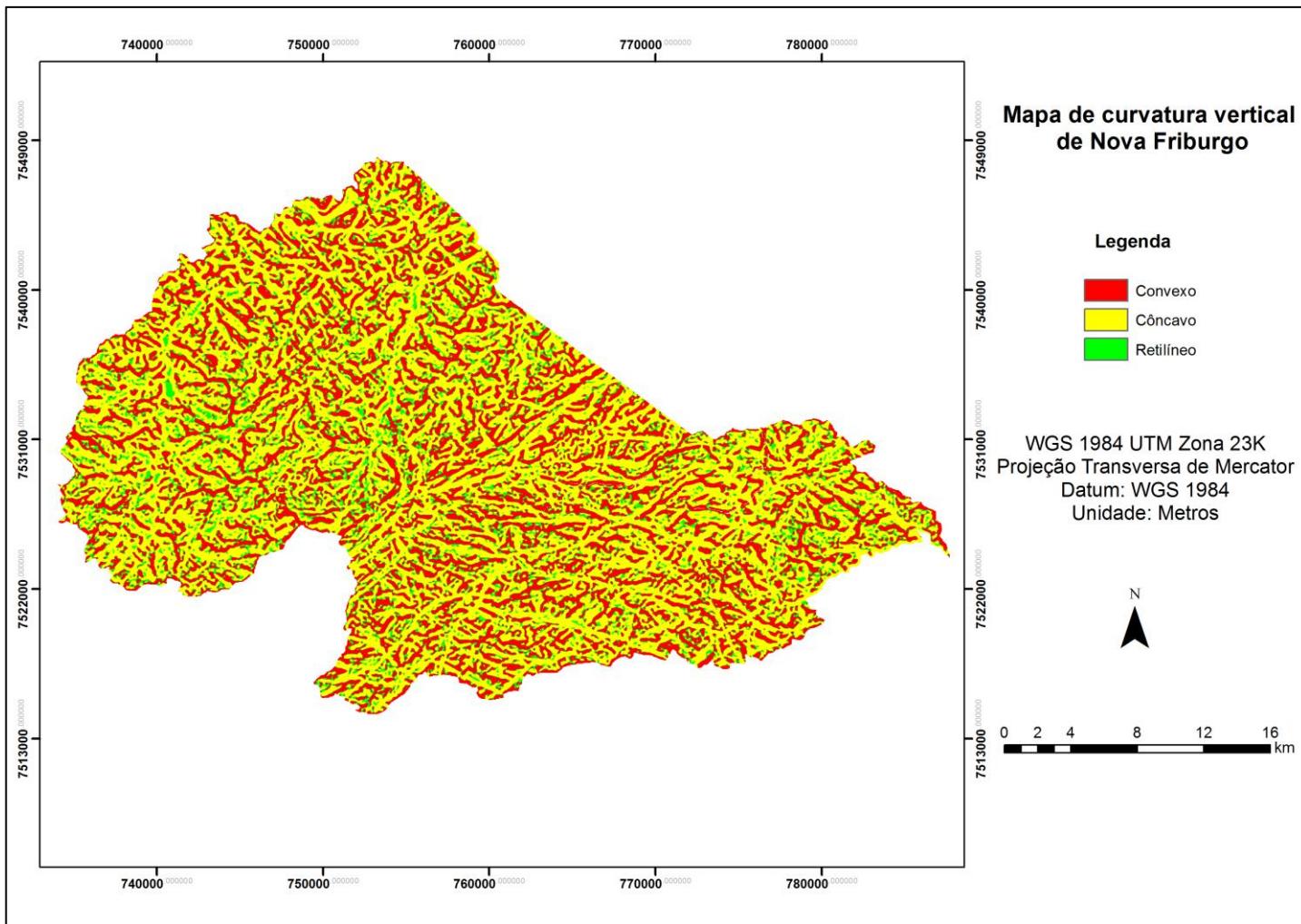


Figura 4.5 – Mapa de curvatura vertical de Nova Friburgo.

As formas do terreno foram baseadas na classificação de Dikau (1990, apud VALERIANO, 2008) (apresentada na Figura 2.11). Esses dados foram agrupados em classes e, através do operador maioria zonal, determinou-se a predominância das cicatrizes em cada uma das variáveis.

#### **4.2.5. Dados de geologia, geomorfologia e solos**

Os dados de geologia foram extraídos do Mapeamento Geológico do CPRM, realizado em parceria com a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). As características geomorfológicas da área foram obtidas junto CPRM, e o mapa pedológico, no Geoportal Digital da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Todos os dados foram editados e recortados no ArcGIS 10.0, com base no polígono de limite municipal.

As litologias (Figura 4.6) do município de Nova Friburgo são da formação Desengano, Granito São José do Ribeirão, Granito São Pedro, Paraíba do Sul, Leucogranito Gnaisse Serra do Paquequer, Rio Negro, Santo Aleixo/ Suíte Serra dos Órgãos, Granito Nova Friburgo e Serra dos Órgãos/ Suíte Serra dos Órgãos. Para cada unidade litológica, foi determinado o tipo de rocha predominante com base no trabalho de Tupinambá et al. (2012).

De acordo com o mapeamento do CPRM, as unidades geomorfológicas da área de estudo são (Figura 4.7): Serras Escarpadas, Serras isoladas e locais, Colinas, Morros, Planícies fluviais e flúvio-marinhais.

Os tipos de solo representados no mapa da Embrapa (Figura 4.8) para a região são: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, Cambissolo Háplico distrófico, Gleissolo Háplico distrófico, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Neossolos Litólicos distróficos e Afloramentos Rochosos.

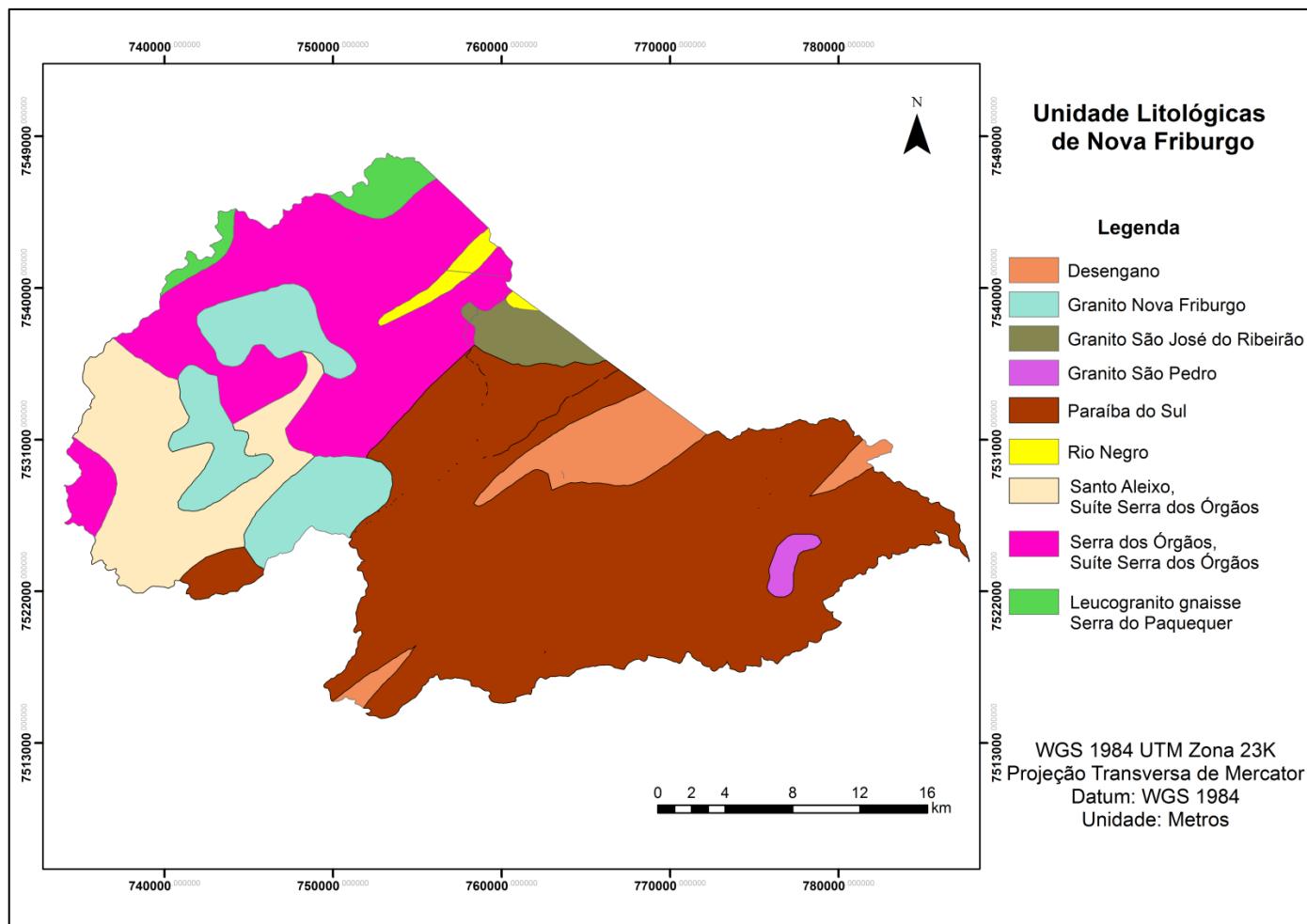


Figura 4.6 – Unidade litológicas de Nova Friburgo.  
Fonte: Tupinambá et al. (2012).

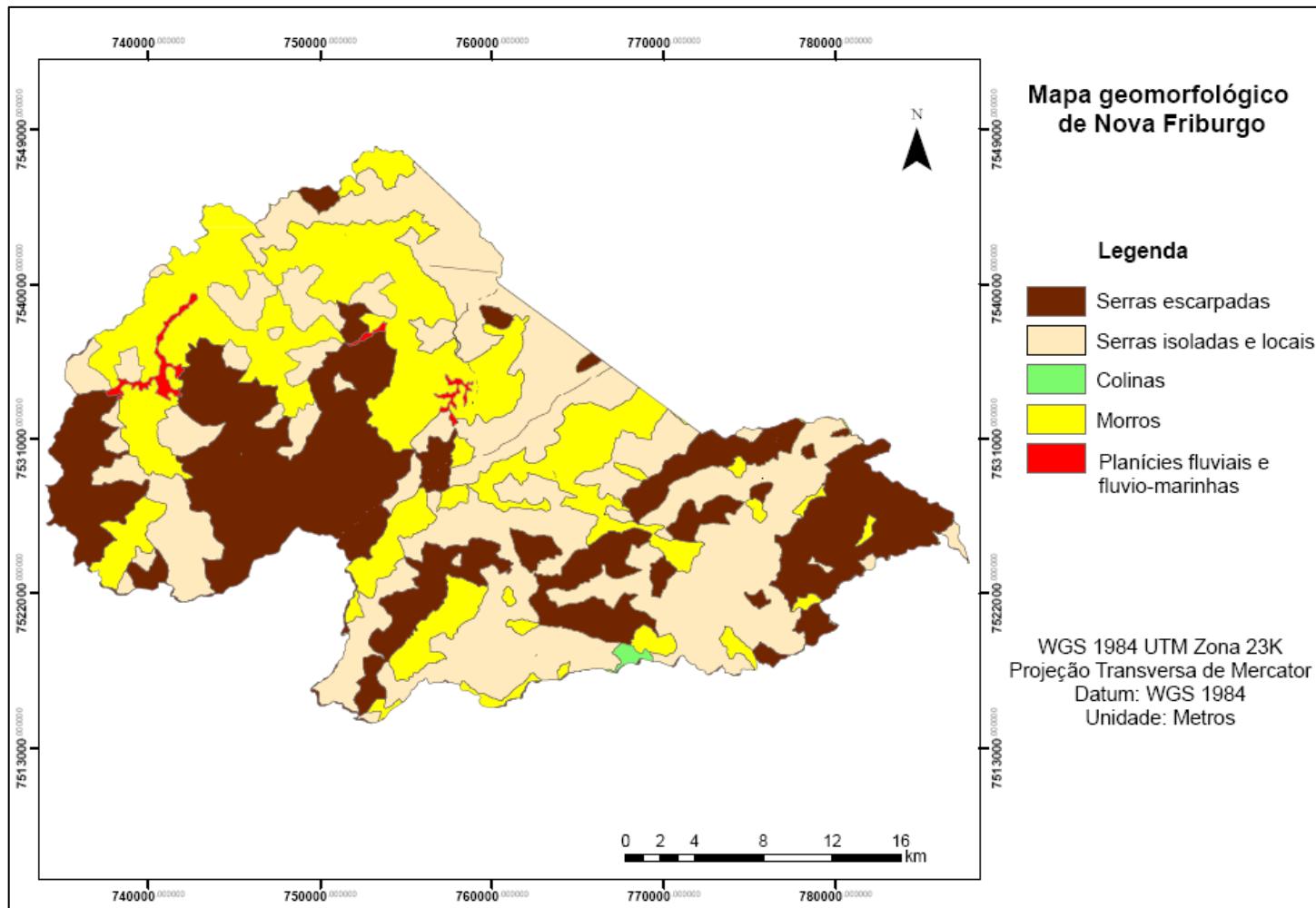


Figura 4.7 – Mapa geomorfológico de Nova Friburgo.  
Fonte: Dantas (2001).

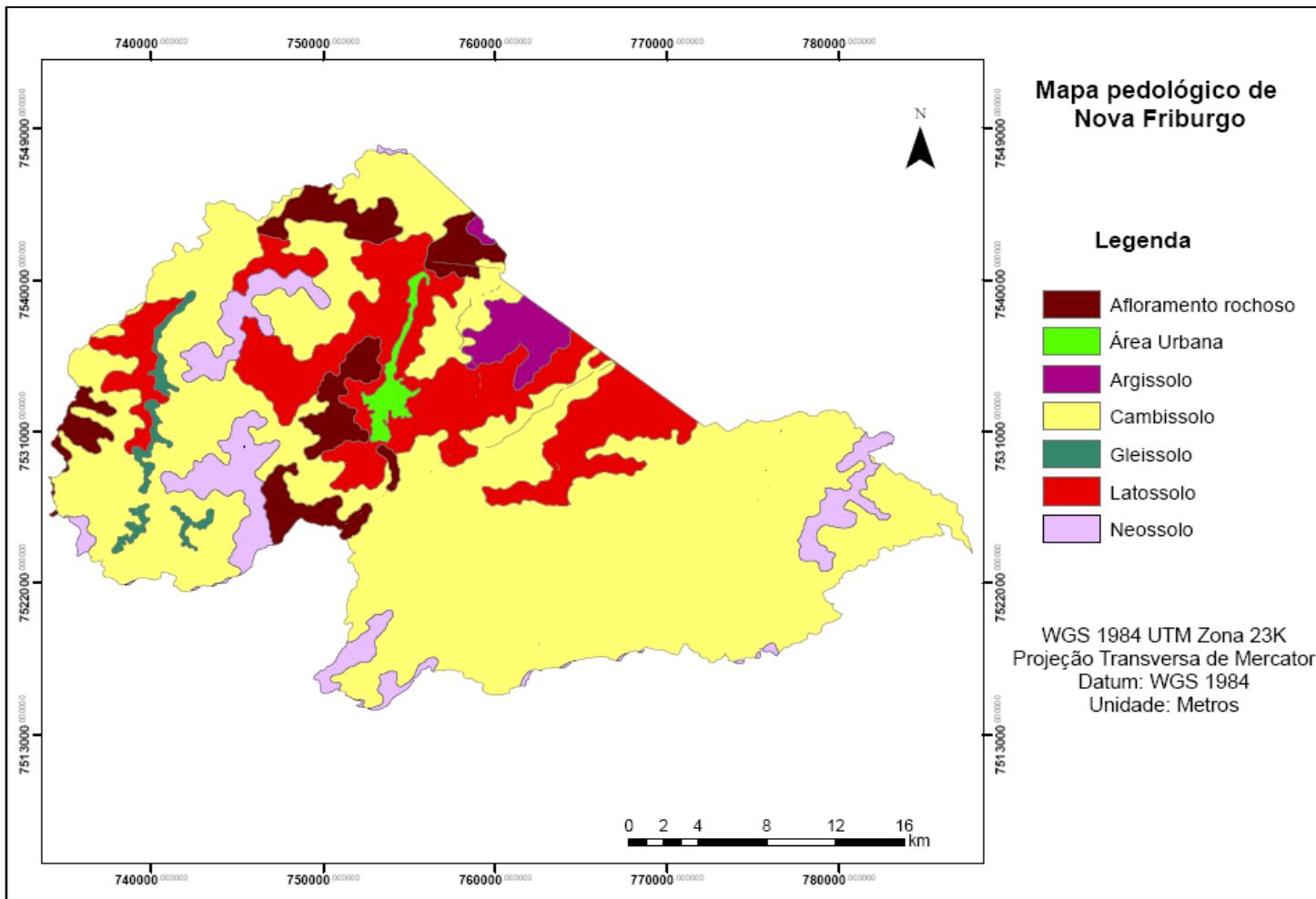


Figura 4.8 – Mapa pedológico de Nova Friburgo.  
Fonte: Carvalho Filho et al. (2003).

Segundo Lepsch (2002), as áreas com declives mais acentuados são formadas por Cambissolos e Neossolos, pois em regiões serranas há pouco desenvolvimento dos solos.

Com base nesses mapas, de pequena escala, foi possível estabelecer de forma não detalhada, as características geológicas, geomorfológicas e pedológicas das cicatrizes dos escorregamentos de 2011.

#### **4.2.6. Mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos**

Na integração de dados de diversas fontes e formatos (como imagens de satélite, mapas geomorfológicos e climáticos, por exemplo), é necessário o uso de SIG que tenham uma linguagem de manipulação que permita a definição de procedimentos complexos de integração de dados, como o LEGAL do SPRING (BARBOSA et al., 1998).

Os procedimentos desenvolvidos nesse trabalho foram baseados na proposta metodológica de Soeters e Van Westen (1996) – também empregada por Muñoz (2005) e Bispo et al. (2011) – utilizando a técnica de inferência espacial fuzzy (operador *Fuzzy Gama*). Optou-se pela utilização dessa técnica, pois muitos trabalhos a apontam como a mais apropriada para lidar com vários conjuntos de dados e modelar fenômenos naturais.

Inicialmente, foram utilizados os dados de cobertura e uso da terra, declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical, geologia, geomorfologia e pedologia para estabelecer a suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo. Porém, a disponibilidade dos mapas de geologia, geomorfologia e pedologia, somente em pequena escala, inviabilizou a análise detalhada.

Dessa forma, optou-se pela utilização somente dos dados de declividade, curvatura vertical e curvatura horizontal devido à sua resolução e importância no processo de acúmulo e escoamento de água, que influência diretamente nos processos de movimentos de massa. Assim, esses dados foram inseridos

no SPRING 5.1.8, no qual foram desenvolvidos os procedimentos descritos a seguir (Figura 4.9).

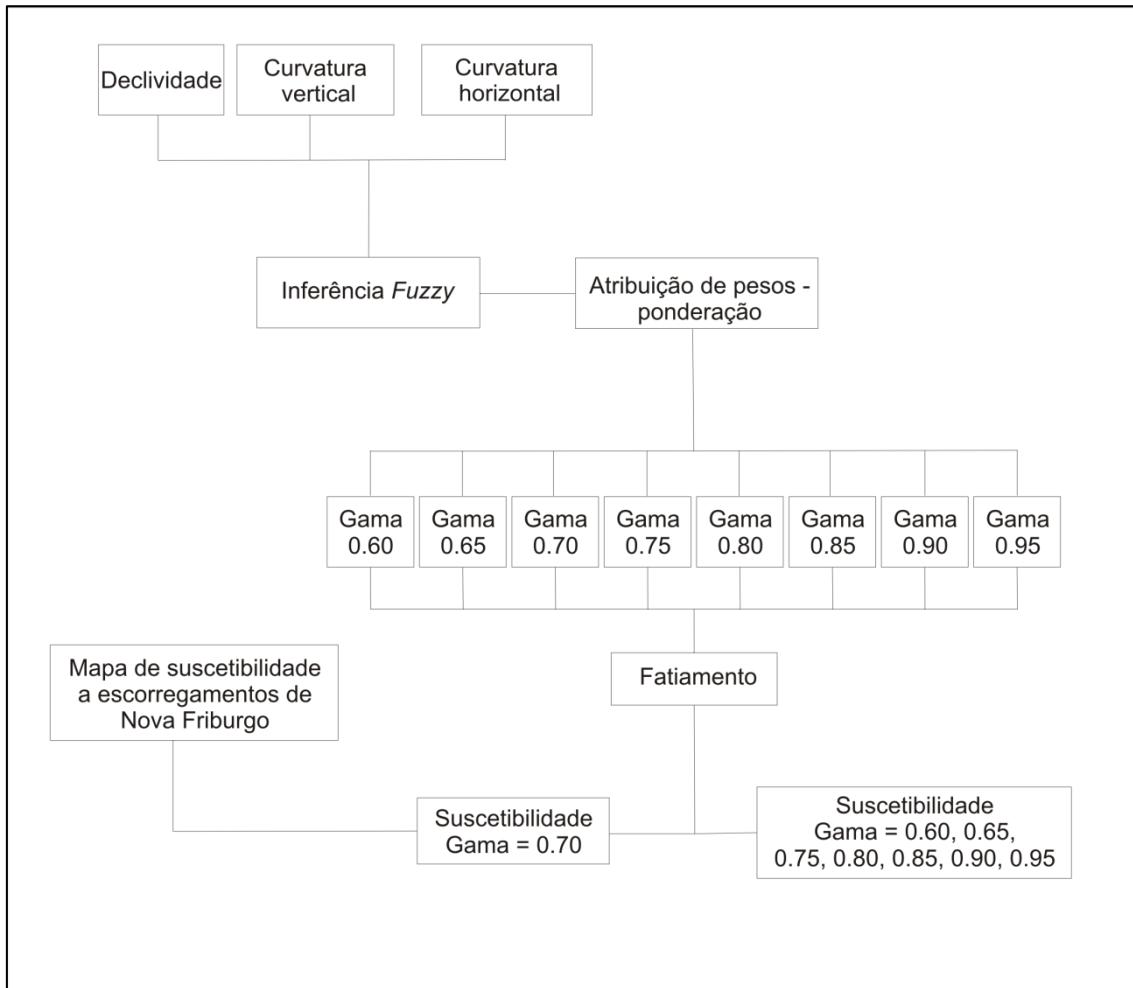


Figura 4.9 – Procedimentos metodológicos.

O método da Lógica *Fuzzy* foi aplicado em três etapas: determinação da influência de cada membro no conjunto, criação das regras do operador *fuzzy* e processamento e análise dos resultados.

Primeiramente, foram estabelecidos os pesos de todas as classes das variáveis, com base nas metodologias de Crepani et al. (2001) e Bispo et al. (2011). No trabalho desenvolvido por Crepani et al. (2001), os autores estabelecem uma escala de vulnerabilidade cujos pesos variam entre um e três (mínimo e máximo, respectivamente). Uma vez que o método *fuzzy* trabalha

com valores entre zero e um, foi necessário realizar uma normalização desses valores por meio da Equação 4.1:

$$Peso_i[0,1] = \frac{Peso_i[1,3] - 1}{(3 - 1)} \quad (4.1)$$

Depois de estabelecidos os pesos (ver Apêndice E), foram realizadas as operações de Ponderação e Fatiamento das variáveis através da linguagem LEGAL do SPRING. Em seguida, estabeleceram-se os diferentes níveis de suscetibilidade (Tabela 4.3) para fatiamento dos mapas finais.

Tabela 4.3: Níveis de suscetibilidade.

<b>Classe</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
<b>0.0 a 0.2</b>	Muito Baixa
<b>0.2 a 0.4</b>	Baixa
<b>0.4 a 0.6</b>	Média
<b>0.6 a 0.8</b>	Alta
<b>0.8 a 1.0</b>	Muito Alta

Finalmente, por meio do operador *Fuzzy Gama*, foram gerados oito cenários de suscetibilidade a escorregamentos utilizando os seguintes valores de gama: 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95.

Os mapas obtidos foram analisados por meio do operador maioria zonal e os dados das cicatrizes de 2011, na tentativa de estabelecer qual seria o cenário mais apropriado para indicar as áreas suscetíveis a escorregamentos em Nova Friburgo. Dessa forma, através do valor gama de 0,70, obteve-se o mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo.

#### **4.2.7. Cenários de alerta com a Plataforma de Monitoramento, Análise e Alerta – TerraMA<sup>2</sup>**

O TerraMA<sup>2</sup> é um *software* livre, baseado em uma arquitetura de serviços que possibilita o desenvolvimento de sistemas operacionais para monitoramento de alertas a riscos ambientais. É um sistema baseado na Arquitetura Orientada a Serviços (Service-Oriented Architecture - SOA) que possibilita a integração de dados de diversas fontes, permitindo o estabelecimento de cenários de alerta através de análises previamente estabelecidas em linguagem de programação LUA, emitindo ainda notificações de alerta aos usuários (REIS et al., 2011; MELONI, 2012). O sistema utiliza dados:

- a) Dinâmicos: informa sobre a condição de variáveis obtidas em intervalos de tempo pré-determinados, como dados de precipitação, umidade relativa, incidência de raios, etc.
- b) Estáticos: apresenta as condições necessárias para a ocorrência de um desastre, como mapas de suscetibilidade, risco, densidade populacional, mapa de hidrografia, localização de dutos etc.
- c) Adicionais: qualquer informação que auxilie na localização das áreas de risco, como localização de ruas e bairros de um município.

É possível criar dois tipos de bancos para operar o *software*: o banco de estudo e o banco de operação. O banco de estudo utiliza para a análise dados dinâmicos passados, e o banco de operação coleta dados em tempo real, a partir de sua configuração.

Neste trabalho, o banco de estudo utilizou como dados de entrada polígonos com os setores censitários do IBGE, mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo por setor censitário, dados de precipitação por pluviômetro do SIMERJ (referente a dezembro de 2010 e janeiro de 2011) e dados de precipitação do BRAMS (do mesmo período).

Foi necessária a criação do mapa de suscetibilidade a escorregamentos por setor censitário por uma limitação computacional e também para otimizar a localização do alerta, pois, uma vez que o cenário de suscetibilidade gerado não possui limites rígidos entre as classes estabelecidas e os dados utilizados possuem uma resolução espacial refinada, inúmeros polígonos são gerados. Como o TerraMA<sup>2</sup> realiza cada análise por polígono, o custo computacional para realizar todo esse processamento seria muito alto e, haveria uma grande dificuldade para localizar espacialmente o polígono em estado de alerta.

Dessa forma, os polígonos dos setores censitários do IBGE foram utilizados como base e, com o operador maioria zonal, a suscetibilidade de cada setor foi determinada. Assim, o alerta é acionado de acordo com o setor censitário, otimizando a sua localização e diminuindo a quantidade de análises realizadas pelo software.

#### **4.2.8. Limiares críticos a escorregamentos**

Para determinar os limiares críticos a escorregamentos utilizados nessa pesquisa, foram utilizados os valores estabelecidos pelo Sistema Alerta Rio (Tabela 4.4), CEDEC-SP (conforme apresentado na Tabela 2.4), Reis et al. (2011) (Tabela 4.5), precipitação observada nos dias dos eventos de 2011 (Figura 4.10).

Tabela 4.4 – Limiares críticos de precipitação do Sistema Alerta Rio.

Sistema Alerta Rio	Nível de alerta		
<i>Valores acumulados</i>	<i>Nível médio</i>	<i>Nível alto</i>	<i>Nível muito alto</i>
<b>Acumulado em 1h</b>	25 a 50 mm	50 a 80 mm	> 80 mm
<b>Acumulado em 24h</b>	85 a 140 mm	140 a 220 mm	> 220 mm
<b>Acumulado em 96h</b>	140 a 220 mm e 25 a 50 mm/24h	220 a 300 mm e 50 a 100 mm/24h	> 330 mm e > 100 mm/24h

Fonte: Alerta Rio (2013).

Tabela 4.5 – Limiares críticos de precipitação acumulada em 24 horas.

Nível de alerta	Precipitação (mm)
<b>Normal</b>	< 50
<b>Observação</b>	< 100
<b>Atenção</b>	< 140
<b>Alerta</b>	< 160
<b>Alerta máximo</b>	> 160

Fonte: Reis et al. (2011).

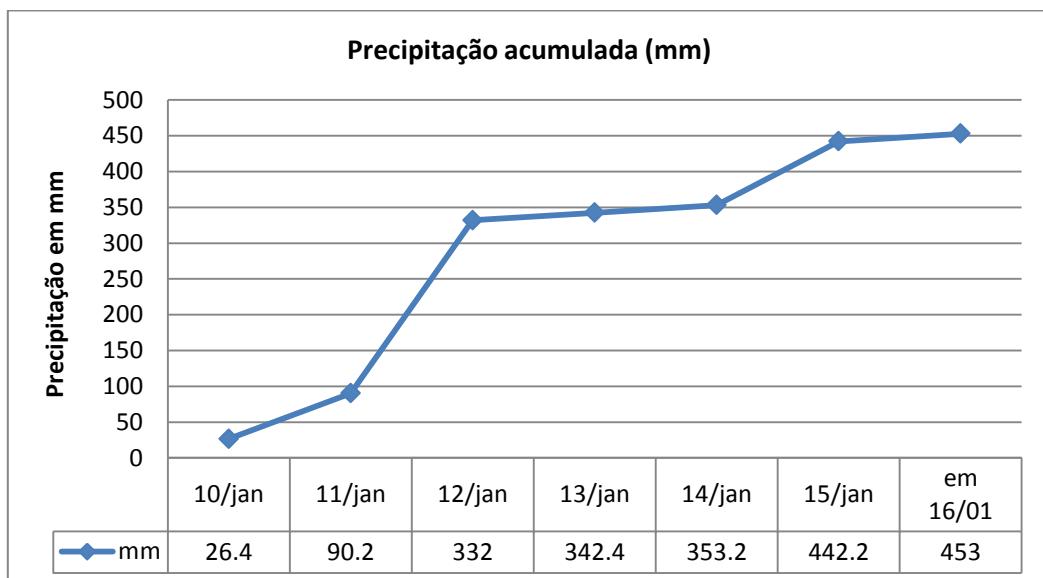


Figura 4.10 – Precipitação acumulada entre os dias 10 e 16 de janeiro de 2011 em Nova Friburgo.

Os valores foram determinados observando também a variação das classes de suscetibilidade. Na Tabela 4.6, segue um exemplo de como foram realizados os testes para estabelecer os limiares críticos para valores acumulados em 24 horas.

Tabela 4.6 – Teste dos limiares críticos de precipitação.

Nível de alerta	Suscetibilidade / limiar de precipitação				
	Muito baixa	Baixa	<b>Média</b>	Alta	Muito alta
<b>0 - Normal</b>	< 28 = 0	< 24 = 0	<b>&lt; 20 = 0</b>	< 16 = 0	< 12 = 0
<b>1 - Observação</b>	< 38 = 1	< 34 = 1	<b>&lt; 30 = 1</b>	< 26 = 1	< 22 = 1
<b>2 - Atenção</b>	< 58 = 2	< 54 = 2	<b>&lt; 50 = 2</b>	< 46 = 2	< 42 = 2
<b>3 - Alerta</b>	< 88 = 3	< 84 = 3	<b>&lt; 80 = 3</b>	< 74 = 3	< 72 = 3
<b>4 - Alerta máximo</b>	> 88 = 4	> 84 = 4	<b>&gt; 80 = 4</b>	> 74 = 4	> 72 = 4

Neste exemplo, os valores dos limiares do sistema Alerta Rio foram inseridos para uma situação de suscetibilidade média. Para a suscetibilidade baixa e muito baixa, foram determinados valores 20% e 40% mais altos de precipitação com relação à média, respectivamente. Para as classes alta e muito alta, foram determinados valores 20% e 40% mais baixos de precipitação com relação à média, respectivamente. Esses valores eram inseridos na análise do TerraMA<sup>2</sup> e testados. Com base nos diversos testes realizados, foram estabelecidos os limiares críticos de precipitação para Nova Friburgo.

#### 4.2.9. Avaliação dos resultados

Para avaliar os resultados do mapeamento de suscetibilidade, alguns autores tomam como referência informações obtidas em pesquisas prévias, desenvolvidas na mesma área de estudo (MUÑOZ, 2005; BISPO et al., 2011). Isso permite comparar e estabelecer uma correlação entre as áreas de suscetibilidade mais alta dos cenários obtidos em cada estudo. Outros autores utilizam modelos matemáticos, por exemplo, o SHALSTAB, para comparar e avaliar os resultados gerados (NERY, 2011).

No caso deste trabalho, optou-se por comparar o mapa de suscetibilidade com o mapa de ocorrência de cicatrizes dos escorregamentos de 2011 (LOPES, 2006; VIEIRA, 2007). Já para avaliar os limiares de precipitação críticos a escorregamentos e os cenários de alerta, foram utilizados os dados de precipitação disponíveis para o mês de janeiro de 2011. Optou-se por esse método, pois foi a precipitação que ocorreu nesse período que deflagrou a série de movimentos de massa desse ano.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Suscetibilidade a escorregamentos em Nova Friburgo

Com o uso do operador *Fuzzy Gama* foram gerados oito cenários de suscetibilidade a escorregamentos para Nova Friburgo. Os valores de gama utilizados foram 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90 e 0.95 (ver Apêndices A e B). Verificou-se que conforme o índice gama tinha seu valor aumentado, o cenário gerado tornava-se mais favorável à ocorrência de escorregamentos. O índice gama 0,70 possibilitou uma melhor distribuição das áreas entre as classes intermediárias de suscetibilidade nas cicatrizes dos escorregamentos de 2011 (Figuras 5.1 e 5.2).

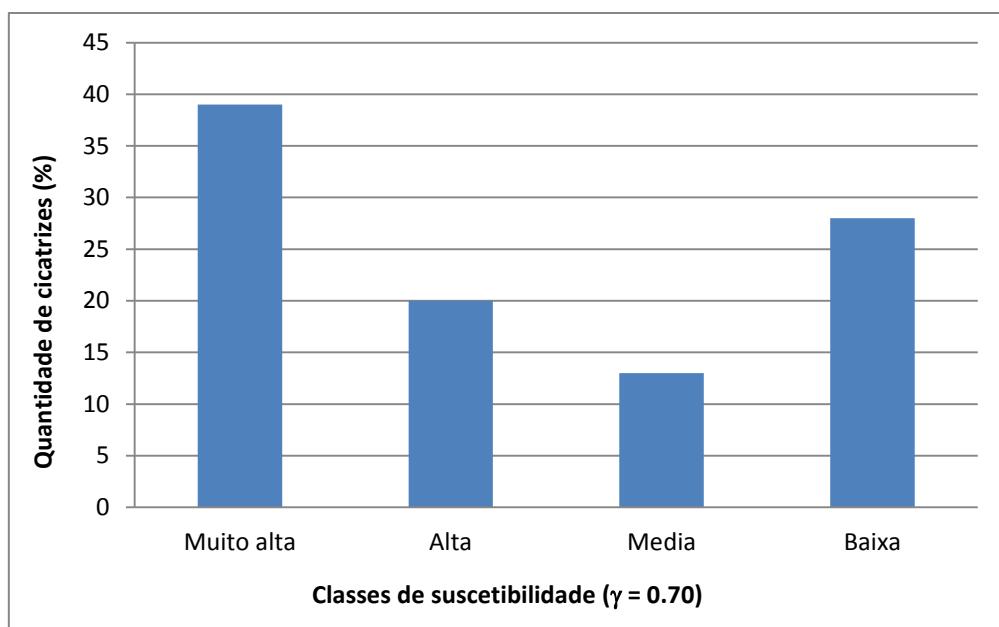


Figura 5.1 – Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos.

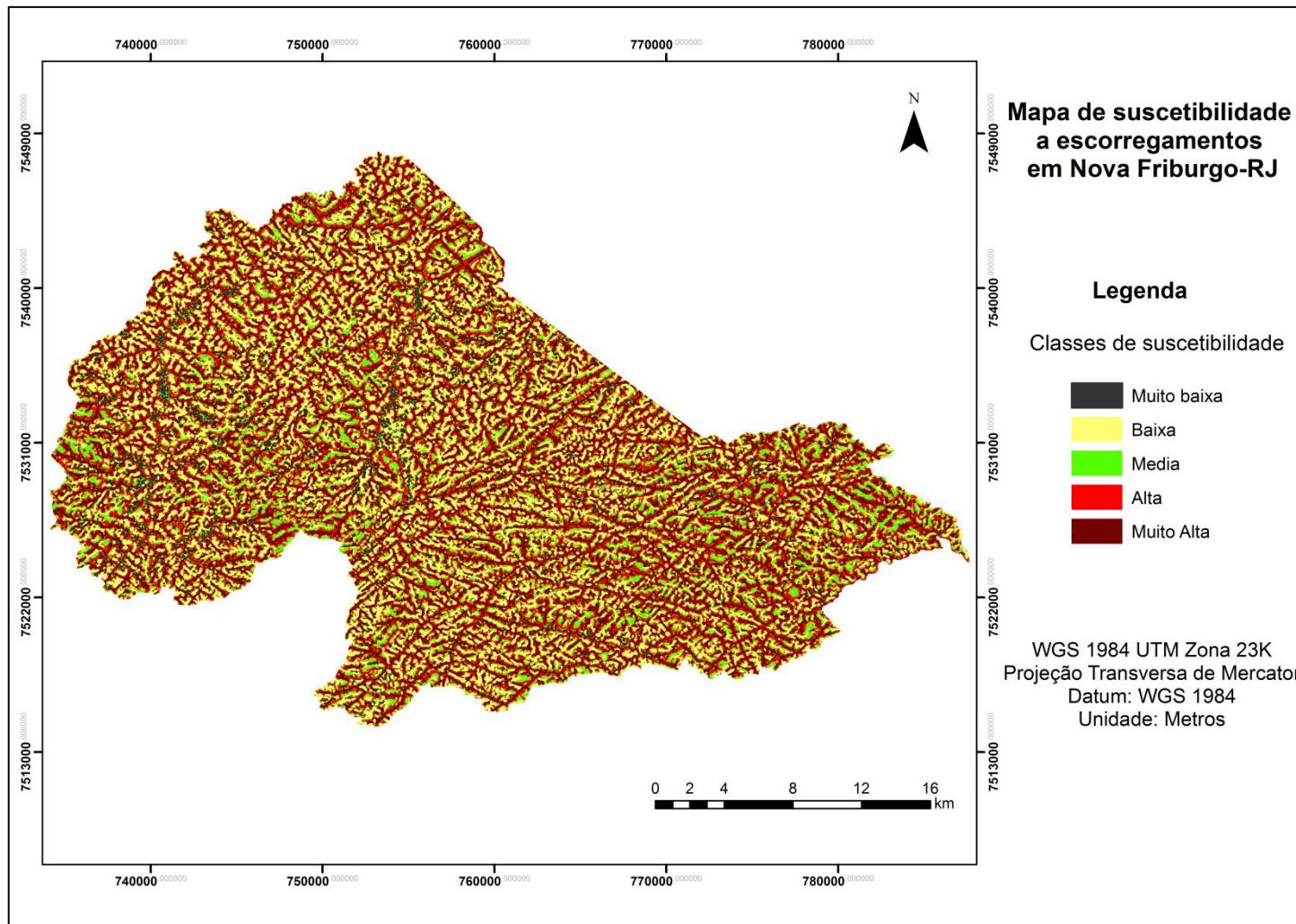


Figura 5.2 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo

Analisando o mapa, podemos perceber a grande quantidade de áreas consideradas com alta suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos em todo o município. Grande parte da área urbana de Nova Friburgo que ocupa a parte com declividades menos acentuadas coincide com áreas classificadas com muito baixa e baixa suscetibilidade. Historicamente, a ocupação urbana neste e em outros municípios da região ocorreu em áreas de baixa declividade nos alvéolos intramontanos (DANTAS, 2001).

As cicatrizes foram analisadas com relação à localização e à geologia, geomorfologia (mapa disponível, além de dados de declividade, curvatura vertical e curvatura horizontal), pedologia, e cobertura e uso da terra. Foram mapeadas 785 cicatrizes (Figura 5.3) e podemos observar que mais de 50% dos escorregamentos ocorreram no distrito de Campo Coelho (Figura 5.4), na parte noroeste do município, em áreas com diferentes tipos de suscetibilidade. Nos distritos de Amparo, São Pedro, Muri e Lumiar não ocorreram movimentos de massa, mesmo com a considerável ocorrência de áreas de suscetibilidade alta.

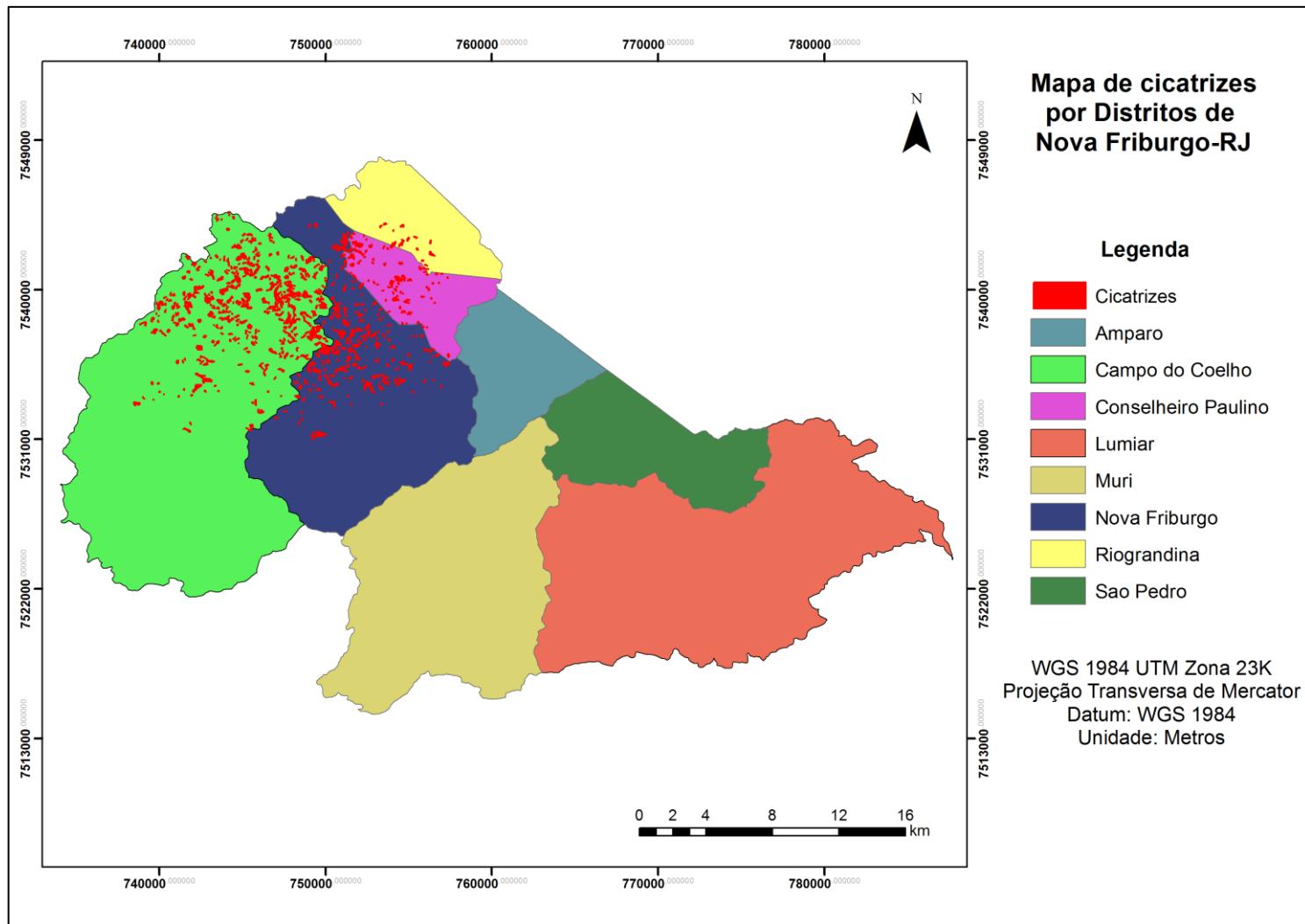


Figura 5.3 – Mapa das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 por Distrito em Nova Friburgo.

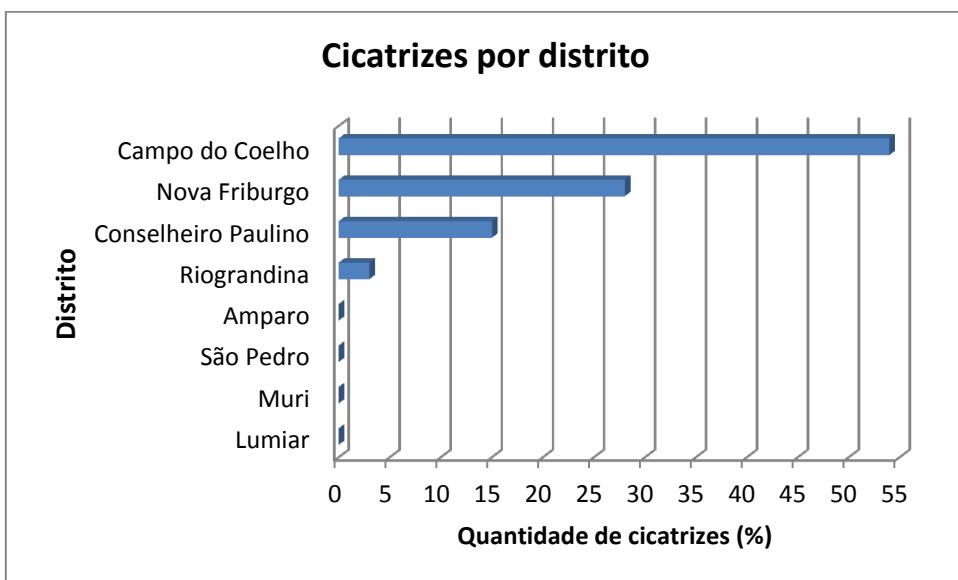


Figura 5.4 – Quantidade de cicatrizes por distrito

Os distritos de Nova Friburgo (Sede) e Conselheiro Paulino apresentaram 27% e 15% das cicatrizes, respectivamente. Destaca-se que, apesar de ser uma quantidade considerável, a maioria desses eventos não ocorreu no sítio urbano, mas no seu entorno, principalmente em áreas de vegetação rasteira, vegetação arbórea e pastagens.

Com relação à geologia das áreas atingidas, podemos observar na Figura 5.5 que aproximadamente 90% das ocorrências se deram na formação Serra dos Órgãos, Suíte Serra dos Órgãos e Granito Nova Friburgo.

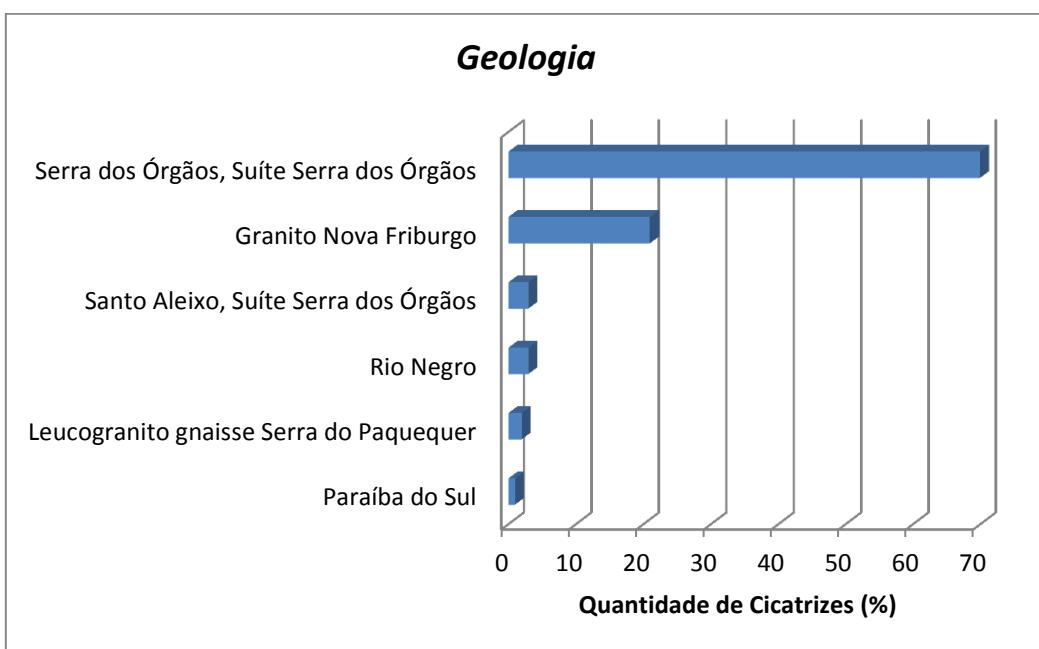


Figura 5.5 – Quantidade de cicatrizes por unidade litológica.

Foram encontradas cicatrizes em todas as unidades litológicas aflorantes. Essas apresentam pouca variação em sua composição, sendo em geral rochas quartzo-feldspáticas. Segundo Tupinambá et al. (2012), a unidade Suíte Serra dos Órgãos, que ocupa grande parte da porção oriental da Folha Nova Friburgo, é composta por gnaisses que se caracterizam por sua granulação grossa e foliação descontínua, e o Granito Nova Friburgo é formado por granitos e domina a zona sul da área urbana do município.

As unidades geomorfológicas das áreas atingidas constituem-se principalmente de Morros e Serras isoladas e locais (Figura 5.6).

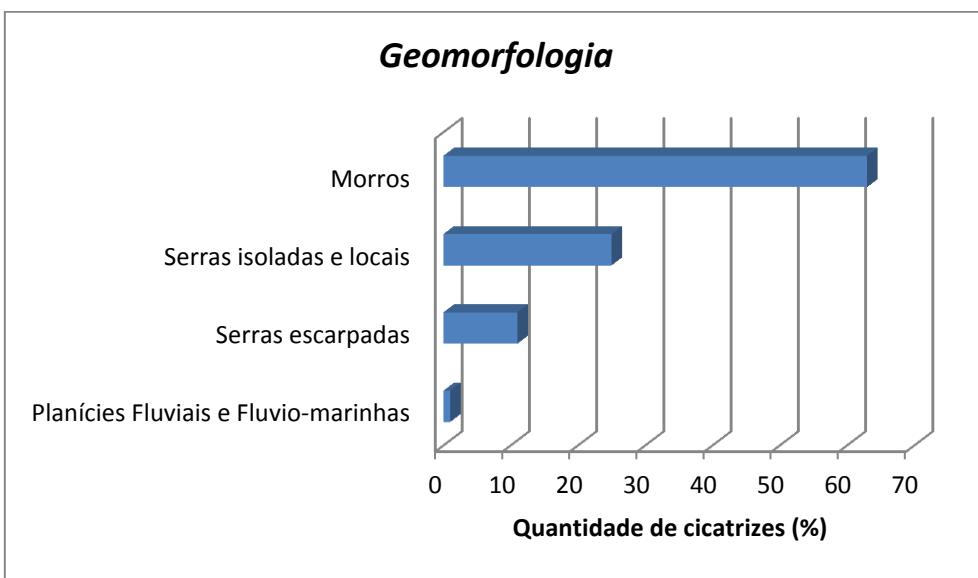


Figura 5.6 – Características geomorfológicas das cicatrizes.

Com relação à geomorfometria, a declividade predominante nas cicatrizes encontra-se no intervalo entre 20 e 50% (Figura 5.7). Segundo a classificação da Embrapa (1999), esse intervalo corresponde a um relevo Forte Ondulado. Essa variável possui uma forte associação com movimentos de massa e está diretamente relacionada à velocidade de deslocamento do material. Esse resultado indica o forte controle topográfico sobre os processos de escorregamento.

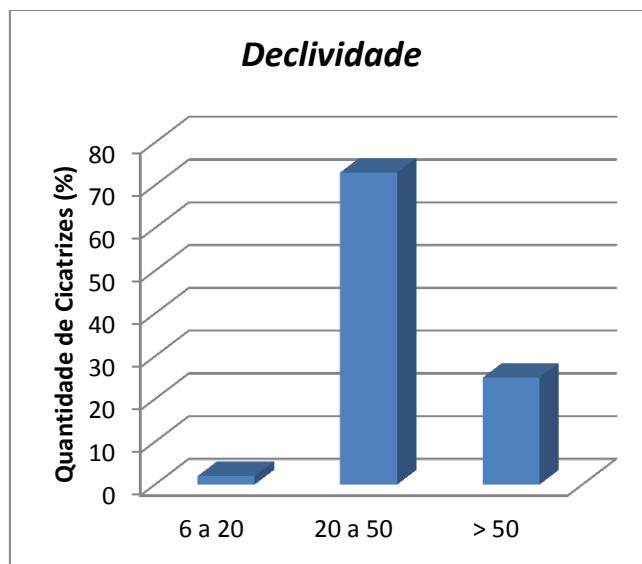


Figura 5.7 – Ocorrências das cicatrizes com relação à declividade.

Outras importantes variáveis analisadas foram a curvatura vertical (Figura 5.8) e curvatura horizontal (Figura 5.9), que compõe a forma do terreno (Figura 5.10). Observou-se que cerca de 40% das cicatrizes estão localizadas em áreas com a combinação côncavo-convergente. Essa forma do terreno propicia máxima concentração e acúmulo do escoamento, o que favorece a saturação do solo e, consequentemente, a ocorrência de movimentos de massa.

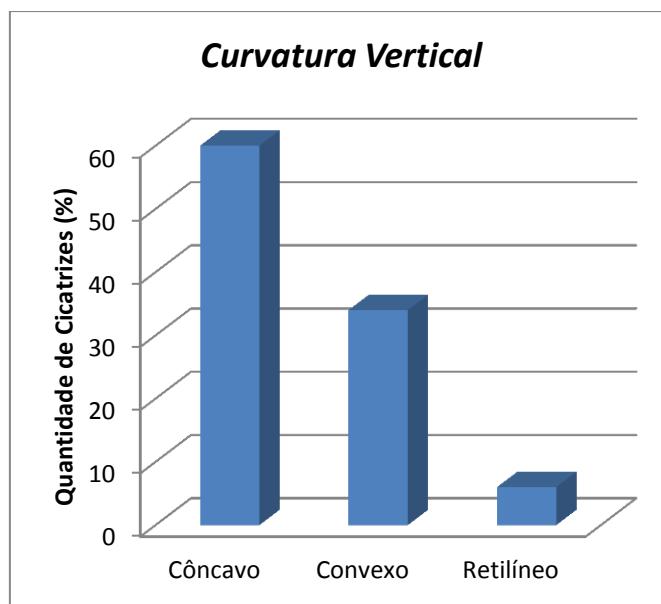


Figura 5.8 – Ocorrências das cicatrizes com relação à curvatura vertical.

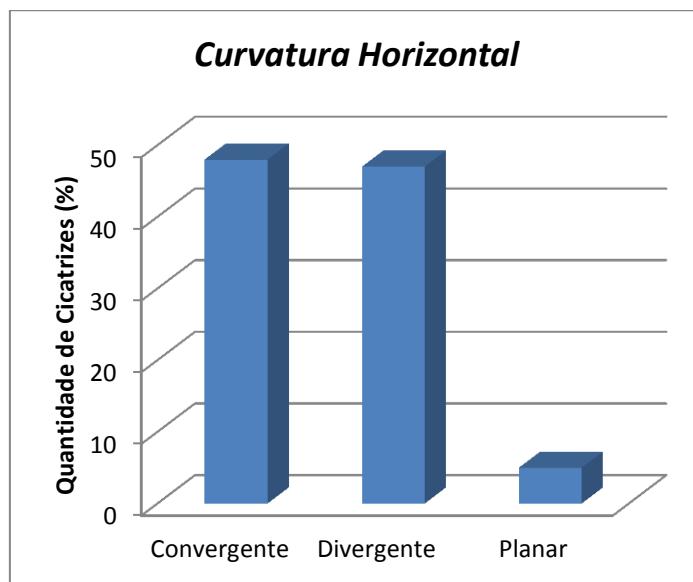


Figura 5.9 – Ocorrências das cicatrizes com relação à curvatura horizontal.

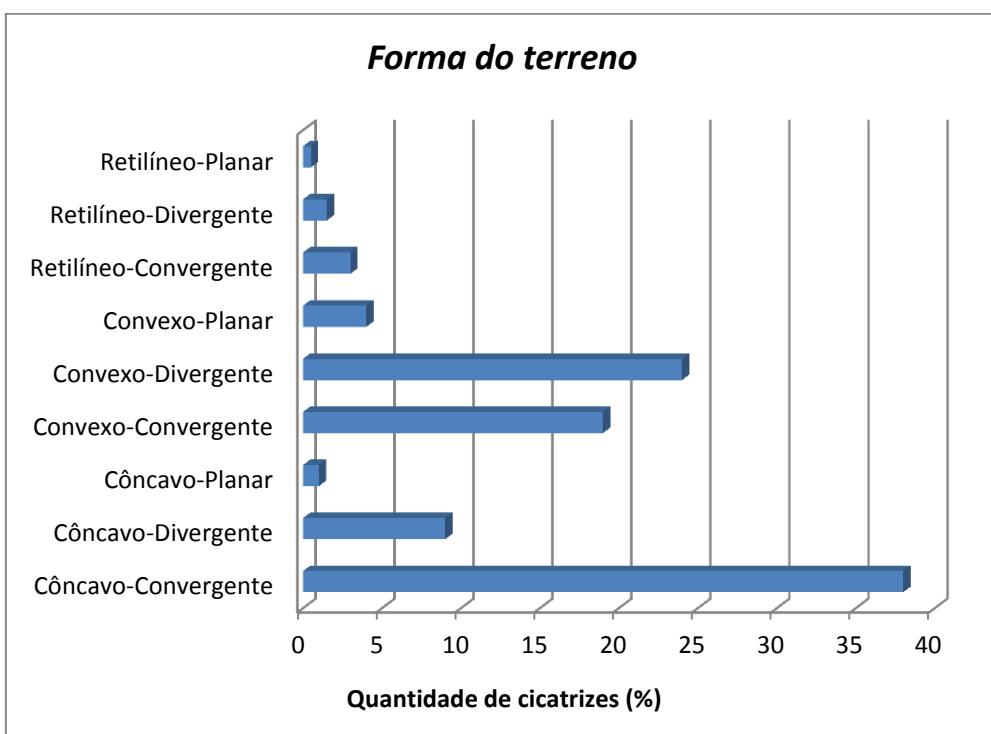


Figura 5.10 – Ocorrência das cicatrizes com relação à forma das vertentes.

Segundo Lepsch (2002), as áreas com declives mais acentuados são formadas por Cambissolos, pois em regiões serranas há pouco desenvolvimento dos solos. Assim, na área de estudo, que está situada em região serrana, os tipos de solo predominantes nos locais dos eventos foram o Cambissolo Háplico, predominantemente, e o Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 5.11).

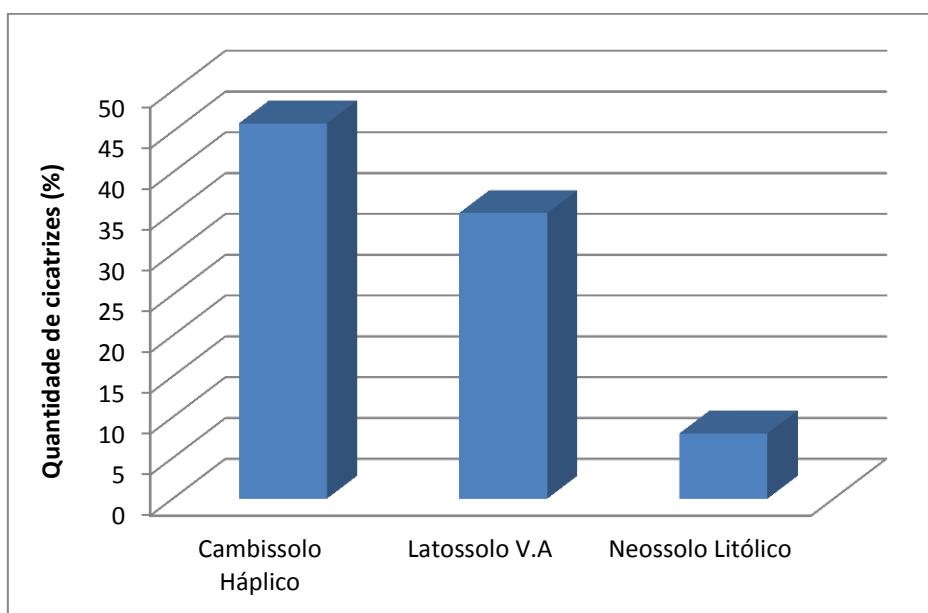
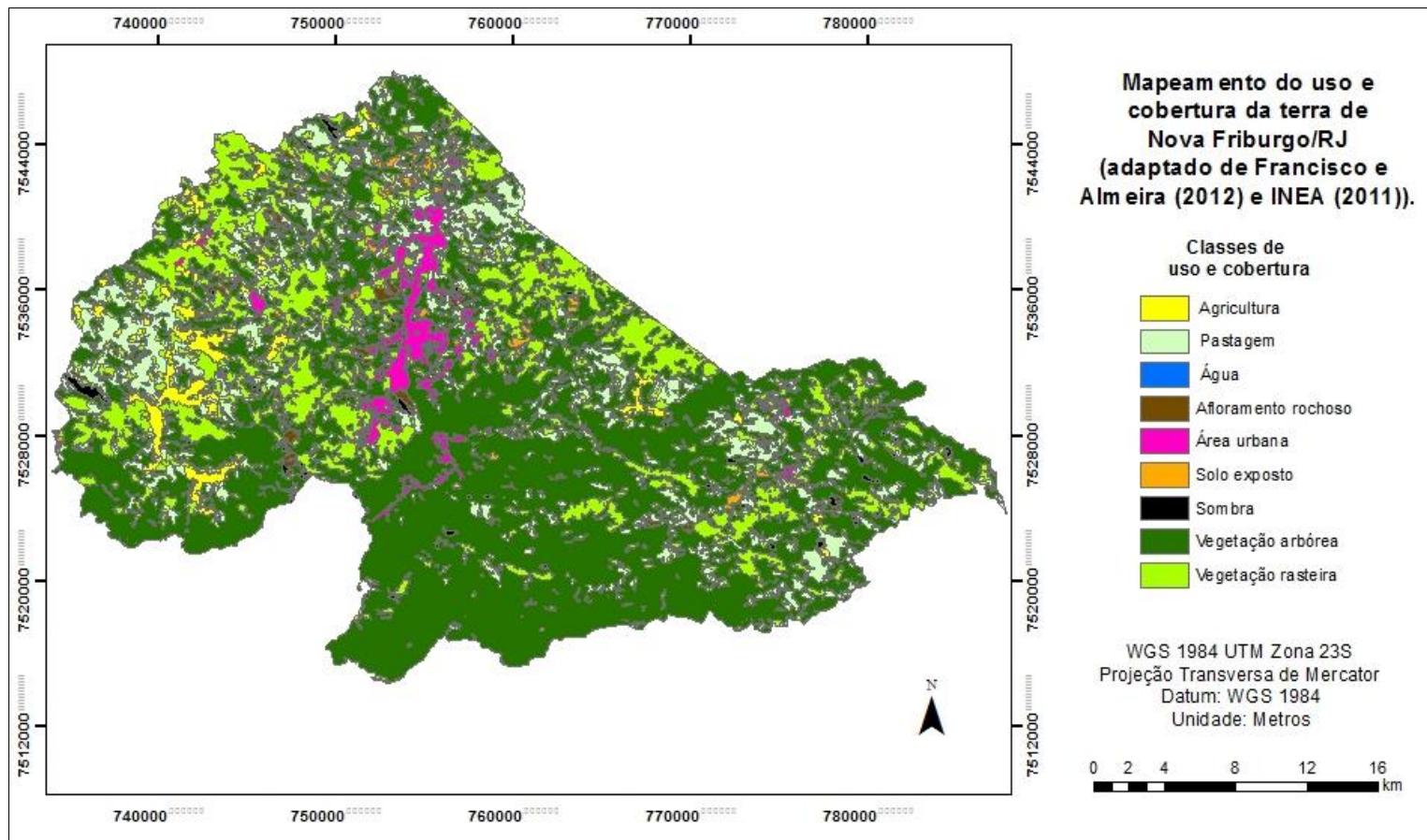


Figura 5.11 – Tipos de solo predominantes no local dos escorregamentos.

Com relação à cobertura e uso da terra (Figura 5.12), a maior parte dos escorregamentos ocorreu em locais com cobertura de vegetação arbórea e vegetação rasteira (Figura 5.13). Neste caso, pode-se inferir que movimentos de massa estão associados ao processo de saturação do solo.



**Figura 5.12 – Mapa de cobertura e uso da terra de Nova Friburgo.**  
Fonte: Adaptado de Francisco e Almeida (2012) e INEA (2011).

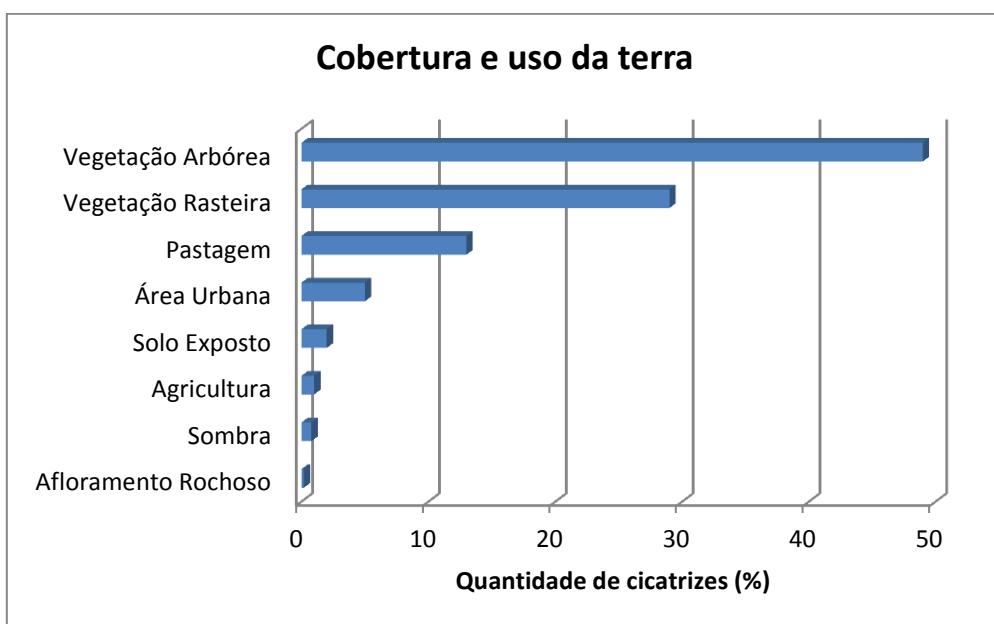


Figura 5.13 – Quantidade de cicatrizes em cada tipo de uso ou cobertura da terra.

Entretanto, analisando a relação entre a área de cada classe de cobertura e uso da terra com a quantidade de cicatrizes, o resultado é consideravelmente diferente do gráfico anterior (Figura 5.14).

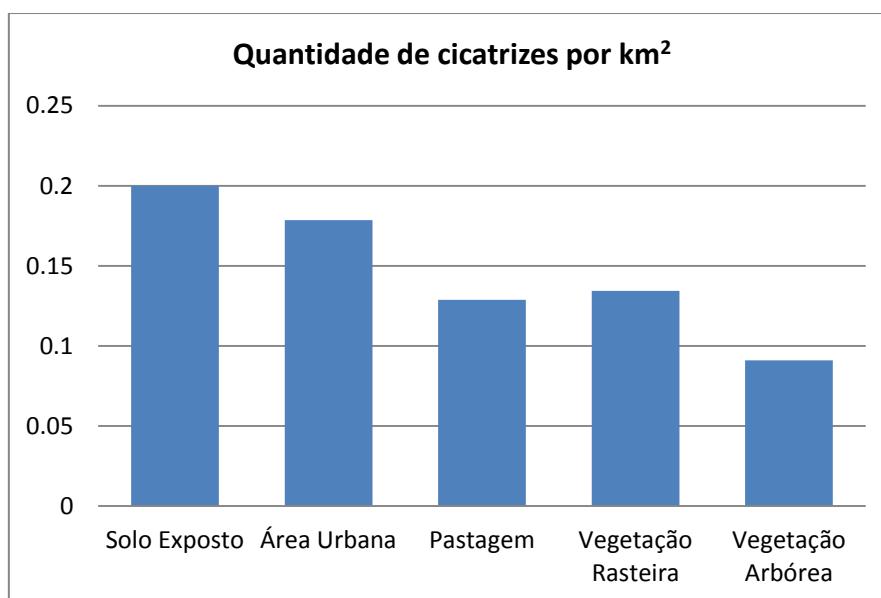


Figura 5.14 – Quantidade de cicatrizes por km<sup>2</sup> nas diferentes coberturas e usos da terra.

A área ocupada por vegetação rasteira e arbórea é de 216 km<sup>2</sup> e 540 km<sup>2</sup>, respectivamente, enquanto que a área urbana possui 28 km<sup>2</sup>, fazendo com

que, proporcionalmente, a quantidade de escorregamentos tenha sido superior nessa classe. Isso confirma a tendência descrita em diversas pesquisas, cujos resultados mostram uma relação do processo de impermeabilização de áreas com o aumento da suscetibilidade a escorregamentos.

## 5.2. Limiares críticos a escorregamentos

Analizando os dados disponíveis e a literatura consultada, foram realizados alguns testes com limiares críticos a escorregamentos para a região. Os valores obtidos da literatura (ALERTA RIO, 2013; XAVIER; SILVA, 2004; REIS et al., 2011) foram considerados como base para áreas com suscetibilidade média.

Com os testes realizados, foram obtidos os limiares apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Limiares para precipitação acumulada em 24 horas.

Nível de alerta	SUSCETIBILIDADE/(mm em 24h)				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
0 - Normal	< 32	< 28	< 25	< 22	< 20
1 - Observação	< 45	< 40	< 35	< 32	< 28
2 - Atenção	< 55	< 50	< 45	< 42	< 37
3 - Alerta	< 100	< 95	< 88	< 80	< 70
4 - Alerta máximo	> 100	> 95	> 88	> 80	> 70

Tabela 5.2 – Limiares para precipitação acumulada em 1 hora.

Nível de alerta	SUSCETIBILIDADE (mm em 1h)				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
0 - Normal	< 24	< 22	< 20	< 18	< 15
1 - Observação	< 30	< 27	< 25	< 23	< 20
2 - Atenção	< 60	< 55	< 50	< 45	< 40
3 - Alerta	< 80	< 75	< 70	< 65	< 60
4 - Alerta máximo	> 80	> 75	> 70	> 65	> 60

Os limiares que mais se aproximaram desses valores foram os estabelecidos pelo Alerta Rio, que são um pouco superiores aos valores estabelecidos para 24 horas de precipitação. Destaca-se que o software utilizado apresenta o nível de alerta seguindo a escala de cores da Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Escala de cores dos níveis de alerta do TerraMA<sup>2</sup>.



A script da análise foi escrito com base nesses limiares e foram observados dois períodos que apresentaram alerta máximo à ocorrência de escorregamentos: entre os dias 22 e 25 de dezembro de 2010 e 11 e 16 de janeiro de 2011. No mês de dezembro, como se pode observar na Figura 5.15, houve um pico de precipitação no dia 22, com 84,6 mm, seguido de chuvas de forte intensidade nos dias 23 e 24, com 54mm e 55,6mm, respectivamente.

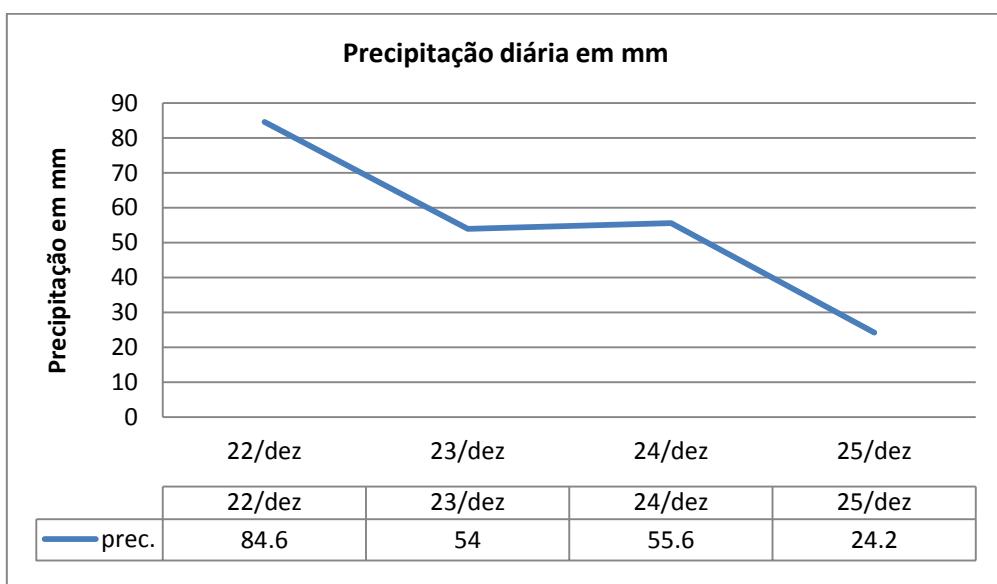


Figura 5.15 – Precipitação diária para o período de 22 a 25 de dezembro de 2010.

De acordo com os resultados da análise realizada, a partir das 19h do dia 22 de dezembro de 2010, o município estaria em estado de atenção, e a partir das 20h do mesmo dia passaria para o estado de alerta, chegando ao alerta máximo às 0h do dia 23 de dezembro de 2010 (Tabelas 5.4 a 5.6).

Tabela 5.4 – Resultados da análise realizada para o dia 22/12/2010 .

Data	Horário	Nível de alerta
22/12/2010	17h	Observação
22/12/2010	18h	Observação
22/12/2010	19h	Atenção
22/12/2010	20h	Alerta
22/12/2010	21h	Alerta
22/12/2010	22h	Alerta
22/12/2010	23h	Alerta

Tabela 5.5 – Resultados da análise realizada para os dias 23/12/2010 e 24/12/2010.

Data	Horário	Nível de alerta	Data	Horário	Nível de alerta
23/12/2010	0h	Alerta máximo	24/12/2010	0h	Alerta
23/12/2010	1h	Alerta máximo	24/12/2010	1h	Alerta
23/12/2010	2h	Alerta máximo	24/12/2010	2h	Alerta
23/12/2010	3h	Alerta máximo	24/12/2010	3h	Alerta
23/12/2010	4h	Alerta máximo	24/12/2010	4h	Alerta
23/12/2010	5h	Alerta máximo	24/12/2010	5h	Alerta
23/12/2010	6h	Alerta máximo	24/12/2010	6h	Alerta
23/12/2010	7h	Alerta máximo	24/12/2010	7h	Alerta
23/12/2010	8h	Alerta máximo	24/12/2010	8h	Alerta
23/12/2010	9h	Alerta máximo	24/12/2010	9h	Alerta
23/12/2010	10h	Alerta máximo	24/12/2010	10h	Alerta
23/12/2010	11h	Alerta máximo	24/12/2010	11h	Alerta
23/12/2010	12h	Alerta máximo	24/12/2010	12h	Alerta
23/12/2010	13h	Alerta máximo	24/12/2010	13h	Alerta
23/12/2010	14h	Alerta máximo	24/12/2010	14h	Alerta
23/12/2010	15h	Alerta máximo	24/12/2010	15h	Alerta
23/12/2010	16h	Alerta máximo	24/12/2010	16h	Alerta
23/12/2010	17h	Alerta máximo	24/12/2010	17h	Alerta
23/12/2010	18h	Alerta máximo	24/12/2010	18h	Alerta
23/12/2010	19h	Alerta máximo	24/12/2010	19h	Alerta
23/12/2010	20h	Alerta	24/12/2010	20h	Alerta
23/12/2010	21h	Observação	24/12/2010	21h	Alerta
23/12/2010	22h	Observação	24/12/2010	22h	Alerta
23/12/2010	23h	Alerta	24/12/2010	23h	Alerta

Tabela 5.4 – Resultados da análise realizada para o dia 25/12/2010 .

Data	Horário	Nível de alerta
25/12/2010	0h	Atenção
25/12/2010	1h	Observação
25/12/2010	2h	Observação
25/12/2010	3h	Observação
25/12/2010	4h	Normal

Ressalta-se que, os dados utilizados são de um único pluviômetro do SIMERJ, o que permite que seja realizada apenas uma análise baseada em PCD

(Plataforma de coleta de dados). Assim, não é possível criar uma regra que leve em consideração as classes de suscetibilidade do município, estabelecendo a diferença do nível de alerta de acordo com o nível de suscetibilidade. Para isso, seriam necessários dados de precipitação obtidos por satélite, que não estão disponíveis para o período analisado.

No mês de janeiro, ocorreu outro pico de precipitação nos dias 11 e 12 (Figura 5.16), chegando a 326 mm. Os escorregamentos ocorreram na madrugada do dia 12, que foi o horário que concentrou a maior parte da chuva deste dia.

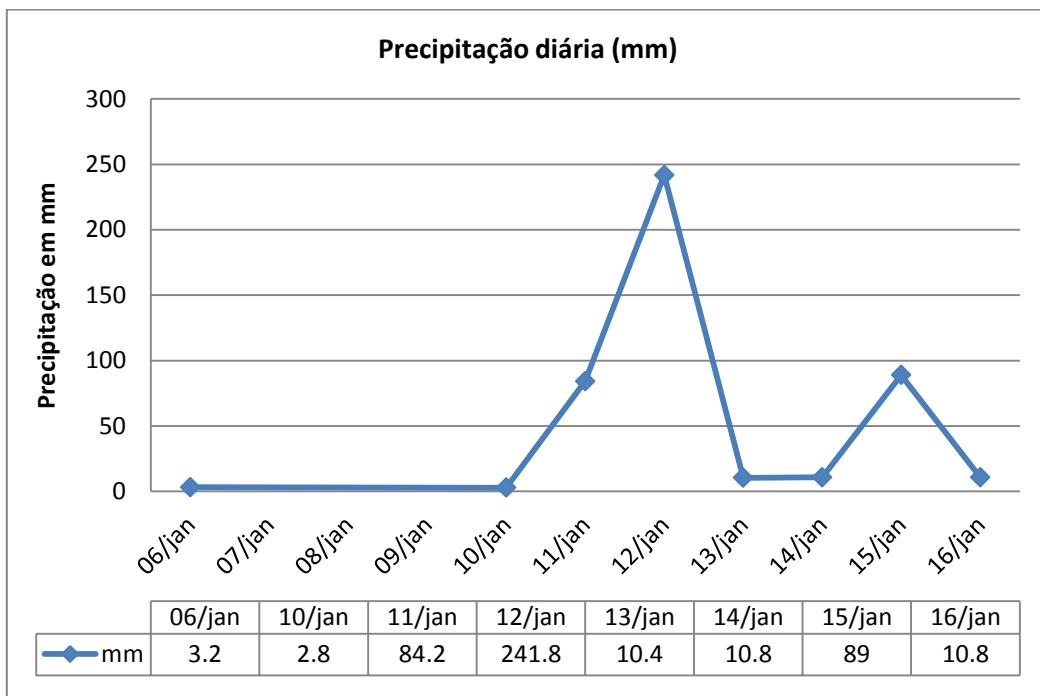


Figura 5.16 – Precipitação diária no período de 06 a 16 de janeiro de 2011.

Os resultados da análise do TerraMA<sup>2</sup> indicam que a partir das 9h do dia 11 de janeiro de 2011 o município estaria em estado de atenção, passando para estado de alerta às 11h, e chegando ao alerta máximo à 0h do dia 12 de janeiro de 2011 (Tabelas 5.5 a 5.7).

Tabela 5.5 – Resultados da análise realizada para o dia 11/01/2011.

Data	Horário	Nível de alerta
11/01/2011	8h	Observação
11/01/2011	9h	Atenção
11/01/2011	10h	Atenção
11/01/2011	11h	Alerta
11/01/2011	12h	Alerta
11/01/2011	13h	Alerta
11/01/2011	14h	Alerta
11/01/2011	15h	Alerta
11/01/2011	16h	Alerta
11/01/2011	17h	Alerta
11/01/2011	18h	Alerta
11/01/2011	19h	Alerta
11/01/2011	20h	Alerta
11/01/2011	21h	Alerta
11/01/2011	22h	Alerta
11/01/2011	23h	Alerta

Tabela 5.6 – Resultados da análise realizada para o dia 12/01/2011.

Data	Horário	Nível de alerta
12/01/2011	0h	Alerta máximo
12/01/2011	1h	Alerta máximo
12/01/2011	2h	Alerta máximo
12/01/2011	3h	Alerta máximo
12/01/2011	4h	Alerta máximo
12/01/2011	5h	Alerta máximo
12/01/2011	6h	Alerta máximo
12/01/2011	7h	Alerta máximo
12/01/2011	8h	Alerta máximo
12/01/2011	9h	Alerta máximo
12/01/2011	10h	Alerta máximo
12/01/2011	11h	Alerta máximo
12/01/2011	12h	Alerta máximo
12/01/2011	13h	Alerta máximo
12/01/2011	14h	Alerta máximo
12/01/2011	15h	Alerta máximo
12/01/2011	16h	Alerta máximo
12/01/2011	17h	Alerta máximo
12/01/2011	18h	Alerta máximo
12/01/2011	19h	Alerta máximo
12/01/2011	20h	Alerta máximo
12/01/2011	21h	Alerta máximo
12/01/2011	22h	Alerta máximo
12/01/2011	23h	Alerta máximo

Tabela 5.7 – Resultados da análise realizada para o dia 13/01/2011.

Data	Horário	Nível de alerta
13/01/2011	0h	Alerta máximo
13/01/2011	1h	Alerta máximo
13/01/2011	2h	Alerta máximo
13/01/2011	3h	Alerta máximo
13/01/2011	4h	Alerta máximo
13/01/2011	5h	Alerta máximo
13/01/2011	6h	Alerta
13/01/2011	7h	Atenção
13/01/2011	8h	Observação
13/01/2011	9h	Observação

Ao realizar a mesma análise utilizando os dados do modelo BRAMS e o mapa de suscetibilidade por setor censitário (Figura 5.17), é gerado um cenário de atenção, nas áreas de muito baixa suscetibilidade, e de alerta nas demais áreas, para o dia 11 de janeiro de 2011. Para o dia 12 de janeiro de 2011, as áreas de muito baixa suscetibilidade estariam em estado de alerta e as demais áreas em alerta máximo (Figuras 5.18, 5.19 e 5.20).

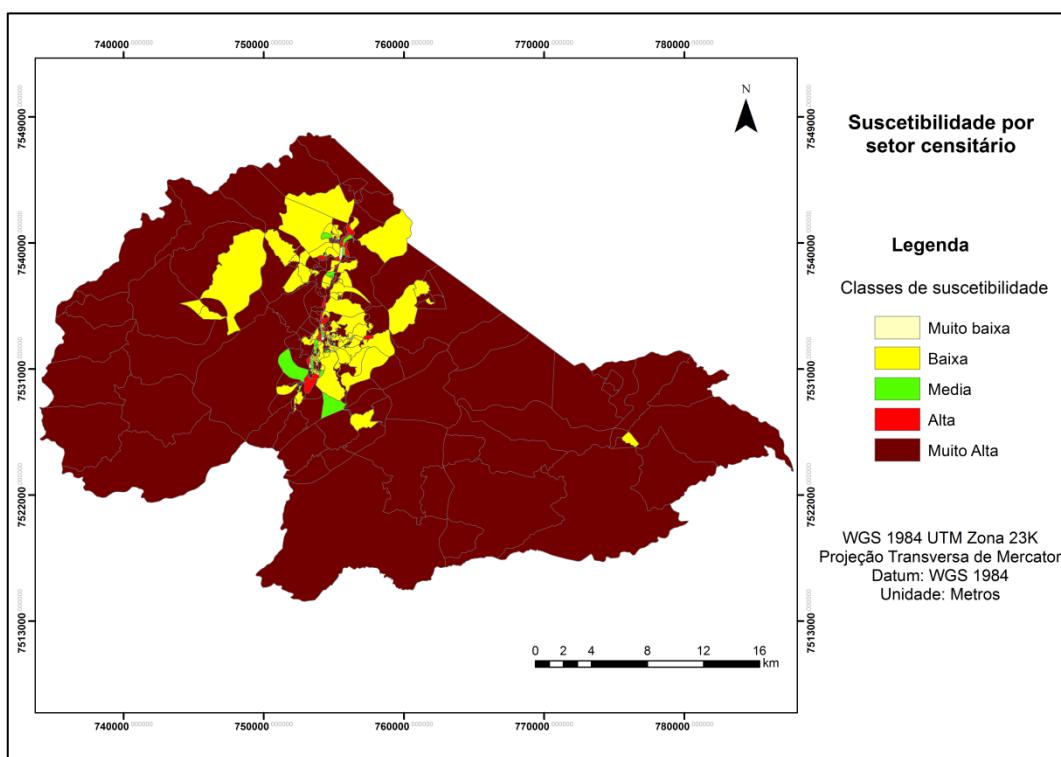


Figura 5.17 – Suscetibilidade por setor censitário.

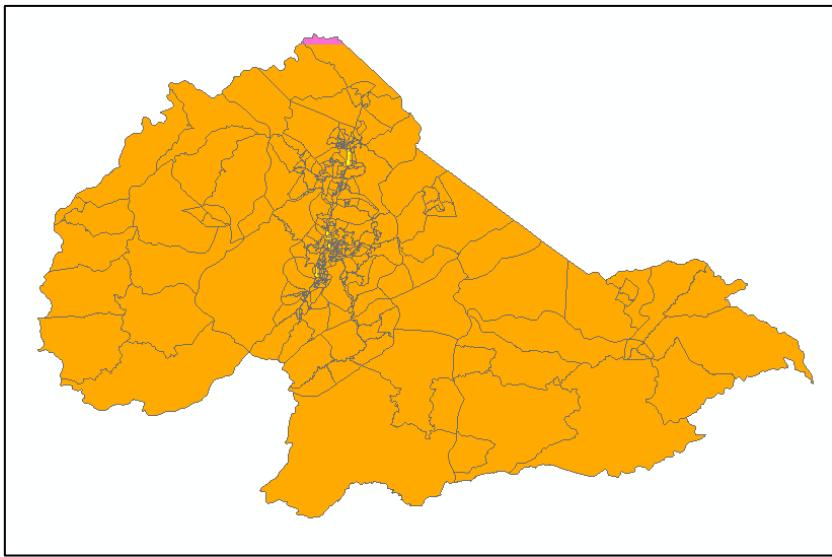


Figura 5.18 – Resultado da análise que utilizou o modelo BRAMS (precipitação acumulada em 24 horas) para o dia 11/01/11.

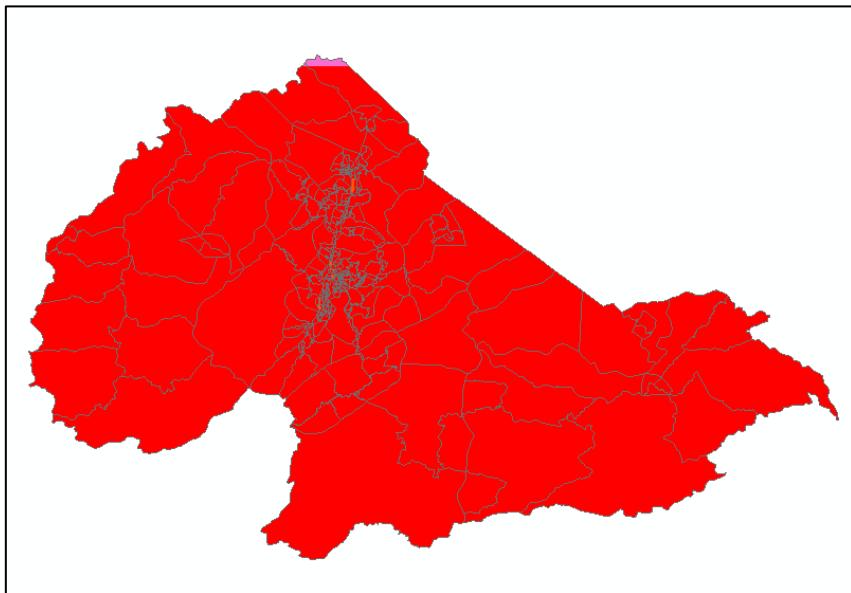


Figura 5.19 – Resultado da análise que utilizou o modelo BRAMS (precipitação acumulada em 24 horas) para o dia 12/01/11.

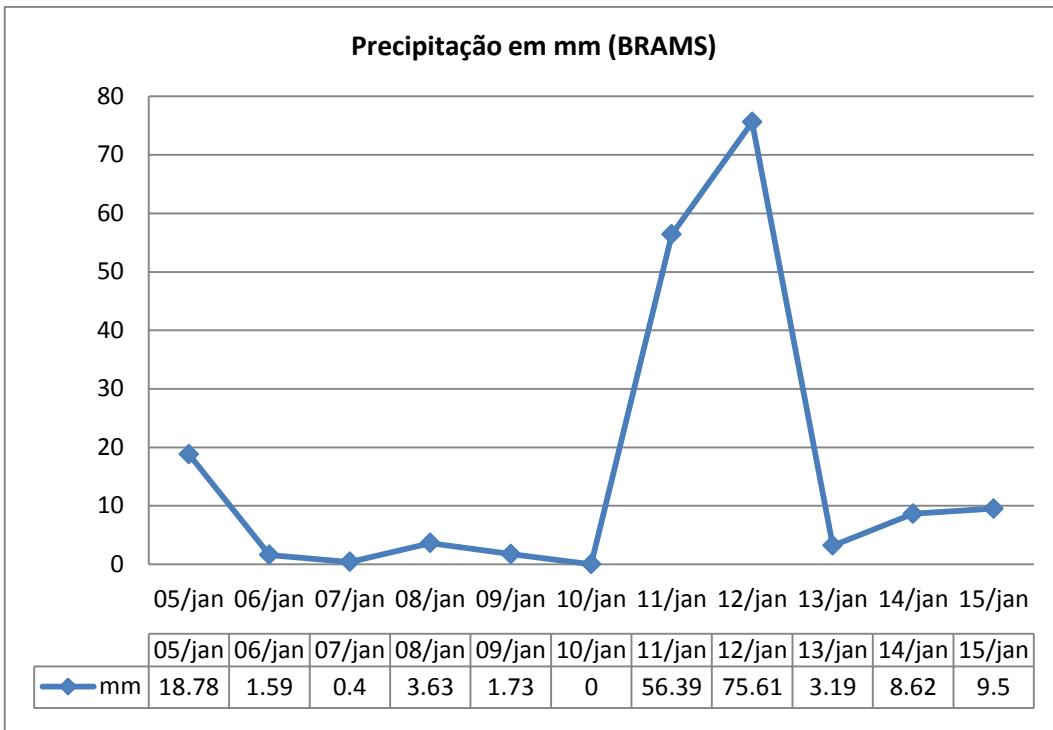


Figura 5.20: Precipitação em mm entre os dias 05 e 15 de janeiro de 2011.

De maneira distinta aos dados de pluviômetro, ao utilizar os dados do BRAMS, é possível realizar a análise diferenciando as classes de suscetibilidade (muito baixa e alta). A limitação desse dado deve-se à sua resolução espacial (20 km) e temporal (uma medida diária).

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O uso do operador *Fuzzy Gama* possibilitou a integração de diversos dados, não tratando os limites entre as classes de maneira rígida, além de permitir a análise de diferentes cenários por meio da variação do índice gama. A análise dos mapas de cicatrizes dos escorregamentos de 2011 e de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo, obtido com o método aplicado, mostra coerência parcial entre os dois resultados obtidos.

Apesar de o setor urbano do município estar situado em uma área de suscetibilidade baixa, ele é muito vulnerável, pois no seu entorno encontram-se vertentes íngremes e suscetíveis a escorregamentos. Trata-se de uma área mais baixa e com declividades inferiores que a do seu entorno, onde podem ocorrer processos de transporte e deposição do material movimentado à montante.

Nesse sentido, acredita-se que outro fator importante para trabalhos de avaliação e previsão de riscos é o diagnóstico do percurso, alcance e depósito das corridas de massa. Em Nova Friburgo, as áreas prováveis de deposição do material movimentado são vulneráveis, pois possuem uma elevada densidade populacional.

Acredita-se, com base nos dados analisados, que a grande quantidade de chuva concentrada em poucas horas foi o fator determinante nos escorregamentos de 2011. Entre as demais variáveis, a declividade e a forma do terreno (côncavo-divergente) foram as que tiveram maior influência nos escorregamentos ocorridos em Nova Friburgo em janeiro de 2011.

Dos dados utilizados nesta pesquisa, a precipitação por pluviômetro foi importante na elaboração dos limiares críticos a escorregamentos, mas, como se refere apenas aos dados observados, limita a análise, não permitindo a diferenciação do nível de alerta pela classe de

suscetibilidade. Além disso, os valores utilizados eram de um único pluviômetro para toda a cidade, o que generaliza a análise para toda a área de estudo.

Para ser eficaz, o alerta deve ser emitido com antecedência suficiente para que ações sejam tomadas para prevenir o desastre natural. Para isso, é necessário aliar aos dados de observação os de previsão com uma maior resolução espacial e temporal, como os dados do ETA-05 e do Radar Pico do Couto-RJ, por exemplo. Assim, é possível elaborar uma análise que consiga agregar à chuva acumulada, a precipitação prevista, indicando em que momento o limiar será ultrapassado.

Os dados do modelo BRAMS não se mostraram adequados para este trabalho, pois representam valores de precipitação com resolução espacial de 20 km e frequência diária. Conforme salientado anteriormente, as análises precisam de dados dinâmicos que permitam que o alerta seja emitido antecipadamente, o que se torna inviável com os dados utilizados.

### **6.1. Recomendações**

- Utilizar os limiares críticos a escorregamentos em um banco de dados de operação no TerraMA<sup>2</sup>, para monitorar a precipitação em Nova Friburgo no período chuvoso.
- Acrescentar ao banco de operação dados dinâmicos, como o ETA-05, Hidroestimador e radar Pico do Couto, e elaborar novas análises.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALERTA RIO. **Alertas de chuvas.** Rio de Janeiro: Sistema Alerta Rio, 2013. Disponível em: <<http://www.sistema-alerta-rio.com.br>>. Acesso em 20 Jan. 2013.

AMARAL, C.; LIMA I. F.; VAREJÃO, L. C.; SANTANA, M. Carta de risco remanescente a escorregamentos no município de Teresópolis, após o Megadesastre '11 da Região Serrana, In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 12, Nova Friburgo, RJ. **Anais...** São Paulo: SBG, 2011.

AYALA, I.A. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v.47, n.2, p. 107-124, out. 2002.

BAGGIO, H.; HORN, H.A. Geological risks in Brazil: The mountainous region of Rio de Janeiro. In: BREITKREUZ, C.; GURSKY, H.J (org). **Geo-risk management:** a German Latin American approach. Germany: Technische Universität Bergakademie, 2011.

BALDUCCI, V. **Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides.** Roma: Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, 2013. Disponível em: <<http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it/>>. Acesso em: 30 Abr. 2013.

BARBOSA, C. C.; CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S.; CREPANI, E.; NOVO, E. M. L. M.; CORDEIRO, J. P. C. Operadores zonais em álgebra de mapas e sua aplicação a zoneamento ecológico-econômico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. (SBSR), 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 487-500. CD-ROM. ISBN 85-17-00015-3. (INPE-6900-PRE/2867). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.08.11.17>. Acesso em: 22 ago. 2012.

BARBOSA, Z. N. T.; OLIVEIRA, W. N.; ALVES, P. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de riscos Estudo de caso: Angra dos Reis -RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 4940-4947. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em:<<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/3A5D2GP>>. Acesso em: 12 set. 2012.

BARNETCHE, D.; MORETTI, S.D. Mapeamento de risco de deslizamentos e enchentes da Bacia do Rio Vadik: aspectos físicos e de ocupação urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., Florianópolis, SC. **Anais...** São Paulo: Fapesp/UFSC, 2004.

**BLAHUT, J. Debris flow hazard and risk analysis at medium and local scale.** 2010. 250p. Tese (Ph.D. Program in Environmental Sciences) – University of Milano, Biccoca, 2010.

BISPO, P. C.; ALMEIDA, C. M.; VALERIANO, M. M.; MEDEIROS, J. S.; CREPANI, E. Análise da Suscetibilidade aos Movimentos de Massa em São Sebastião/SP com o uso de métodos de inferência espacial. **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 467-478, 2011.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists:** Modeling with GIS. Ontario: Pergamon, 1994. 398p.

**BORTOLOTI, F.D. Redes neurais com topologias otimizadas aplicadas na modelagem de dados geotécnicos e pluviométricos para predição de deslizamentos de solo.** 2012. 211p. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES, 2012.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems.** Oxford: Oxford University Press, 1998. 333p.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001. 344 p. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43>>. Acesso em: 12 set. 2012.

CAMARGO, F. F.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G.; CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. Avaliação dos Métodos Booleano, Fuzzy Gama e Bayesiano na Identificação de Áreas Suscetíveis a Movimentos de Massa no Município de São Sebastião/SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 12., Natal, RN. **Anais...** 2007. CD-ROM. Disponível em: <<http://www.cchla.ufrn.br/sbgfa12/>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

CARMO, R.L; HOGAN, D.J.; OLIVEIRA, A. A. B. Urbanização e vulnerabilidade sócio-ambiental: o caso de Campinas. In: HOGAN, D.J.; CUNHA, J.M.P.; CARMO, R.L.; BAENINGER, R. (org). **Migração e Ambiente nas Aglomerações Urbanas.** Campinas: NEPO/UNICAMP, 2001.

CARVALHO FILHO, A.; LUMBRERAS, J.F.; WITTERN, K.P.; LEMOS, A.L.; SANTOS, R.D.; CALDERANO FILHO, B.; CALDERANO, S.B.; OLIVEIRA, R.P., AGLIO, M.L.D.; SOUZA, J.S.; CHAFFIN, C.E. **Carta de reconhecimento de baixa intensidade dos solos dos estado do Rio de Janeiro – Folha SF-23-Z-B** (Rio de Janeiro). Escala 1:250.000. Campinas: Embrapa, 2003.

- CHAVEZ, P. S.; SIDES, S. C.; ANDERSON, J. A. Comparison of three difference methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 57, n. 3, p. 295-303, mar. 1991.
- COELHO NETTO, A.L.; SATO, A.M.; AVELAR, A.S.; VIANNA, L.G.G.; ARAÚJO I.S.; FERREIRA, D.L.C.; LIMA, P.H.; SILVA, R.P. January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. In: Second World Landslide Forum, 2, Roma, Italy. **Proceedings...** Roma, 2011.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 101 p. (INPE-8454-RPQ/722).
- DAI, F.C.; LEE, C.F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. **Engineering Geology**, v. 59, n.2, p. 253-366, 2001.
- DANTAS, M. E. **Mapa geomorfológico do estado do Rio de Janeiro**. Escala 1:500.000. Rio de Janeiro: CPRM, DRM/RJ, 2001.
- DAVIDOVICH, F. R. Considerações sobre a urbanização no Brasil. In: BECKER, B. K. et al. (Org.). **Geografia e meio ambiente no Brasil**. 3 ed. São Paulo: Hucitec; Annablume, 2002, p. 79-96.
- DIAS, L.F.; LIMA, P.H.F. Mapeamento da espacialidade dos deslizamentos no município de Nova Friburgo – RJ. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** São Paulo: UGB, 2012.
- DISASTER CHARTER. **International Charter: Space and major disasters**. 2013. Disponível em: <<http://www.disasterscharter.org>>. Acesso em: 15 Fev. 2013.
- D'ORSI, R.N. **Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ (Rio-Teresópolis)**. 2011. 287p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2011.
- EMBRAPA. **Sistemas orbitais de monitoramento e gestão territorial**. Rio de Janeiro: Embrapa Monitoramento por Satélite, 1999. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 30 Jan. 2012.
- ENGELBRECHT, A.; JATOBÁ, A.; SILVA, A.J.D.; GOMES, J.O. A análise do trabalho dos meteorologistas na previsão de chuvas intensas no Rio de Janeiro. **Ação Ergonômica**, v.06, n.02, p. 11-17, 2011.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (org.) – **Geomorfologia e Meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FRANCISCO, C.N.; ALMEIDA, C.M. Avaliação de desempenho de atributos estatísticos e textuais em uma classificação de cobertura da terra baseada em objeto. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.18, n.2, p.302-326, 2012

GARATWA, W; BOLLIN, C. **Disaster risk management**: working concept. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2002. 48p. Disponível em: <<http://www2.gtz.de/dokumente/bib/02-5001.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

GILLESPIE, T.W.; CHU, J.; FRANKENBERG, E.; THOMAS, D. Assessment and Prediction of Natural Hazards from Satellite Imagery. **Progress in Physical Geography**, v.5, n.31, p. 459–470, 2007.

GOMES, R.A.T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa**. 2006. 102p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2006.

GUERRA, A.J.T.; GONÇALVES, L.F.H.; LOPES, P.B.M. Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, p.35-43, 2007.

GUHA-SAPIR, D.; VOS, F.; BELOW, R. **Annual disaster statistical review 2010**: the numbers and trends. Belgium: CRED, 2010. 50p. Disponível em: <[http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR\\_2010.pdf](http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2012

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1976.

GUIDOLINI, L.; EIRADO, L.G.; FRAIFELD, F.; MOTTA, M.; AMARAL, C. Os movimentos de massa do Megadesastre de Janeiro de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro: uma avaliação dos condicionantes

geológicos. In: SIMPOSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** São Paulo: UGB, 2012.

GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. (org) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe. **Meteorology and Atmospheric Physics** (online version), v. 98, n.2, p.239-267, 2007.

HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook** - A guide to understanding landslides. Reston, Virginia, EUA: Geological Survey Circular 1325, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em 03 Fev. 2012.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **INPE formaliza acordo para uso de imagens de satélites em catástrofes**. São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <[http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=2749](http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2749)>. Acesso em: 28 Abr. 2013.

ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI 4.7**, version 4.7. Boulder: Colorado, EUA, 2009.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R.V.; SCHRODER, P.H.; GRANDO, A.; REGINATTO, G.M. Papel das comunidades e universidades no gerenciamento de desastres naturais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1, 2004, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Fapesp/UFSC, 2004.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LOPES, E.S.S. **Modelagem espacial dinâmica aplicada ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista, na escala de 1:10.000**. 2006. 276p. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2006.

LOPES, E. S. S.; NAMIKAWA, L. M.; REIS, J. B. C. Risco de escorregamentos: Monitoramento e alerta de áreas urbanas nos municípios no entorno de Angra dos Reis - Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E

AMBIENTAL, 13., 2011, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, 2011. v. 1. DVD.

MARCELINO, E.M. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto**. 2004. 228p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004

MARCELINO, E.M.; NUNES, L.H.; KOBIYAMA, M. Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 6, n. 19, p. 130-149, 2006.

MARTINI, L.C.P.; UBERTI, A.A.A.; SCHEIBE, L.F.; COMIN, J.J.; OLIVEIRA, M.A.T. Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em sistemas de informações geográficas. **Revista do Instituto de Geociências**, v. 6, n. 1, p. 41-52, Jul. 2006.

MELONI, R.B.S. **TerraMA<sup>2</sup>**: Manual do usuário versão 3.0.0. São José dos Campos: INPE, 2012. 142p.

MOREIRA, F. R. S. **Uso da avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas**. 2001. 164 p. (INPE-9481-TDI/825). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/10.10.07.29>>. Acesso em: 02 set. 2012.

MOURA, E.F. **Percepção de risco em áreas de população vulnerável a desastres naturais do município do Guarujá – SP**. 2011. 88p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2011.

MUÑOZ, V.A. **Análise comparativa de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de suscetibilidade aos movimentos de massa na região de São Sebastião, São Paulo, Brasil**. 2005. 61p. Monografia (Especialização do XVIII Curso Internacional em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

NERY, T.D. **Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar**. 2011. 170p. Dissertação (Mestrado – Geomorfologia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1979.

PASSARELA, S.M.; MACHADO, F.B.; RIEDEL, P.S.; LOPES, E.S.S.; FERREIRA, M.V.; MOREIRA, M.R.; AZZI, A.A. Análise da relação entre escorregamento e formas de vertentes no município de Cubatão (SP) e seus arredores. **Geociências**, v.27, n.1, p. 7-20, 2008.

PINHO, G.; FRANCISCO, C.; SALGADO, C. Análise espacial dos movimentos de massa ocorridos em 2011 no bairro do Córrego D'Antas – Nova Friburgo/RJ. In: SIMPOSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** São Paulo: UGB, 2012.

PRADHAN, B. Application of an advanced fuzzy logic model for landslide susceptibility analysis. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 3, n. 3, p. 370-381, set. 2010.

RAPHAEL, L. Análise de movimentos de massa no córrego Dantas, Nova Friburgo (RJ). . In: SIMPOSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** São Paulo: UGB, 2012.

REIS, J. B. C.; CORDEIRO, T. L.; LOPES, E.S.S. Utilização do sistema de monitoramento e alerta de desastres naturais aplicado a situações de escorregamentos: caso de Angra dos Reis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 14, 2011, Dourados. **Anais...** Dourados: SBGFA, 2011. p. 4940-4947.

RESTREPO, C.; ALVAREZ, N. Landslides and their contribution to land-cover change in the mountains of Mexico and Central America. **Biotropica**, v. 38, n.4, p. 446–457, 2006.

RSI. **ENVI User's Guide**. ENVI Version 4.0 September, 2003.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P.; NEDEL, A. S.; SAITO, S. M.; MADRUGA, R.; LIMA JUNIOR, E. R.; GALVÃO, M. I. S. Uso de geotecnologias para análise e avaliação dos prejuízos causados pelas inundações no Rio Grande do Sul – Setembro de 2009 a Janeiro de 2010. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 6050-6057. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/39ULTUH>>. Acesso em: 23 jan. 2012.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 3. ed. San Diego, USA: Academic Press, 2007. 515p.

SILVA, M.A. **Aplicação de lógica nebulosa para previsão do risco de escorregamentos de taludes em solo residual**. 2008. 150p.

Dissertação (Mestrado em Geotecnica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, F.F.; LOUREIRO, H.A.S.; SILVEIRA, T.S.; Diagnóstico dos deslizamentos na cidade do Rio de Janeiro a partir das chuvas de abril de 2010: estudo de caso do Morro dos Prazeres. **Revista de Geografia**, v.08, n. 03, p. 180-192, set 2010.

SOETERS, R. & VAN WESTEN, C.J. Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In: TURNER, A.K.; SCHUSTER, R.L. (Eds.). **Landslides, investigation and mitigation**. Washington, EUA: National Academy Press, p. 129-177, 1996.

SUERTEGARAY, M. R. BELLANCA, E.T. FACHINELLO, A. **Terra: feições ilustradas**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. p. 193.

TAVARES, R.; SANT'ANNA NETO, J.L.; TOMMASELLI, J.T.G.; PRESSINOTTI, M.M.N.; SANTORO, J. Análise da variabilidade temporal e espacial das chuvas associada aos movimentos de massa no litoral norte paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 680-696.

THIERY, Y. MALET, J.P. MAQUAIRE, O. Test of fuzzy logic rules for landslide susceptibility assessment. In: COLLOQUE INTERNATIONAL DE GÉOMATIQUE ET D'ANALYSE SPATIALE RECHERCHES & DÉVELOPPEMENTS (SAGEO). n. 1, 2006, Strasbourg, France, **Proceedings...** Strasbourg, 2006. p. 01-16.

TOMINAGA, L.K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos:** aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP. 2007. 240p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2007.

TOMINAGA, L.K. Análise e mapeamento de risco. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org). **Desastres naturais:** conhecer para prevenir. São Paulo: 2009. 196p. Disponível em: <<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em 20 jan. 2012.

TUPINAMBÁ, M.; SILVA, L.C.; HEILBRON, M.; FERRASSOLI, M.A. **Geologia e recursos minerais da folha Nova Friburgo SF. 23-Z-B-II, estado do Rio de Janeiro.** Escala: 1:100.000. Belo Horizonte: CPRM, 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC). **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010:** volume Rio de Janeiro.

Florianópolis: UFSC. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: UFSC, 2011.

UN-ISDR. **Living with risk**: A global review of disaster reduction initiatives. United Nations. Genebra, Suíça: UN, 2004. 457p. Disponível em: <<http://www.unisdr.org/we/inform/publications/657>>. Acesso em: 03 jan. 2012.

VALERIANO, M. M. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/33EPEBL>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

VAN WESTEN, C.J.; VAN ASCH, T.W.J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation – why is it so difficult?. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 65, n.2, p. 167-184, mai. 2006.

VAN WESTEN, C.J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S.L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 65, n.3, p. 112-131, dez. 2008.

VIEIRA, B.C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007. 193p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2007.

XAVIER, C.; SILVA, W.B. A importância da meteorologia da defesa civil do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza, CE. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2004.



## APÊNDICE A – MAPAS DE SUSCETIBILIDADE COM DIFERENTES VALORES DE GAMA.

As Figuras A.1 a A.7 apresentam os cenários de suscetibilidade gerados com diferentes valores do índice gama.

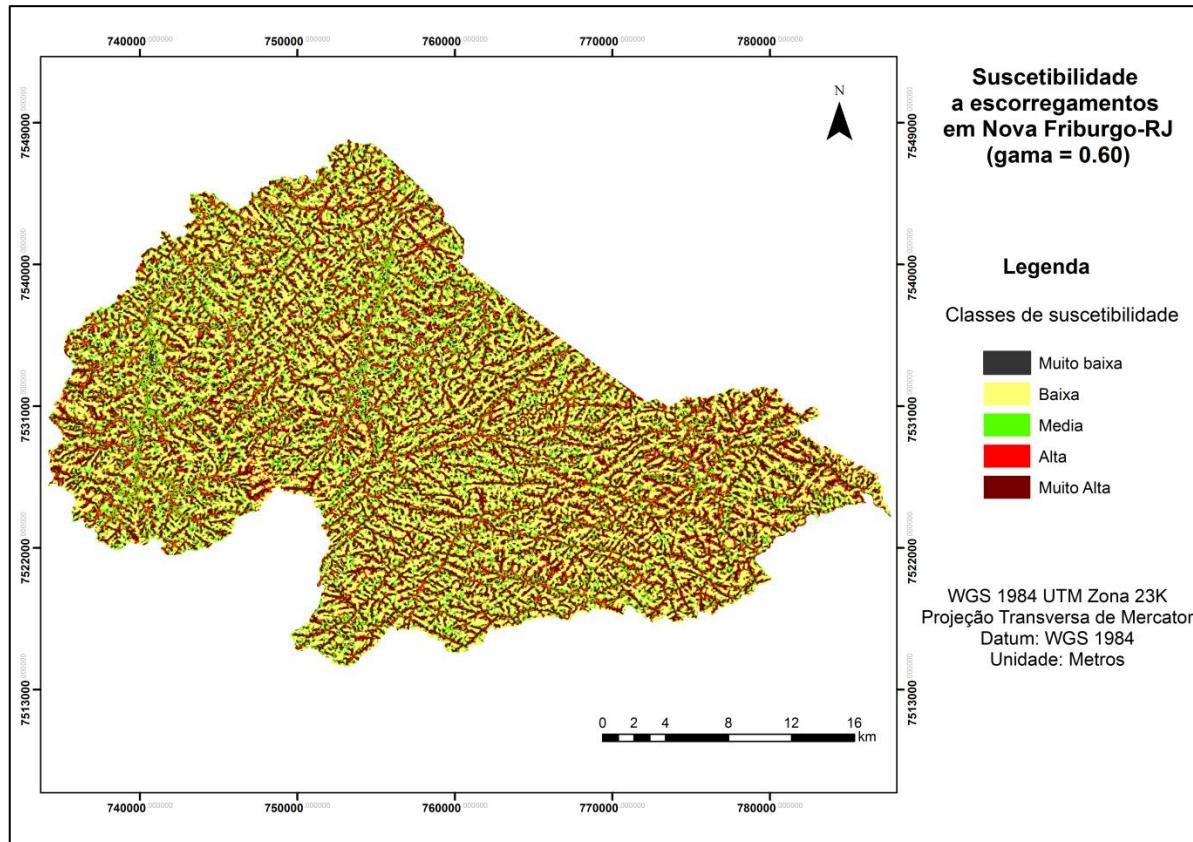


Figura A.1 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.60).

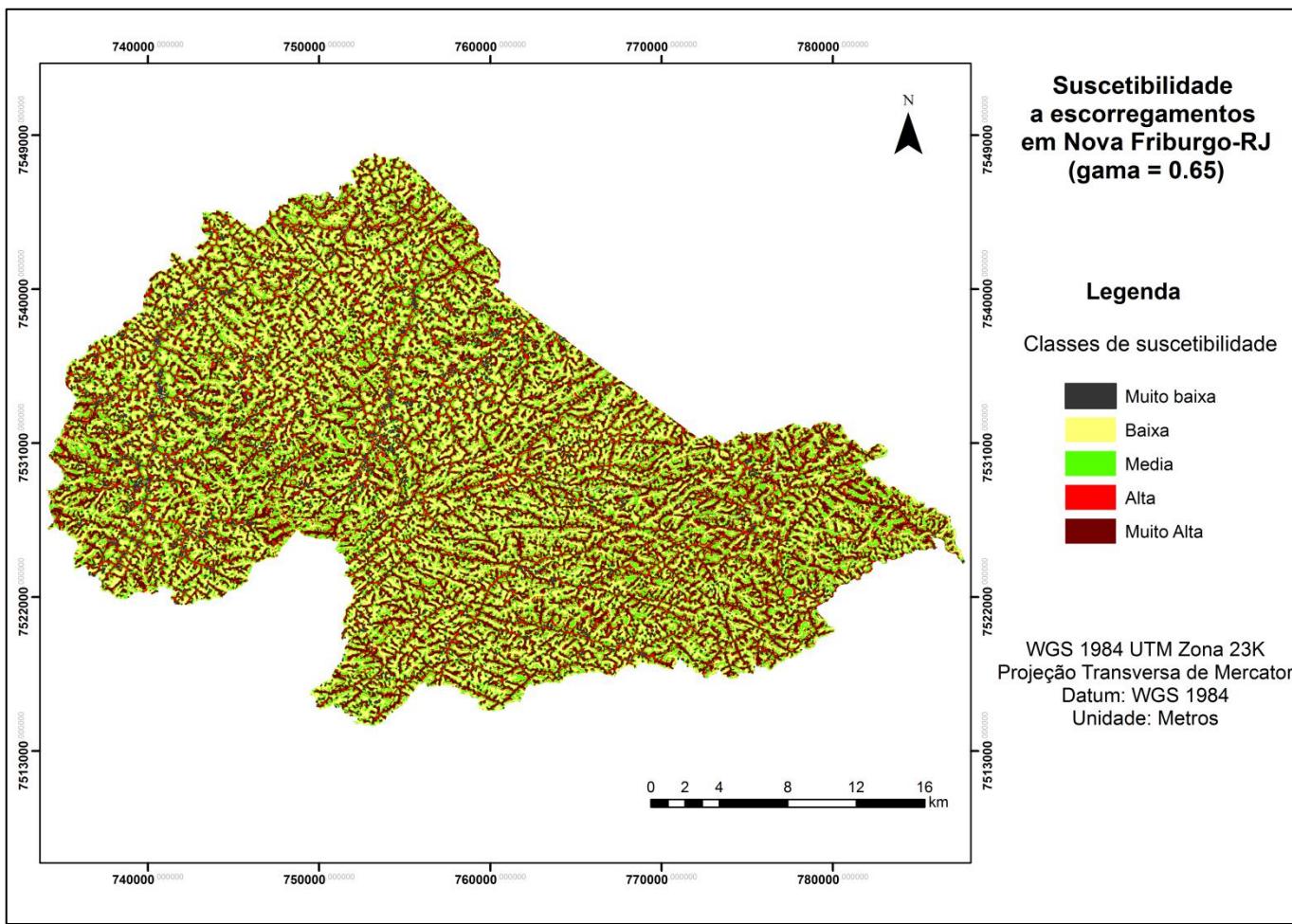


Figura A.2 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.65).

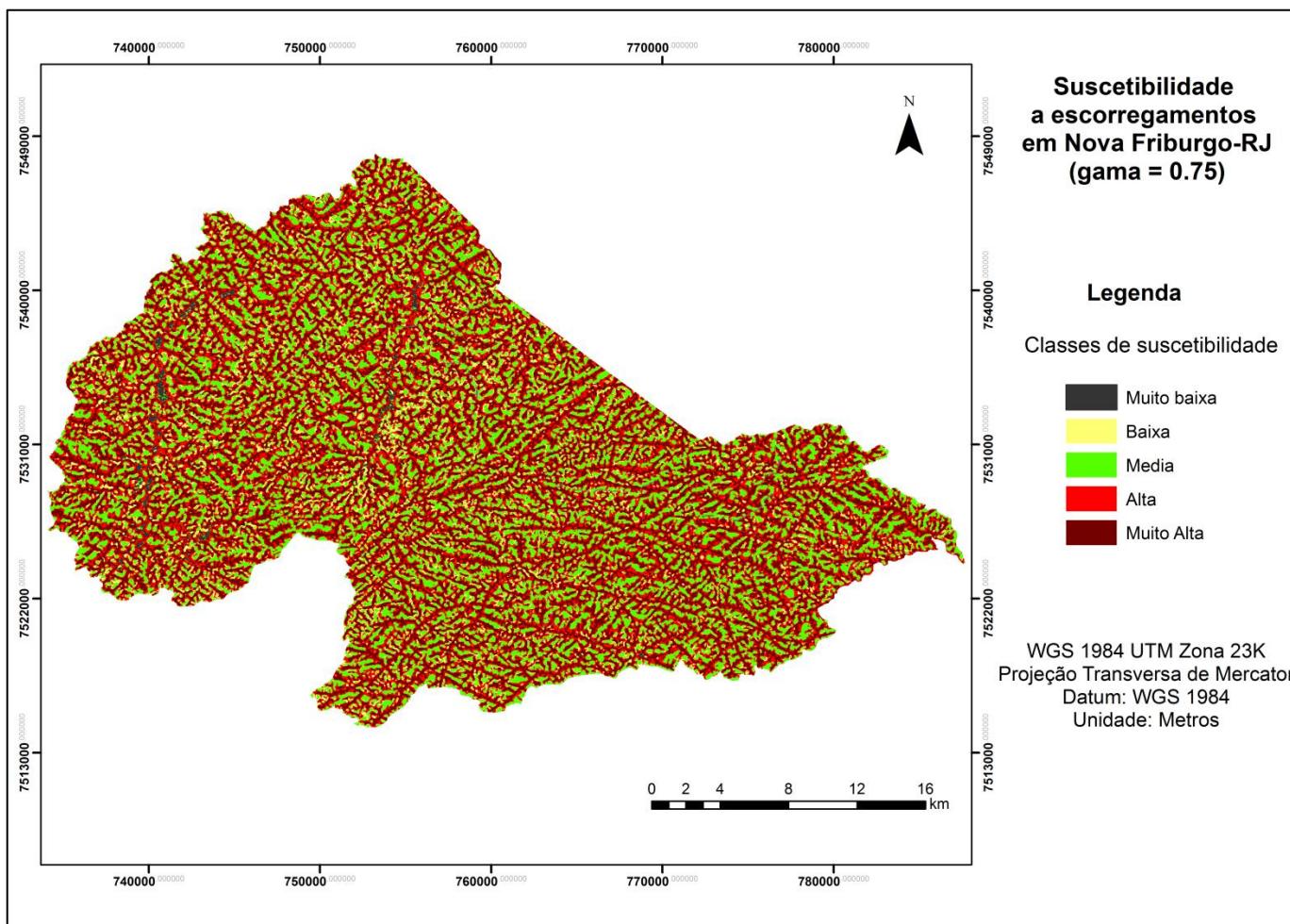


Figura A.3 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.75).

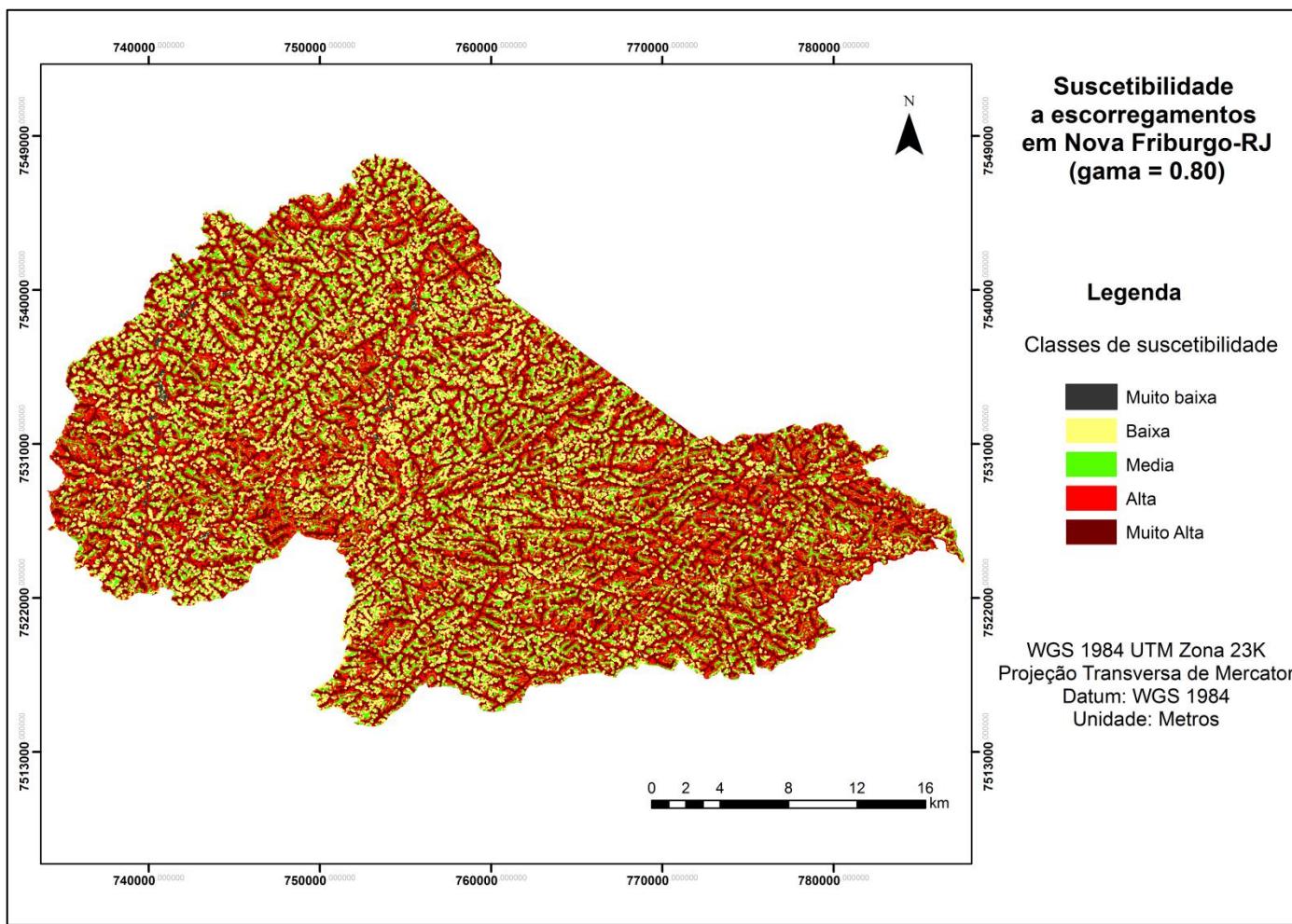


Figura A.4 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.80).

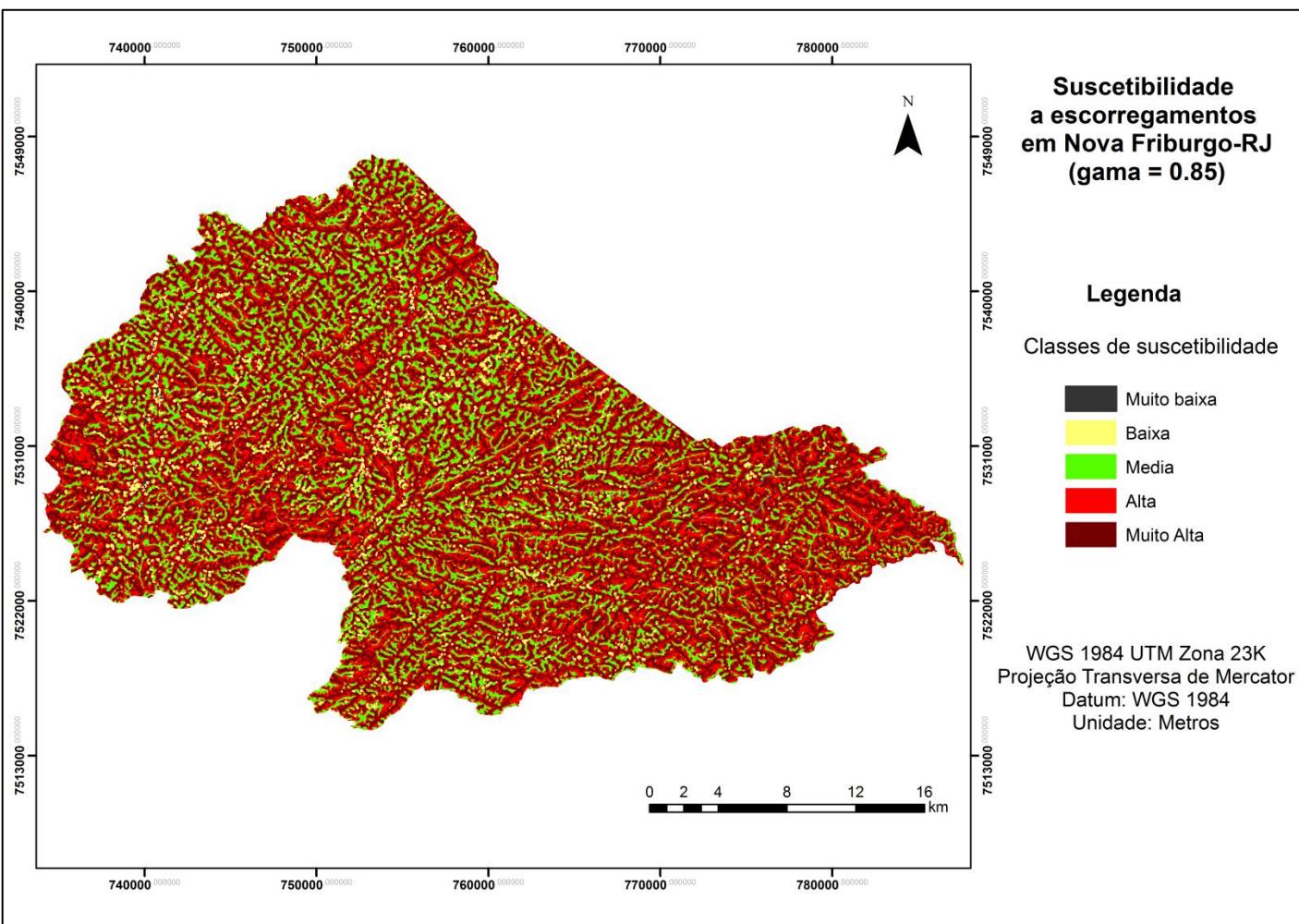


Figura A.5 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.85).

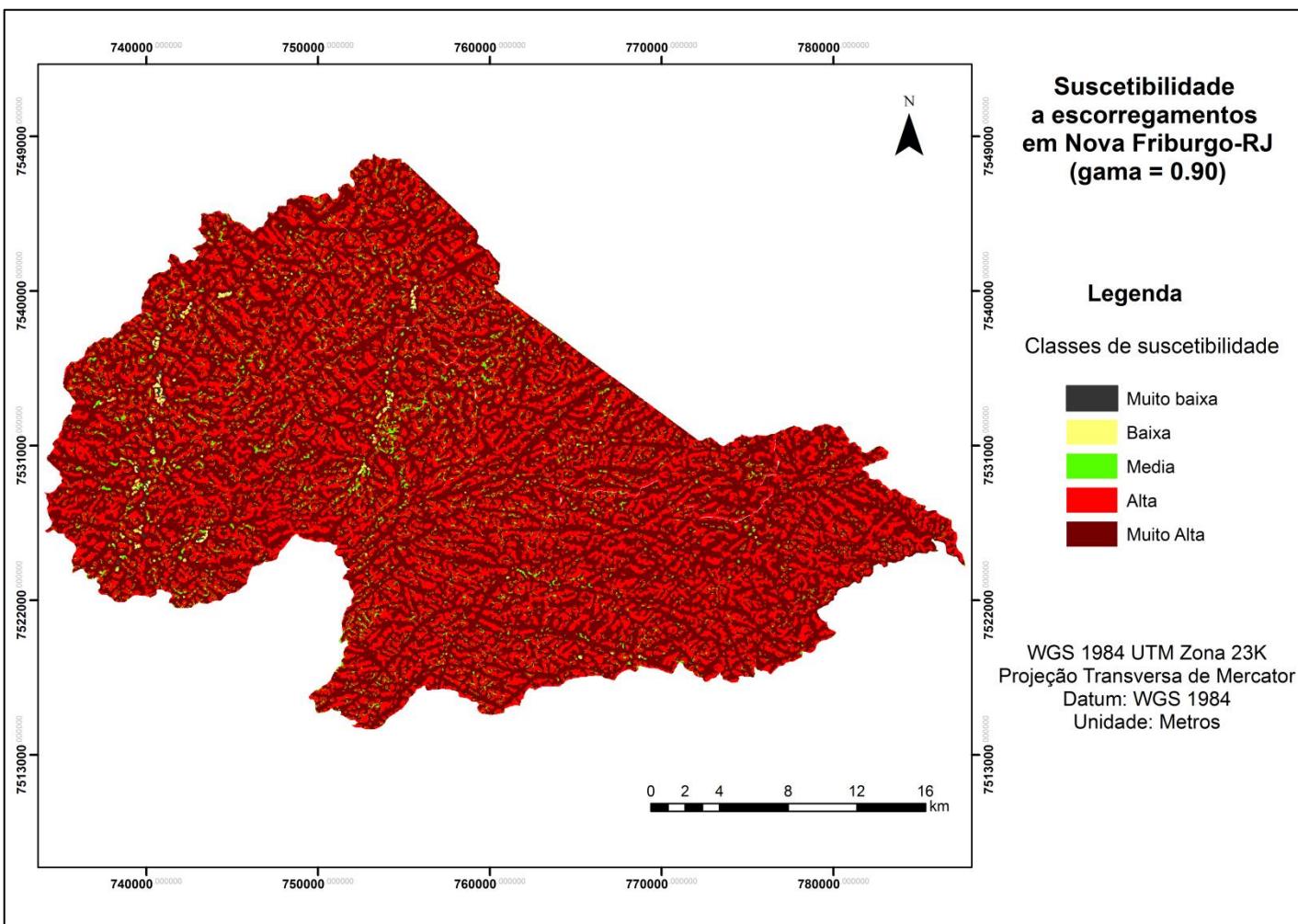


Figura A.6 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.90).

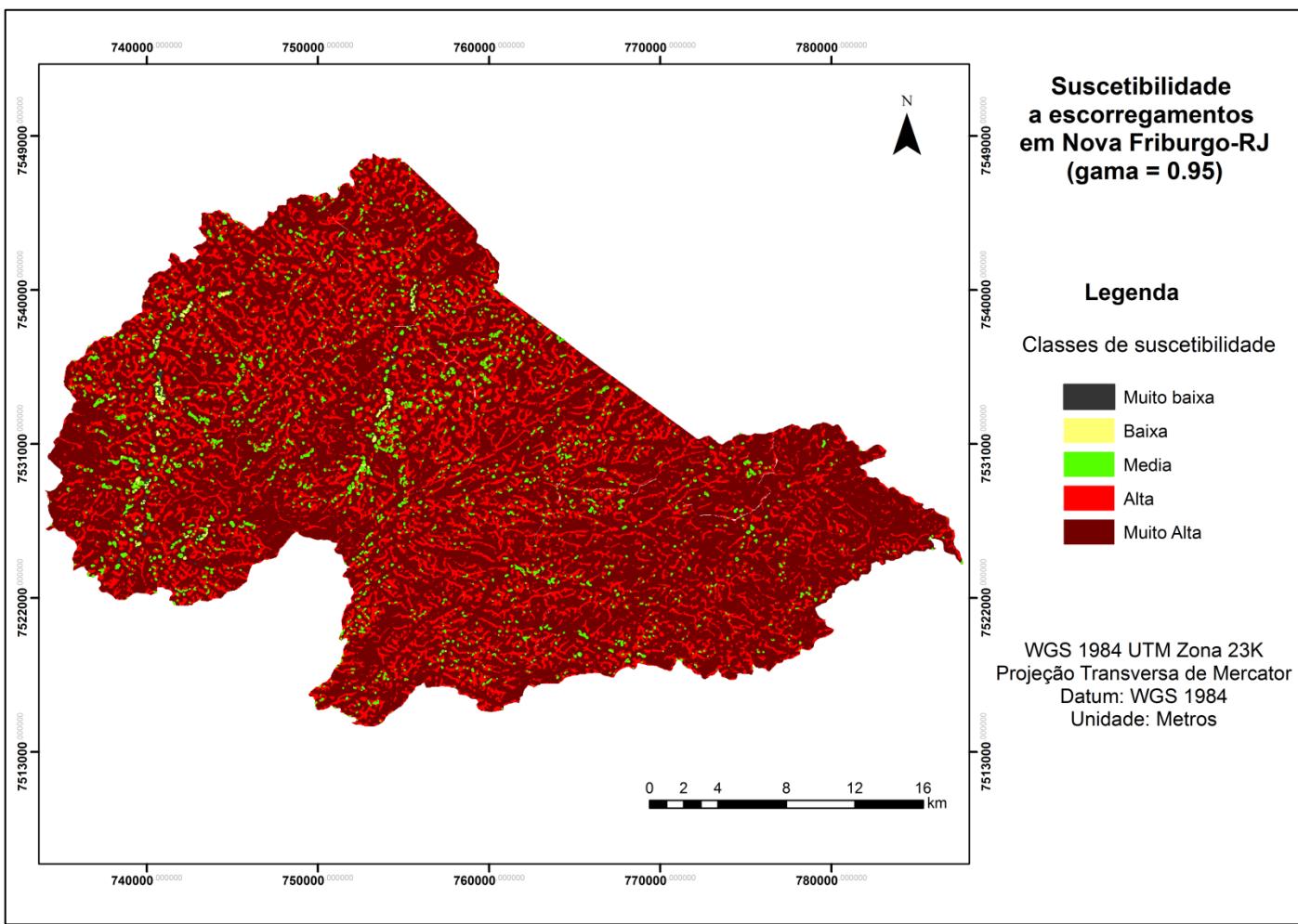
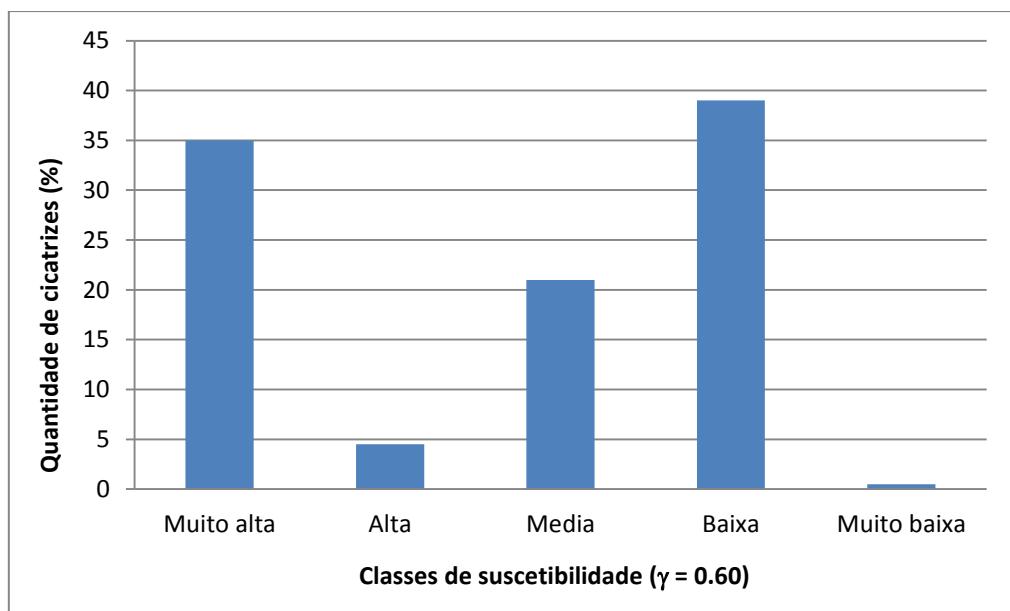


Figura A.7 – Mapa de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo (gama = 0.95).



## **APÊNDICE B – OCORRÊNCIA DE CICATRIZES NAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE, NOS MAPAS COM DIFERENTES VALORES DE GAMA.**

Os gráficos apresentados abaixo (Figuras B.1 a B.7) demonstram a quantidade de cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas diferentes classes de suscetibilidade, em cada um dos cenários gerados com a variação do valor de gama.



**Figura B.1 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.60).**

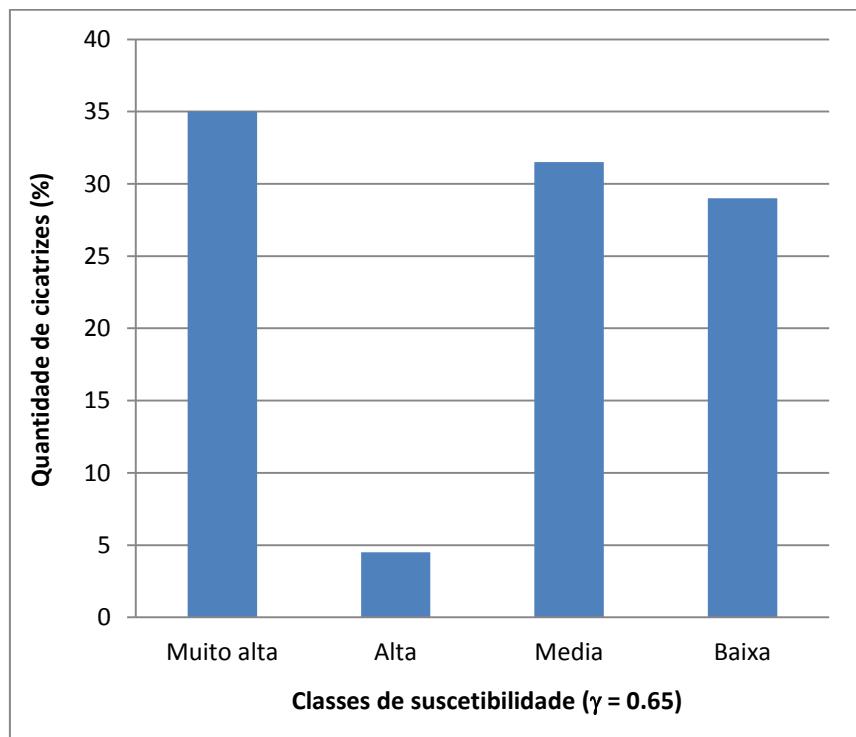


Figura B.2 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.65).

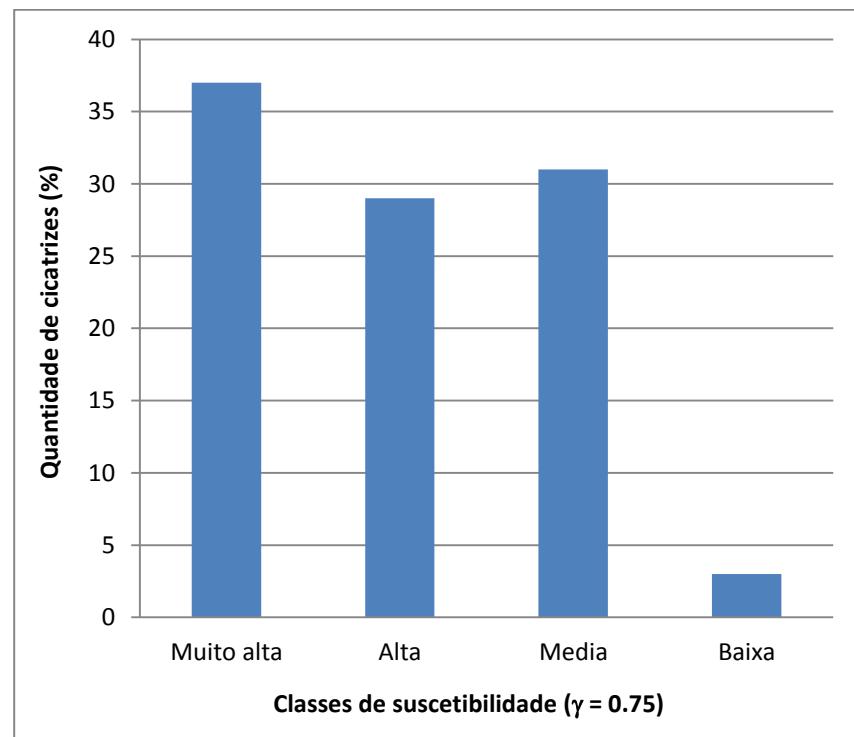


Figura B.3 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.75).



Figura B.4 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.80).

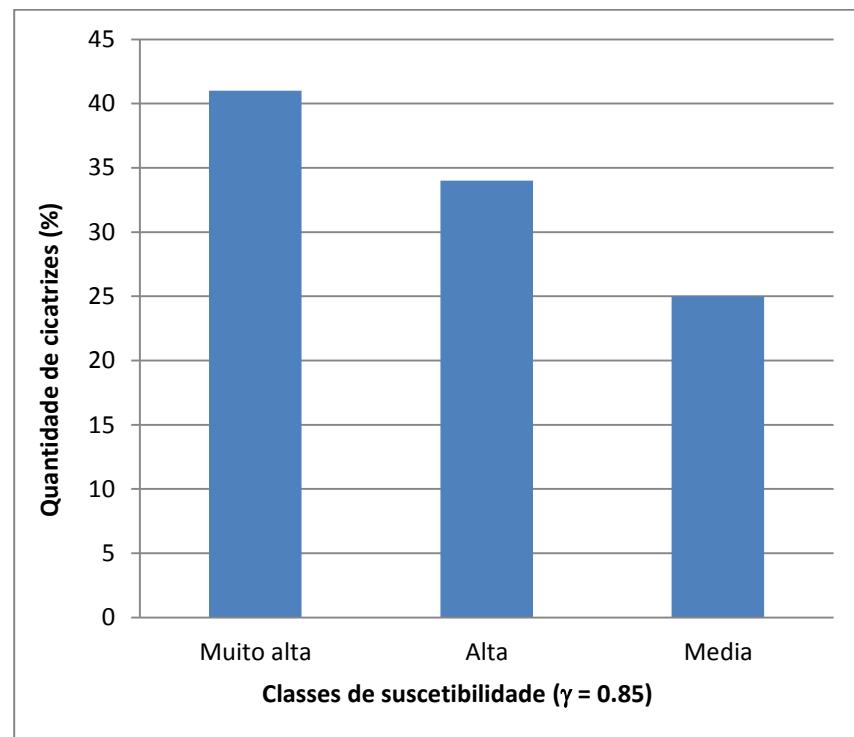


Figura B.5 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.85).

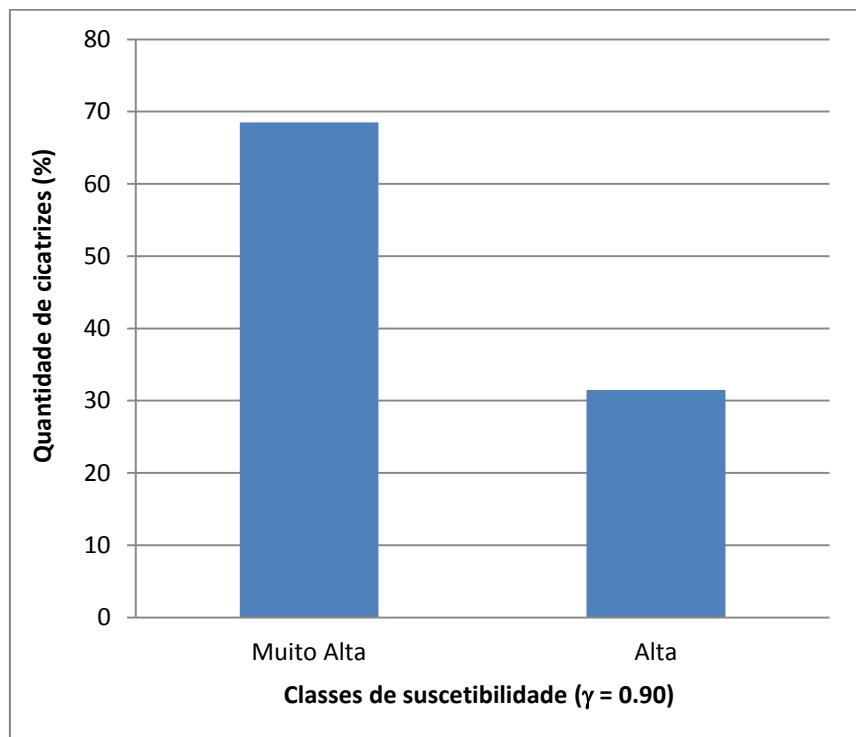


Figura B.6 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.90).

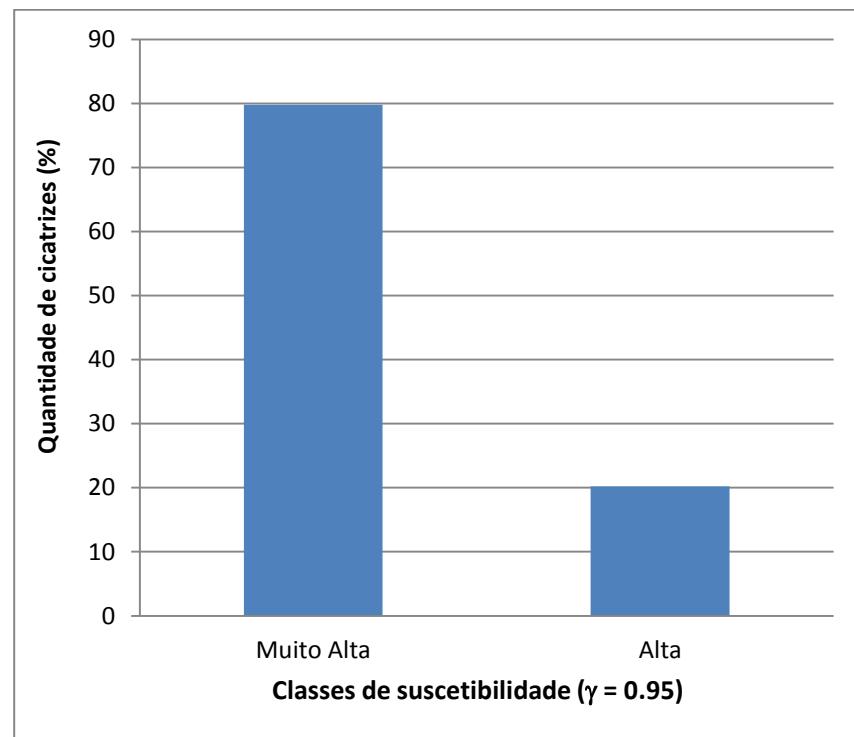


Figura B.7 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos de 2011 nas classes de suscetibilidade a escorregamentos (valor de gama igual a 0.95).

## APÊNDICE C – PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA OS DIAS 10 A 13 DE JANEIRO, SEGUNDO DADOS DO BRAMS.

As Figuras C.1 a C.4 foram geradas com base na precipitação média observada e prevista pelo modelo Brams.

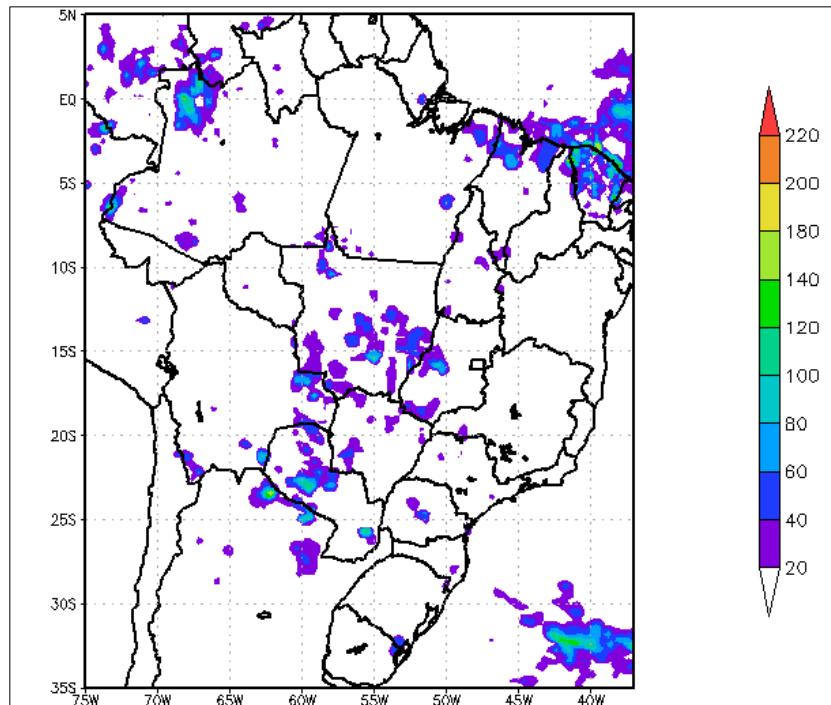


Figura C.1 – Precipitação acumulada para o dia 10 de janeiro de 2011 (em mm).

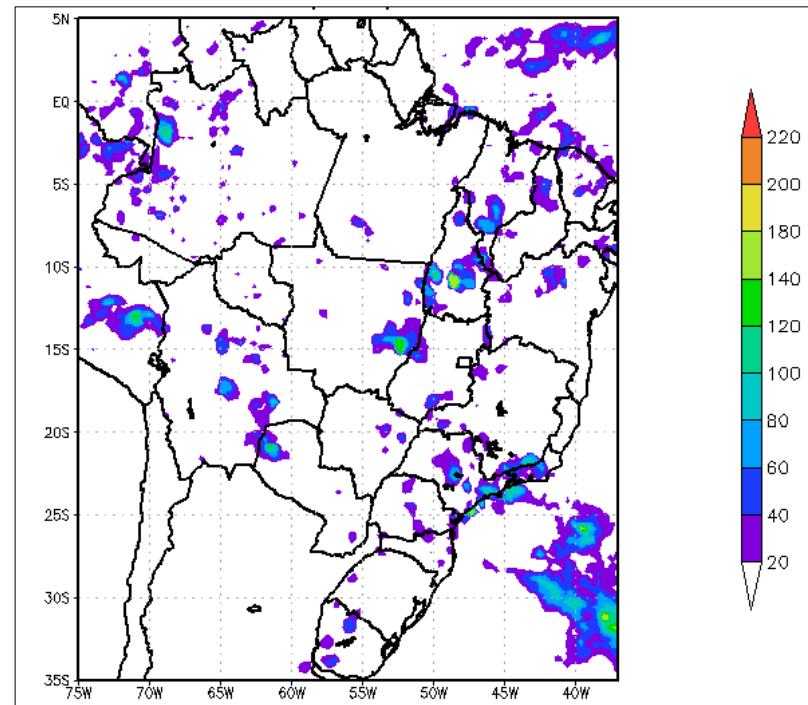


Figura C.2 – Precipitação acumulada para o dia 11 de janeiro de 2011 (em mm).

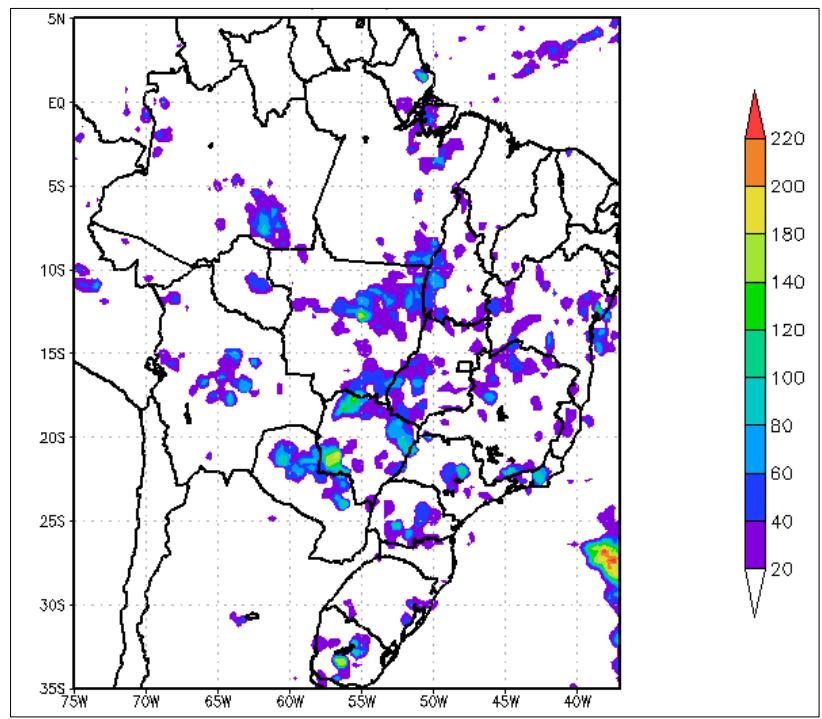


Figura C.3 – Precipitação acumulada para o dia 12 de janeiro de 2011 (em mm).

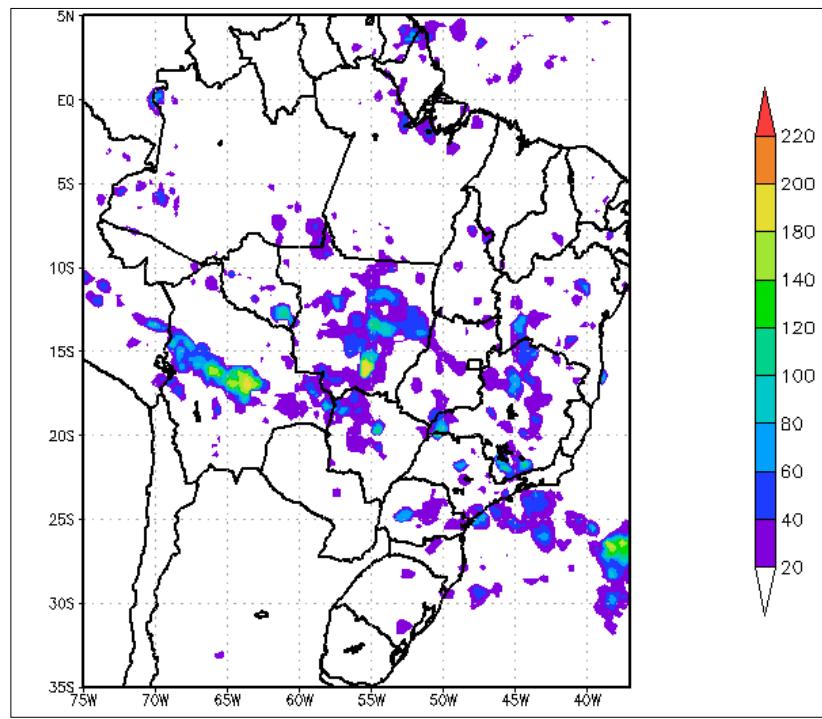


Figura C.4 – Precipitação acumulada para o dia 13 de janeiro de 2011(em mm).

## **APÊNDICE D – PESOS DAS CLASSES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA COMPOR O MAPA DE SUSCETIBILIDADE.**

Tabela D.1– Tabela de pesos das classes da variável curvatura vertical.

<b>Tabela de pesos – curvatura vertical</b>	
<b>Convexo</b>	0.99
<b>Côncavo</b>	0.30
<b>Retilíneo</b>	0.20

Tabela D.2 – Tabela de pesos das classes da variável curvatura horizontal.

<b>Tabela de pesos – curvatura horizontal</b>	
<b>Divergente</b>	0.30
<b>Convergente</b>	0.99
<b>Planar</b>	0.20

Tabela D.3 – Tabela de pesos das classes da variável declividade.

<b>Tabela de pesos - declividade</b>	
<b>0% a 2%</b>	0
<b>2% a 6%</b>	0.25
<b>6% a 20%</b>	0.50
<b>20% a 50%</b>	0.75
<b>&gt; 50%</b>	0.99