

Thayssa Pereira de Andrade

**FATORES PREDISPONETES AOS MOVIMENTOS DE MASSA
DO MACIÇO DA TIJUCA, RJ, NO PERÍODO DE 2010 A 2015**

Trabalho Final de Curso

(Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2018



UFRJ

Thayssa Pereira de Andrade

**FATORES PREDISPOANTES AOS MOVIMENTOS DE MASSA DO
MACIÇO DA TIJUCA, RJ, NO PERÍODO DE 2010 A 2015**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Emilio Velloso Barroso

Raquel Batista Medeiros da Fonseca

Rio de Janeiro

2018



UFRJ

A553f Andrade, Thayssa Pereira de
FATORES PREDISPOANTES AOS MOVIMENTOS DE MASSA
DO MACIÇO DA TIJUCA, RJ, NO PERÍODO DE 2010 A 2015
/ Thayssa Pereira de Andrade. -- Rio de Janeiro,
2018.
91 f.

Orientador: Emilio Velloso Barroso.

Coorientadora: Raquel Batista Medeiros da
Fonseca.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
de Geociências, Bacharel em Geologia, 2018.

1. Movimentos de Massa. 2. Fatores
Predisponentes. 3. Tipologias de Movimento. I.
Barroso, Emilio Velloso , orient. II. Fonseca,
Raquel Batista Medeiros da , coorient. III. Título.



UFRJ

FATORES PREDISPONETES AOS MOVIMENTOS DE MASSA DO MACIÇO DA TIJUCA, RJ, NO PERÍODO DE 2010 A 2015

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Emilio Velloso Barroso

Raquel Batista Medeiros da Fonseca

Aprovada em: 01 de Março de 2018

Por:

Orientador: Emilio Velloso Barroso (UFRJ)

Orientador: Raquel Batista Medeiros da Fonseca (Fundação GeoRio)

Andrea Ferreira Borges (UFRJ)

Márcio Fernandes Leão (UFRJ)



UFRJ

Dedico esse trabalho à Deus, o meu melhor amigo, à minha melhor amiga e mãe, Cláudia, e à minha tia, Zoraide, pelo incentivo, paciência e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me presenteou com a oportunidade de fazer essa graduação e me sustentou me dando sabedoria e forças para vencer cada etapa.

Aos amigos e orientadores, professor Dr. Emilio Velloso Barroso e geóloga Raquel Fonseca pela paciência e humildade na orientação ao desenvolvimento do presente trabalho.

Aos professores Luís Paulo Vieira Braga, pela orientação quanto às análises geoestatísticas, e José Carlos Sícoli Seoane, pelas orientações quanto ao geoprocessamento.

À Fundação Geo-Rio, por disponibilizar os laudos dos eventos de escorregamentos na cidade do Rio de Janeiro no período de 2010 a 2015, e à Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo incentivo ao projeto por meio da concessão da bolsa de Iniciação Científica PIBIC.

À toda minha família por me apoiar de muitas maneiras, em especial à minha mãe, Claudia Pereira, e à minha tia, Zoraide Pereira, que nos momentos difíceis me incentivaram a prosseguir independente das dificuldades. Sou grata a Deus pela vida de vocês.

Às minhas amigas, Letícia F. Leal e Rachel Coutinho, pela amizade, incentivo e apoio.

À todos os professores que contribuíram para o meu aprendizado, em especial aos professores Emilio Velloso Barroso, Helena Polivanov e Andrea Borges que muito me ajudaram no entendimento acerca dos temas abordados no presente trabalho. Agradeço pela dedicação e excelência no ensino.

Agradeço também a toda a equipe do LEMETRO, em especial ao Márcio Leão e Marcelo Galvão, pelo aprendizado, palavras de incentivo e sugestões, e ao Edgard Damasceno, pelo desenvolvimento e conquistas que obtivemos no projeto de pesquisa durante a graduação, a partir do qual foram extraídos dados para a realização do presente trabalho.

À todos que direta ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

***“O coração do sábio adquire o conhecimento,
e o ouvido dos sábios busca a ciência.”***

Provérbios 18:15, Bíblia Sagrada

Resumo

ANDRADE, Thayssa Pereira de. **Análise de Fatores Predisponentes aos Movimentos de Massa do Maciço da Tijuca, Rj, no Período de 2010 a 2015**. 2018. 91p. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O presente trabalho tem por objetivo analisar a distribuição e volume dos movimentos de massa que ocorreram no maciço da Tijuca no período de 2010 a 2015, e seus principais fatores predisponentes (litologia, unidades geotécnicas, geomorfologia, inclinação, orientação de vertente e lineamentos), a fim de obter um melhor entendimento acerca da relação entre esses fatores e as diferentes tipologias de movimento. A metodologia consiste na análise de 368 laudos de movimentos de massa, fornecidos pela Fundação Geo-Rio, relacionados a eventos pluviométricos significativos. A análise do movimento teve como base a classificação de Varnes, à qual foram feitas algumas adaptações a fim de obter uma melhor adequação à natureza das ocorrências locais. A caracterização litológica e geotécnica baseou-se no mapa geológico-geotécnico do município. A análise da geomorfologia, da inclinação, da orientação de vertente e dos lineamentos foi realizada por meio dos mapas gerados através do tratamento de imagem SRTM no ArcGIS®. A espacialização dos eventos mostrou que há um predomínio de ocorrências nos setores 1 e 2 do maciço da Tijuca. 81,2% dos eventos mobilizaram volumes menores que 100 m³. A principal tipologia de movimento segundo a classificação de Varnes foi a de escorregamento translacional, e segundo a adaptada, a de solo. De forma geral a maior parte dos eventos ocorreu em solos de espessuras maior que dois metros, em vertentes côncava-convergentes, em substratos de gnaisses, e em inclinações entre 16° e 35°. Os movimentos de massa apresentaram uma correlação direta com a menor distância ao lineamento mais próximo, porém inversa quanto a densidade de lineamentos. A análise das componentes principais evidenciou dois grupos no qual o primeiro grupo tem maior influência sobre os eventos: primeiro grupo - inclinação, distância ao lineamento e densidade de lineamento; segundo grupo - formado pela curvatura em plano e em perfil.

Palavras-chave: Movimentos de Massa; Fatores Predisponentes; Tipologias de Movimento

ABSTRACT

This work aims to analyze the distribution and volume of the mass movements that occurred in the Tijuca massif range in the period of 2010 to 2015, and its main predisposing factors (lithology, geotechnical units, geomorphology, inclination, hillside orientation and lineament), to obtain a better understanding of the relation of these factors and the different types of movement. The methodology consists in the analysis of 368 landslides reports provided by Geo-Rio Foundation and related to significant rainfall events (SRE). The study of movement was based on the classification of Varnes, adapted in order to obtain a better fitting to the nature of the local occurrences. The lithological and geotechnical characterization was based on the geological-geotechnical map of the city. The geomorphological analysis and the examination of the inclination, hillside orientation and lineament rely on the maps engendered by the SRTM image processing in the ArcGIS®. The specialization of the events showed that there is a prevalence of occurrences in the sectors 1 and 2 of the Tijuca massif range. 81,2% of the events mobilized volumes with less than 100 m³. The main movement typology according to the classification of Varnes was the translational slide and, according to the adapted one, the soil. In general, most of the events occurred in soils with width larger than 2 meters, in concave-convergent, in gneisses substracts, and in inclinations between 16° and 35°. The landslides presented a direct correlation to the proximity of the closest lineament, but an inverse one in relation to the density of the lineaments. The analysis of the principal components showed two groups in which the first one has a higher influence on the events: group one – inclination, distance on lineament and lineament density; group two – composed by the curvature in profile and planform.

Key-Words: Landslides; Predisposing Factors; Landslide Classification

Lista de figuras

Figura 1 - Esquema de queda de blocos.....	24
Figura 2 - Esquema de escorregamento translacional.....	26
Figura 3 - Esquema de escorregamento rotacional.....	28
Figura 4 - Esquema de fluxo de detritos	29
Figura 5 - Geometria da encosta (da esquerda para a direita e de cima para baixo): Convexa, Côncavo, Retilíneo (em perfil), Divergente, Convergente, Retilíneo (em planta).....	32
Figura 6 - Mapa de localização do maciço da Tijuca na cidade do Rio de Janeiro.....	38
Figura 7 - Mapa mostrando a divisão do maciço da Tijuca em 5 setores.....	42
Figura 8- Número e porcentagem de eventos de movimentos de massa no período de 2010 a 2015.....	45
Figura 9 - Geometria de encosta (da esquerda para a direita e de cima para baixo): Convexo-divergente, Convexo-convergente, Convexo-linear, Côncavo-divergente, Côncavo-convergente, Côncavo-linear, Linear-divergente, Linear-convergente e Linear-linear.....	52
Figura 10- Distribuição geográfica dos eventos no Maciço da Tijuca.....	57
Figura 11- Gráfico das tipologias encontradas nos eventos de escorregamentos ocorridos no Maciço da Tijuca no período de 2010 a 2015.....	59
Figura 12 – Escorregamento translacional de solo no Cosme Velho em 2010.....	59
Figura 13 - À esquerda: Escorregamento translacional de rocha no Túnel Acústico, sentido Gávea, em 2013. À direita: Queda de bloco de rocha na comunidade Sumaré, em Rio Cumprido.....	60
Figura 14 – Dois exemplos de eventos classificados como Solo. À esquerda: movimento de massa no morro do Borel, na Tijuca- a foto mostra o local coberto torando impossível a observação da superfície de ruptura. À direita: movimento de massa na comunidade da Rocinha - a foto não exhibe a superfície de ruptura.....	60
Figura 15- Gráfico do volume mobilizado no Maciço da Tijuca no período de 2010 a 2015.....	61
Figura 16 – Gráfico da quantidade de cada tipologia de movimento relacionada às unidades geológicas.....	62
Figura 17-Eventos sobrepostos a mapa de unidades geológicas.....	63
Figura 18 – Mapa de Curvatura em Perfil do Maciço da Tijuca.....	64
Figura 19 – Mapa de Curvatura em Plano do Maciço da Tijuca.....	65
Figura 20- Gráfico da curvatura das encostas onde ocorreram os eventos.....	66
Figura 21- Gráfico de comparação dos volumes mobilizados nas geometrias côncavo-convergente e convexo-divergente.....	67

Figura 22- Gráfico das curvaturas das encostas correlacionadas às tipologias das ocorrências..	68
Figura 23- Gráfico das unidades geotécnicas correlacionadas às tipologias de movimentos.....	70
Figura 24- Mapa de Orientação de Vertente do Maciço da Tijuca.....	71
Figura 25- Porcentagem das orientações de vertentes relacionadas aos eventos de movimento de massa no Maciço da Tijuca.....	72
Figura 26 – Mapa de Inclinação dos Relevos do Maciço da Tijuca.....	75
Figura 27 - Gráficos das tipologias de movimento (1- Complexo Translacional e Queda; 2- Escorregamento Lixo/Entulho; 3- Escorregamento Translacional de Rocha; 4- Escorregamento Translacional de Solo; 5- Fluxo; 6- Não Identificado; 7- Queda/ Rolamento de blocos ou lascas; 8- Solo; 9- Escorregamento Rotacional) correlacionadas com a inclinação: (a) 0-16°; (b) 16-35°; (c) 35-45°.....	75
Figura 28 – Mapa de lineamentos do Maciço da Tijuca e de áreas próximas.....	76
Figura 29 – Mapa de densidade de lineamentos do Maciço da Tijuca.....	77
Figura 30 – Distribuição da distância entre os eventos e os lineamentos.....	78
Figura 31 – Distribuição da densidade de lineamento.....	79
Figura 32- Gráfico correlacionando a curvatura em perfil (eixo y), a curvatura em plano (eixo x) e a distância ao lineamento (tamanho da bolha). É importante ressaltar que a região de -0,04 a 0,04 no eixo y e de -0,06 a 0,06 no eixo x, corresponde à geometria linear-linear.....	80
Figura 33 – Distribuição da distância ao lineamento em relação aos eventos ocorridos nas geometrias convergentes (histograma acima) e divergentes (histograma abaixo).....	81
Figura 34 - Gráfico da variância correspondente a cada componente.....	82
Figura 35 - PCA de todos os eventos no período de 2010-2015 com base na densidade de lineamento (DensiLine), distância da ocorrência ao lineamento mais próximo (DistLine), inclinação (Inclin) e curvatura em plano (Plano) e em perfil (Perfil).....	84
Figura 36 - PCA dos eventos por tipologia de movimento. O número de dados de entrada para cada PCA foi: 137 – Escorregamento Translacional de Solo; 163 – Solo; 10 - Fluxo de Detritos; 13- Complexo.....	86

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1958).....	20
Tabela 2 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978).....	21
Tabela 3 - Classificação de movimentos de massa observados no Rio de Janeiro.....	21
Tabela 4 - Classificação dos escorregamentos quanto às condições de amolgamento	22
Tabela 5 - Classificação dos escorregamentos quanto às condições de drenagem.....	22
Tabela 6 - Contribuições da cobertura vegetal segundo Guidicini e Nieble (1984).....	34
Tabela 7 - Critérios para atribuir um evento pluviométrico como significativo (EPS), de acordo com as medições da rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro.....	46
Tabela 8 - Endereço, Tipologia, Categoria do Volume Mobilizado e Laudo.....	47
Tabela 9 - Características geomorfológicas, unidade geotécnica e orientação.....	47
Tabela 10 - Uso do solo, densidade e distância ao lineamento, coordenadas e confiabilidade..	48
Tabela 11 - Classificação segundo Varnes (1959) de forma simplificada.....	49
Tabela 12 - Adaptações propostas para realizar a reclassificação dos laudos.....	49
Tabela 13 - Resumo da análise das componentes.....	80
Tabela 14 - Matriz de correlação das variáveis.....	81

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	viii
Resumo.....	x
ABSTRACT	xi
Lista de figuras	xii
INTRODUÇÃO	17
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1 Classificação dos Movimentos de Massa.....	19
1.1.1 Queda	23
1.1.2 Escorregamento	24
1.1.3 Fluxo de Detritos	28
1.2 Fatores Condicionantes dos Movimentos de Massa	29
1.2.1 Características do Relevo - Aspectos Geomorfológicos	30
1.2.2 Cobertura Vegetal	32
1.3 Aspectos Geológico-Geotécnicos.....	35
1.4 Análise Multivariada de Dados	36
2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MACIÇO DA TIJUCA.....	38
2.1 Localização e Extensão.....	38
2.2 Geologia.....	39
2.3 Geomorfologia	41
2.4 Ocupação nas Encostas	43
2.5 Eventos de Instabilidade de Encostas em EPS no período de 2010 a 2015.	44
3 METODOLOGIA	46
3.1 Dados e mapas fornecidos pela Fundação GEO-RIO e Triagem	46
3.2 Reclassificação dos Laudos segundo Tipologia adaptada de Varnes (1958)	48
3.3 Espacialização e Verificação das Coordenadas.....	49
3.4 Geração de Mapas no ArcGIS.....	50
3.4.1 Mapa de Lineamentos	50
3.4.2 Mapa de Orientação de Vertentes	51
3.4.3 Mapa de Curvatura da Encosta (Geomorfologia)	51
3.4.4 Mapa de Inclinação	53
3.5 Cruzamento dos dados e Análise.....	53
3.6 Análise de Componentes Principais (<i>Principal Component Analysis</i> – PCA).....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56

4.1	Espacialização das Ocorrências.....	56
4.2	Tipologias dos Movimentos de Massa (Varnes, 1958 e 1978).....	58
4.3	Volumes Mobilizados	60
4.4	Unidades Geológicas das Ocorrências	62
4.5	Curvaturas do Relevo	64
4.5.1	Mapa de Curvatura do Relevo	64
4.5.2	Curvaturas do Relevo das Ocorrências	65
4.6	Unidades Geotécnicas das Ocorrências	68
4.7	Orientação de Vertente	71
4.7.1	Mapa de Orientação das Vertentes.....	71
4.7.2	Orientação das Vertentes das Ocorrências	72
4.8	Inclinações dos Relevos.....	73
4.8.1	Mapa das Inclinações dos Relevos.....	73
4.8.2	Inclinações dos Relevos das Ocorrências.....	74
4.9	Curvatura em Perfil X Curvatura em Plano X Distância ao Lineamento Erro! Indicador não definido.	
4.9.1	Mapa dos Lineamentos no Maciço da Tijuca	76
4.9.2	Mapa de Densidade de Lineamentos.....	76
4.9.3	Distância ao Lineamento	77
4.9.4	Densidade de Lineamentos	79
4.9.5	Análise dos Fatores Curvatura em Perfil, Curvatura em Plano e Distância ao Lineamento	79
4.10	Análise dos Fatores Condicionantes a partir do PCA.....	81
5	CONCLUSÕES	87
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

INTRODUÇÃO

Movimentos de massa de grande porte, que causam impacto à população têm sido alvo de atenção por parte da mídia social, de pesquisadores e da população como um todo. Isso devido ao grande número de tragédias seja por perda de vidas e/ou de bens materiais deixando milhares de pessoas desabrigadas. De uma forma geral, é o risco geológico mais difundido ao redor do mundo (Wang, 2012), corresponde à maior categoria de desastres naturais (Samia *et al*, 2017), está entre os desastres mais comuns gerando graves consequências e perdas materiais (Liu, 2013) e é o principal processo geomorfológico modificador do relevo nos domínios montanhosos (Avelar, 2006).

Muitos autores (Varnes, 1978; Guidicini e Nieble, 1984; Wang, 2012; Liu, 2013; Silva, 2006) dividem os fatores que influenciam a instabilidade da encosta segundo sua relação com a deflagração do movimento. Um exemplo é obtido nos trabalhos de Liu (2013) e Wang (2012) que dividem em duas categorias: (1) fatores intrínsecos (ou interno) que contribuem para o escorregamento e que tem efeitos decisivos sobre o movimento de massa, e (2) fatores extrínsecos (ou externo) que tendem a desencadear movimentos, como chuvas e inundações. Geralmente, a variação dos fatores externos é um processo curto e de difícil previsibilidade, enquanto que a distribuição dos fatores internos afeta a susceptibilidade de movimentos (Liu, 2013). No presente estudo, porém, são contemplados apenas os fatores intrínsecos: litologia, unidades geotécnicas, geomorfologia (curvatura), declividade, orientação de vertente e lineamentos.

Na cidade do Rio de Janeiro os escorregamentos estão associados historicamente a elevado número de mortes e a extensos prejuízos. Características particulares como maciços rochosos fraturados, perfis de solos residuais desenvolvidos sobre rochas metamórficas de alto grau, heterogêneas e anisotrópicas, zonas de concentração de matacões, perfis rasos de solo sobre rocha sã ou depósitos heterogêneos de tálus, colúvio sob gradientes elevados e a ocupação urbana desordenada favorecem a

ocorrência de desastres (CPRM, 2012). Cortes realizados em taludes a fim de obter uma área plana para a construção de moradias, o lançamento de lixos nas encostas, a impermeabilização, e outros fatores consequentes da ocupação desordenada, contribuem para a instabilidade do talude.

Os três eventos de chuvas ocorridos na cidade do Rio de Janeiro em janeiro de 1966, fevereiro de 1988 e fevereiro de 1996, embora não tenham registrado as maiores pluviometrias entre os eventos do século XX, são os três eventos mais marcantes desse século na cidade do Rio de Janeiro (Dereczynski *et al*, 2017). Após o evento de 1966 foi criado, no mesmo ano, o Sistema Alerta Rio, gerenciado pela Fundação Geo-Rio, que tem como propósito emitir alertas à população sempre que houver previsão de chuvas intensas com potencial para deflagrar movimentos de massa. Uma desvantagem do sistema atual de previsão de acidentes geotécnicos é o uso da intensidade de precipitação como único critério. Os limiares que definem as classes de intensidades baseiam-se na análise de chuvas pretéritas e seu potencial para deflagrar movimentos de massa e ocasionar alagamentos, porém contemplam de forma homogênea o município como um todo, sem considerar as diferentes características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, e de outros fatores, na cidade do Rio de Janeiro. É necessária, então, uma avaliação abrangente dos escorregamentos, considerando outros fatores que influenciam no movimento de massa, a fim de prever e mitigar esses eventos e obter uma maior precisão na emissão dos alertas.

Esse trabalho tem como objetivo analisar as tipologias, os volumes mobilizados e os principais fatores predisponentes relacionados aos movimentos de massa, deflagrados em eventos pluviométricos significativos, que ocorreram no maciço da Tijuca, Rio de Janeiro, no período de 2010 a 2015, tendo como base os eventos relatados pela população e vistoriados pela GeoRio.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Classificação dos Movimentos de Massa

Movimentos de massa fazem parte da dinâmica da superfície terrestre. As tipologias e intensidades estão atreladas a fatores predisponentes (e.g. litologia, forma do relevo, estruturas das rochas, entre outros) e fatores deflagradores (principalmente chuva). Para Guidicini e Nieble (1984) a ação antrópica é tida somente como um agente efetivo (deflagrador), para Temoteo (1993), porém, pode ser tanto um fator predisponente quanto deflagrador. Diferentes propostas de classificações têm sido apresentadas, mas cada uma atendendo a um determinado objetivo e características. Isso ocorre devido as diferentes condições em que cada autor as elaborou (Guidicini e Nieble, 1984), e porque diferentes categorias de profissionais (geólogos, geomorfólogos, engenheiros, etc.) atribuem diferentes observações e importâncias aos movimentos de massa condizente a cada campo de especialização.

A classificação de movimentos de massas que foi pioneira em influência e base para grande parte das classificações posteriores foi a de Sharpe (1938, *apud* Temoteo, 1993, p. 14; *apud* Silva 2006, p. 6). Essa classificação correlaciona de modo simplificado o tipo e a velocidade do movimento com o tipo de material dividindo em três grandes grupos: quedas, escorregamentos e fluxo (Temoteo, 1993).

Varnes (1958) divide os movimentos de massa em queda, fluxo e escorregamentos – o qual, de acordo com o mecanismo de movimento, ele subdivide em dois subgrupos, aquele no qual a massa não é muito deformada e aquele no qual a massa é muito deformada ou consiste de pequenas unidades- e complexo que é definido pela combinação de materiais ou de tipos de movimento (tabela 1), evidenciando, segundo Silva (2006), a dificuldade em se estabelecer limites rígidos entre os tipos de

movimento e de materiais. Essa classificação considera duas importantes variáveis: (a) o tipo de material mobilizado, o qual geralmente é identificado no momento da vistoria, e (b) o tipo de movimento que pode ser observado a partir da cicatriz do movimento e arranjo dos detritos.

Tabela 1 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1958).

TIPO DE MOVIMENTO	TIPO DE MATERIAL			
	ROCHA		SOLOS	
QUEDA	QUEDA DE ROCHA		QUEDA DE SOLO	
	ROTACIONAL	PLANAR	ROTACIONAL	PLANAR
POUCAS UNIDADES ESCORREGAMENTO	ABATIMENTO	ESCORREGAMENTO DE BLOCOS	ESCORREGAMENTO DE BLOCOS	ABATIMENTO DE BLOCOS
MUITAS UNIDADES		ESCORREGAMENTO DE ROCHA	ESCORREGAMENTO DE DETRITOS	FALHA POR ESPALHAMENTO LATERAL
	INCONSOLIDADOS			
	FRAGMENTOS DE ROCHA	AREIA OU SILTE	MISTO	MAIS PLÁSTICO
	FLUXO DE FRAGMENTOS DE ROCHA	CORRIDA DE AREIA	FLUXO DE LOESS	
FLUXO			RÁPIDO FLUXO DE TERRA	AVALANCHE DE DETRITOS
ÚMIDO		FLUXO AREIA OU SILTE	FLUXO DE DETRITOS	LENTO FLUXO DE TERRA
COMPLEXO	COMBINAÇÃO DE MATERIAIS OU TIPO DE MOVIMENTOS			

Freire (1965, *apud* Guidicini e Nieble, 1984, p.4) classifica os movimentos de massa em três grupos: escoamentos (subdividido em corrida e rastejo), escorregamentos (subdividido em rotacional e translacional) e subsidência (subdividido em subsidências propriamente ditas, recalques e desabamentos). Guidicini e Nieble (1984), baseado nessa classificação, propuseram algumas alterações dentre elas a diferenciação entre agentes e causas dos movimentos de massa.

Varnes (1978) revisa a classificação proposta em 1958 (Varnes, 1958) e acrescenta à classificação os movimentos lentos de rochas e solos, e às tipologias acrescenta o espalhamento lateral e tombamento (tabela 2). As classificações de Varnes têm como critérios principais, primeiramente o tipo de movimento e secundariamente o tipo de material.

Tabela 2 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978).

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			ROCHA	SOLOS	
				GROSSEIRO	FINO
QUEDA			QUEDA DE ROCHA	QUEDA DE DETRITOS	QUEDA DE TERRA
TOMBAMENTO			TOMBAMENTO DE ROCHA	TOMBAMENTO DE DETRITOS	TOMBAMENTO DE TERRA
ESCORREGAMENTO	ROTACIONAL	POUCAS UNIDADES	ABATIMENTO DE ROCHA	ABATIMENTO DE DETRITOS	ABATIMENTO DE TERRA
		MUITAS UNIDADES	ESCORREGAMENTO DE BLOCO DE ROCHA	ESCORREGAMENTO DE BLOCO DE DETRITOS	ESCORREGAMENTO DE TERRA
	TRANSLOCACIONAL		ESCORREGAMENTO DE ROCHA	ESCORREGAMENTO DE DETRITOS	ESCORREGAMENTO DE TERRA
ESPALHAMENTO LATERAL			ESPALHAMENTO DE ROCHA	ESPALHAMENTO DE DETRITOS	ESPALHAMENTO DE TERRA
FLUXO			FLUXO DE ROCHA (rastejo)	FLUXO DE DETRITOS (rastejo de solo)	FLUXO DE TERRA
COMPLEXO			COMBINAÇÃO DE MATERIAIS OU TIPO DE MOVIMENTOS		

A Fundação GeoRio (2000, *apud* Silva, 2006, p. 9) utiliza uma classificação própria na descrição dos acidentes geológico-geotécnicos do Rio de Janeiro, a fim de obter uma melhor caracterização segundo o objetivo da fundação, abrangendo até mesmo ruptura de estrutura de contenção e escorregamento de lixo/entulho. A tabela 3 mostra as 13 tipologias usadas nessa classificação. A GeoRio (2000) faz referência ainda à classificação quanto às condições de amolgamento do solo (tabela 4) e quanto às condições de drenagem (tabela 5).

Tabela 3 - Classificação de movimentos de massa observados no Rio de Janeiro. Tabela obtida a partir dos dados fornecidos pela Fundação GeoRio.

TIPOLOGIA DE OCORRÊNCIAS	
TALUDE DE CORTE	ESCORREGAMENTO DE SOLO
	ESCORREGAMENTO DE SOLO/ROCHA
	ESCORREGAMENTO DE ROCHA
RUPTURA DE ATERRO	
ENCOSTA NATURAL	ESCORREGAMENTO DE SOLO
	ESCORREGAMENTO DE SOLO/ROCHA
	ESCORREGAMENTO DE ROCHA
QUEDA/ROLAMENTO DE BLOCOS OU LASCAS DE ROCHA	
ESCORREGAMENTO DE TÁLUS	
RUPTURA DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO	
ESCORREGAMENTO DE LIXO/ENTULHO	
CORRIDA	
PROCESSO EROSIVO/ASSOREAMENTO	

Tabela 4 - Classificação dos escorregamentos quanto às condições de amolgamento (GeoRio, 2000).

ESCORREGAMENTOS VIRGENS	OCORREM EM GERAL EM MATERIAL INDEFORMADO, COM PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ASSOCIADOS À CONDIÇÃO DE PICO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO
ESCORREGAMENTOS REATIVADOS	OCORREM COM MATERIAL AMOLGADO, EM SUPERFÍCIES PRÉ-EXISTENTES QUE SOFRERAM ESCORREGAMENTOS ANTERIORES; A RESISTÊNCIA DO MATERIAL TENDE PARA A CONDIÇÃO RESIDUAL.

Tabela 5 - Classificação dos escorregamentos quanto às condições de drenagem (GeoRio, 2000).

CONDIÇÕES DRENADAS (LONGO PRAZO)	POROPRESSÃO ASSOCIADA A FLUXO PERMANENTE NO MATERIAL. DISSIPACÃO TOTAL DAS POROPRESSÕES GERADAS PELO CISALHAMENTO
CONDIÇÕES PARCIALMENTE DRENADAS (PRAZO INTERMEDIÁRIO)	PARTE DA POROPRESSÃO GERADA PELO CISALHAMENTO É DISSIPADA
CONDIÇÕES NÃO DRENADAS (CURTO PRAZO)	MATERIAIS COM BAIXO VALOR DE COEFICIENTE DE ADENSAMENTO c_v . GERAÇÃO DE EXCESSOS DE POROPRESSÃO ASSOCIADOS AO CISALHAMENTO DO MATERIAL

Hungr *et al.* (2014) propõe uma revisão e atualização a partir de algumas modificações da classificação de Varnes (1978). Entre as recomendações propostas estão a de modificar a definição e classes dos materiais que constituem os movimentos de massa (e.g. rocha, argila, lama, silte, areia, cascalho, matacão, detritos), a exclusão dos movimentos complexos como tipologia (considerando como opção do usuário de combinar ou não as tipologias presente na classificação) e algumas outras alterações que refletem os recentes avanços no entendimento sobre esse fenômeno. Essa nova proposta de classificação resultou em 32 tipologias.

Muitas propostas de classificação já foram apresentadas. Varnes (1958) afirma que cada classificação é melhor adaptada a um determinado interesse de investigação, e que cada classificação apresenta vantagens e desvantagens, podendo “haver, é claro, variações no tipo de movimento e no tipo de material de lugar para lugar, ou de tempo

em tempo, na classificação atual de escorregamentos, por isso uma classificação inflexível não é prática e nem desejável”.

Apesar de existirem inúmeras classificações, até mesmo posteriores, a classificação mais adotada no meio científico e profissional é a de Varnes (1958; 1978) que também é usada como base para este trabalho. Esse capítulo tem como objetivo revisar e apresentar uma compilação, principalmente, dos conceitos apresentados por Varnes (1958 e 1978), Guidicini e Nieble (1984), Temoteo (1993) e Highland e Bobrowsky (2008), a respeito das tipologias de movimentos encontradas nas ocorrências aqui estudadas.

1.1.1 Queda

A queda se inicia com o desprendimento de uma massa (rocha ou solo), de qualquer tamanho, de uma encosta íngreme, ao longo de uma superfície na qual tenha ocorrido pouco ou nenhum deslocamento por cisalhamento (fig. 1). O movimento ocorre principalmente por queda livre, salto ou rolamento (Varnes, 1958; 1978). A massa em queda pode quebrar no impacto, iniciar um rolamento em taludes mais íngremes ou iniciar saltos ao atingir taludes num ângulo menor que o ângulo de queda (Highland e Bobrowsky, 2008).

Quedas de blocos são movimentos rápidos a extremamente rápidos e podem ocorrer como consequência da ação de vários possíveis fatores ou pela combinação de dois ou mais desses. Dentre esses fatores estão: a ação alternada de congelamento e degelo ao longo de fraturas, ciclagem térmica em massas rochosas, perda de apoio de blocos devido à erosão regressiva por meio aquoso, alívio de tensões de origem tectônica (Guidicini e Nieble, 1984), atividades humanas como escavações para

construção ou manutenção de estradas, terremotos ou outras vibrações intensas (Highland e Bobrowsky, 2008), dentre outros.

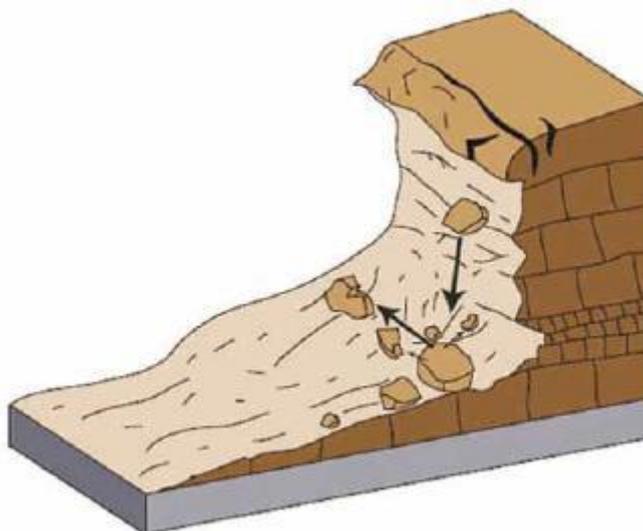


Figura 1 – Esquema de queda de blocos (modificada de Cruden e Varnes, 1996 por Highland e Bobrowsky, 2008).

1.1.2 Escorregamento

Escorregamento é definido como um movimento no qual a massa, de solo ou rocha, se desloca por cisalhamento ao longo de uma ou mais superfícies que são visíveis ou podem ser inferidas (Varnes, 1958; 1978). A direção do vetor de movimento relativo é paralela à superfície de ruptura (Temoteo, 1993). Segundo Guidicini e Nieble (1984) o escorregamento é desencadeado quando a relação entre a resistência média ao cisalhamento do material e as tensões médias de cisalhamento na superfície potencial de movimentação decrescem, de um valor inicial maior que um até a unidade, no instante do movimento, ou seja, estão associadas a uma diminuição da resistência ao cisalhamento. Esse decréscimo é, via de regra, gradual envolvendo uma deformação progressiva do material acima da superfície potencial e um movimento em declive de todos os pontos situados na superfície daquele corpo. Quanto aos materiais envolvidos, Souza (2014) diz ocorrer com frequência em materiais heterogêneos, e cita como exemplos solos residuais com estruturas reliquias, blocos rochosos *in situ* integrantes

de formações residuais e coluviais, depósitos de encostas cuja diferenciação dos solos residuais é complexa quando em perfis de intemperismo em estágio avançado de alteração, depósitos de lixo, apresentam-se misturados a aterros e materiais naturais. O escorregamento é subdividido em dois grupos: escorregamento translacional e escorregamento rotacional. Temoteo (1993) apresenta ainda escorregamentos em depósitos de lixo como uma subdivisão comum no maciço da Tijuca, porém essa não se insere nas classificações mais utilizadas:

“[...] escorregamentos em depósito de lixo, cuja causa está associada à alta declividade dos locais utilizados para tal, bem como a própria inconsistência do material” (Temoteo, 1993, p. 18).

1.1.2.1 Escorregamento Translacional

A massa, no escorregamento translacional, move-se para fora e para baixo do talude, ao longo de uma superfície relativamente plana (fig. 2), com pequeno movimento rotacional ou inclinação para trás (Varnes, 1978). Eventuais escorregamentos que ocorram em massas de solo ou rocha com anisotropia acentuada, irão provavelmente apresentar planos de movimentação condicionados a tais anisotropias, isto é, comumente ocorrerão ao longo de descontinuidades geológicas como falhas, junções, estratificação, trecho de variação na resistência ao cisalhamento entre as camadas, ou o ponto de contato entre rocha e solo (Varnes, 1978; Guidicini e Nieble, 1984). Pode ser desde inicialmente vagaroso até extremamente rápido. Com o aumento da velocidade pode converter-se em um fluxo de detritos (Highland e Bobrowsky, 2008).

O movimento translacional é uma das formas mais frequentes de movimento de massa. Geralmente é raso e extenso, podendo progredir indefinidamente se a superfície

de ruptura for suficientemente inclinada e a resistência ao cisalhamento permanecer mais baixa do que tensão de cisalhamento (Varnes, 1978; Guidicini e Nieble, 1984; Highland e Bobrowsky, 2008). Segundo Highland e Bobrowsky (2008) o principal mecanismo desencadeador (fator deflagrador) é a chuva intensa, também podendo ser o aumento da saturação do solo pelas chuvas, degelo, inundações, vazamentos de tubulações ou distúrbios relacionados à ação do homem, dentre outros.

Segundo Fernandes e Amaral (1996 *apud* Azevedo e Silva, 2015, p. 12) o escorregamento translacional pode ser subdividido em translacional de rocha, de solo residual, de tálus/colúvio e de detritos, dependendo do tipo de material transportado, porém na natureza não há uma rigidez de limites, o que acarreta em mistura de materiais em movimento.

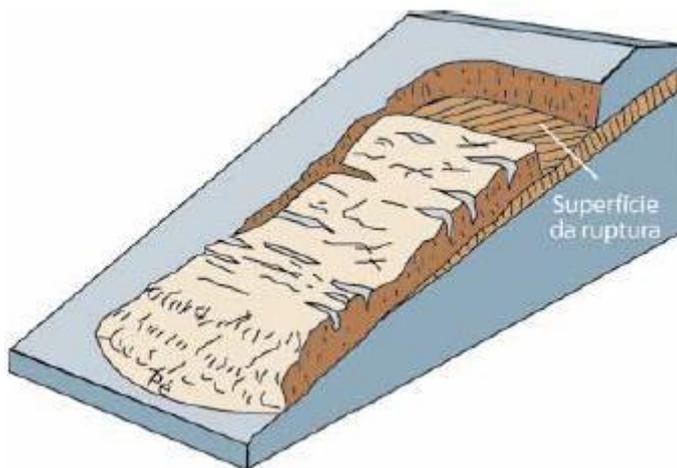


Figura 2 - Esquema de escorregamento translacional (modificada de Cruden e Varnes, 1996 Highland e Bobrowsky, 2008).

1.1.2.2 Escorregamento Rotacional

O movimento de massa, no escorregamento rotacional, ocorre ao longo de uma superfície curva (fig. 3), ou seja, quando ocorrem restritamente, trata-se de um movimento aproximadamente rotatório ao longo de um eixo paralelo à superfície de

ruptura curvada no sentido superior, similar à forma de uma colher, e quando há extensão lateral apresenta uma forma cilíndrica (Varnes, 1978; Temoteo, 1993; Highland e Bobrowsky, 2008). Segundo Guidicini e Nieble (1984) “se a resistência ao cisalhamento de um solo possuir variações nas direções horizontal ou vertical, o círculo de ruptura poderá sofrer achatamento ou maior desenvolvimento na vertical”.

No início da parte superior da ruptura o material pode mover-se quase que verticalmente para baixo e a parte superior pode inclinar-se em direção ao talude, podendo apresentar velocidade de extremamente vagarosa a rápida (Highland e Bobrowsky, 2008; Temoteo, 1993).

Esse tipo de movimento está relacionado, principalmente, a solos espessos e homogêneos. Segundo Highland e Bobrowsky (2008), chuvas intensas e/ou contínuas capazes de levar à saturação do solo, rápido escoamento de rios após enchentes, aumento de água subterrânea devido ao enchimento de represas ou aumento no nível de ribeirões, lagos e rios, que causam erosão na base dos taludes, podem causar escorregamentos rotacionais. Segundo Souza (2014) cortes naturais ou artificiais, na base do material, também estão relacionados ao início desse tipo de movimento. Se o escorregamento for rotacional e apresentar vários planos de movimentos paralelos e curvos, esse é denominado abatimento.

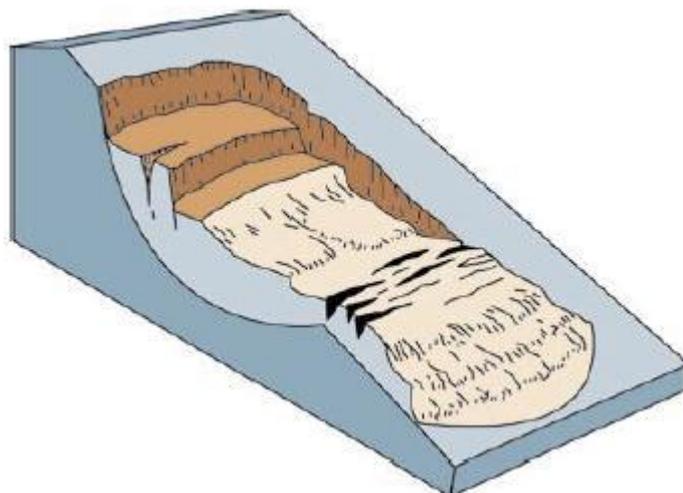


Figura 3 - Esquema de escorregamento rotacional (modificada de Cruden e Varnes, 1996 por Highland e Bobrowsky, 2008).

1.1.3 Fluxo de Detritos

No fluxo de detritos (fig.4) a massa movimentada escoá talude abaixo com o comportamento de um fluxo viscoso, e, por ser um movimento controlado pelo excesso de água, muito frequentemente ocorre em vales e talvegues. Segundo Guidicini e Nieble (1984) o movimento é ocasionado pela perda de atrito interno devido à destruição da estrutura, resultado do excesso de água. Nesse tipo de movimento, solo e rocha, e por vezes, material orgânico, devido à presença de água, formam uma lama que escoá em um fluxo rápido a extremamente rápido, dependendo do ângulo de inclinação e da consistência (Highland e Bobrowsky, 2008). A definição de fluxo está relacionada não ao movimento de massa, mas à distribuição e continuidade das partículas que constituem a massa em movimento (Temoteo, 1993). De acordo com o teor de água o fluxo pode ser subdividido em avalanche de detritos, fluxo de detritos e fluxo de lama.

Segundo Highland e Bobrowsky (2008) o principal mecanismo desencadeador é o intenso fluxo de água na superfície, gerados, por exemplo, por chuvas intensas, que causam erosão e movimentam as rochas e solos nas regiões inclinadas.

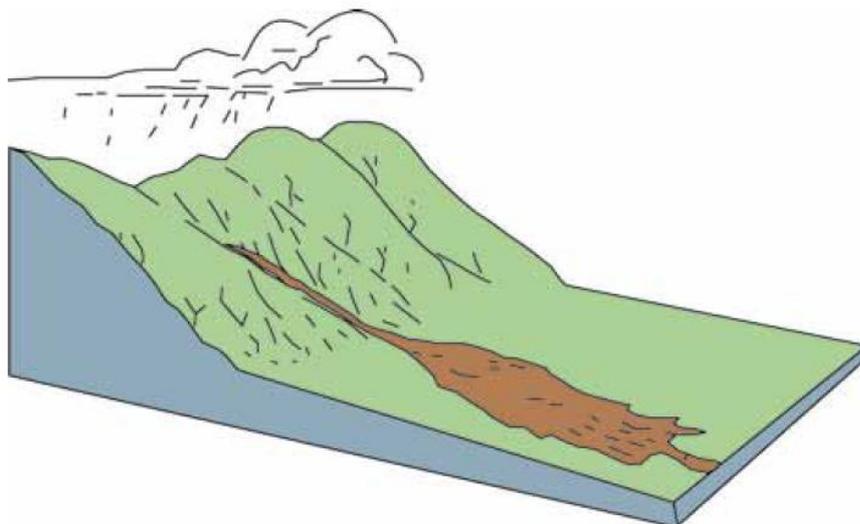


Figura 4 - Esquema de fluxo de detritos (modificada de Cruden e Varnes, 1996 por Highland e Bobrowsky, 2008).

1.2 Fatores Condicionantes dos Movimentos de Massa

“São elementos do meio físico e externos que contribuem para o desencadeamento dos movimentos de massa de uma encosta.” (Temoteo, 1993)

A chuva é na maior parte das vezes entendida como o único fator condicionante dos movimentos de massa. É fato que na maior parte dos casos a chuva é o principal agente deflagrador, porém é necessário entender que o movimento também é função de fatores predisponentes ou intrínsecos, assim como de outros fatores deflagradores. Os fatores intrínsecos ou predisponentes são aqueles que contribuem para o escorregamento, que tem efeitos decisivos sobre o movimento de massa, que constituem e caracterizam o local do evento (e.g. estruturas geológicas, litologia, geomorfologia, características dos materiais envolvidos). Os fatores deflagradores ou extrínsecos são aqueles que tendem a desencadear movimentos, como a chuva, que é o principal agente

deflagrador na maior parte dos casos (Liu, 2013; Wang, 2012; Guidicini e Nieble, 1984; Silva, 2006).

Guidicini e Nieble (1984) afirmam que o agente deflagrador pode ter uma maior ou menor influência, e por isso dividem em dois subgrupos: os preparatórios (e.g. pluviosidade, erosão pela água ou vento, variação de temperatura, ação humana e de animais, oscilação de nível do lençol freático) e os imediatos (e.g. chuva intensa, erosão, terremotos, ondas, ventos, ação do homem). Varnes (1978) apresenta outra visão subdividindo em fatores que contribuem para o aumento da tensão cisalhante – retirada de suporte, sobrecarga, tensões momentâneas (terremotos, vibrações por explosões, tráfegos), pressão lateral (e.g. pelo congelamento da água nas fraturas, dilatação como resultado da hidratação de argilas expansivas) e outros – e fatores que contribuem para uma baixa ou reduzida resistência ao cisalhamento, que podem ser características inerentes ao material ou fatores variáveis que provocam mudanças nas características – composição, textura, mudanças nas estruturas e outros.

A seguir, são apresentados e abordados alguns dos principais fatores condicionantes dos movimentos de massa.

1.2.1 Características do Relevo - Aspectos Geomorfológicos

As feições morfológicas desenvolvidas nas encostas têm suas características em função da interação entre os aspectos geológico, pedológico e geomorfológico associados aos condicionantes pluviométricos, climáticos e de vegetação (Temoteo, 1993; Souza, 2014). A inclinação e a forma do relevo são dois aspectos geomorfológicos de grande importância na estabilidade do talude, além de influenciarem na tipologia de ocorrência (Temoteo, 1993). A forma de vertente influencia, principalmente, no comportamento e volume do fluxo, enquanto que a

declividade influencia na velocidade e na distância alcançada pelo deslocamento da massa, porém ambos estão relacionados, ou seja, as inclinações ao longo do perfil configuram as formas geométricas por ele apresentadas. A forma ou geometria da encosta, que pode ser observada de forma simplificada na figura 5, é dividida em:

◆ **Em Perfil**

- Côncavo: parte da encosta na qual a inclinação diminui com a diminuição da elevação, ou seja, a jusante.
- Convexo: parte da encosta na qual a inclinação aumenta com a diminuição da elevação, ou seja, a jusante.
- Retilíneo (Linear): parte da encosta na qual a inclinação permanece praticamente a mesma com a diminuição da elevação, ou seja, a jusante.

◆ **Em planta**

- Convergente: parte da encosta na qual o fluxo converge para o centro do perfil, ou seja, tende a ocorrer uma concentração do fluxo na parte central.
- Divergente: parte da encosta na qual o fluxo diverge no perfil, ou seja, tende a ocorrer um espalhamento (ou dispersão) do fluxo.
- Retilíneo (Linear): parte da encosta que praticamente não exerce influência sobre o percurso do fluxo.

Há várias propostas para a divisão das classes da inclinação. A utilizada neste trabalho é descrita no item 3.4.4. De uma forma geral, a inclinação é inversamente

proporcional à estabilidade do talude, ou seja, quanto menor a inclinação maior a estabilidade e vice-versa.

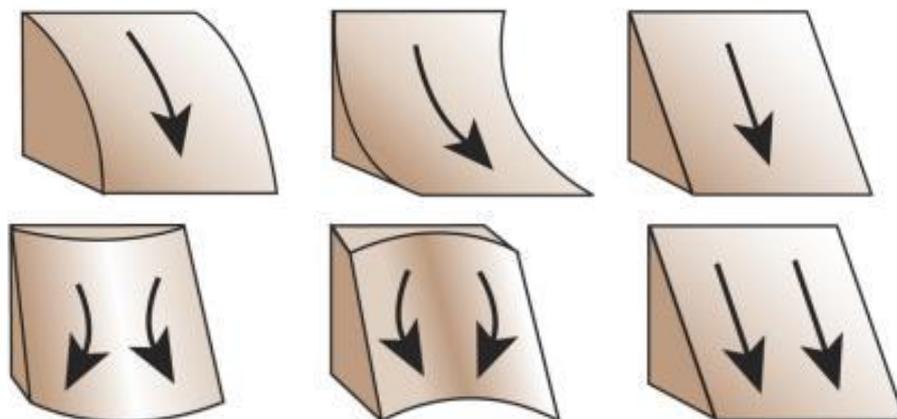


Figura 5 - Geometria da encosta (da esquerda para a direita e de cima para baixo): Convexa, Côncavo, Retilíneo (em perfil), Divergente, Convergente, Retilíneo (em planta). Fonte: site do ArcGis.

1.2.2 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal é um fator que pode contribuir tanto com a estabilidade do talude quanto com os movimentos de massa. A vegetação contribui na retenção de alguns movimentos de massa que ocorrem acima da cobertura vegetal e reduz o impacto da chuva diretamente na superfície do solo, diminuindo a erosão e possibilitando uma maior infiltração, uma vez que a água primeiramente atinge as folhas, galhos, troncos e, por fim, podendo ou não atingir o solo. Segundo Temoteo (1993), a penetração imediata da água no solo é reduzida pelo escoamento hipodérmico, que em alguns casos pode trazer a água de volta à superfície através de linhas de drenagens e pela evapotranspiração. Outra contribuição é a das raízes, que aumentam a resistência do solo. Como efeito não favorável à estabilidade, pode ser levado em conta o intemperismo biológico por meio da penetração das raízes nas fraturas das rochas propagando-as, e também o efeito alavanca produzido pelos troncos quando atingidos

pelo vento, há, porém, casos em que o envolvimento de blocos pelas raízes é tido como um fator positivo (Temoteo, 1993), pois ajuda a sustentar os blocos.

A tabela 6 a seguir mostra de modo simplificado as contribuições da cobertura vegetal segundo Guidicini e Nieble (1984):

Tabela 6 - Contribuições da cobertura vegetal segundo Guidicini e Nieble (1984).

COMPONENTES DA COBERTURA VEGETAL	CONTRIBUIÇÕES
Copas e demais parte aéreas	Protege o maciço da ação dos raios solares, dos ventos e das chuvas, evitando assim grandes variações na temperatura e umidade do solo
	Retém substancial volume de água da chuva, uma vez que a água primeiro atinge as folhas, galhos, troncos e epífitas associadas
	Elimina, na forma de vapor, grande volume de água excedente do metabolismo vegetal, por meio da evapotranspiração, subtraindo assim uma parte da água infiltrada e por conseguinte reduzindo a infiltração efetiva no maciço
Detritos Vegetais	Retém boa parte da água que atinge a superfície do terreno (o grau de retenção é proporcional à espessura da camada de detritos vegetais)
	Promove, juntamente com o sistema radicular de desenvolvimento superficial, o escoamento hipodérmico, graças a sua estrutura acamadada, resultante da suave deposição de fragmentos planares e alongados
	Reduz o escoamento superficial, em condições de máxima pluviosidade, permitindo assim que uma parcela seja conduzida para o regime de escoamento hipodérmico, evitando os efeitos erosivos que poderiam comprometer a estabilidade. Nessa atuação, a camada de detritos alia-se à presença dos troncos e porções superficiais de raízes reptantes e tabulares
Sistema Radicular	(aspecto mecânico) (Diretamente) Contribui na estabilização através da estruturação do solo, o qual fornece um acréscimo substancial de resistência ao cisalhamento, e (indiretamente) através da continuidade de sua estrutura, que distribui nas encostas as tensões originadas em pontos críticos
	(aspecto hidráulico) (Diretamente) Contribui para o escoamento hipodérmico, que reduz a intensidade da infiltração efetiva do maciço. (Indiretamente) Como parte da ação biológica, o sistema promove a sucção, com dois efeitos benéficos: pressão neutra negativa - aumentando assim a coesão do solo- e reduzindo parte da água destinada à infiltração efetiva no maciço

1.3 Aspectos Geológico-Geotécnicos

De modo geral, os maciços rochosos apresentam um grau muito maior de anisotropia em suas características de resistência, permeabilidade e deformabilidade, do que os maciços terrosos devido a dois grandes grupos de fatores geológicos: presença de feições estruturais que influenciam na resistência das massas rochosas; e maior irregularidade na percolação da água no interior rochoso, em relação ao terroso, reflexo também das estruturas geológicas (Guidicini e Nieble, 1984).

A estabilidade dos maciços rochosos é condicionada, dentre outros fatores, pela presença de descontinuidades como, por exemplo, falhas, juntas, contatos litológicos, planos de acamamento, laminação, planos de foliação, zonas de cisalhamento, fendas de tração, veios, diques, foliações metamórficas, dentre outros, que podem representar locais de instabilidade potencial e, em alguns casos, compartimentam o maciço rochoso podendo constituir canais favoráveis à ação dos agentes intempéricos e da erosão (Temoteo, 1993; Silva, 2006). Temoteo (1993) ressalta ainda, a nível local, o contato entre litologias com forte diferença de resistência ao intemperismo como um fator favorável ao aparecimento de descontinuidades, influenciando a estabilidade do talude.

Segundo O'Leary *et al.* (1976, apud Andrades Filho e Fonseca, 2009, p.3151) lineamento é definido como uma feição mapeável na superfície terrestre, linear, retilínea ou suavemente encurvada, que pode ser tanto simples como composta. Segundo Andrades Filho e Fonseca (2009) os dados obtidos a partir do produto da imagem SRTM são eficazes na identificação de lineamentos estruturais, proporcionando um maior detalhamento do mapeamento. Para Ribeiro *et al.* (2011) o mapa de relevo sombreado é um recurso bem adequado na identificação e análise dos lineamentos, pois não apresentam feições superficiais (e.g. cobertura da vegetação e estradas) que

influenciam na interpretação, além disso, a aplicação do sombreado em diferentes direções favorece o contraste dos lineamentos.

Segundo Tominaga (2007, *apud* Azevedo e Silva, 2016, p. 16) a composição mineralógica ou físico-química das diferentes litologias, as respectivas propriedades mecânicas, estruturas geológicas e grau de intemperismo, são considerados, dentre os aspectos geológicos, como importantes fatores influenciadores no movimento de massa.

1.4 Análise Multivariada de Dados

Para um estudo com muitas variáveis se torna mais difícil o tratamento de dados devido à alta dimensionalidade, porém uma ferramenta que possibilita uma melhor visualização da relação entre essas variáveis é a Análise de Componentes Principais que, basicamente, rotaciona a nuvem de pontos de dados de tal forma que a máxima variabilidade seja visível (Horikava,2008). Trata-se de uma manipulação matemática da matriz de dados a fim de reduzir a dimensionalidade original e realizar uma correlação entre as variáveis (Parreira, 2003).

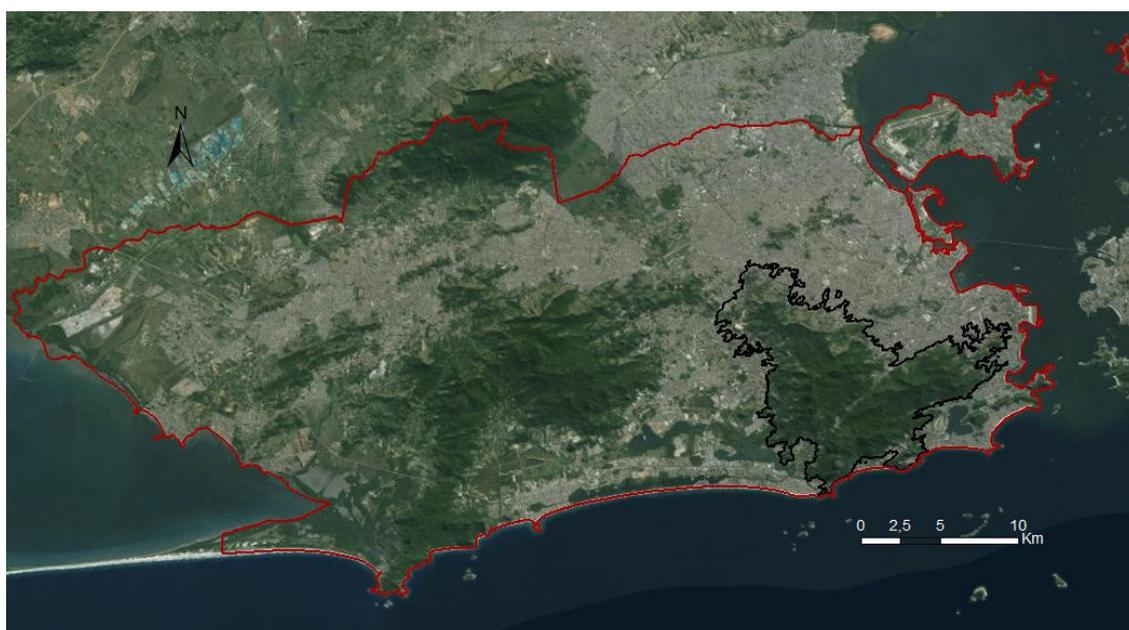
É gerado um novo conjunto de vetores (com base em novas variáveis linearmente independentes que descrevem os dados originais) atrelados a novos eixos ortogonais entre si representados pelas componentes principais e ordenados em termos da quantidade de variância explicada pelos dados, sendo que o primeiro vetor encontra-se na direção de maior variância (G. Strang, 1976, *apud* Parreira, 2003, p.4). O PCA permite um maior entendimento sobre a relação entre as variáveis, uma vez que a construção desse novo conjunto apresenta uma importância ordenada em baixa dimensionalidade. Segundo Haddou *et al* (2013), o objetivo desse método é extrair, de forma condensada, o máximo de informações possíveis sobre os dados analisados, e a partir das matrizes de correlação determinar as correlações positivas e negativas. Além disso, permite identificar variáveis originais que contribuem muito pouco para a

elucidação do comportamento de uma área quando se estuda os processos que nela atuaram, o que permite sugerir a eliminação destas variáveis em etapas futuras do estudo (Andriotti, 1997).

2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MACIÇO DA TIJUCA

2.1 Localização e Extensão

A cidade do Rio de Janeiro é dividida em dois compartimentos: os maciços litorâneos e as áreas de baixada, que incluem alguns morros isolados (Fernandes *et al*, 2006). Dentre os maciços destaca-se o Maciço da Tijuca (fig. 6), área de estudo desse trabalho, localizado na porção leste da cidade do Rio de Janeiro e que apresenta uma área de 120,3 Km². É delimitado pela cota de 40m, uma vez que demonstra uma maior representatividade em relação à de 20m que se propaga pelo município e confunde-se com o maciço da Pedra Branca (Fernandes *et al*, 1999; Fernandes *et al*, 2006).



Legenda

-  Limite Maciço da Tijuca
-  Limite Rio de Janeiro

Figura 6 - Mapa de localização do maciço da Tijuca na cidade do Rio de Janeiro. Fonte: Mapa Base da Esri, ArcGIS.

2.2 Geologia

“O substrato rochoso das encostas do Rio de Janeiro é formado fundamentalmente por rochas metamórficas de alto grau, gnaisses e migmatitos e, ígneas intrusivas graníticas que normalmente cortam as anteriores. Este contexto geológico apresenta grande complexidade estrutural e de difícil relacionamento estratigráfico. Suas idades são Pré-Cambrianas, [...] embora alguns granitos apresentem idades um pouco mais jovens. Todo o conjunto é atravessado por ígneas mais recentes, na forma de diques básicos (diabásios) ou alcalinos [...]”
(GeoRio, 2000)

O maciço da Tijuca faz parte das cristas litorâneas que compõem a ombreira a sul do Graben Guanabara (CPRM, 2012), um dos três grandes compartimentos geomorfológicos estruturados e definidos por falhamentos em blocos durante o rifteamento do Paleógeno, no contexto do Sistema de Riftes do Sudeste do Brasil (SRSB, Riccominni, *et al.*, 1989, *apud* CPRM, 2012, p. 20). O Maciço da Tijuca representa uma pequena parte da grande faixa móvel que formou as rochas do sudeste brasileiro, constituída por gnaisses (Gnaiss Facoidal; Biotita Gnaiss; Kinzigitos; Gnaiss Archer), e granitos (Granito Favela) (Pires e Heilbron 1989, *apud* Fernandes *et al.*, 1999, p. 49).

O trabalho de Helmbold *et al.* (1965, *apud* Temoteo, 1993, p. 31; *apud* GeoRio, 2000, cap2, p.1) apresenta uma divisão do Pré-Cambriano em duas séries: Série Inferior (mais antiga), caracterizada por gnaisses granodioríticos a quartzodioríticos, com estrutura complexa e xistosidade mal definida, associam-se a migmatitos; e Série

Superior, que agrega a maior parte dos gnaisses das encostas do Rio de Janeiro, sendo caracterizada por gnaiss facoidal, biotita-gnaiss, Kinzigitos, Leptinitos, plagioclásio-gnaisses, quartzito e rochas calcossilicáticas. Essa última série abrange a parte leste do Rio de Janeiro e constitui todo o conjunto rochoso do maciço da Tijuca. As litologias associadas à estruturação geológica do maciço da Tijuca (rochas da Série Superior) apresentam as maiores variações composicionais, estruturais e texturais, o que influencia na morfologia do maciço e nos processos ligados aos movimentos de massa (GeoRio, 2000). Segundo Fernandes *et al* (2006) o substrato rochoso do maciço da Tijuca é de idade pré-cambriana, constituído predominantemente por gnaisses diversos (microclina, biotita e granitóides) e algumas intrusões de granitos. Associados aos gnaisses e migmatitos intercalam-se grandes intrusões graníticas (Temoteo, 1993). “A exceção de alguns granitos intrusivos, os conjuntos gnáissicos foram gerados e deformados em regime dúctil durante a Orogênese Brasileira do Proterozoico Superior, que configurou a atual estruturação geológica NE-SW do sudeste brasileiro” (GeoRio, 2000). Fraturas de alívio e subverticais, de orientação dominante NW-SE e NE-SW, são comuns no substrato rochoso de todo o maciço. Segundo Netto (2005) o maciço da Tijuca está associado aos inúmeros blocos falhados dentro da Faixa Ribeira.

É certo que existem maiores explicações sobre a evolução geológica das rochas do maciço da Tijuca, porém considerando o objetivo do presente estudo é suficiente abordar apenas os domínios geológicos do maciço.

Dentre as unidades litológicas que constituem o maciço são destacadas neste trabalho aquelas referentes aos eventos, sendo majoritariamente os gnaisses (biotita-gnaiss, gnaiss migmatítico, gnaiss facoidal, gnaiss bandado (Archer)) e também o granito cinza porfírico (Granito Favela), o gabro e o quartzo diorito. Baseado nas

descrições de Temoteo (1993), da GeoRio (2000) e da CPRM (2012) são apresentadas abaixo algumas características de parte das principais litologias do maciço.

- Biotita-gnaise: apresenta granulação fina a média, ocorre contendo intercalações centimétricas a métricas de quartzitos, espessura variável, em alguns pontos apresenta aspecto migmatítico e estruturas deformacionais, como dobramentos. Recobrem os Kinzigitos e formam a maior parte do relevo baixo e vales da Floresta da Tijuca.
- Kinzigito: são gnaisses mais ricos em sillimanita, cordierita e granada. Esse aspecto mineralógico é uma distinção dessa litologia. Apresenta foliação bem desenvolvida.
- Gnaise facoidal: tipo textural, principalmente, de microclina-gnaise que ocorre também com laminação pronunciada. Rocha leucocrática de cor rosada a cinza clara, de granulação grosseira.
- Gnaise (Archer): rocha de granulação média a grossa, constituída por quartzo, feldspato, biotita e, localmente, hornblenda. Apresenta bandamento metamórfico destacado, principalmente nos ricos em biotita.
- Granitos: apresentam textura variando de porfiróide a equigranular, e granulação variando de fina a média, dependendo do tamanho do corpo intrusivo.

2.3 Geomorfologia

O maciço da Tijuca é caracterizado por um relevo montanhoso subdividido em cinco setores diferentes quanto ao arranjo de ocupação presente em cada setor (fig. 7), porém igualmente muito alterados devido às condições de degradação ambiental

(e.g. desmatamento e queimada) (Fernandes *et al*, 1998; Fernandes *et al*, 2006). O maciço é drenado por bacias hidrográficas que desaguam na Baía de Guanabara (setores 1 e 2), na lagoa da Tijuca ou de Jacarepaguá (setores 4 e 5) na lagoa Rodrigo de Freitas ou diretamente no oceano (setor 3) (Fernandes *et al*, 1998; Netto, 2005; Fernandes *et al*, 2006). Os vales dos rios Maracanã (SW-NE) e Cachoeira (NE-SW) dividem o maciço da Tijuca em Serra da Carioca e Serra da Tijuca ou Três Rios (Netto,2005).

É importante ressaltar que o Maciço da Tijuca funciona como um importante armazenador e distribuidor das águas pluviais para as áreas de baixadas, antes de essas desagüem em seus respectivos reservatórios (Netto,2005).

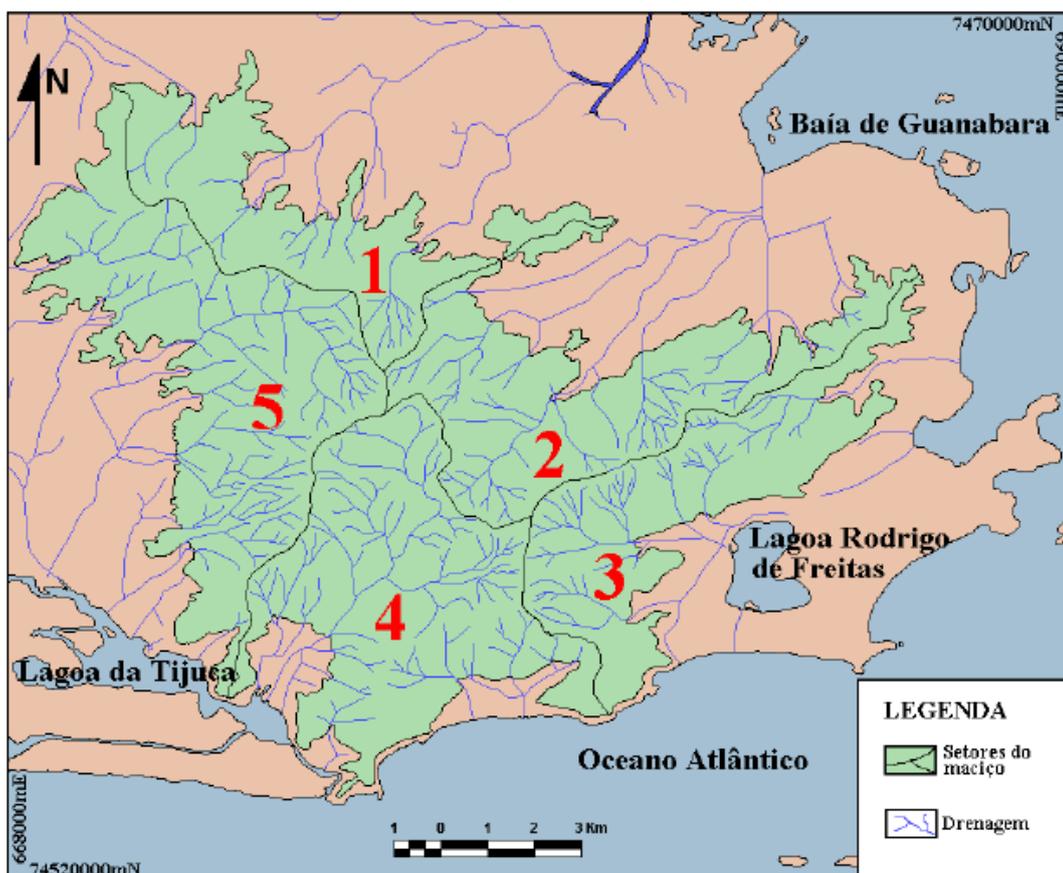


Figura 7- Mapa mostrando a divisão do maciço da Tijuca em 5 setores. Fonte: Fernandes *et al*, 1999.

2.4 Ocupação nas Encostas

Nas últimas décadas cresceu o número de comunidades de populações de baixa renda que ocupam as encostas. Essa situação, que é resultado de crises político-econômicas, é um dos maiores problemas sociais atrelados a riscos geológico-geotécnicos. Isso ocorre porque tais construções, na maior parte das vezes, não apresentam as estruturas adequadas, e são estabelecidas próximas a áreas íngremes onde, para conseguir um terreno plano, são realizados taludes de cortes sem o estudo e obra adequados, o que aumenta o risco de movimentos de massa e de acidentes geológico-geotécnicos.

A construção de casas nas encostas, constituindo as chamadas favelas, ocorreu devido a administrações, entre o final do século XIX e XX, voltadas a modernizar e melhorar as condições no Rio de Janeiro. Entre as medidas planejadas estava a destruição dos cortiços, o que fez com que os moradores ocupassem os espaços desvalorizados das encostas. Com o passar do tempo e aumento do número de habitantes a população avançou sobre a encosta ocupando as partes mais elevadas, íngremes e de maior risco. Com o início dessas comunidades começou também uma “nova degradação ambiental com cortes a meia encosta, não só para construção de moradias como também para construção de estradas, túneis, viadutos, pontes e aterros com o propósito de diminuir as distâncias entre os bairros, transpondo a imensa barreira natural do Maciço da Tijuca” (Temoteo, 1993).

A transformação contínua do maciço da Tijuca, com a substituição da cobertura vegetal que caracteriza a Floresta da Tijuca por feições urbanas (não somente da população de baixa renda) e áreas desmatadas, levam as encostas a tal ponto de exaustão que mesmo em chuvas não excepcionais tornam-se prováveis o risco de

eventos catastróficos. Além disso, tornam-se cada vez mais frequentes as ocorrências de movimentos de massa nas encostas, contribuindo para a modificação do comportamento hidrológico, caracterizando o desenvolvimento de condições favoráveis ao aumento de processos erosivos por diferentes mecanismos, e consequente aumento das descargas líquidas e sólidas nos canais fluviais favorecendo o assoreamento das redes de drenagem, naturais ou artificiais, especialmente nas zonas de baixadas (Fernandes *et al*, 1999). Durante os eventos pluviométricos mais intensos, essas descargas tornam-se maiores e mais rápidas, propiciando, cada vez mais frequente, as inundações nas porções inferiores dos vales e baixadas adjacentes. Exemplos disso são os casos registrados em 1966, 1967, 1988 e 1996, que assumiram um caráter catastrófico, principalmente nas áreas habitadas por populações mais pobres, em face da carência de infraestrutura urbana (Temoteo, 1993; Fernandes *et al*, 1999; Fernandes, 2006). Fernandes *et al* (1999) afirmam que não são somente as comunidades que influenciam a instabilidade da encosta, mas também, porém em menor grau, os condomínios de luxo, casas de classe média e outras edificações presentes nas encostas.

2.5 Eventos de Instabilidade de Encostas em EPS no período de 2010 a 2015.

Entre os eventos pluviométricos significativos (EPS), no período 2010 a 2015, os anos de 2010 e 2013 apresentaram o maior número de ocorrências de movimento de massa com, respectivamente, 70,9% e 14,9% do total de eventos no Maciço da Tijuca como pode ser observado na figura 8. Os eventos de 2010 estão, em sua maior parte, relacionados aos eventos pluviométricos significativos que ocorreram no mês de abril. Segundo os relatórios de chuva e escorregamento da Geo-Rio o ano de 2010 apresentou totais pluviométricos muito elevados e um aumento significativo para os meses de

março e abril quando comparado às médias mensais dos anos anteriores. Destaca-se que 75,8% das ocorrências registradas na cidade do Rio de Janeiro no ano de 2010, foram deflagradas em 4 de abril. Em relação a 2013 o respectivo relatório destaca uma grande intensidade pluviométrica, quando comparado às médias anuais anteriores, resultando em eventos pluviométricos significativos ao longo do ano. Os valores das médias anuais de 2015 foram, de forma geral, menores quando comparados às médias anteriores, porém nesse ano ocorreu uma oscilação na pluviometria média registrada, ora um aumento ora uma redução. Os demais anos, 2011, 2012 e 2014, apresentaram, na maior parte, valores percentuais menores de precipitação do que as médias mensais dos anos anteriores, com destaques de pluviometria significativa em: novembro de 2011, junho de 2012 e julho de 2014.

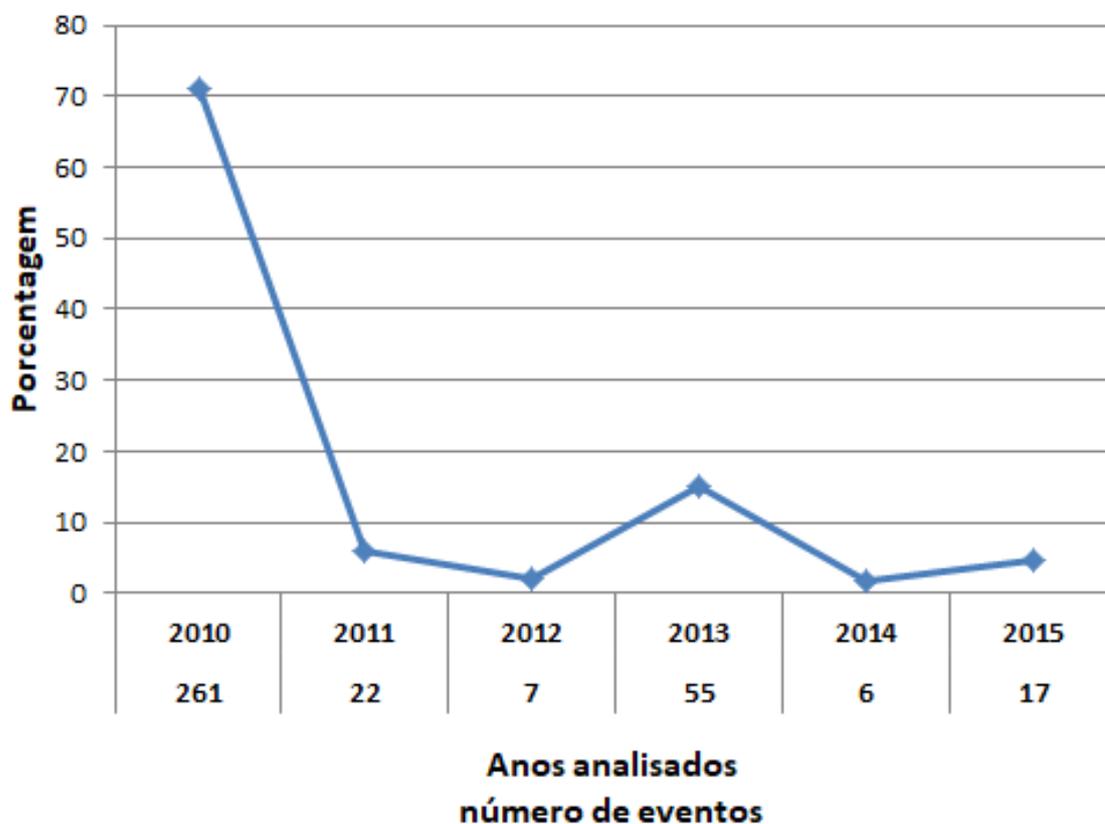


Figura 8- Número e porcentagem de eventos de movimentos de massa no período de 2010 a 2015.

3 METODOLOGIA

3.1 Dados e mapas fornecidos pela Fundação GEO-RIO e Triagem

Os dados das ocorrências de eventos de instabilidade nas encostas, como localização, coordenadas, descrição e volume mobilizado foram obtidos a partir de laudos técnicos de vistorias fornecidos pela Fundação Geo-Rio. Dentre todos os laudos realizados pela Geo-Rio, no período de 2010 a 2015, neste trabalho constam apenas aqueles que foram classificados como relacionados a eventos pluviométricos significativos (EPS). Segundo a Geo-Rio um evento pluviométrico é considerado significativo (EPS) quando esse apresenta potencial para deflagrar acidentes geológico-geotécnicos, seguindo os critérios da tabela 7.

Tabela 7- Critérios para atribuir um evento pluviométrico como significativo (EPS), de acordo com as medições da rede de pluviômetros do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (d'Orsi *et al*, 2013).

Macrobacia Hidrográfica	Intensidade Pluviométrica Registrada		
	≥ 10mm/h	≥ 20mm/h	≥ 40mm/h
Baía de Guanabara	em pelo menos cinco estações		
Zona Sul		em pelo menos duas estações	em pelo menos uma estação
Jacarepaguá	em pelo menos três estações		
Baía de Sepetiba			

Foi necessária uma leitura e revisão dos laudos a fim de se alcançar três objetivos: (1) excluir os eventos que não estavam diretamente relacionados a fatores naturais, como aqueles eventos que ocorreram por ruptura de obra de contenção (por problemas na construção e/ou na manutenção), (2) organizar as informações dos laudos

em uma tabela de dados como é demonstrado nas tabelas 8, 9 e 10, e (3) realizar uma reclassificação das tipologias segundo Varnes.

Tabela 8 - Endereço, Tipologia, Categoria do Volume Mobilizado e Laudo.

Logradouro	Bairro	Comunidade	Tipologia	Tipologia Predominante	Tipologia Varnes	Categoria do Volume Mobilizado	Laudo
Rua Professor Olinto de Oliveira nº 160 a casa 56 - Amapolo	Santa Teresa	Coroado	1	1	Esc. Transla-cional	1 a 10m³	0025/2011
Rua Almirante Alexandrino nº 2966	Santa Teresa	-	8	8	Esc. Transla-cional de Rocha	1 a 10 m³	0387/2015

Tabela 9 - Características geomorfológicas, unidade geotécnica e orientação.

Declividade	Unidade Geotécnica	Geometria Padrão (Perfil-Plano)	Curvatura Perfil	Curvatura Plano	Orientação	Azimute	Laudo
9,55	Solo Residual > 2m (e)/ Leptinito	Côncava-Convergente	0,54174	-0,42923	Sul	130	0025/2011
32,51	Solo Residual > 2m (e)/ Leptinito	Convexo-Divergente	-1,11660	0,20564	Noroeste	317	0387/2015

Tabela 10 - Uso do solo, densidade e distância ao lineamento, coordenadas e confiabilidade.

Uso do Solo		Densidade de Lineamento (Padrão Tijuca)			Distância Lineamento	UTMX	UTMY	Confiabi- lidade (Coorde- nada)
Uso Agregado	Grupo	Intervalos	Classes	Densidade de Lineamento (Valor Absoluto)				
Cobertura arbórea e arbustiva	Áreas não urbani- zadas	0,94863	Denso	1,42043519	30,83543	684481	7462435	Baixa
		- 1,57015						
Áreas residen- ciais	Áreas urbani- zadas	1,57015	Muito Denso	1,13777626	208,90115	684717	7462717	Alta
		- 2,45337						

3.2 Reclassificação dos Laudos segundo Tipologia adaptada de Varnes (1958)

A Geo-Rio apresenta uma classificação interna, para as tipologias de movimento, que atende ao seu objetivo de vistoria e de definição de obras necessárias para a segurança da população. Por isso tornou-se necessária uma reclassificação dos laudos, segundo uma classificação utilizada internacionalmente no meio científico, a fim de realizar um trabalho científico.

A reclassificação foi baseada, principalmente, na classificação de Varnes (1958), que está resumida na tabela 11. No entanto, alguns laudos não apresentaram informações suficientes a partir das quais pudesse ser identificada a tipologia ou não condisseram com nenhuma das tipologias. Por essa razão, propôs-se uma adaptação a essa classificação, mostrada na tabela 12.

Tabela 11 - Classificação segundo Varnes (1959) de forma simplificada.

TIPO DE MOVIMENTO		TIPO DE MATERIAL	
QUEDA		R O C H A	S O L O
TOMBAMENTO			
DESLIZA- MENTO	ROTACIONAL		
	TRANSLACIONAL/ LINEAR		
ESPALHAMENTO LATERAL			
FLUXOS			
COMPLEXO		<i>COMBINAÇÃO DE DOIS OU MAIS TIPOS</i>	

Tabela 12 - Adaptações propostas para realizar a reclassificação dos laudos

CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
SOLO/ROCHA	Quando não foi possível distinguir o mecanismo de movimento, somente o tipo de material mobilizado.
ESCORREGAMENTO DE LIXO/ENTULHO	Material antrópico que é lançado nas encostas e, devido à instabilidade, se torna susceptível a escorregamentos.
NÃO IDENTIFICADO	Quando não foi possível identificar a tipologia e/ou a causa do movimento.

3.3 Espacialização e Verificação das Coordenadas

As coordenadas das ocorrências são fornecidas nos laudos, assim como o endereço, comunidade e bairro. Com o objetivo de obter uma maior confiabilidade na localização, os eventos foram espacializados por meio do software ArcGis® e, com

base nos *shapes* de bairros, ruas e favelas do IPP (Instituto Pereira Passos), foram verificadas as localizações, tendo como base para comparação a descrição de localização nos laudos. Aqueles que não condiziam com a localização descrita tiveram as suas coordenadas corrigidas e alteradas por meio de ferramentas do ArcGIS® e com o auxílio do software Google Earth. Cerca de 36% dos laudos foram corrigidos em relação ao nome do bairro, comunidade e/ou coordenada, confirmando a importância dessa fase de verificação.

3.4 Geração de Mapas no ArcGIS

Foi criado um banco de dados em SIG (Sistema de Informações Geográficas) com todas as informações e mapas para realizar posterior análise dos fatores predisponentes aos movimentos de massa. Os mapas de atributos foram gerados a partir de ferramentas do ArcGIS® e do uso do modelo digital de elevação (MDE), que foi obtido a partir da imagem de radar da SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), disponibilizada pela USGS (*United States Geological Survey*), com resolução de 30 metros. Posteriormente os valores (classe ou nome) dos atributos, correspondentes a cada ocorrência, foram adicionados à tabela de dados.

3.4.1 Mapa de Lineamentos

Foram gerados relevos sombreados como produto da imagem SRTM a partir da ferramenta *Hillshade* do ArcGIS®. Essa ferramenta permite a escolha do azimute e da altitude da fonte de iluminação artificial tornando possível a geração de diferentes mapas de relevos sombreados que contribuem para uma melhor observação dos lineamentos, uma vez que uma determinada iluminação ressalta melhor determinados lineamentos que, muitas das vezes, não são observados em outra direção. Com base na

análise dos mapas obtidos de oito sentidos de iluminação (N, S, E, W, NE, NW, SE e SW) os lineamentos foram fotointerpretados e vetorizados no ArcGIS®.

Posteriormente dois procedimentos foram realizados tendo como base o lineamento. Primeiro, foi calculada a menor distância de cada evento ao lineamento mais próximo usando a ferramenta *Near*. Segundo, foi elaborado um mapa de densidade de lineamento por meio da ferramenta *LineDensity*. Conceitualmente essa ferramenta desenha um círculo ao redor do centro de cada célula correspondente à localização de um evento. O comprimento da parte de cada lineamento que se encontra dentro desse círculo é somado e dividido pela área do círculo (m/m^2) e o valor é atribuído à respectiva célula. O valor atribuído ao raio do círculo foi de 800 m, pois nenhum ponto apresenta uma menor distância ao seu lineamento mais próximo maior que esse valor.

3.4.2 Mapa de Orientação de Vertentes

O mapa de orientação de vertentes foi gerado a partir da ferramenta *Surface Aspect* do ArcGIS®. Essa ferramenta identifica a direção de maior declive e atribui o valor em graus correspondente a cada célula, e o valor -1 para as áreas planas. Cada sentido recebe uma determinada cor de acordo com a seguinte divisão: Norte (337,5-360 e 0-22,5); Nordeste (22,5-67,5); Leste (67,5-112,5); Sudeste (112,5-157,5); Sul (157,5-202,5), Sudoeste (202,5-247,5); Oeste (247,5-292,5); Noroeste (292,5-337,5).

3.4.3 Mapa de Curvatura da Encosta (Geomorfologia)

O mapa de curvatura da encosta foi elaborado a partir da ferramenta *Curvature*. Essa ferramenta, basicamente, calcula a segunda derivada da superfície e gera como resultado o valor da curvatura, em perfil e em plano, atribuído a cada célula. A partir

desse valor é possível distinguir as geometrias de encosta. A curvatura em perfil é dividida em côncava, convexa e linear, e a em plano é dividida em convergente, divergente e linear. Segundo Valeriano e Carvalho Júnior (2003), boa parte do que é classificado como retilíneo (linear) não apresenta uma curvatura exatamente igual à zero. Por isso, a faixa de tolerância utilizada neste trabalho que define uma geometria plana foi de: -0,04 a 0,04, para curvatura em perfil; e -0,06 a 0,06 para curvatura em planta (Stabile e Vieira, 2009). A figura 9 apresenta um resumo das combinações entre geometrias em perfil e em plano.

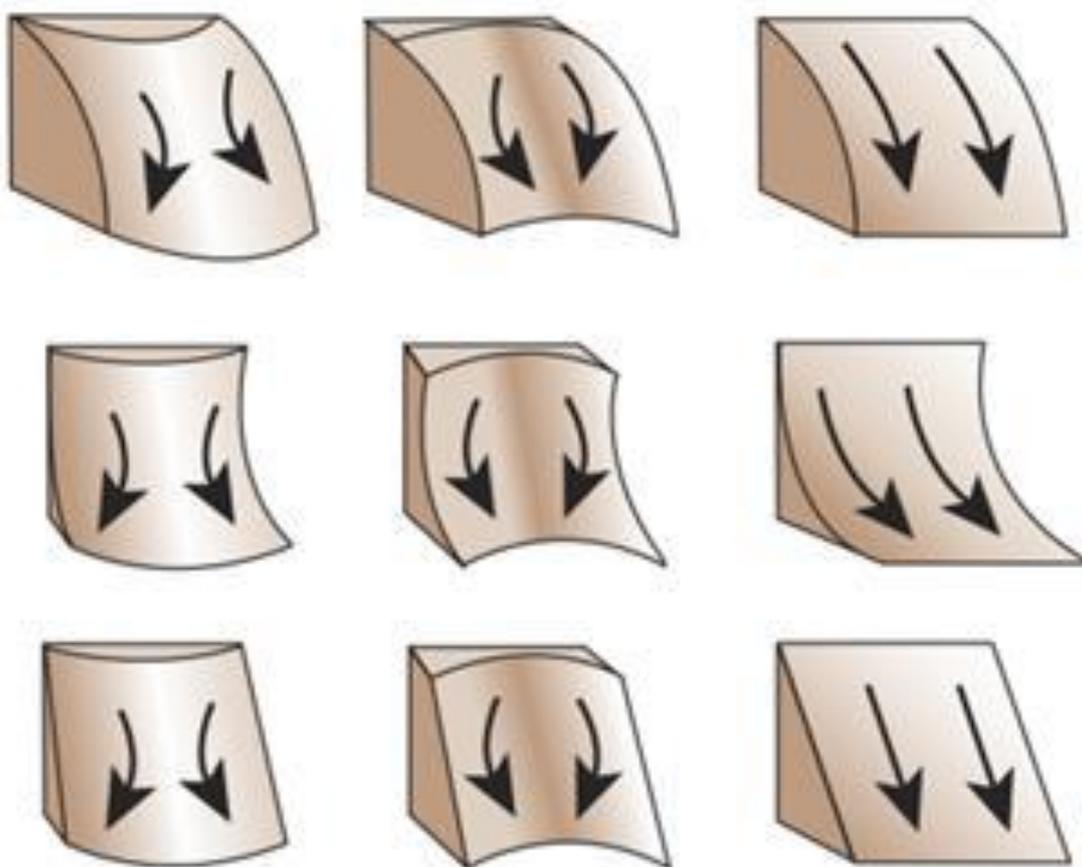


Figura 9 - Geometria de encosta (da esquerda para a direita e de cima para baixo): Convexo-divergente, Convexo-convergente, Convexo-linear, Côncavo-divergente, Côncavo-convergente, Côncavo-linear, Linear-divergente, Linear-convergente e Linear-linear. Fonte: ArcGis Desktop-Help.

3.4.4 Mapa de Inclinação

O mapa de inclinação foi gerado a partir da ferramenta *Slope* do ArcGIS® que calcula a inclinação com base nos dados da imagem SRTM. Segundo a descrição da ferramenta, basicamente, é calculada a maior variação de elevação sobre a distância entre a célula e os seus oito vizinhos fornecendo assim o valor da maior inclinação naquela célula.

Para esse trabalho as classes de inclinação foram divididas baseadas nos ângulos de atrito mais comuns relacionados aos gnaisses. Tendo como base artigos sobre este assunto, foram consideradas as médias dos ângulos de atrito obtidos em ensaio de cisalhamento direto e o menor valor obtido em ensaio de compressão. Boszczowski (2008) apresenta um resumo dos trabalhos sobre ângulos atrito no qual a média dos ângulos apresentados foi de 33,7° em ensaios de cisalhamento direto, e no qual o valor mínimo para ensaio de compressão axial foi de 16°. Oliveira (2000) a partir do estudo experimental em laboratório de um solo residual jovem de gnaiss na condição saturada, situado no bairro do Leblon, Maciço da Tijuca, obteve ângulo 39,12° em ensaio de compressão. Baseado nesses trabalhos e em outros (Fonseca, 2006; Kazmierski *et al.*, 2017; Arêdes, 2017) a inclinação foi dividida em quatro classes: 0-16°; 16-35°; 35-45° e maior que 45°.

3.5 Cruzamento dos dados e Análise

A partir das ferramentas *Extract Values to Points* e *Spatial Join* foram extraídas, de cada mapa, as informações associadas a cada evento de movimento de massa. A primeira ferramenta extrai o valor do pixel sobre o qual o ponto (evento) está localizado, sendo usada, principalmente, para extrair informações de mapas numéricos (e.g. densidade de lineamentos e orientação de vertentes). A segunda extrai o

nome/classe de cada polígono onde o ponto se encontra e é usada para extrair informações de mapas em que os polígonos são especificados por nome (e.g. mapa geológico e geotécnico). Com base em todos os dados obtidos (através dos mapas e da leitura dos laudos) e organizados em uma tabela, foi elaborado o cruzamento das informações com os eventos.

3.6 Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis – PCA*)

O método PCA pressupõe a existência de variáveis quantitativas. Sendo assim, na análise das componentes principais foram usados como dados de entrada apenas a inclinação, os valores das curvaturas em plano e em perfil, a densidade de lineamento e a distância ao lineamento. Apesar de a orientação de vertente ser um fator quantitativo não foi usado nessa análise, pois apresentou um valor de correlação muito baixo, sendo eliminado da análise. Esses dados foram organizados em uma nova tabela e através do software R foram gerados os PCA's, apresentados no item 4.10.

Os seguintes tópicos mostram, de forma resumida, as etapas realizadas para a obtenção dos PCA's:

- 1) Todas as variáveis quantitativas (densidade de lineamento, distância ao lineamento, orientação, inclinação e curvaturas em plano e em perfil) foram organizadas em uma tabela e usadas como dados de entrada no software R. Foi obtido o primeiro PCA.
- 2) A matriz de correlação foi calculada por meio de um comando do programa. A partir dessa matriz tornou-se possível observar a correlação entre os grupos de variáveis (fatores). O fator orientação foi retirado da análise por apresentar valores menores que 0,15 na correlação com todos os outros fatores.

- 3) Um novo PCA foi gerado com os fatores quantitativos, exceto a orientação de vertente. A partir desse PCA foram analisadas as duas primeiras componentes principais.
- 4) Foram verificados os grupos de variáveis sugeridos pelas componentes e considerado se havia concordância com a interpretação geológica.

Posteriormente foram gerados PCA's de acordo com as tipologias de movimento que estavam relacionadas a um número maior do que 10 eventos de movimentos de massa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Espacialização das Ocorrências

A partir da espacialização dos eventos ocorridos no período de 2010 a 2015, observou-se que, em relação à localização (fig. 10), a maior parte dos eventos está concentrada na parte norte do maciço, principalmente, nos setores 1 e 2. Esse resultado confirma o que foi apresentado no trabalho de Fernandes *et al* (1999), que afirma que quanto maior a área de favelas maior será a incidência de deslizamentos nestas áreas, e apresenta os setores 1 e 2 como os que possuem a maior área de favela. É importante ressaltar que os eventos de movimentos de massa, aqui abordados, estão atrelados a comunicados realizados pela população, por isso, a maior parte dos casos está relacionada a áreas de ocupação, principalmente áreas de comunidade, que se tornam áreas de risco quando os cortes nos taludes são realizados sem técnicas adequadas e as devidas estruturas e obras, e onde, muitas das vezes, o lixo é lançado na própria encosta. Por esse motivo, também, a ocupação não foi considerada como um fator nas análises.

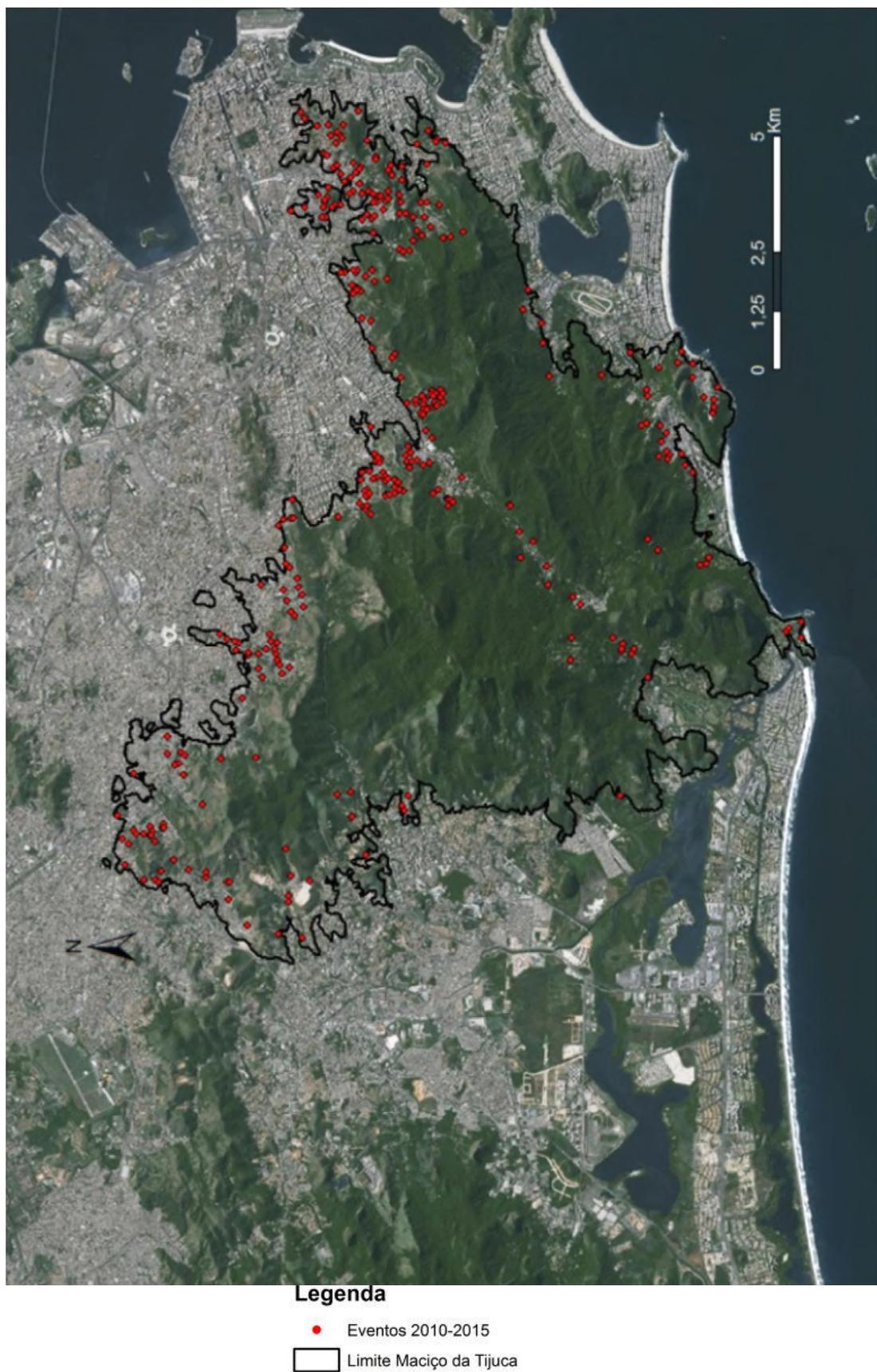


Figura 10- Distribuição geográfica dos eventos no Maciço da Tijuca. Fonte Mapa Base da Esri, Arcgis

4.2 Tipologias dos Movimentos de Massa (Varnes, 1958 e 1978)

A figura 11 mostra a distribuição percentual dos escorregamentos no município do Rio de Janeiro. Entre as tipologias definidas por Varnes (1958; 1978), que caracteriza o movimento de acordo com o material mobilizado e a superfície de ruptura, a mais comum foi o escorregamento translacional de solo (137). Considerando as adaptações feitas à classificação de Varnes (1958; 1978), que descreve somente o tipo de material mobilizado, a principal tipologia foi a de solos (163). Sendo assim, a maior parte dos eventos são de longe aqueles que envolvem solo como o material mobilizado (81%), assim como no inventário apresentado no trabalho de Amaral (1997). Isso pode ser entendido como reflexo dos cortes realizados nas encostas a fim de obter uma área plana para a construção de moradias. Esses tipos de corte levam à instabilidade do talude, principalmente, devido a um maior ângulo de inclinação, que é um dos atributos de importância no fator de segurança do talude.

Liu *et al* (2013) ao realizar um estudo baseado nos dados sobre escorregamentos (adquiridos principalmente a partir de relatórios de notícias na internet, anuários locais e banco de dados de desastres), afirmou que os dados podem apresentar falta de exatidão e completude. Em aproximadamente 8,4% dos laudos de ocorrências não foi possível identificar, a partir da descrição e imagem, o tipo de movimento e se realmente não se tratava de um evento, por exemplo, de ruptura de obra de contenção por problemas na estrutura ou de manutenção que ocasionaram a mobilização de um pequeno volume de material terroso.

As demais tipologias perfazem cerca de apenas 10% do total de eventos.

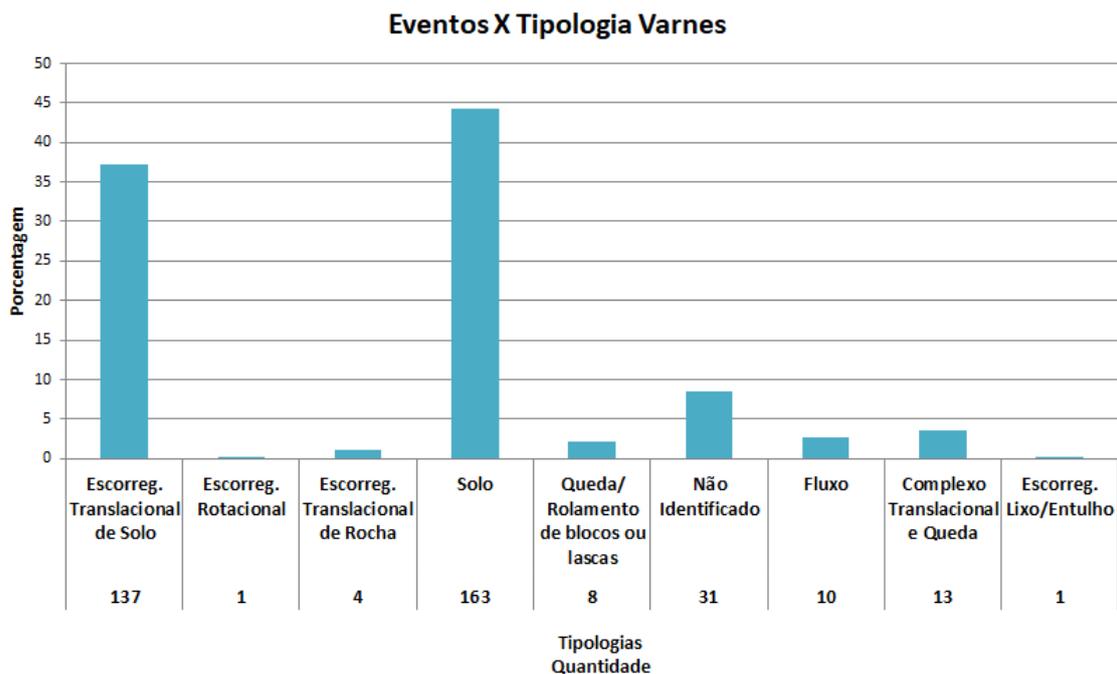


Figura 11- Gráfico das tipologias encontradas nos eventos de escorregamentos ocorridos no Maciço da Tijuca no período de 2010 a 2015.

Algumas fotos (fig. 12, 13 e 14) dos laudos da Fundação Geo-Rio são inseridas abaixo, a fim de exemplificar as tipologias de movimento de massa encontradas com maior frequência no Maciço da Tijuca. A figura 14 ilustra a dificuldade na classificação quando não é possível observar a superfície de ruptura, tornando-se necessária uma classificação segundo somente o tipo de material.



Figura 12 – Escorregamento translacional de solo no Cosme Velho em 2010. (b) corresponde a foto ampliada do quadrado em vermelho da foto (a). Fonte: Geo-Rio.



Figura 13 – À esquerda: Escorregamento translacional de rocha no Túnel Acústico, sentido Gávea, em 2013. À direita: Queda de bloco de rocha na comunidade Sumaré, em Rio Cumprido. Fonte: Geo-Rio.



Figura 14 – Dois exemplos de eventos classificados como Solo. À esquerda: movimento de massa no morro do Borel, na Tijuca- a foto mostra o local coberto torando impossível a observação da superfície de ruptura. À direita: movimento de massa na comunidade da Rocinha - a foto não exibe a superfície de ruptura. Fonte: Geo-Rio.

4.3 Volumes Mobilizados

A partir do gráfico representado na figura 15 observa-se que aproximadamente a metade dos eventos refere-se à mobilização de pequeno volume (1 a 10 m³) e 30,7% à mobilização de 11 a 100 m³. Isso provavelmente indica que a maior parte dos eventos ocorridos nesse período provocaram apenas danos materiais. Porém, segundo a CPRM

(2012), volumes pequenos apresentam potencial para gerar grandes danos também. Volumes maiores que 100 m³, correspondente a 10,3 % das ocorrências, são eventos de maior impacto e que tem maior potencial para provocar consequências graves incluindo perdas de vidas. Volumes maiores que 1000 m³ estão relacionados a situações mais específicas de eventos extremos como as que ocorreram em 2010 e 2013, prova disso é que as duas únicas ocorrências nessa categoria ocorreram nesses anos.

A porcentagem de pequenos volumes mobilizados, assim como relatado no inventário de Amaral (1997), mantém-se como a maior por ser consequência, principalmente, dos cortes no talude que instabilizam os horizontes superficiais do solo, do lançamento de lixos nas encostas, da impermeabilização, e de outros fatores consequentes da ocupação desordenada nas encostas.

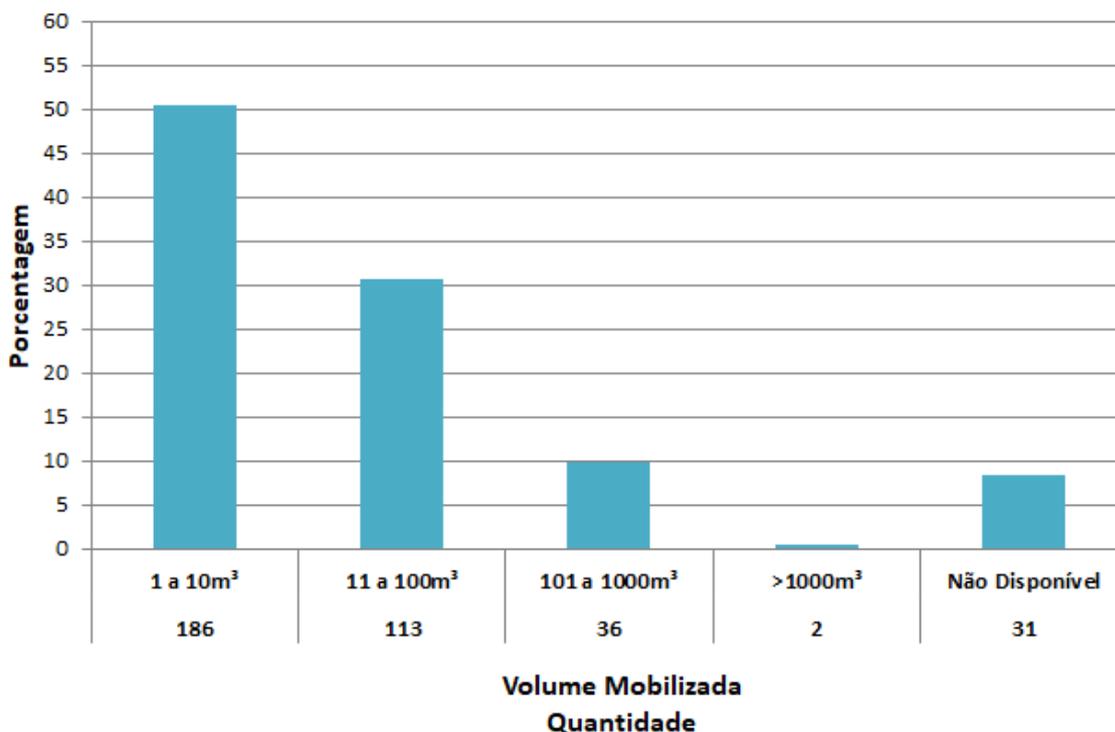


Figura 15- Gráfico do volume mobilizado no Maciço da Tijuca no período de 2010 a 2015.

4.4 Unidades Geológicas das Ocorrências

Em relação às unidades geológicas a maior parte dos eventos, cerca de 77% do total, ocorreram associadas às unidades gnáissicas (biotita-gnaïsse, gnaïsse facoidal, gnaïsse bandado, gnaïsse migmatítico), como pode ser observado no gráfico da figura 16 e no mapa da figura 17. Isso pode estar relacionado tanto às características deste tipo de rocha que são herdadas pelos solos como feições reliquiares, quanto ao fato de que a maior parte do maciço da Tijuca é composta por gnaïsses.

Nos gnaïsses o principal tipo de material mobilizado é solo (presente nas tipologias solo e escorregamento translacional) e o principal mecanismo de ruptura é translacional (escorregamento translacional). Isso ocorre devido às descontinuidades presentes no contato solo – rocha, ou estruturas conservadas no solo, herdadas da rocha de origem, que favorecem o escorregamento translacional de solo.

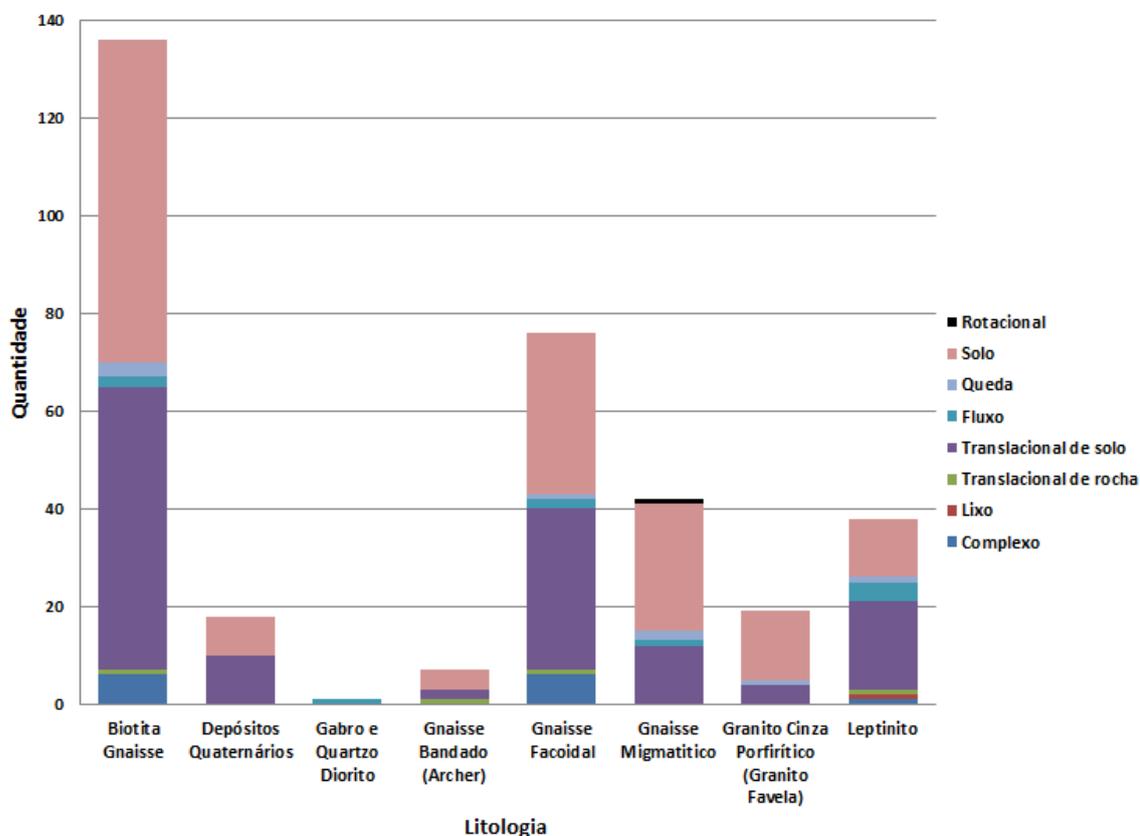
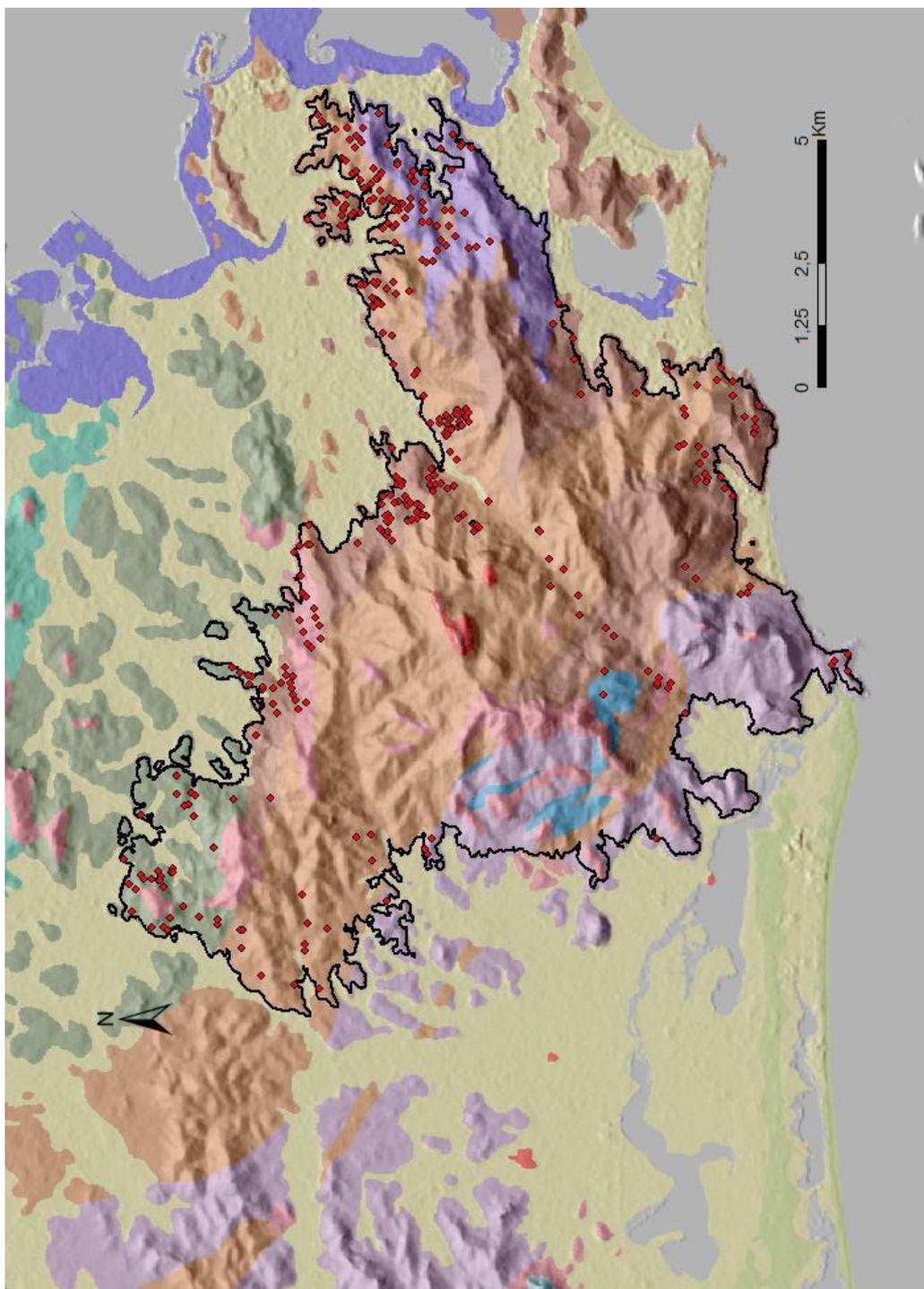


Figura 16 – Gráfico da quantidade de cada tipologia de movimento relacionada às unidades geológicas.



Legenda

- ◆ Eventos 2010-2015
- ▭ Limite Maciço da Tijuca

Mapa_Geológico

UNIDADES

- | | |
|-------------------------|--|
| Aluvião | Gnaiss Migmatítico |
| Aterro | Granito Cinza Porfírico (Granito Favela) |
| Biotita Gnaiss | Granito Pegmatóide |
| Dunas | Granodiorito, Tonalito e Quartzodiorito |
| Gnaiss Bandado | Kinzigito |
| Gnaiss Bandado (Archer) | Leptinito |
| Gnaiss Facoidal | Quartzo Gabro e Quartzo Diorito |
| Gnaiss Granitóide | Sienito e Tinguaito |

Figura 17-Eventos sobrepostos a mapa de unidades geológicas. Fonte: Geo-rio.

4.5 Curvaturas do Relevo

4.5.1 Mapa de Curvatura do Relevo

Os mapas de curvaturas do relevo do Maciço da Tijuca são mostrados nas figuras 18 e 19 e foram usados como base para a classificação da geometria das encostas segundo os critérios descritos no item 3.4.3. Na escala em cinza presente nos mapas a cor cinza mais clara exhibe as áreas convexas (em perfil) e divergentes (em plano), enquanto que a cor preta exhibe as áreas côncavas (em perfil) e convergentes (em plano). A cor intermediária em ambos os mapas representa as áreas lineares/retilíneas.

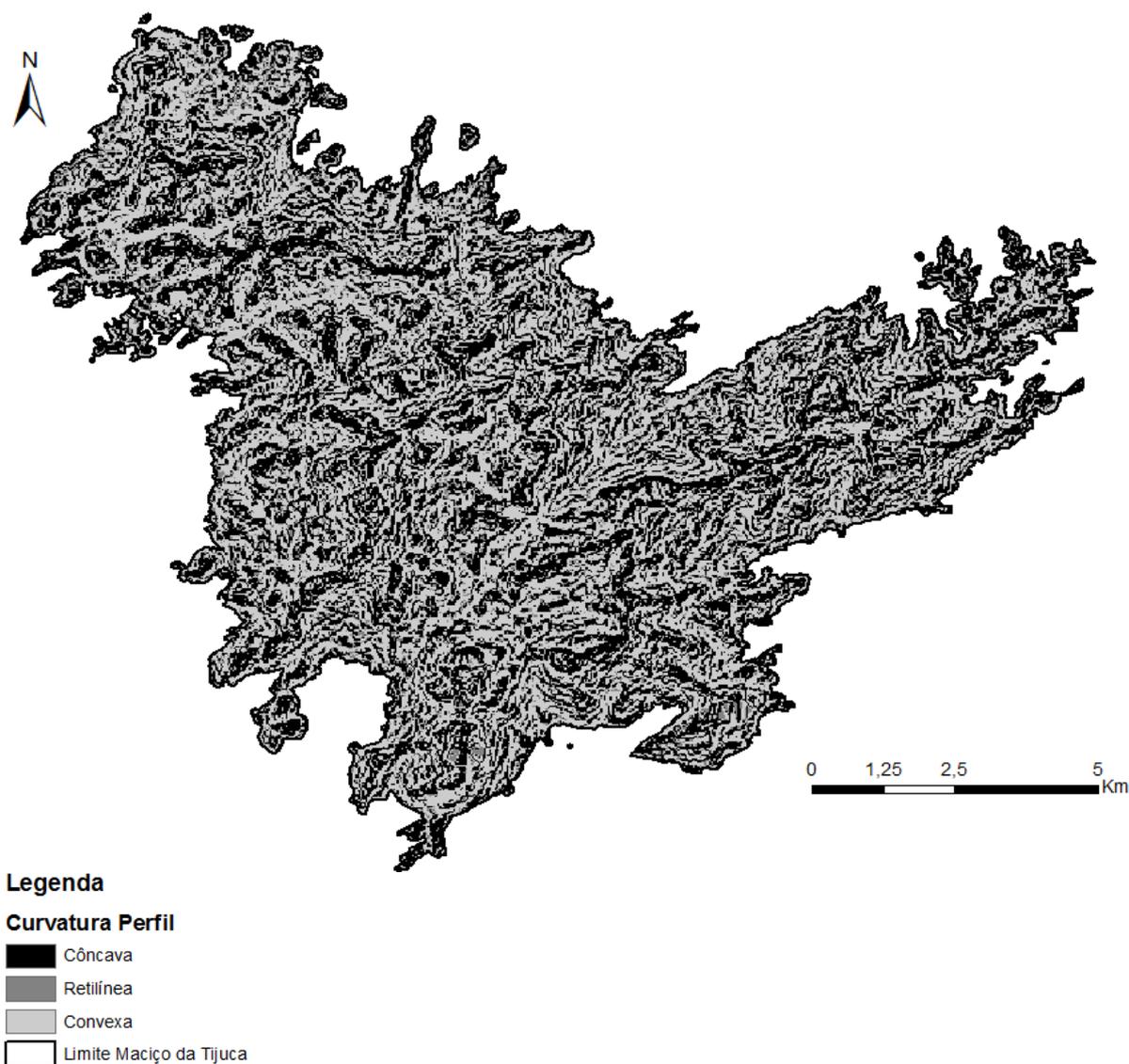


Figura 18 – Mapa de Curvatura em Perfil do Maciço da Tijuca.

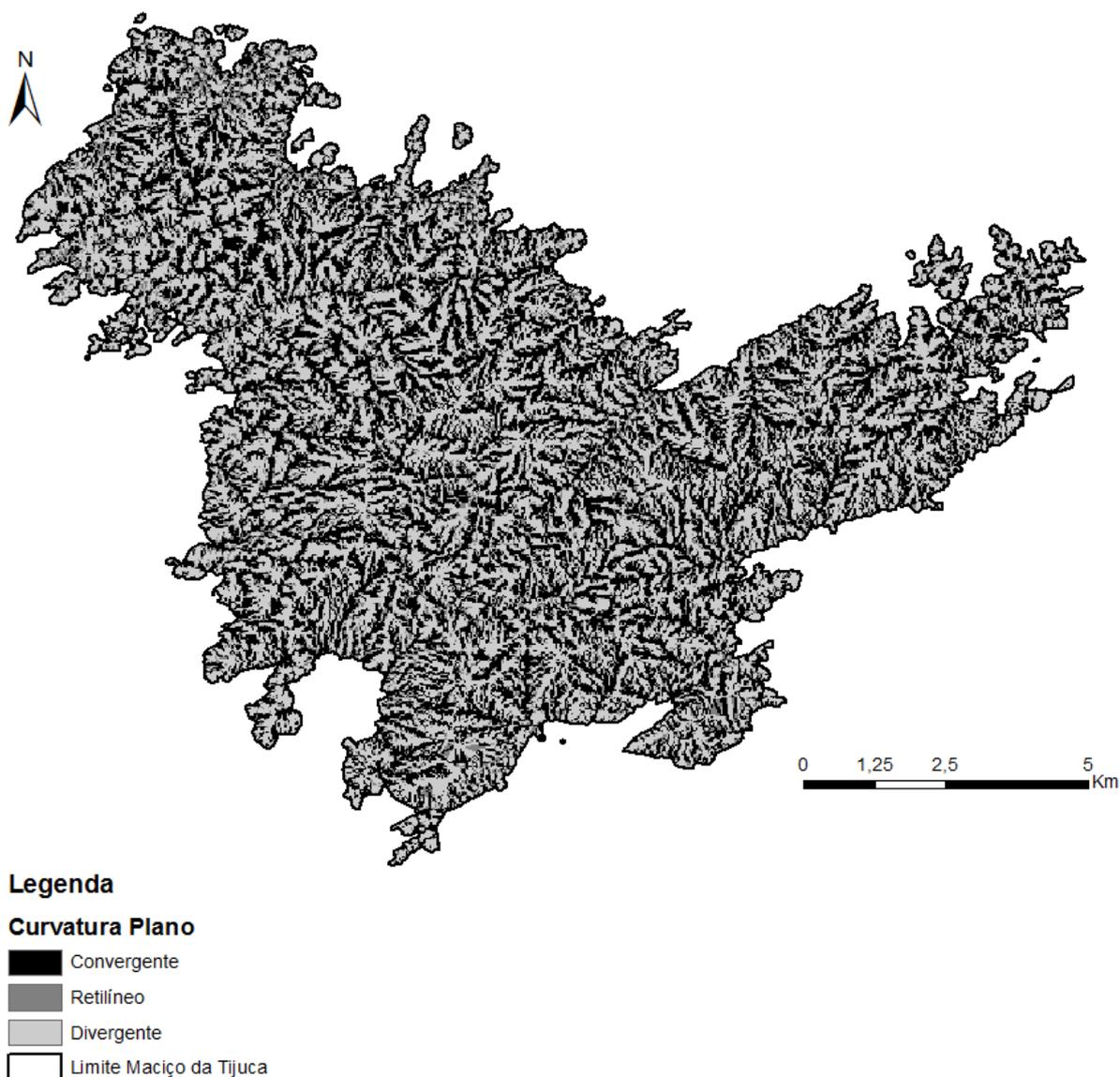


Figura 19 – Mapa de Curvatura em Plano do Maciço da Tijuca

4.5.2 Curvaturas do Relevo das Ocorrências

Partindo da análise das geometrias das encostas relacionadas ao número de ocorrências como um todo, ou seja, sem diferenciar por tipologia, verificou-se que a maior parte dos eventos ocorreu em vertentes de configuração côncava-convergente (fig. 20). Confirmando o que se conclui em muitos trabalhos na literatura, como por exemplo, o de Fernandes e Amaral (1996, *apud* Souza, 2014) no qual afirmam que a geometria côncava, ou que possuem segmentos côncavos em sua seção, são as mais

propícias a movimentos de massa. Isso ocorre porque essa geometria como descrita no item 2.2.1, propicia a convergência do fluxo de água, o que contribui para o movimento por meio do aumento da poropressão e também por meio do próprio peso que o acúmulo de água exerce sobre o material. Além disso, apresenta uma maior disponibilidade de material à mobilização uma vez que apresenta uma menor inclinação favorecendo, assim, o acúmulo de material e a atuação de processos pedológicos formando solos mais espessos, diferente das geometrias convexas na qual os solos são pouco espessos. Secundariamente, um grande número de movimentos ocorreu em vertentes convexo-divergentes, porém mobilizando, majoritariamente, volumes menores.

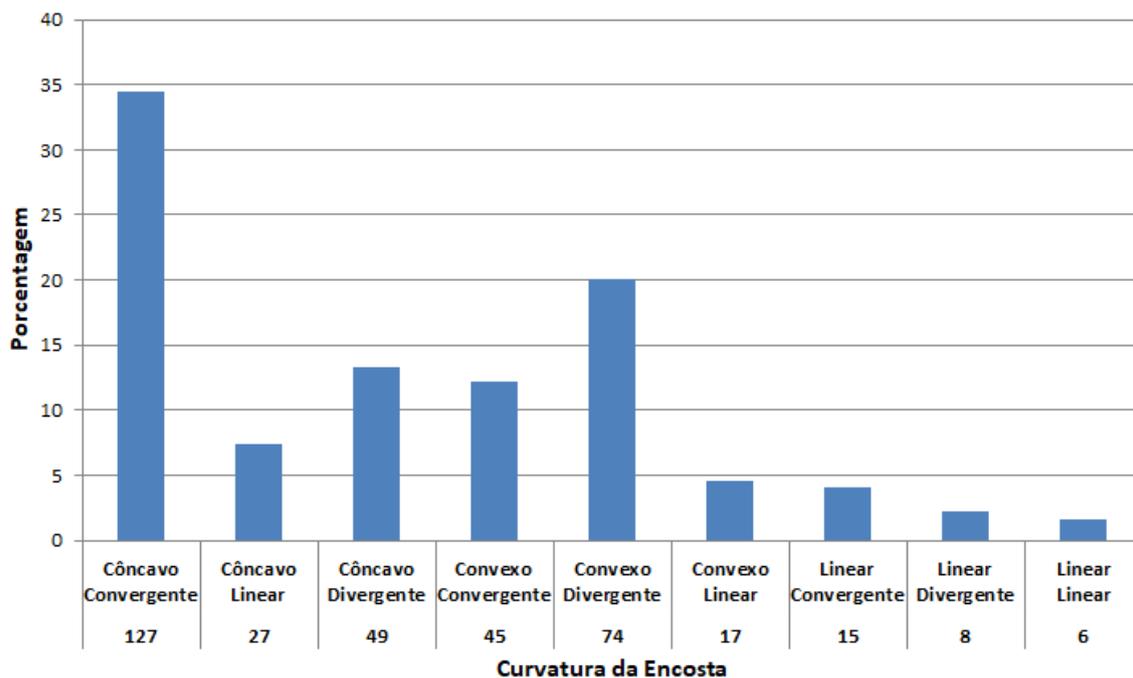


Figura 20- Gráfico da curvatura das encostas onde ocorreram os eventos.

Como pode ser observado no gráfico da figura 21 as geometrias côncavo-convergente estão relacionadas a todas as categorias de volume, desde 1 m³ até maior que 1000 m³, ou seja os eventos estão distribuídos em todas essas categorias, enquanto que as convexo-divergentes apresentam uma maior concentração nos volumes menores e nem atingem volumes maiores que 1000 m³.

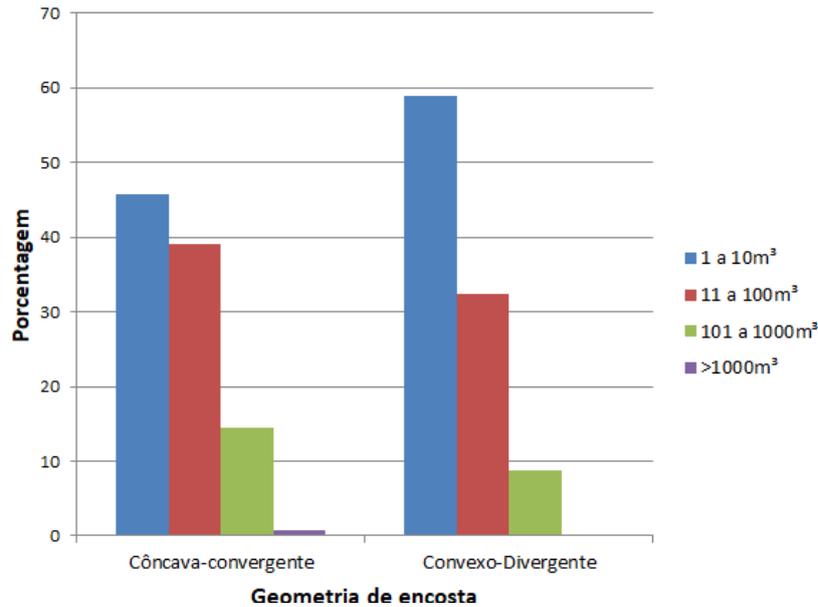


Figura 21- Gráfico de comparação dos volumes mobilizados nas geometrias côncavo-convergente e convexo-divergente.

Com base no gráfico da figura 22 verificou-se que escorregamento translacional e solo estão presentes em todas as geometrias, côncavo-convergente, côncavo-linear, côncavo-divergente, convexo-convergente, convexo-divergente, convexo-linear, linear-convergente, linear-divergente, linear-linear, sendo mais frequente nas vertentes côncavas. Destaque para as quedas mais comuns em vertentes côncavas, em relação as convexas. Os movimentos complexos (translacional e queda) foram mais comuns nas vertentes convergentes, com destaque para as côncavas e convexas, respectivamente. Os fluxos foram mais comuns nas vertentes côncavo-convergentes.

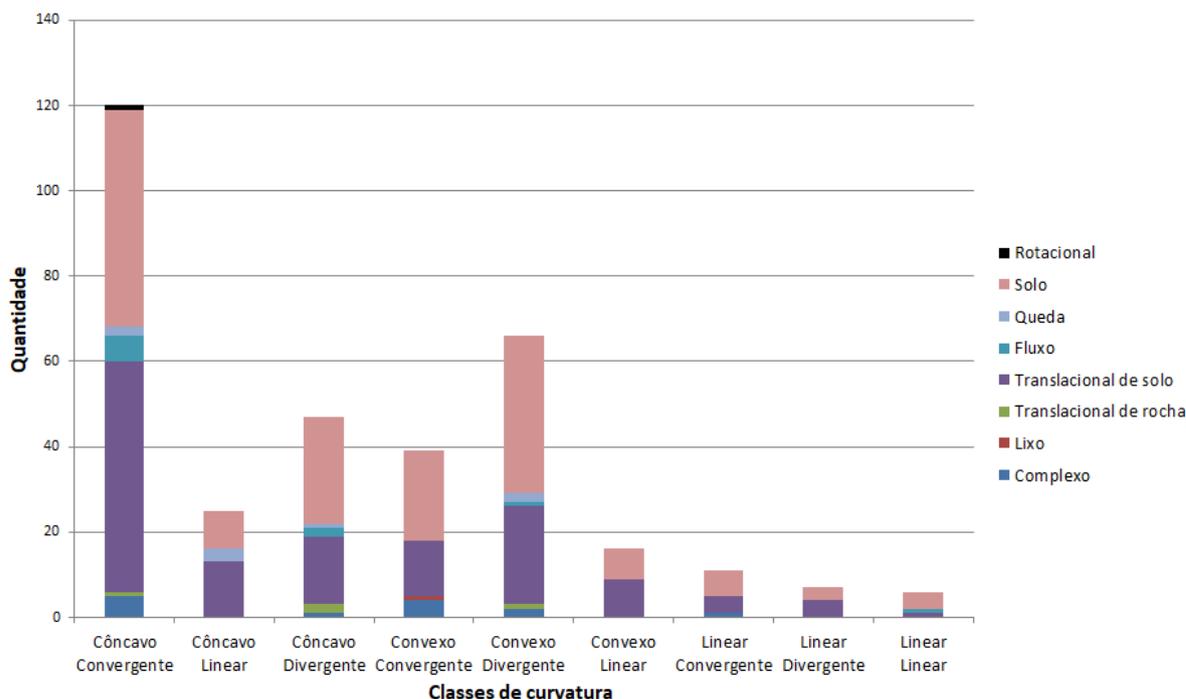


Figura 22- Gráfico das curvaturas das encostas correlacionadas às tipologias das ocorrências.

4.6 Unidades Geotécnicas das Ocorrências

O maior número de ocorrências, cerca de 70%, está relacionado a solos residuais de espessura maior que dois metros. Nessa unidade estão presentes todas as tipologias de movimento, escorregamento rotacional, solo, queda de blocos, fluxo, translacional de solo, translacional de rocha, escorregamento de lixo e complexo (fig. 23.a). A ocorrência de escorregamento translacional de rocha e de queda de blocos em solos espessos, não está de acordo com as características desses tipos de movimento. Uma hipótese a ser considerada é a de que as coordenadas fornecidas nos laudos da Geo-Rio referem-se ao local onde a massa mobilizada se depositou, ou seja, nesse caso os blocos ou as lascas de rochas teriam se depositado nas superfícies menos íngremes onde ocorre o desenvolvimento de solos espessos. No caso da queda de blocos outra hipótese é a de que os blocos de rochas estavam imersos em um solo espesso, e devido a diversos fatores, entre eles a erosão, esses blocos foram expostos e se desprenderam em queda livre. O grande número das demais tipologias, provavelmente está ligado ao fato de que

solos espessos apresentam características que favorecem o deflagrar dos diferentes tipos de movimento. Entre essas características pode-se citar como hipótese o desenvolvimento de solos argissolos, que são caracterizados pela presença de um horizonte B textural. Em períodos de chuva pode haver um aumento da umidade nesse tipo de solo e consequente aparecimento de superfícies de ruptura que podem ocorrer entre os horizontes de características diferentes, configurando planos de ruptura.

O segundo maior número de eventos ocorreu em depósito de tálus-colúvio, seguido por solos residuais de espessura menor que dois metros (fig.23.b).

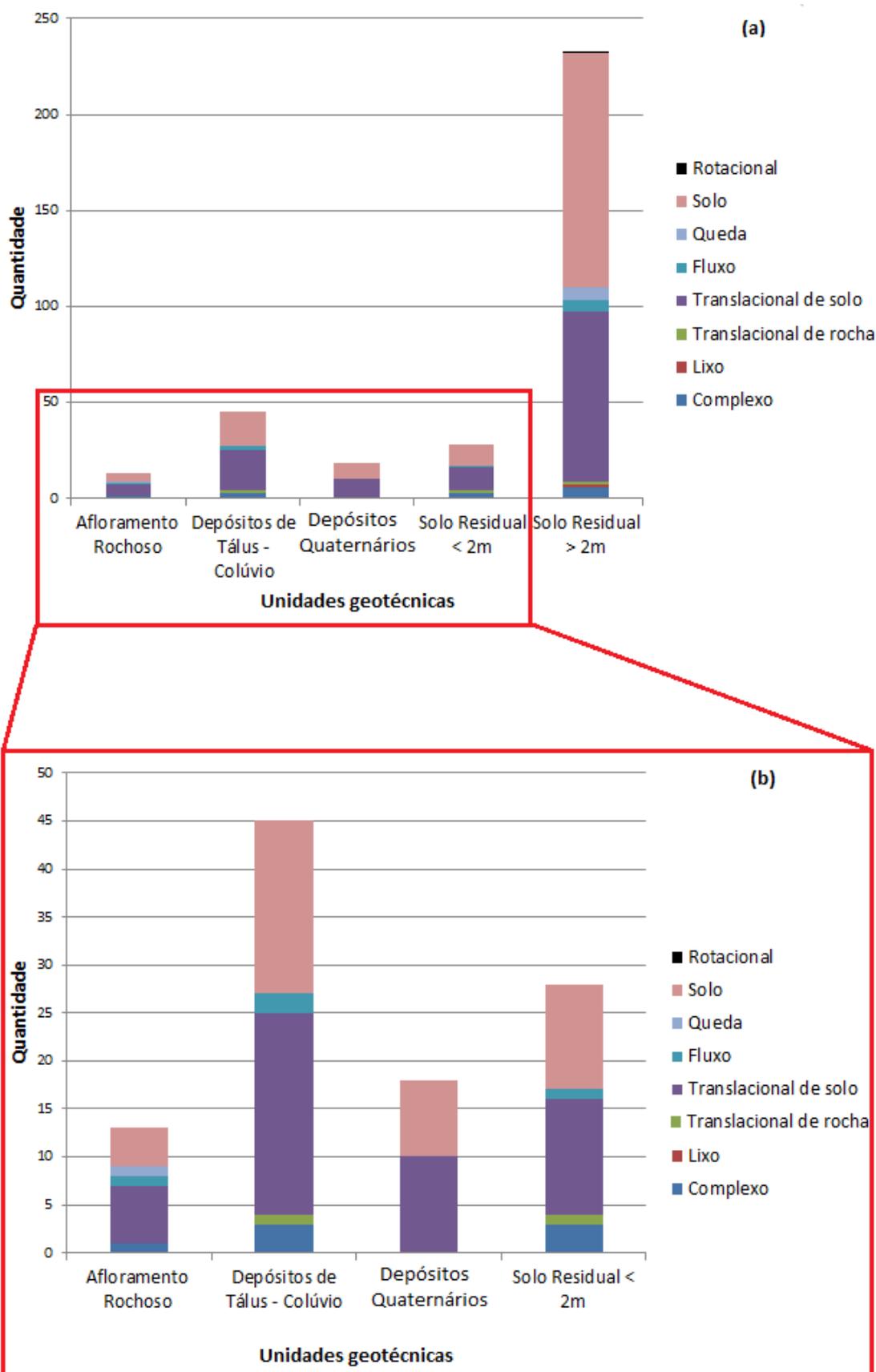


Figura 23- Gráfico das unidades geotécnicas correlacionadas às tipologias de movimentos. A figura (a) apresenta todas as unidades geotécnicas. A figura (b) apresenta as unidades geotécnicas exceto solo residual maior que dois metros, a fim de obter uma melhor visualização das unidades com um número menor de eventos.

4.7 Orientação de Vertente

4.7.1 Mapa de Orientação das Vertentes

O mapa de orientação de vertentes do Maciço da Tijuca é mostrado na figura 24. A partir desse mapa foi obtida a orientação de cada vertente onde ocorreram os movimentos de massa.

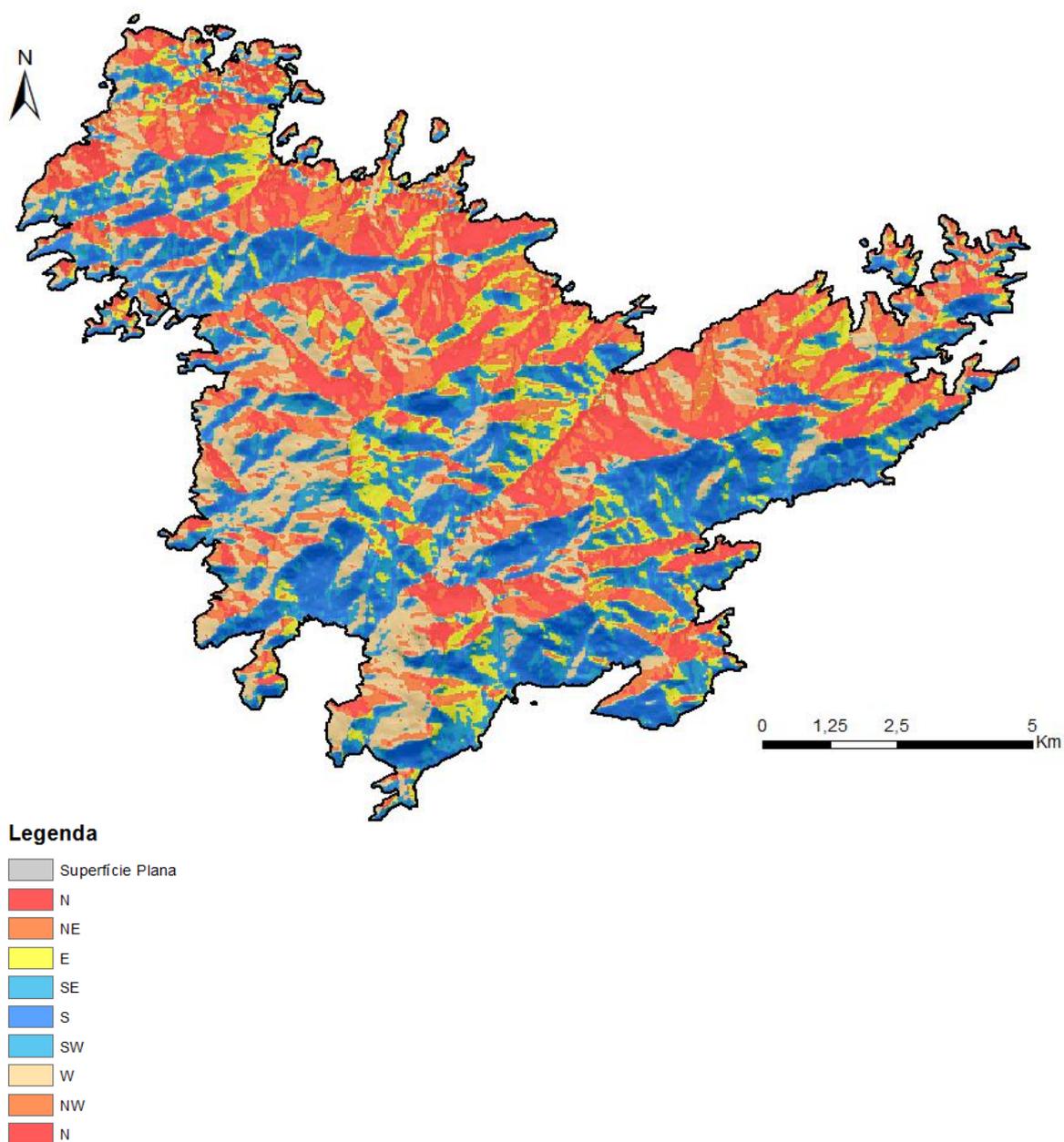


Figura 24- Mapa de Orientação de Vertente do Maciço da Tijuca

4.7.2 Orientação das Vertentes das Ocorrências

Apesar de o encontro com o relevo e conseqüente elevação das massas úmidas, vindas do oceano e procedentes do sul e sudeste, caracterizarem a porção sul do maciço como clima “Af” segundo a classificação de Köppen, ou seja, tropical chuvoso o ano todo, a região que apresenta maior número de eventos é a composta pelas vertentes norte da porção norte do maciço da Tijuca, como pode ser observado nas figuras 25 e no mapa de orientação de vertente mostrado no item 4.7.1. Essa porção, que compreende os setores 1 e 2 do maciço, apresenta clima “Aw” (tropical com uma estação seca no inverno) e “Am” (típico de área de bosque com uma pequena estação seca e pluviosidade um pouco mais elevada que a do “Aw”), respectivamente. Embora haja períodos de secas, os eventos são datados principalmente no período de dezembro a abril, que são os períodos chuvosos característicos, uma vez que os eventos aqui estudados têm base em eventos pluviométricos significativos.

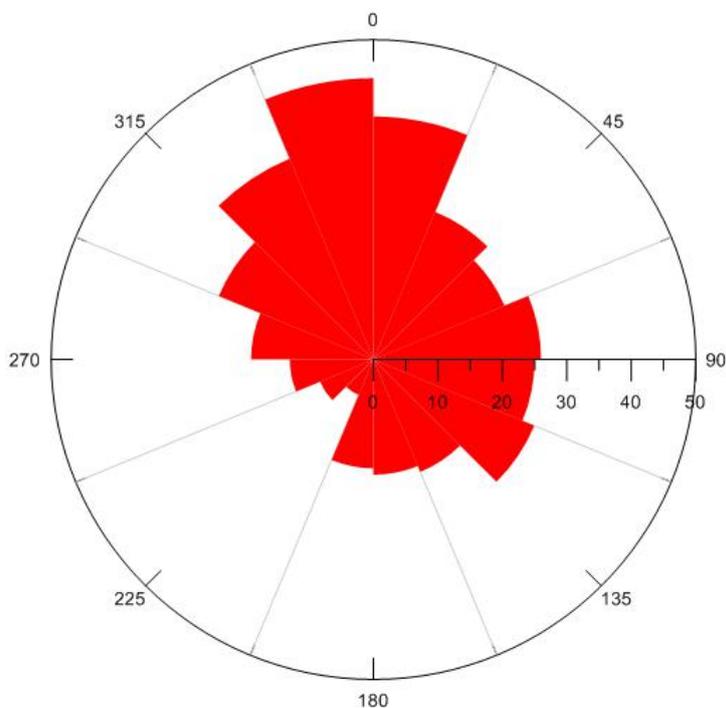


Figura 25- Porcentagem das orientações de vertentes relacionadas aos eventos de movimento de massa no Maciço da Tijuca.

“A variação de exposição à pluviosidade, insolação e ventos de uma vertente estão relacionados à sua orientação (aspecto), o que causa diferenças na umidade retida na vertente e, portanto, na umidade do solo. Vertentes que retêm mais umidade estão, em geral, opostas à insolação ou voltadas para a umidade transportada por ventos ou por pluviosidade.” (Souza, 2014).

4.8 Inclinações dos Relevos

4.8.1 Mapa das Inclinações dos Relevos

O mapa de inclinações do Maciço (fig. 26) apresenta classes de inclinação segundo os ângulos de atritos, como descrito no item 3.5.

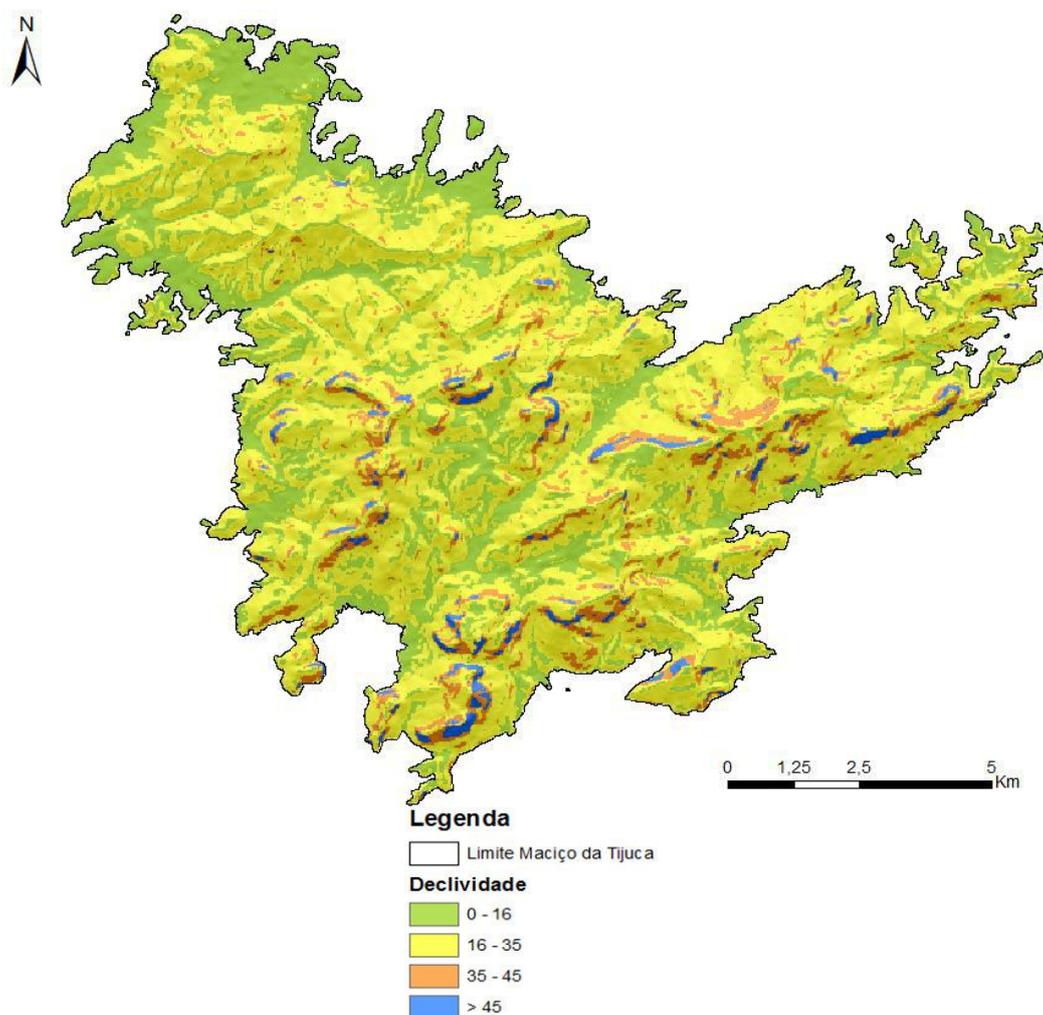


Figura 26 – Mapa de Inclinação dos Relevos do Maciço da Tijuca

4.8.2 Inclinações dos Relevos das Ocorrências

Dentre as classes de inclinação a principal foi a de 16° a 35° , onde ocorreram 66,4% dos eventos. Secundariamente, 30,4 % ocorreram na classe menor ou igual a 16 graus. Entre os demais eventos 2,4 % ocorreram em inclinações entre 35 e 45 graus. Apenas 1 evento, classificado como fluxo de detritos, ocorreu em inclinação maior que 45 graus.

Ao contrário do que era esperado um grande número de eventos ocorreu em inclinações menores que os ângulos de atrito (item 3.4.4). Na tentativa de explicar esse resultado são levantadas algumas hipóteses. Sabe-se que as coordenadas fornecidas nos laudos da Geo-Rio nem sempre se referem ao local exato onde ocorreu o movimento. Muitas das vezes essas coordenadas são obtidas no local onde o movimento de massa cessou ou mesmo nos locais os danos foram provocados. Além disso, como já foi abordada no item 3.3, uma quantidade considerável dos laudos apresentou falta de exatidão quanto às coordenadas dos eventos, tornando-se necessária a correção com base em fotos, descrições e endereço, sendo possível inferir, a partir desses, as coordenadas corretas. Porém em ambos os casos citados, há uma certa distância entre a localização de onde de fato o movimento foi deflagrado e a coordenada obtida, distância essa que, no quesito inclinação, pode ter grande influência. Outra hipótese a ser considerada é a de que, com base na resolução da imagem SRTM (item 3.4), o valor da inclinação em cada pixel corresponde à inclinação a cada 30 metros, ou seja, não é possível observar variação na inclinação dentro dessa distância. Sendo assim, na obtenção do mapa de inclinação, não são apresentadas como resultado as inclinações produzidas por ações antrópicas, que influenciam a instabilidade do talude.

A partir da análise dos gráficos obtidos para cada classe de inclinação (fig. 27) observou-se que em todas predomina o movimento de solos. O escorregamento

translacional de solo apresenta-se como o segundo principal, exceto na inclinação entre 35 e 45 graus, na qual apresenta a mesma quantidade de eventos que o movimento complexo. Não há como estabelecer uma relação entre a inclinação e os escorregamentos de lixo/entulho e rotacionais devido ao pequeno número de eventos desses tipos nos dados do presente estudo. As quedas ocorreram apenas nas classes menores que 35 graus. Há registro de fluxos em todas as classes, inclusive na maior que 45 graus, exceto no intervalo 35 a 45 graus.

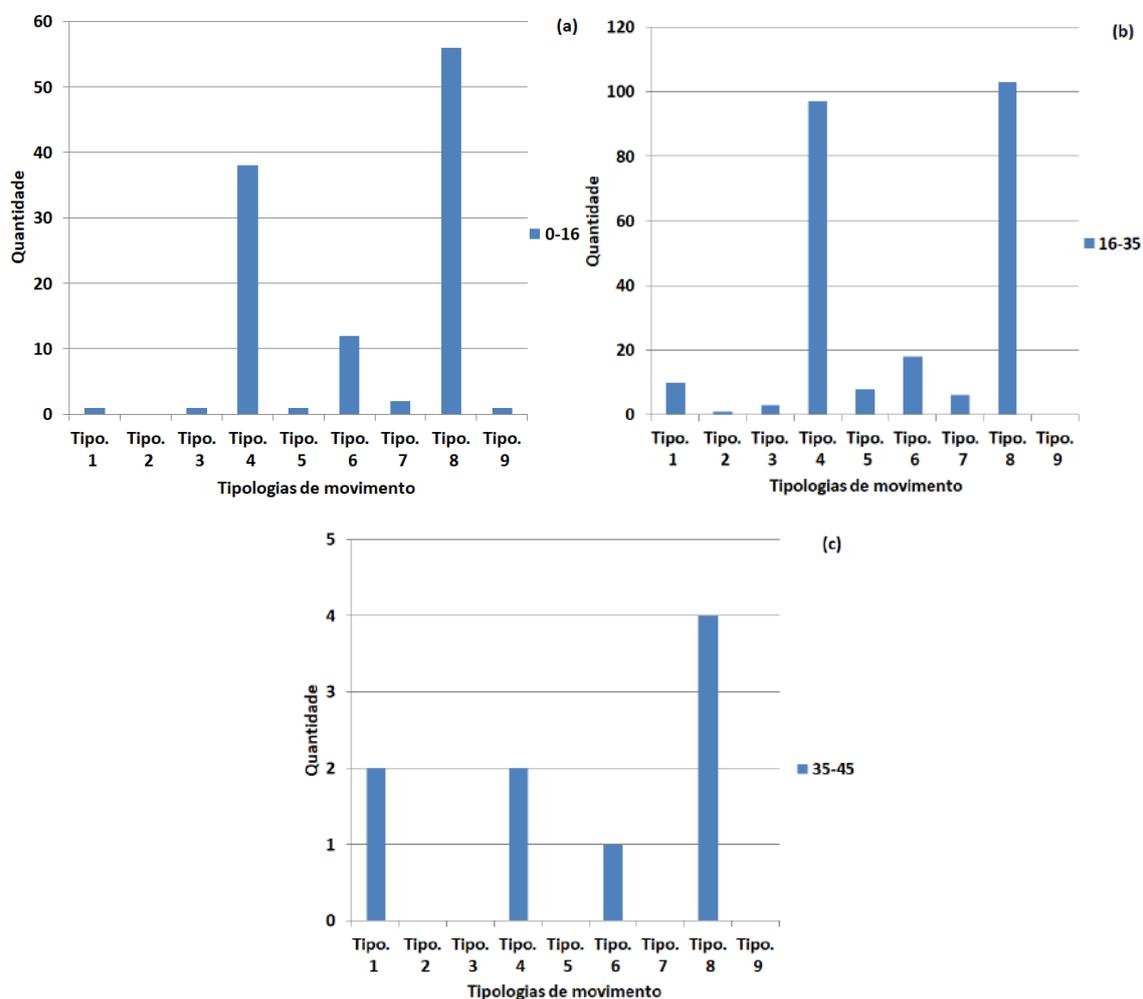


Figura 27 - Gráficos das tipologias de movimento (1- Complexo Translacional e Queda; 2- Escorregamento Lixo/Entulho; 3- Escorregamento Translacional de Rocha; 4- Escorregamento Translacional de Solo; 5- Fluxo; 6- Não Identificado; 7- Queda/Rolamento de blocos ou lascas; 8- Solo; 9- Escorregamento Rotacional) correlacionadas com a inclinação: (a) 0-16°; (b) 16-35°; (c) 35-45°.

4.9 LINEAMENTOS

4.9.1 Mapa dos Lineamentos no Maciço da Tijuca

O mapa de lineamentos fotointerpretado para a área do Maciço da Tijuca é ilustrado na figura 28. Os lineamentos além da área do Maciço da Tijuca estão presentes como resultados, pois, assim como aqueles dentro da área, foram usados como base para a obtenção da distância entre cada ocorrência e o seu lineamento mais próximo.

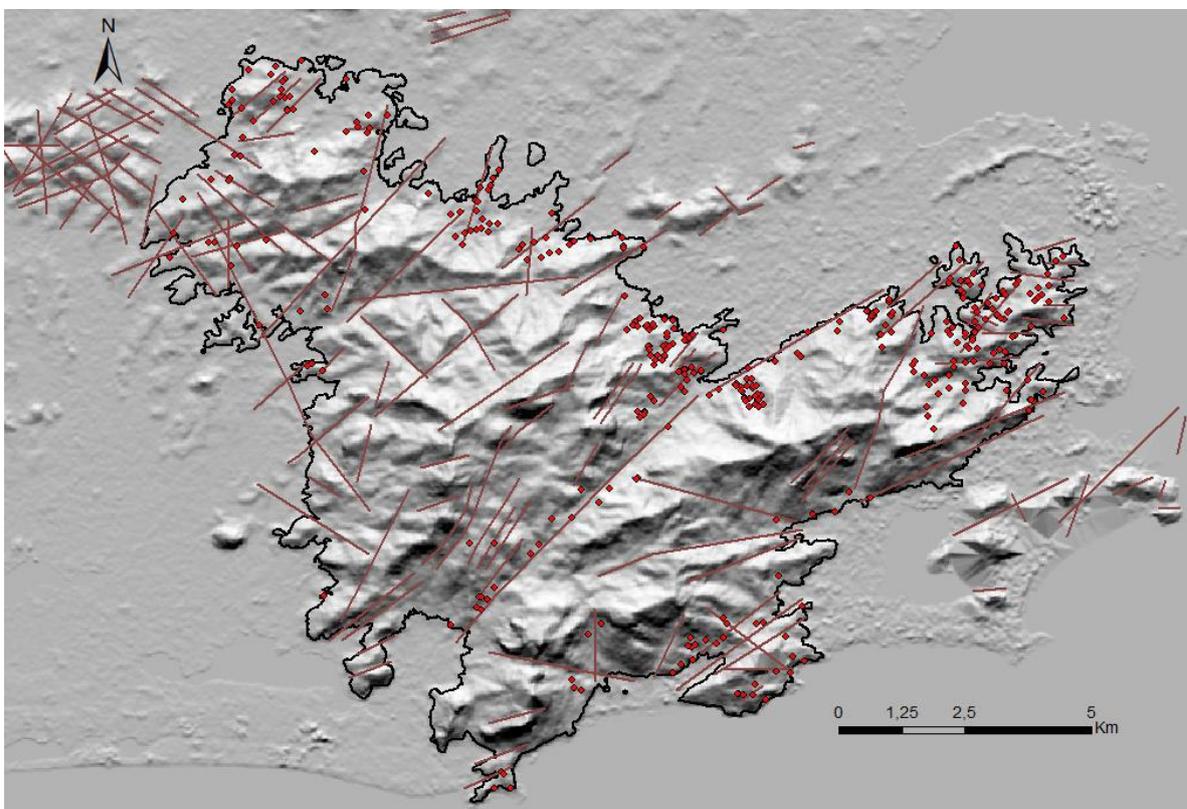


Figura 28 – Mapa de lineamentos do Maciço da Tijuca e de áreas próximas.

Legenda

- ◆ Eventos 2010-2015
- Lineamentos
- Limite Maciço da Tijuca

4.9.2 Mapa de Densidade de Lineamentos

O mapa de densidade de lineamentos (fig. 29) é dividido em classes segundo o método *Natural Breaks*, onde os intervalos são estabelecidos buscando minimizar o

desvio médio da média de cada classe. A partir desse mapa foi obtida a densidade de lineamento relacionada a cada evento de movimento de massa.

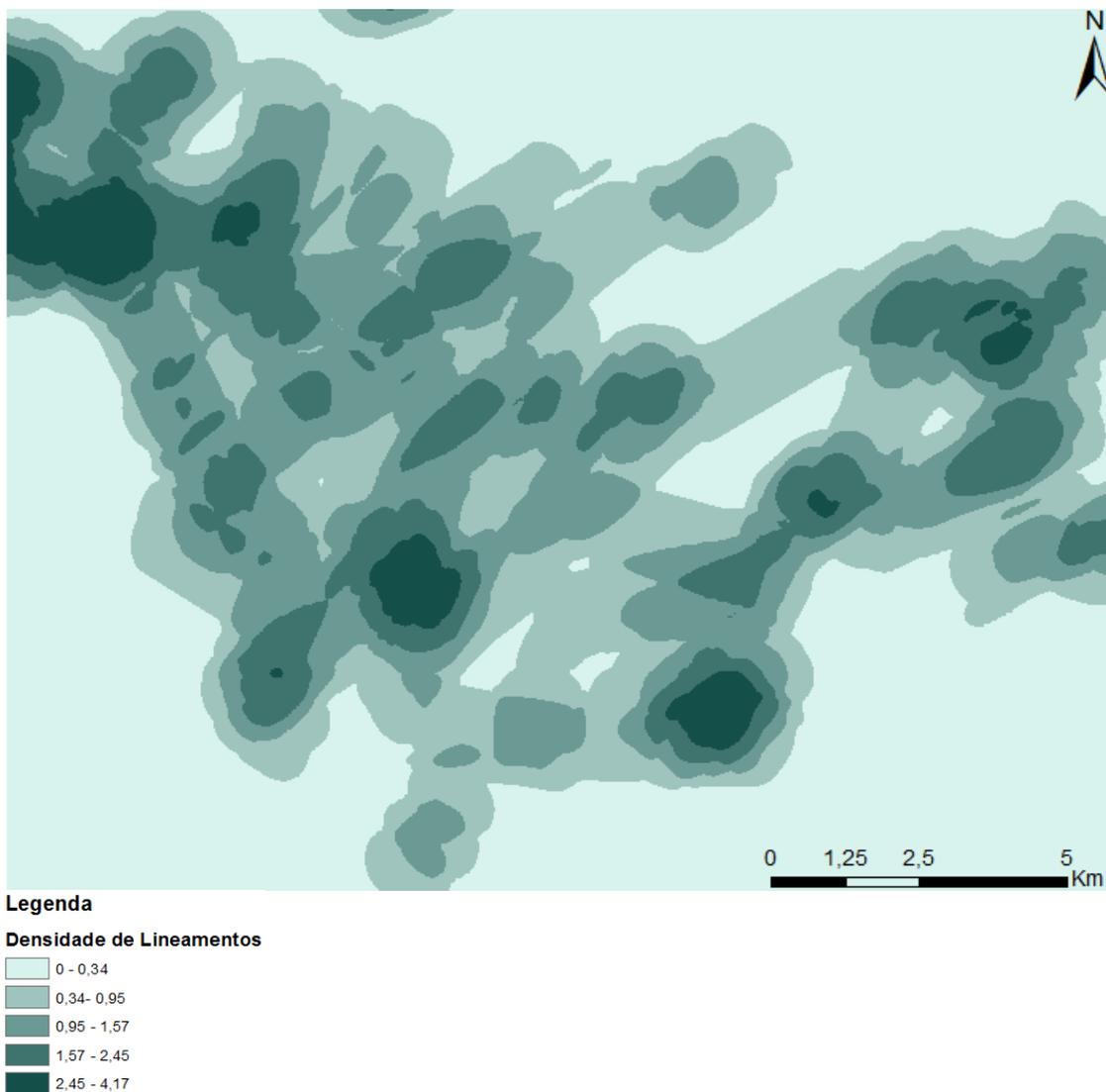


Figura 29 – Mapa de densidade de lineamentos do Maciço da Tijuca.

4.9.3 Distância ao Lineamento

O histograma da figura 30 apresenta uma distribuição com assimetria positiva (ou à direita), ou seja, a distribuição decresce à direita mostrando que a maior parte dos eventos (51%) ocorreu a distâncias menores que 150 metros do lineamento mais próximo. Conforme aumenta a distância observa-se o decréscimo expressivo no número de eventos. O limite da distância na qual um determinado lineamento exerce influencia

no deflagrar de movimentos de massa pode ser aprimorado se forem analisados os lineamentos em mapeamento de maior detalhe, ou seja, aqueles não foram passíveis de fotointerpretação. Porém, mesmo na escala de lineamentos usada nesse trabalho é possível observar uma relação inversa entre a distância e o número de eventos, que pode estar relacionada tanto a influencia direta dessas estruturas sobre os movimentos - por exemplo, pela percolação de água ao longo dessas fraturas favorecendo o aumento da poropressão - quanto a influencia dessas combinadas com a ocupação ao longo de vales.

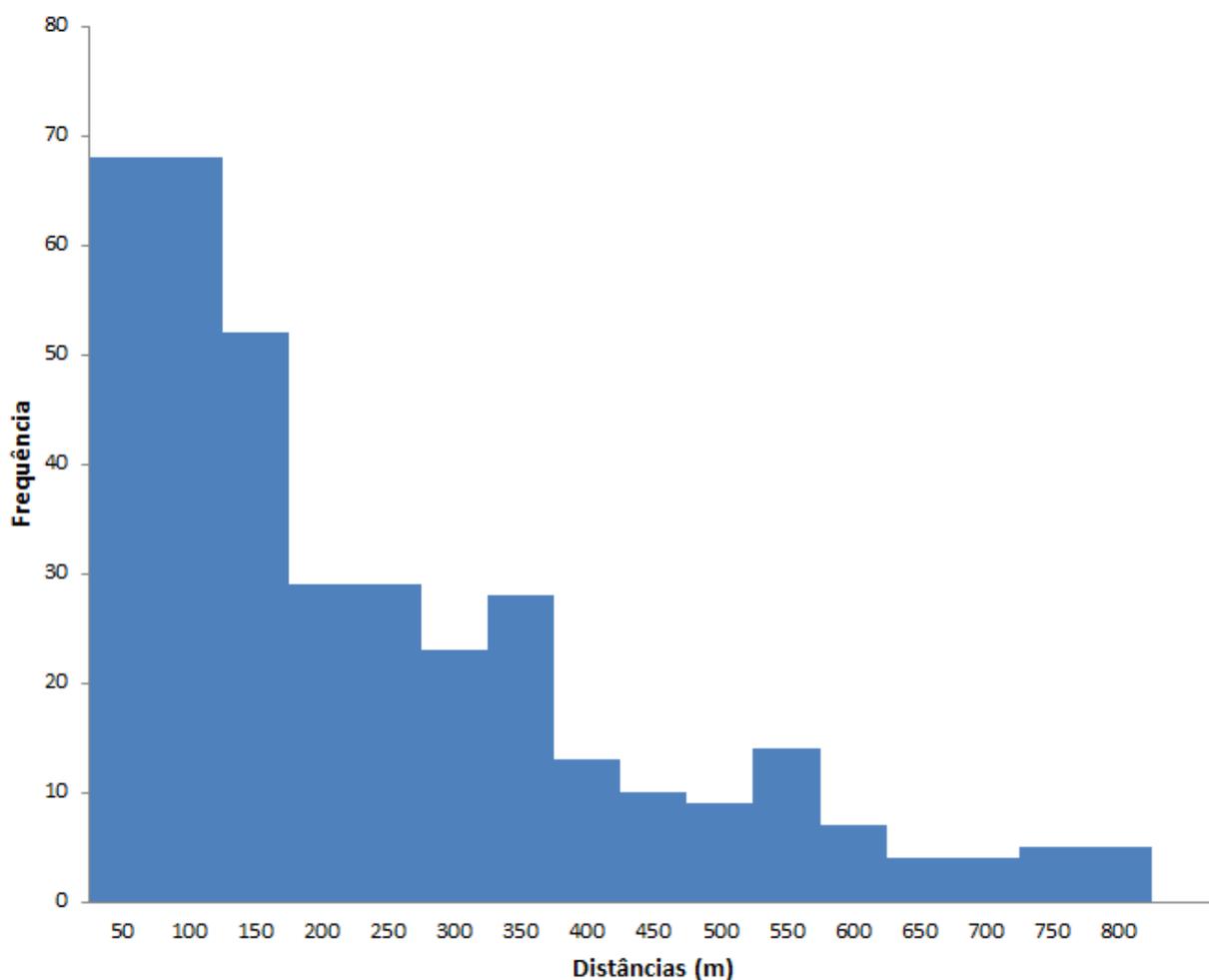


Figura 30 – Distribuição da distância entre os eventos e os lineamentos.

4.9.4 Densidade de Lineamentos

O gráfico da relação entre o movimento de massa e a densidade de lineamento, ou seja, a soma dos comprimentos de lineamentos em um raio de 800 metros em relação ao local da ocorrência (item 3.4.1), é mostrado na figura 31. A partir desse gráfico observou-se que, de forma geral, o número de eventos diminui com o aumento da densidade de lineamentos. Isso provavelmente está relacionado à dissipação da poropressão com o aumento da densidade de lineamento.

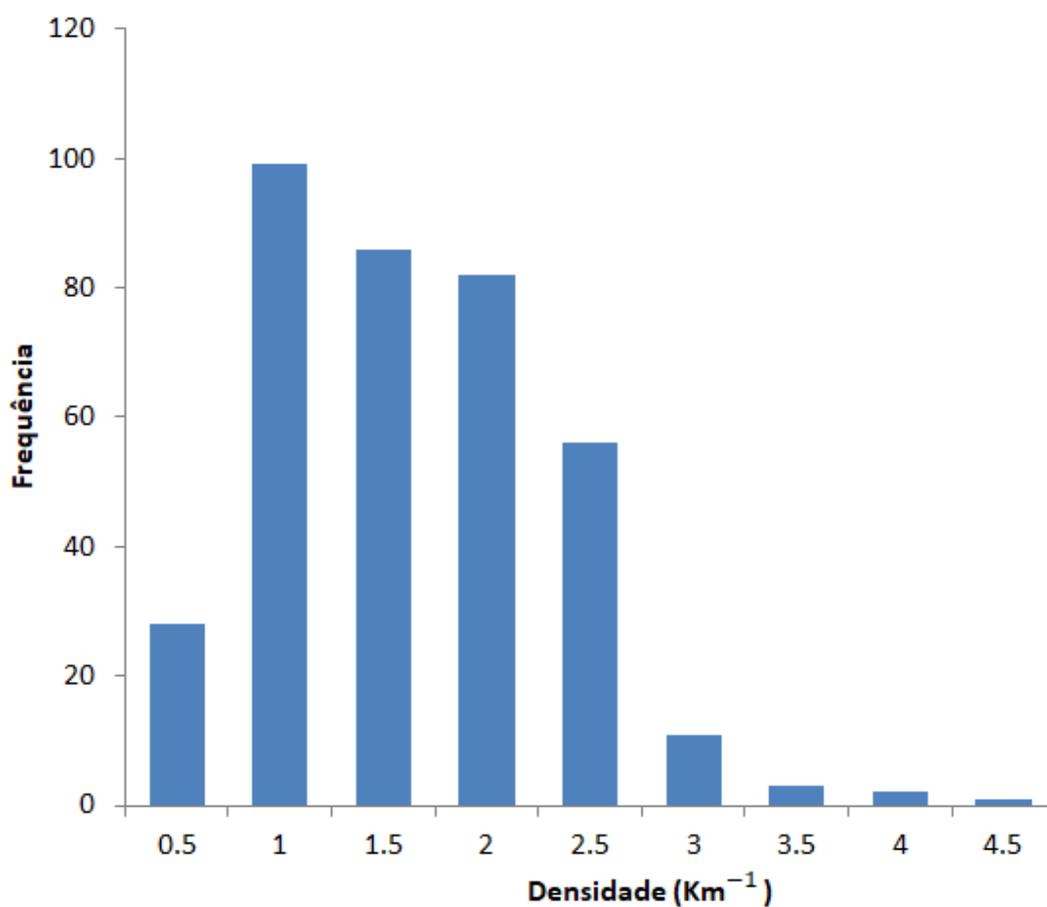


Figura 31 – Distribuição da densidade de lineamento.

4.9.5 Análise dos Fatores Curvatura em Perfil, Curvatura em Plano e Distância ao Lineamento

A análise da relação entre a curvatura em plano, em perfil e a distância ao lineamento evidenciou que as geometrias de encosta não apresentam uma relação com uma faixa de distância, ou seja, ocorreram próximos a lineamentos até bem distantes desses, como pode ser observado de forma geral no gráfico da figura 32. Por meio dos gráficos da figura 33 é possível observar uma pequena diferença onde nas classes convergentes ocorre a distribuição dos eventos em todas as distâncias, enquanto que as divergentes parecem apresentar uma concentração em distâncias maiores que 100 metros.

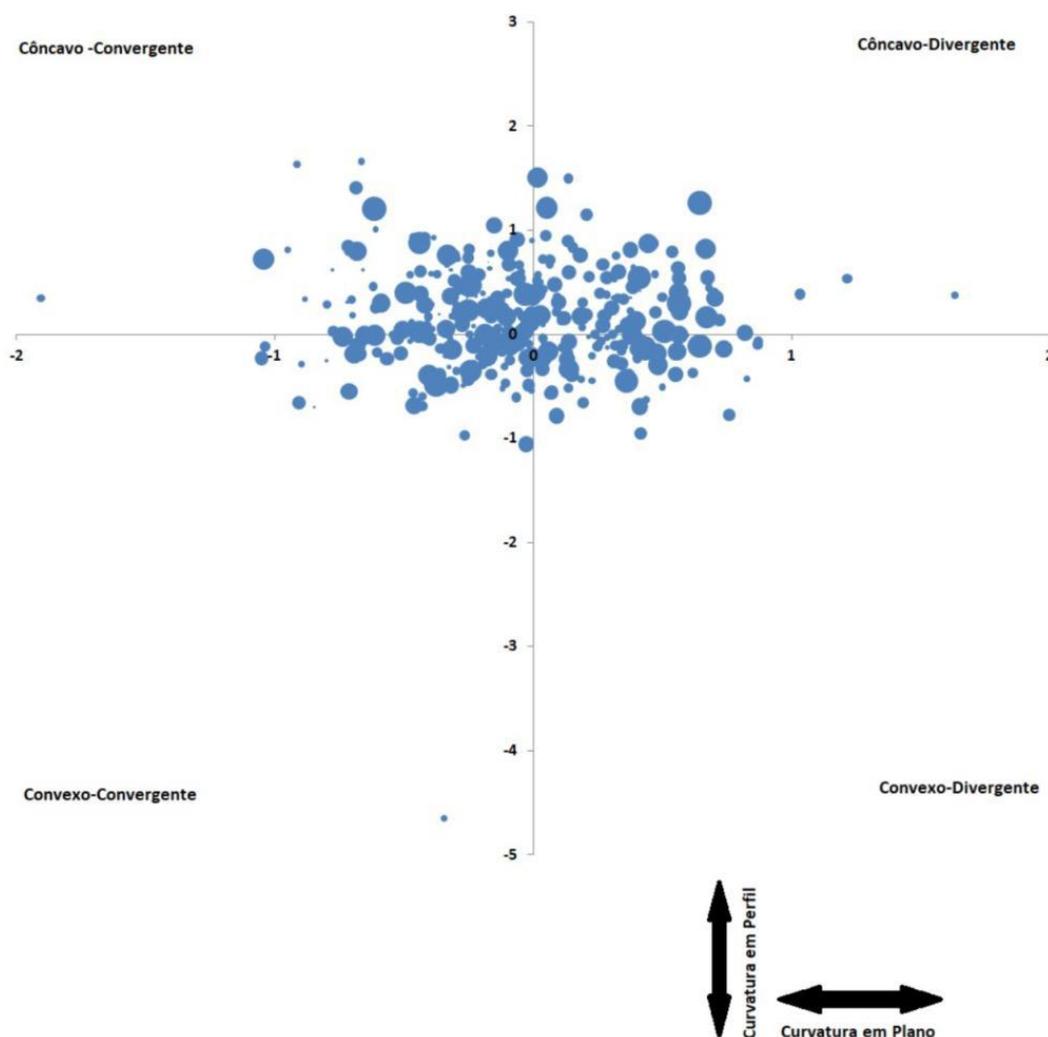


Figura 32- Gráfico correlacionando a curvatura em perfil (eixo y), a curvatura em plano (eixo x) e a distância ao lineamento (tamanho da bolha). É importante ressaltar que a região de -0,04 a 0,04 no eixo y e de -0,06 a 0,06 no eixo x, corresponde à geometria linear-linear.

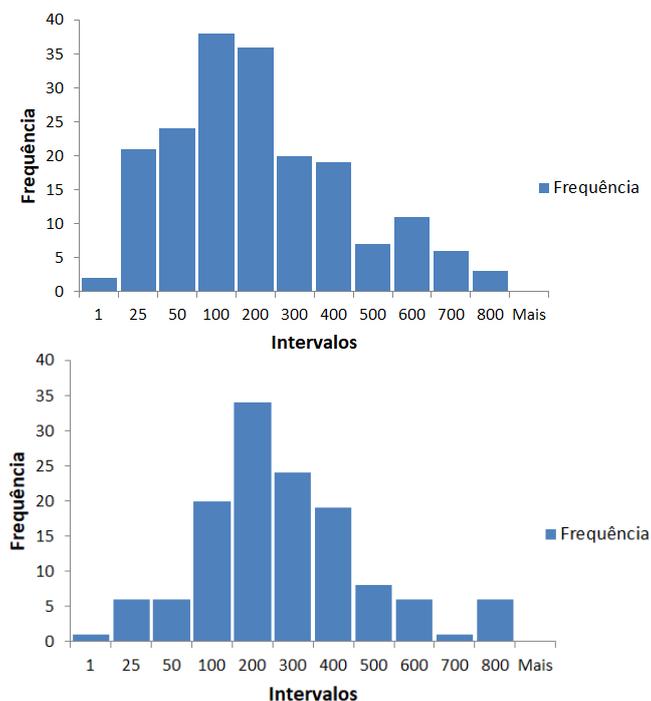


Figura 33 – Distribuição da distância ao lineamento em relação aos eventos ocorridos nas geometrias convergentes (histograma acima) e divergentes (histograma abaixo).

4.10 Análise dos Fatores Condicionantes a partir do PCA

O PCA foi obtido a partir de cinco parâmetros (densidade de lineamento, distância da ocorrência ao lineamento mais próximo, inclinação e curvatura em plano e em perfil) e os 368 dados de eventos. A partir da análise das componentes observa-se que as três primeiras componentes correspondem a 80% do total da variância, sendo 61% compreendida pelas duas primeiras (tabela 13). O gráfico na figura 34 mostra que a componente 1 apresenta a maior importância pois, uma vez que possui o valor de variância mais alto, esse tem a maior variância, seguido da componente 2.

Tabela 13 - Resumo da análise das componentes

	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Comp.4	Comp.5
Standard deviation	1.29472	1.17669	0.98369	0.73727	0.65414
Proportion of Variance	0.33526	0.27692	0.19353	0.10871	0.08558
Cumulative Proportion	0.33526	0.61218	0.80571	0.91442	1.00000

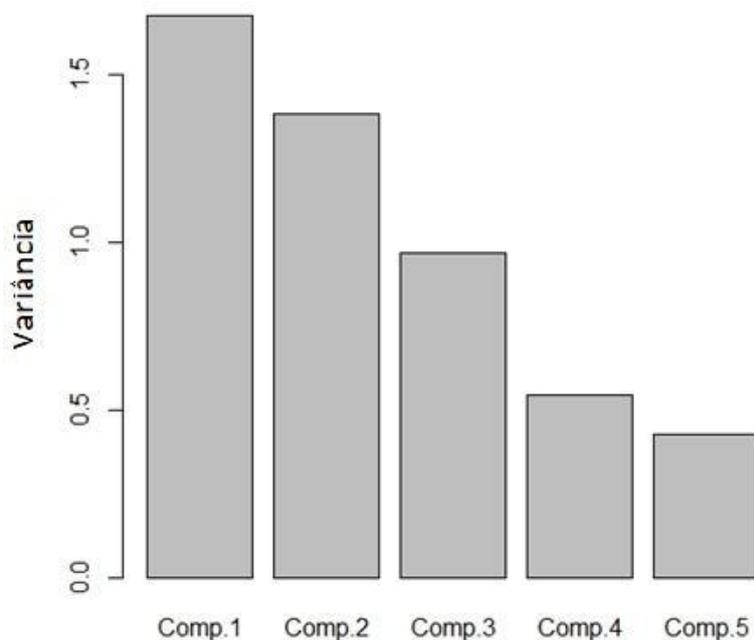


Figura 34 - Gráfico da variância correspondente a cada componente.

Com base na matriz de correlação (tabela 14) obtém-se o grau de associação (que é maior quanto maior o módulo do valor da correlação) entre os fatores, e a proporcionalidade entre esses, ou seja, uma correlação positiva (associação direta) ou uma correlação negativa (associação inversa). As correlações mais significantes ocorrem, respectivamente, entre densidade de lineamentos e distância ao lineamento, e entre curvatura em perfil e em plano. A inclinação e a distância ao lineamento apresentam uma correlação moderada, em relação às correlações citadas anteriormente.

Tabela 14 - Matriz de correlação das variáveis

	Perfil	Plano	Inclin.	DensiLine	DistLine
Perfil	1.00000	-0.43828	-0.05114	-0.00291	-0.03735
Plano	-0.43828	1.00000	-0.02755	-0.08706	0.106308
Inclin.	-0.05114	-0.02755	1.00000	-0.07302	0.204195
DensiLine	-0.00291	-0.08706	-0.07302	1.00000	-0.55517
DistLine	-0.03735	0.106308	0.204195	-0.55517	1.00000

Cada fator é representado por um vetor como pode ser observado na figura 35. Sendo assim, a importância de um determinado fator pode ser entendida como diretamente proporcional à magnitude do vetor. O tamanho do vetor indica a importância que o fator tem sobre a variabilidade dos eventos e o sentido do vetor corresponde a correlação com as componentes 1 e 2.

A análise do PCA (fig. 35) mostrou que, de uma forma geral, existem dois grupos que estão associados aos movimentos de massa. O primeiro grupo formado pelos pontos cujas projeções, em módulo, em relação aos vetores de inclinação, distância ao lineamento e densidade de lineamento são maiores do que em relação aos vetores de curvatura em plano e em perfil, e reciprocamente para o segundo grupo.

O primeiro grupo apresenta uma alta correlação com a componente de maior variância, ou seja, apresenta uma projeção maior na componente 1, logo pode ser interpretado como o grupo que apresenta maior importância em relação aos eventos aqui analisados. Esse grupo pode ser dividido em dois subgrupos diferenciados pelo sentido do vetor. Primeiro subgrupo: formado pela nuvem de pontos à direita do centro e que apresentam as maiores projeções nos vetores que representam a inclinação e a distância ao lineamento. São diretamente correlacionados a esses fatores e apresentam correlação inversa, ou menor influência (mínima), do fator densidade de lineamento. Segundo subgrupo: formado pela nuvem de pontos à esquerda do centro e que apresentam as maiores projeções no vetor distância ao lineamento. São diretamente correlacionados a esse fator e apresentam correlação inversa, ou menor influência (mínima), dos fatores inclinação e distância ao lineamento. O segundo grupo apresenta uma alta correlação com a segunda componente de maior variância, ou seja, apresenta uma projeção maior na componente 2. Nesse grupo se encontram os fatores curvatura em plano e em perfil que, assim como a definição dos subgrupos do primeiro grupo, formam dois subgrupos.

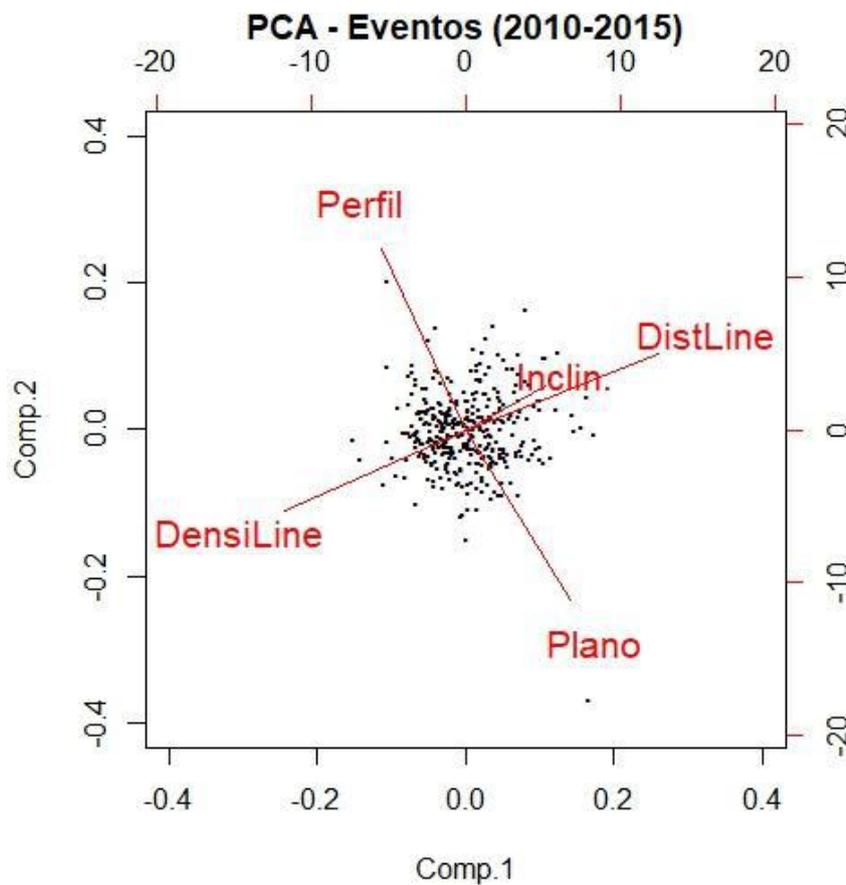


Figura 35 - PCA de todos os eventos no período de 2010-2015 com base na densidade de lineamento (DensiLine), distância da ocorrência ao lineamento mais próximo (DistLine), inclinação (Inclin) e curvatura em plano (Plano) e em perfil (Perfil).

Os PCA's para cada uma das tipologias principais (fig. 36), ou seja, com maior número de eventos, apresentam uma interpretação similar ao PCA com o total de eventos, exceto a interpretação do complexo. Abaixo são listadas as diferenças e a interpretação para os movimentos complexos:

- Os PCA's para escorregamento translacional, solo e fluxo de detritos, expressaram respectivamente:
 - o Maior correlação entre os fatores curvatura em perfil e em plano e a componente 2. Porém, diferente do PCA com todos os eventos, apresenta uma fraca correlação positiva entre as componente 1 e a curvatura em perfil, e negativa entre as componentes e o fator curvatura em plano.

- Correlação positiva entre a componente 1 e o fator distância ao lineamento, e negativa entre a componente 2 e o mesmo fator. Inversamente para a densidade de lineamentos.
 - Menor correlação entre inclinação e distância ao lineamento.
- O PCA para movimentos complexos mostraram dois grupos diferentes formados por:
- Grupo 1 formado por dois subgrupos: subgrupo 1- distância ao lineamento – que apresenta correlação positiva com as componentes 1 e 2- e inclinação - que apresenta correlação positiva com a componente 1 e negativa com a componente 2 - e subgrupo 2 - curvatura em plano, que apresenta correlação negativa com as componentes 1 e 2.
 - Grupo 2 formado pela densidade de lineamento – que apresenta correlação negativa com as componentes 1 e 2 - e curvatura em perfil - que apresenta correlação positiva em relação à componente 1, e negativa em relação à componente 2.

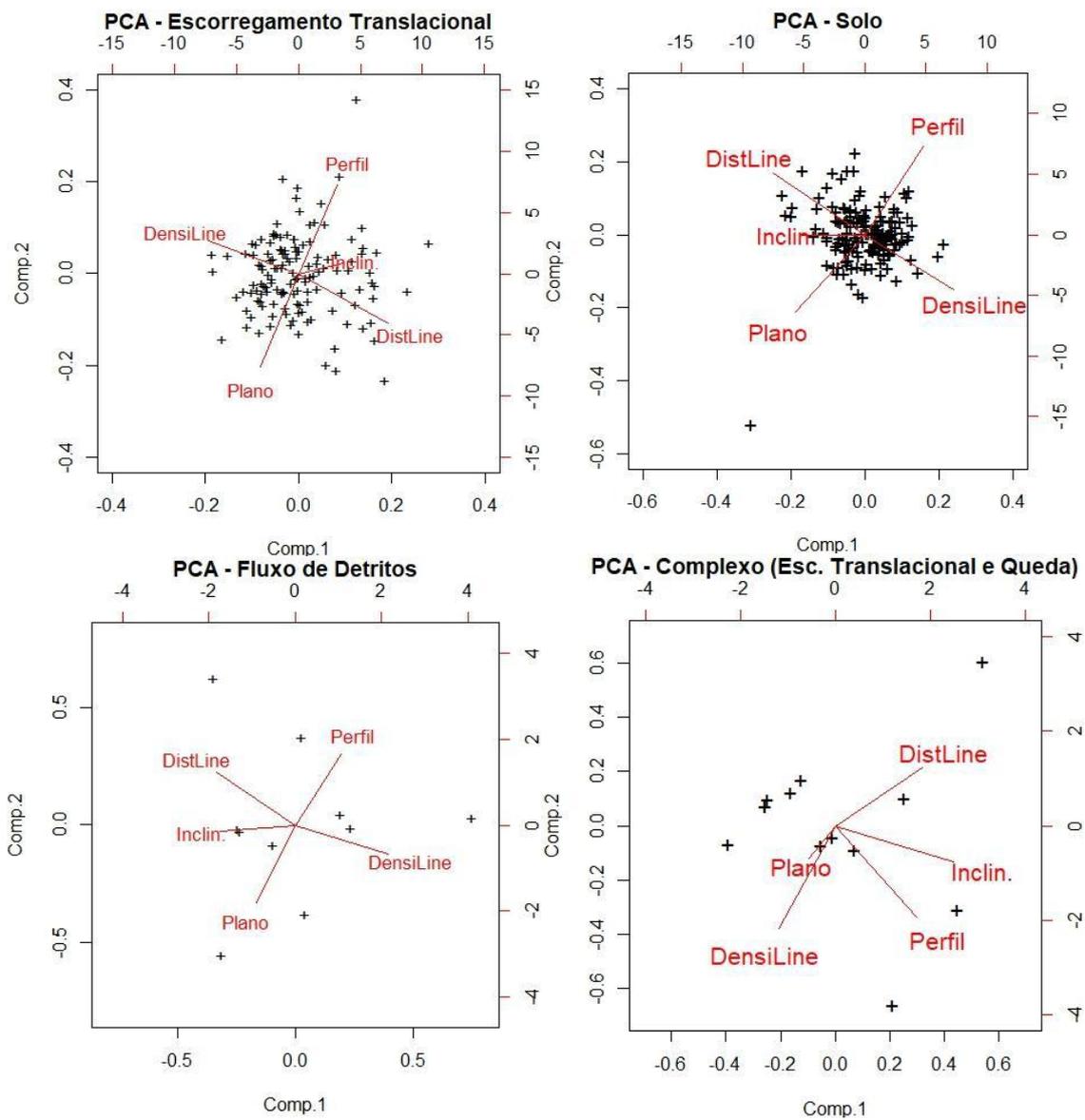


Figura 36 - PCA dos eventos por tipologia de movimento. O número de dados de entrada para cada PCA foi: 137 – Escorregamento Translacional de Solo; 163 – Solo; 10 - Fluxo de Detritos; 13- Complexo

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo analisar a distribuição e volume dos movimentos de massa que ocorreram no maciço da Tijuca no período de 2010 a 2015, e seus principais fatores predisponentes, a fim de obter um melhor entendimento acerca da relação entre esses fatores e as diferentes tipologias de movimento.

Em relação à base de dados observou-se uma necessidade de melhora tanto na descrição quanto nos atributos de localização geográfica, pois em alguns casos tornou-se necessária a correção dos dados de localização geográfica e a interpretação da tipologia de movimento tendo como base somente as imagens e a descrição, que na maior parte das vezes eram incompletas e não descreviam a superfície de ruptura.

A ocupação desordenada nas encostas ocorre principalmente ao longo da porção norte-leste (setor 1 e 2) do maciço, que apresenta, principalmente, substrato de gnaisses. Esse fator atrelado às propriedades dos gnaisses contribui para que a maior parte dos movimentos de massa aqui estudada tenha ocorrido nessas áreas, uma vez que os dados utilizados no presente trabalho são obtidos a partir de laudos realizados pela Fundação Geo-Rio, principalmente, em áreas ocupadas. Os eventos ocorreram principalmente no biotita-gnaisse e secundariamente no gnaisse facoidal.

Em relação ao volume mobilizado destaca-se o predomínio de volumes entre 1 a 100 m³ (81,3%), sendo 50 % dos eventos correspondentes a 1 a 10 m³. Esses volumes de pequeno porte provavelmente são reflexos das ocupações nas encostas, na qual para se obter área plana para a construção de moradias e afins, são realizados cortes no talude. Os grandes volumes (>1000 m³), porém são incomuns, presentes somente em 2010 e 2013, anos de extremos eventos pluviométricos significativos.

Entre as tipologias definidas por Varnes (1958; 1978), que caracteriza o movimento de acordo com o material mobilizado e a superfície de ruptura, a mais comum foi o escorregamento translacional de solo, provavelmente devido às descontinuidades presentes no solo como feições reliquias, às camadas delgadas de solo sobre rocha e à diferença de características entre os horizontes de solo. Considerando as adaptações feitas à classificação de Varnes (1958; 1978), que descreve somente o tipo de material mobilizado, a principal tipologia foi a de solo correspondente a aproximadamente metade das ocorrências. A análise das unidades geotécnicas mostrou que a maior parte desses eventos ocorreu em solos residuais de espessura maior que 2 metros.

Como já era esperada, de uma forma geral, a mais comum geometria de vertente associada foi côncava-convergente, pois favorece a convergência do fluxo de água, o que contribui para o movimento por meio do aumento da poropressão e também por meio do próprio peso que o acúmulo de água exerce sobre o material.

Todas as tipologias de movimento ocorreram principalmente em inclinações entre 16° e 35°, a tipologia queda, ao contrário do esperado, esteve presente também em inclinações menores do que 16°.

Em relação aos lineamentos observou-se uma relação inversa entre os movimentos de massa e os fatores distância ao lineamento e densidade ao lineamento, ou seja, os eventos foram mais frequentes quanto menor a distância ao lineamento mais próximo e quanto menor a densidade de lineamentos.

A análise do PCA para todos os eventos permitiu a divisão dos fatores quantitativos em dois grupos:

- Primeiro grupo que apresenta os fatores de maior influência sobre os dados analisados, formado pela inclinação, distância ao lineamento e densidade de lineamento.
- Segundo grupo formado pela curvatura em plano e em perfil.

Os PCA's de acordo as tipologias mostraram padrão semelhante, exceto os movimentos complexos. Nesse ultimo a curvatura em plano foi agrupada no grupo dois com a curvatura em plano e em perfil.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOTTI, José Leonardo Silva. Análise de Componentes Principais: Fundamentos de uma Técnica de Análise de Dados Multivariada Aplicável a Dados Geológicos. **Acta Geológica Leopoldensia**. v. 20, nº 44, 27-50p.,1997.

AMARAL, Cláudio Palmeiro do Amaral. **Escorregamentos no Rio de Janeiro: Inventário, Condicionantes Geológicas e Redução do Risco**. 1997. 269p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil - Ênfase em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC), Rio de Janeiro.

ANDRADES FILHO, Clódis de Oliveira; FONSECA, Leila Maria Garcia. Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2009, Natal, Brasil. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. 3151-3158 p.

ARÊDES, Ana Carolina Nascimento de Barros *et al.* Análise de uma Ruptura Local em um Talude de Solo Residual de Gnaiss. In: VII CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. 2017, Florianópolis, Santa Catarina. **Anais VI Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**.

AVELAR, André de Souza; LACERDA, Willy Alvarenga; NETTO, Ana Luiza Coelho. Mecanismos de Iniciação de Fluxos Detríticos no Maciço da Tijuca, Rio De Janeiro (RJ): O Caso da Encosta do Soberbo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 7, nº 1, 73-83p., 2006.

AZEVEDO, Rachel da Silva; SILVA, Tatiana Ximenes Osório da. **Estudos de Correlação Chuva x Escorregamento na Região do Maciço da Tijuca**. 2015. 86p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ.

BASTOS, Frederico de Holanda; PEULVAST, Jean-Pierre. Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Massa no Maciço de Baturité - Ceará, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**. v. 32, 124-142p., 2016.

BOSZCZOWSKI, Roberta Bomfim. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR**. 2008. 577p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DERECZYNSKI, Claudine Pereira; CALADO, Renata Novaes; BARROS, Airton Bodstein de. Chuvas Extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 40, p. 17-30, 2017.

D'ORSI, Ricardo Neiva *et al.* Análise dos Escorregamentos em Encostas do Município do Rio de Janeiro Deflagrados por Chuvas Intensas no Ano de 2010. In: VI CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (VI COBRAE). 2013, Angra dos Reis (RJ). **Anais VI Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**. p. 452-460.

FERNANDES, Manoel do Couto; AVELAR, André de Souza; NETTO, Ana Luiza Coelho. Domínios Geo-Hidroecológicos do Maciço da Tijuca, RJ: Subsídios ao Entendimento dos Processos Hidrológicos e Erosivos. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 29, nº2, p. 122-148, 2006.

FERNANDES, Manoel do Couto; LAGÜÉNS, João Vicente Marques; NETTO, Ana Luiza Coelho. O Processo de Ocupação por Favelas e sua Relação com os Eventos de Deslizamentos no Maciço da Tijuca/RJ. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 22, p. 45-59, 1999.

FONSECA, Ana Paula; LACERDA, Willy Alvarenga. Ensaio de Resistência de Pico e Residual em Solos Tropicais de Gnaiss. In: GEOJOVEM. 2006, São Paulo. **Anais GeoJovem**.

GEO-RIO. **Manual Técnico de Encostas: Análise e Investigação**. 2ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2000.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2ed. São Paulo, SP, Brasil: Edgard Blücher Ltda, 1984. 194p.

HADDOU, Mohamed Ben *et al.* Study of the Geotechnical Parameters of the Different Soils by Correlation Analysis and Statistical, in the Kenitra Region (Morocco). **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, v. 3, 51-60 p., 2013. ISSN 1792-9040 (print), 1792-9660 (online).

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. **O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos**. Reston, Virginia, U.S Geological Survey Circular, 2008. 129p.

HORIKAVA, Élio Hiromi. **Geoquímica de solo e geologia da região do depósito de ouro do Amapari - AP**. 2008. 210p. Tese (Mestrado em Geologia Econômica). Instituto de Geociências, Universidade Federal De Minas Gerais, Minas Gerais.

HUNGR, Oldrich; LEROUÉIL, Serge; PICARELLI, Luciano. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**. v.11, 167–194 p., 2014.

KAZMIERSKI, Michel; SANTOS, Adriana Goulart; ODEBRECHT, Edgard. O uso das raízes no aumento do fator de segurança de taludes. In: VII CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. 2017, Florianópolis, Santa Catarina. **Anais VI Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**.

LIU, Chun. *et al.* Susceptibility evaluation and mapping of China's landslides based on multi-source data. **Nat Hazards**, v. 69, 1477–1495 p., 2013.

NETTO, Ana Luiza Coelho. A Interface Florestal-Urbana e os Desastres Naturais Relacionados à Água no Maciço da Tijuca: Desafios ao Planejamento Urbano numa Perspectiva Sócio-Ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, 46-60 p., 2005.

OLIVEIRA, Ciro Portela de. **Estudo do Comportamento Tensão-Deformação-Resistência de um Solo Residual de Biotita Gnaisse Saturado**. 2000. 114p. Tese (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PARREIRA, Thais Fernanda. **Utilização de Métodos Quimiométricos em Dados de Natureza Multivariada**. 2003. 91p. Tese (Mestrado em Química). Instituto de Química, Departamento de Físico-Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

RIBEIRO, Daniela Dantas de Menezes *et al.* Técnicas de Sensoriamento Remoto com foco na identificação de lineamentos estruturais: aplicação na sub-bacia do rio Siriri, estado de Sergipe. In: **XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR**. 2011, Curitiba, PR, Brasil. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. 3459 - 3466 p.

SAMIA, Jalal. *et al.* Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory. **Landslides**, v. 14, 547-558 p., 2017.

SILVA, Alexander Magno Borges Gomes da. **Condicionantes Geológico-Geotécnicos de Escavação Grampeada em Solo Residual de Gnaisse**. 2006. 126p. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL.

SOUZA, Juliana Martins de. **Características do Meio Físico em um Escorregamento em São Pedro da Serra e suas Influências na Transformação da Paisagem em Nova Friburgo, RJ**. 2014. Tese (Mestrado em Geografia). Pós-Graduação em Geografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

STABILE, Rodrigo Augusto; VIEIRA, Bianca Carvalho. O papel do ângulo da encosta e da forma das vertentes na distribuição das feições erosivas da bacia água da faca, Piratininga (SP). In: **XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA**. 2009, Viçosa (MG). **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. p. 1-11.

TEMOTEO, Jaci Pereira da Silva. **Condicionantes Geológico-Geotécnicos na Estabilidade de Taludes (Maciço da Tijuca)**. 1993. 143p. Tese (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências, Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

VALERIANO, Márcio de Morisson; CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio de. Geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação para Mapeamento da Curvatura Horizontal em Microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 4, nº 1 17-29p., 2003.

VALERIANO, Cláudio de Morisson *et al.* **Geologia e recursos minerais da folha Baía de Guanabara SF.23-Z-B-IV, estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: CPRM- Programa Geologia do Brasil, 2012. 156p.

VARNES, David J. **Landslide Types and Processes**. Highway Research Board, Special Report. 29 ed. 1958. Washington, D.C. cap. 3, p.20 - 47.

Varnes, David J. **Slope movement types and processes**. Special Report 176: *Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science. 1978. Washington D. C., cap. 2, p.11-33.

WANG, Wei-Dong *et al.* A Subjective and Objective Integrated Weighting Method for Landslides Susceptibility Mapping Based on GIS. **Environ Earth Sci.** v. 65, 1705-1704p., 2012.