

Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica

Programa de Engenharia Urbana

Fernanda Cristina Gonçalves Gonzalez

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE MASSA EM FUNÇÃO DA PLUVIOMETRIA NA BACIA DO RIO QUITANDINHA PETRÓPOLIS, RJ

Rio de Janeiro



Fernanda Cristina Gonçalves Gonzalez

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE MASSA EM FUNÇÃO DA PLUVIOMETRIA NA BACIA DO RIO QUITANDINHA PETRÓPOLIS, RJ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça

Glauco Valle da Silva Coelho

Rio de Janeiro

Gonzalez, Fernanda Cristina Gonçalves.

Probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em função da pluviometria na bacia do rio Quitandinha Petrópolis, RJ / Fernanda Cristina Gonçalves Gonzalez. –2017.

f.138 : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro, 2017

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça e Glauco Valle da Silva Coelho

1. Movimento de Massa. 2. Deslizamento 3. Pluviometria. 4. Estatística Aplicada. 5. Desastres. I. Mendonça, Marcos Barreto de e Coelho, Glauco Valle da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Avaliação da probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em função da pluviometria na bacia do rio Quitandinha Petrópolis, RJ



PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE MASSA EM FUNÇÃO DA PLUVIOMETRIA NA BACIA DO RIO QUITANDINHA PETRÓPOLIS, RJ

Fernanda Cristina Gonçalves Gonzalez

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça

Glauco Valle da Silva Coelho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Aprovada pela banca:	
	Marcos Barreto de Mendonça, DSc.
	Glauco Valle da Silva Coelho, DSc.
	Leandro Torres Di Gregorio, DSc.
	Maria Cristina Moreira Alves, DSc.
	André de Souza Avelar, DSc.
	Rio de Janeiro

2017

RESUMO

GONZALEZ, Fernanda. **Probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em função da pluviometria na bacia do rio Quitandinha Petrópolis, RJ**. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Movimentos de massa são problemas presentes em muitas cidades no Brasil e no mundo. A cidade de Petrópolis, RJ, possui um histórico de deslizamentos associados a perdas, sobretudo no primeiro distrito onde reside a maior parcela da população. Os sistemas de alerta são medidas de redução de riscos associados a deslizamentos, sobretudo através de avisos sonoros para evacuar a população diante de significativa probabilidade de ocorrência desses eventos. Os deslizamentos geralmente ocorrem devido ao aumento da pressão de água no solo, como acontece em decorrência das chuvas. Assim, o monitoramento da pluviometria é imprescindível para a avaliar a possibilidade de ocorrência de deslizamentos. Cada localidade, em função de suas características específicas, possui um par de período de tempo onde a ocorrência de deslizamentos e a pluviometria são mais dependentes, e determinados limiares de chuva a partir dos quais há grande probabilidade de ocorrência desses eventos. Este trabalho propõe um método de análise de dependência entre pluviometria e deslizamentos em dois pares de período, possibilitando identificar probabilidades de ocorrência de deslizamentos em função da pluviometria para pares de períodos distintos. Foram avaliadas as dependências de diferentes pares de períodos de chuva associados à chuva das últimas 24h antes do evento, por meio do cálculo do coeficiente de contingência, baseado em registros de chuvas e deslizamentos na bacia do rio Quitandinha, no primeiro distrito de Petrópolis. O par de períodos de chuva que apresentou a maior dependência foi o de 24 x 96h. Para este par de períodos calcularam-se as probabilidades de ocorrência de pelo menos um, pelo menos três e pelo menos cinco deslizamentos em determinados índices pluviométricos acumulados.

Palavras-chave: movimento de massa, deslizamento, pluviometria, estatística aplicada, desastres.

ABSTRACT

GONZALEZ, Fernanda. Probability of the mass movement occurrence according to

the pluviometry in the Quitandinha river basin Petrópolis, RJ. Rio de Janeiro, 2017.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Urbana, Escola Politécnica,

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Landslides are problems present in many cities in Brazil and in the world. The city of

Petrópolis, RJ, have a long history of landslides associated with losses, especially in the

first district, where most of the population lives. Warning systems consist in actions to

reduce landslides risk, especially by population evacuation sound warning. Most

landslides occur due to water soil pressure chance, as occur during rain situations.

Therefore, monitoring is indispensable to predict the occurrence of landslids. Due to its

specific characteristics, each locality has a determined pair of periods where the

occurrence of landslides and rainfall are more dependents. The present work proposes a

dependency between rainfall and landslides in two periods analysis method, enabling the

identification of probabilities in function of landslides occurrence at rainfall distinct pair

of periods. Different rain periods associated with the last 24h dependences have been

evaluated, through the contingence coefficient, based on records of rainfall and

landslides, at the Quitandinha river basin, in the first district of Petrópolis. The period of

biggest dependence associated with 24h was 96 hours. Then, the probabilities of

occurrence of at least one, at least three and at least five landslides at determined

accumulated rainfall were calculated for this pair of periods.

Key words: mass movement, landslide, rainfall, applied statistics, disasters.

vi

Sumário

1.	Introdução	9
	1.1 Descrição do problema e sua relevância	9
	1.2 Objetivo e metodologia do trabalho	. 14
	1.3 Organização do trabalho	. 15
2.	Revisão bibliográfica	. 16
	2.1 Movimentos de massa	. 16
	2.1.1 Definição de movimento de massa	. 16
	2.1.2 Tipos de movimentos de massa	. 17
	2.1.3 Investigação e identificação dos movimentos de massa ocorridos	. 25
	2.2 Relação entre deslizamentos e pluviometria	. 27
	2.2.1 Influência da água nos movimentos de massa	. 27
	2.2.2 Correlação entre chuva e movimentos de massa	. 29
	2.3 Análise de risco de movimentos de massa	. 35
	2.4 Sistemas de alerta	. 37
3.	Área estudada	. 42
	3.1 Informações gerais sobre o Município de Petrópolis	. 42
	3.2 Informações sobre a bacia do rio Quitandinha	
	3.3 Ocupação e uso do solo	. 48
	3.4 Legislação de ocupação	. 53
	3.5 Características físicas	. 57
	3.5.1 Relevo	. 57
	3.5.2 Clima	. 58
	3.5.3 Cobertura Vegetal	. 60
	3.5.4 Geologia	. 61
	3.5.5 Geomorfologia	. 65
	3.5.6 Solos	. 66
	3.6 Movimentos de massa na área de estudo	
	3.6.1 Histórico	. 66
	3.6.2 Caracterização dos movimentos	. 72
	3.6.3 Gestão de risco de deslizamento	. 75
4.	Materiais e métodos	. 84
	4.1 Metodologia empregada	. 84
	4.2 Obtenção e tratamento de dados	. 85

	4.2.1 Dados de chuva	85
	4.2.3 Obtenção e tratamento de dados de deslizamento	87
	4.2.4 Cruzamento de dados de ocorrência de deslizamentos e pluviometria	88
	4.3 Medição da dependência entre a pluviometria nos períodos de observação e ocorrência de deslizamentos	89
	4.3.1 Análise de dependência	89
	4.3.2 Valores observados e frequência observada de deslizamentos	94
	4.3.3 Valores esperados e frequências esperadas	97
	4.3.4 Cálculo do Qui quadrado e coeficiente de contingência	100
4	4.4 Análise das probabilidades de deslizamento	105
5.	Apresentação e análise dos resultados	109
5	5.1 Análise de dependências entre pluviometria e ocorrência de deslizamentos 1	109
5	5.2 Probabilidades ocorrência de deslizamentos	114
5	5.3 Análise de eventos recentes	125
6.	Conclusões	131
7.	Referências Bibliográficas	134

1. Introdução

1.1 Descrição do problema e sua relevância

Uma característica presente nas grandes cidades do Brasil e do mundo são os problemas ambientais. Causados pela poluição, ocupação desordenada, superpopulação, desmatamento e poluição do ar, das águas e do ambiente comum, entre outros fatores, estes problemas tem sido alvo de estudos e discussões no campo da engenharia urbana, por serem os responsáveis por perdas materiais, comprometimento da qualidade de vida, problemas de saúde e em alguns casos mais severos, por óbitos.

Dentre os problemas que geram as consequências mais graves, os movimentos de massa, mais comumente conhecidos pelo termo "deslizamentos", são um dos principais desafios enfrentados por cidades com relevos acidentados e montanhas, como é o caso de muitas cidades brasileiras, entre as quais se destacam algumas do estado do Rio de Janeiro. Nos últimos anos, foi alta nesse estado a frequência de desastres associados a deslizamentos em que áreas habitadas, e alto também o gasto que o poder público teve com a recuperação das áreas afetadas e indenização daqueles que tiveram perdas, de forma que tem sido extremamente necessário o estudo de soluções preventivas para estes desastres ambientais.

Dados do *Emergency Disaster Database* (apud KOBIYAMA, 2004) mostram que, obedecendo o critério de 10 ou mais vítimas fatais, 100 ou mais pessoas afetadas, declaração de estado de emergência ou uma chamada internacional por assistência, os desastres naturais ocorridos no Brasil entre 1948 e 2004 possuem a distribuição mostrada na Tabela 1. Conforme se pode observar nessa tabela, o deslizamento de terra é o segundo tipo de desastre mais frequente, com um dos números mais altos de mortes que se pode observar no Brasil.

Segundo PINTO et al. (2013), movimentos de massa são importantes processos modeladores da superfície da Terra e se apresentam de formas distintas nos diferentes climas, solos e relevos do planeta Terra. Os movimentos de massa são fenômenos essencialmente naturais e presentes em várias localidades, e no entanto, passaram a caracterizar um problema urbano, uma vez que existem pessoas e bens em situação de perigo devido a esse fenômeno.

Tabela 1: Número de eventos e de vítimas por desastres naturais ocorridos no Brasil entre 1948 e 2004. Fonte: KOBIYAMA, 2004.

Desastre natural	N° de eventos	N° de mortes	N° de feridos
Secas	15	20	0
Terremoto	1	1	0
Epidemia	10	2029	0
Temp. extremas	6	323	600
Enchentes	82	5764	11476
Infestações por insetos	1	0	0
Deslizamentos	21	1615	214
Incêndio	3	0	0
Vendaval	14	336	1562

Toda a região serrana do estado do Rio de Janeiro, e de forma muito particular a cidade de Petrópolis, possui um histórico de eventos catastróficos, associados a enormes perdas causadas por deslizamentos, como mostram as Figuras 1 e 2. Um evento marcante pelo qual passou a cidade foi o desastre de 1988, que teve 171 vítimas fatais. Principalmente a partir desse evento, foi iniciada uma série de estudos sobre movimentos de massa em Petrópolis, tendo sido adotada uma série de intervenções para redução de riscos (DANZIGER, 1992 e MENDONÇA & TEMÓTEO, 1993), mas, ainda assim, a cidade tem vivenciado outros episódios. Como exemplos de grandes desastres mais recentes em Petrópolis, tem-se o de 2001 com 50 vítimas fatais, o de 2011, que atingiu toda a região serrana e foi identificado pelo CEMADEN (2011) como o pior desastre natural já visto no Brasil, onde das 947 mortes, 71 ocorreram no município de Petrópolis, e o de 2013, que resultou em 33 vítimas fatais, todas dentro do primeiro distrito de Petrópolis. (GUERRA & JORGE, 2014)



Figura 1: Deslizamento no bairro Quitandinha, devido à chuva de 14 de novembro de 2016. Fonte: RSIM, 2016.



Figura 2: Movimento de massa ocorrido em 18 de março de 2013. Fonte: R7, 2016.

O tipo e a magnitude dos deslizamentos são variáveis, e dependem tanto das características naturais, que englobam condicionantes geomorfológicos, geológicos e geotécnicos de uma determinada região quanto de fatores antrópicos, como desmatamento, cortes no terreno e ocupação desordenada. E em meio a tantos fatores, a grande maioria dos deslizamentos está associada à infiltração da água no solo, sobretudo em situações de pluviometria alta, devido à elevação da poropressão, diminuindo a resistência ao cisalhamento (GUIDICINI & NIEBLE, 1984), como podem confirmar os registros de deslizamentos da região.

Para reduzir os enormes impactos dos desastres associados a movimentos de massa, os gastos com as recuperações de áreas atingidas, e principalmente a perda de vidas e danos sociais, as prefeituras juntamente com outras esferas de poder têm buscado investir em medidas preventivas. Estas medidas podem ser estruturais, como a construção de estruturas de contenção e de drenagem, e não estruturais, como: os planos preventivos da defesa civil, as medidas socioeducativas e o estabelecimento de um zoneamento adequado para o município (GEORIO, 2014).

A urbanização de áreas de encosta traz consigo uma série de fatores que contribuem para a instabilidade de taludes, como a sobrecarga das construções e a retirada da cobertura vegetal entre outros. Algumas dessas ações resultantes do processo de ocupação contribuem diretamente para reduzir a estabilidade das encostas e aumentar a influência que a água tem na ocorrência de movimentos de massa. A impermeabilização das áreas ocupadas, por exemplo, altera as trajetórias de percolação de água no solo e pode provocar a concentração da mesma em alguns pontos, tornando o solo mais suscetível a deslizamentos nesses pontos.

Dentre as medidas preventivas não estruturais, uma tem ganhado atenção nos últimos anos no Brasil: os sistemas de alerta. O uso de sistemas de alerta é uma medida que tem por finalidade diminuir a exposição da comunidade aos impactos de um desastre, sendo seu objetivo prever e informar a população e os órgãos competentes a possibilidade de ocorrência de deslizamentos com antecedência suficiente para que a região seja evacuada. (ANDRADE, 2006)

Existem várias formas de os órgãos que usam os sistemas de alerta orientarem a população a se deslocar das áreas onde há perigo de deslizamento nas situações de chuva que representam perigo, como divulgação por rádio, televisão, site e redes sociais. A esse

conjunto de medidas é dado o nome de sistema de alarme (OLIVEIRA, 2004). Dentre elas, está a adoção de sirenes, que emitem avisos sonoros que indicam quando há perigo e como deve ocorrer a evacuação da área onde há o risco.

Algumas cidades como por exemplo São Paulo e Rio de Janeiro possuem sistemas bem estruturados de alerta, que contam com monitoramento frequente e divulgação para a população do estado em que as encostas se encontram por meio de site, televisão, redes sociais e sirenes.

A cidade de Petrópolis começou a estruturar um sistema de alerta no ano de 2013 e, desde 2014, recebeu a implantação de um total de 18 sirenes em 10 bairros, conforme ilustrado na Figura 3. (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2016)

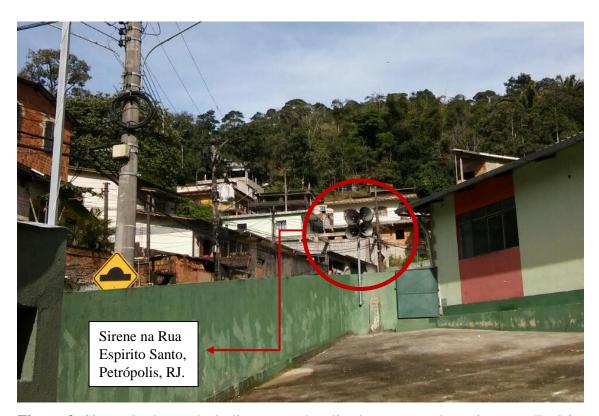


Figura 3: Sirene de alarme de deslizamentos localizada em ponto de apoio na rua Espirito Santo, bairro Quitandinha.

Um problema, no entanto, que envolve os sistemas de alerta é a definição de valores de pluviometria para determinar uma situação em que é bastante provável a ocorrência de deslizamento, chamados de limiares de chuva. Na literatura específica

sobre o tema é possível encontrar alguns métodos de determinação desses limiares, seja pela observação das características físicas do ambiente ou pela análise do comportamento observado ao longo dos anos que indique alguma correlação entre quantidade de chuva e deslizamento (D'ORSI, 2011; MENDONÇA et al.,2013). Levando em consideração que as encostas de diferentes locais possuem diferentes comportamentos diante das chuvas quanto à suscetibilidade a deslizamentos em função dos diferentes complexos de condicionantes, não é possível utilizar o limiar de chuva de uma determinada área para outra sem validá-lo previamente.

Alguns limiares são estabelecidos com base em valores de dois períodos de observação de pluviometria acumulada, de forma que o limiar avaliado é a combinação de dois valores de pluviometria, um para cada período considerado. Para a determinação do limiar, torna-se necessário avaliar previamente quais são os períodos de tempo aos quais devem ser associados os limiares de pluviometria, para que estes sejam considerados nos sistemas de alerta.

1.2 Objetivo e metodologia do trabalho

Esta dissertação possui como objetivo geral apresentar um método de análise de dependência da ocorrência de deslizamentos em função dos índices pluviométricos e de cálculo de probabilidade de ocorrência de deslizamentos visando definir limiares de chuva que possam ser usados em um sistema de alerta.

Os objetivos específicos são: aplicar o método proposto para a bacia do rio Quitandinha em Petrópolis, RJ e observar a coerência dos resultados estatísticos com as características físicas da área de estudo.

A metodologia usada consiste em uma análise dos dados de quantidades de chuva e da ocorrência dos deslizamentos na área da bacia do rio Quitandinha, em Petrópolis, RJ no período entre 01/01/2005 e 16/05/2009 e utilização do coeficiente de contingência do teste Qui Quadrado para se conhecer qual o par de períodos de tempo (um mais curto e um mais longo) de acumulados de chuva que indicam maior dependência entre a ocorrência de chuvas e deslizamentos na área de estudo. Como as medições de pluviometria disponíveis eram diárias, o período mais curto foi o de 24h anterior a cada deslizamento registrado. O segundo período considerado é retroativo em relação ao

primeiro, variando entre 48h e 240h. Para o par de períodos onde foi encontrada a maior dependência foram calculados os valores de probabilidade de ocorrência de pelo menos um, pelo menos três e pelo menos cinco deslizamentos por dia de acordo com as pluviometrias. A partir desses cálculos, é possível propor limiares de chuva para os sistemas de alerta de deslizamentos de acordo com a probabilidade aceitável.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, contendo, após esta introdução, revisão bibliográfica, sobre movimentos de massa, correlação entre pluviometria e deslizamentos, análise de risco e sistemas de alerta.

No terceiro capítulo há uma caracterização da área estudada e histórico de movimentos de massa na região e a gestão de riscos geológicos que existe atualmente no município. São apresentados uma caracterização geral da cidade de Petrópolis, seu histórico de ocupação e legislação, além da caracterização física da área, com informações de relevo, clima, cobertura vegetal, geologia, geomorfologia e tipos de solos.

O capítulo quatro apresenta os materiais e métodos utilizados para o cálculo da dependência e das probabilidades, como a delimitação da área de estudo e o tratamento de dados de chuva e de registros de deslizamento. O capítulo apresenta os passos da aplicação do teste do qui quadrado e do coeficiente de contingência.

No quinto capítulo, os resultados do teste de dependência são apresentados, analisados e interpretados fisicamente. Baseado nesses resultados, as probabilidades são calculadas para a ocorrência de deslizamentos com base na chuva acumulada observada. Além disso, limiares usados atualmente e valores de eventos já ocorridos são comparados com o resultado obtido.

Finalmente, são apresentados nos capítulos seis e sete as conclusões do trabalho e as referências bibliográficas, respectivamente.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Movimentos de massa

2.1.1 Definição de movimento de massa

"Movimento de massa" é o deslocamento de uma porção de solo, rocha ou uma combinação dos dois em uma superfície natural inclinada sujeita a forças internas e externas, a qual chamamos de encosta (SILVA, 2006). VARNES (1984) definiu movimentos de massa como processos geológicos exógenos que envolvem o deslocamento de materiais como rocha, solo e detritos encosta a baixo, e podem acontecer naturalmente ou serem induzidos pelo homem. Segundo Terzaghi (1960 apud SILVA, 2006), o deslocamento de uma massa da encosta pode ser entendido como o avanço do centro de gravidade para uma região de menor energia potencial gravitacional e ocorrem também sob a influência de fatores naturais externos como a água, o gelo ou o ar.

A causa da ocorrência, embora seja variável, conduz a condição mecânica onde a tensão cisalhante que atua sobre a superfície inclinada no interior da massa de solo ou de rocha supera as forças de resistência ao cisalhamento. Essa tensão cisalhante ocorre devido à própria massa terreno e às tensões induzidas pelo que está sobre ele, submetidos à gravidade. A resistência ao cisalhamento deve-se por sua vez às componentes de atrito e coesão do solo ou rocha. Os movimentos de massa encontrarão duas diferentes situações de resistências em solos localizados em encostas e em depósitos sedimentares.

É possível encontrar trabalhos que se referem aos movimentos de massa com o termo "deslizamento" ou "escorregamento", embora se saiba que estes termos são usados para um determinado tipo de movimento de massa, como exposto a seguir. O termo "deslizamento" é bastante usado pelos meios de comunicação por ser mais facilmente entendido pela sociedade em geral. Neste trabalho optou-se por usar este termo para se referir aos movimentos de massa, podendo também ser referido como deslizamento.

2.1.2 Tipos de movimentos de massa

Os movimentos podem ser classificados em diferentes tipos e sua variação dá-se pela cinética do movimento, tipo de material e geometria do deslocamento variáveis, descritas a baixo (GEORIO, 2014):

- Cinética do movimento: leva em consideração fatores de deslocamento da massa envolvendo velocidade, direção e sequência de deslocamentos.
- ii) Tipo do material: define o que sofreu deslocamento, podendo ser definido como solo, rocha e detritos entre outros.
- iii) Geometria: considera o tamanho e o formato da superfície de ruptura na encosta.

Considerando essas variáveis, os principais tipos de movimento de massa existentes na região do estado do Rio de Janeiro são:

1. Quedas

É um tipo de movimento de massa que ocorre especificamente em taludes verticais ou extremamente íngremes, que acontecem pela ação da força gravitacional combinada com a ação do intemperismo. O tipo de intemperismo mais frequente encontrado nesse movimento é a ação da água, embora ele também ocorra por razões tectônicas e por congelamento e degelo em regiões mais frias (GEORIO, 2014).

Este movimento geralmente é observado em rochas, sobretudo pelo tipo de encosta em que ocorrem, que exige uma grande declividade característica de escarpas rochosas. No entanto, também é possível ocorrer com porções de solo e detritos, em taludes muito inclinados que foram modificados por ação antrópica. (GUIDICINI & NIEBLE, 1984).

2. Tombamentos

Este movimento de massa, característico de áreas com afloramentos rochosos, ocorre pelo desprendimento de blocos de rocha em encostas sub verticais de superfícies

com descontinuidade. É comum em encostas muito íngremes ou com declividade negativa, como o que se encontra em pedreiras. (OLIVEIRA, 2004)

3. Rolamentos

Como o próprio nome diz, trata-se de um movimento onde os blocos de rocha desprendem-se e rolam ao longo de encostas. Geralmente ocorre com blocos de rocha que estão sobre superfícies de solo que sofreram a ação de intemperismo descobrindo o bloco ou que vieram de alguma porção a montante da encosta. Este movimento apresenta grande perigo quando ocorre próximo a construções e áreas habitadas, e requer atenção e monitoramento em áreas em que possa acontecer.

4. Escorregamento

Também chamados de deslizamentos, escorregamentos são movimentos em uma superfície bem definida em que a velocidade de deslocamento do solo começa alta e vai diminuindo devido ao atrito entre o solo em movimento e o material estático abaixo dele, até que o solo para completamente ou passa a apresentar características do movimento de rastejo (AUGUSTO FILHO, 1992), se subdividindo nos seguintes tipos:

d.1- Escorregamento Rotacional (ou Circular)

É o tipo de escorregamento onde a massa de material solto entre a superfície de ruptura e o talude possui forma arredondada. Dessa forma, o escorregamento da porção de solo em movimento se dá em torno de um eixo de rotação ao longo do limite rígido do solo estático, sendo comum inclusive a presença de vários escorregamentos sucessivos. (GUIDICINI & NIEBLE, 1984)

d.2 - Escorregamento Translacional (ou Planar)

Trata-se de outro tipo de escorregamento que ocorre com um padrão de movimentação em torno de um eixo imaginário, mas nesse caso o movimento assemelhase a um movimento de translação (GEORIO, 2014). Sua causa costuma estar atrelada a descontinuidades mecânicas e hidrológicas dentro da massa de solo ou na interface entre solo e rocha.

Este movimento é característico de solos pouco espessos sobre rocha e pode apresentar um uma trajetória de deslocamento muito longo. (AUGUSTO FILHO, 1992)

d.3 - Escorregamento em Cunha

É resultante da junção de duas massas de escorregamento translacional, e geralmente apresenta sua direção de movimento coincidindo com a linha de intercessão da superfície de ruptura (OLIVEIRA, 2004). São comumente encontradas em encostas cortadas, que sofreram escavações ou perfurações (GUIDICINI & NIEBLE, 1984).

e. Rastejo

Movimentos lentos que ocorrem continuamente e podem deslocar grandes porções de solo. A baixa velocidade geralmente não excede 10^{-7} m/s e a grande quantidade de solo que pode se mover pode tornar impossível a percepção de que há movimento de parte do material. A presença da água neste movimento influencia as poropressões dentro da massa de solo, de forma que períodos de seca podem paralisar o movimento, enquanto os de chuva podem agravá-lo e transformá-lo em escorregamento. Geralmente ocorre em solos de baixa declividade e que já sofreram deslocamentos anteriores ou muita ação de intemperismo (SILVA, 2006). Pode ser percebido por: inclinação em postes e árvores na encosta, xistosidade na encosta, deslocamento de cercas, trincas e rachaduras em muros e paredes, etc. (OLIVEIRA, 2004)

f. Corridas

As corridas são os escoamentos em sua modalidade mais rápida, e ocorrem pela perda de atrito interno, devido ao excesso de água, como em situações de chuva. Neste movimento, o solo ou o conjunto rocha-solo passa a comportar-se como um fluido pela presença da água em excesso. (SILVA, 2006)

Um tipo de corrida que merece destaque, por ser extremamente catastrófico é a corrida de detritos. Esta corrida costuma envolver porções de solo e rocha soltas, e ocorre em encostas de elevadas inclinações e com espaço amplo por onde correr, de forma que muitas corridas de detritos começam como escorregamentos simples, e torna-se uma

corrida conforme ganham velocidade, ou conforme a porção de solo fica saturada de água e vai se fluidificando. (OLIVEIRA, 2014)

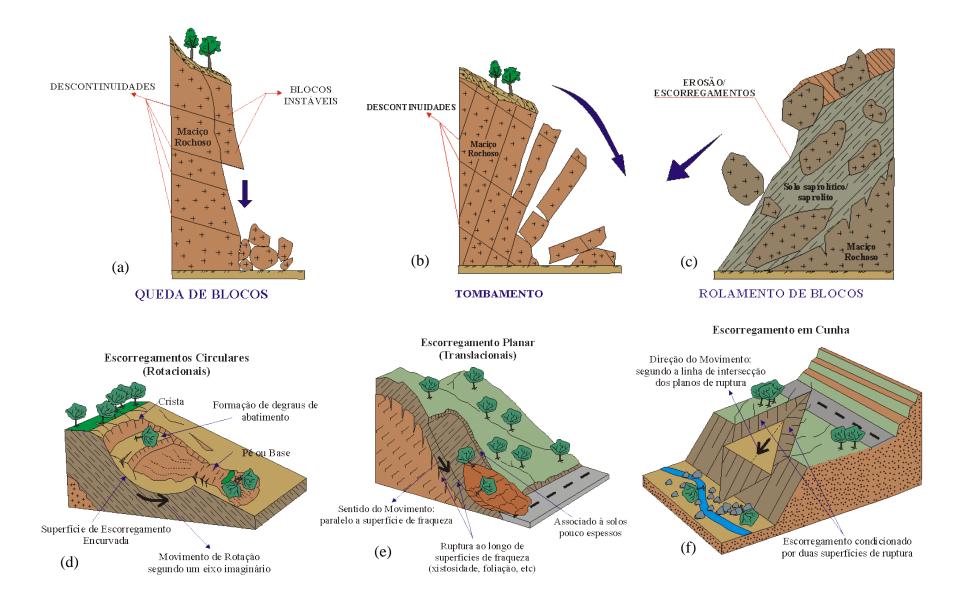
g. Complexos

Movimentos de massa complexos são movimentos em que se somam ou confundem mais de um dos tipos descritos anteriormente. São assim classificados movimentos que apresentam diversas características e por isso são difíceis de serem distinguidos, como também movimentos que mudam de características ao longo da trajetória ao acumular mais material. Um rastejo de solo, por exemplo, ao receber uma quantidade de água pode tornar-se uma corrida de detritos. (GEORIO, 2014)

A Tabela 2 apresenta um quadro geral com as características dos movimentos descritos e a Figura 4 os respectivos desenhos esquemáticos.

Tabela 2: Tipos de movimento de massa mais comuns no estado do Rio de Janeiro. Fonte: GEORIO, 2014.

Tipo de movimento		Material predominante	Cinética	
Quedas		Lascas ou blocos de rocha; solo em margem de corpos d'agua	Queda livre em planos inclinados	
Tombamentos		Lascas de rocha com fraturamento subvertical	Basculamento seguido de queda de lascas de rocha	
Rolamentos		Bloco de rocha/matacão	Rolamento de blocos/matacões aflorantes em taludes de solo	
	Rotacional	Rochas muito fraturadas ou solos espessos sem anisotropia relevante ou resíduos sólidos urbanos	Movimentos rápidos ou lentos ao longo de superfícies conchoidais ou cilíndricas	
Escorregamento	Translacional	Blocos de rocha ao longo das foliações ou continuidades, solos rasos sobre rocha ou camada resistente, resíduo sólido urbanos sobre material mais resistente	Movimentos rápidos ou lentos ao longo de superfícies planas	
	Em cunha	Bloco de rocha	Ocorre quando há dois planos de descontinuidade cuja intercessão é uma linha de orientação desfavorável na direção do movimento	
	Corridas	Detritos (mistura de solo com blocos de rocha com vegetação) ou lama	Movimento semelhante a de um líquido viscoso, desenvolvimento ao longo dos fundos de vale. Velocidades altas (>20km/h). Extenso alcance.	
Fluxos ou escoamento	Rastejo ou fluências (creeps)	Solos coluvionares ou massa de tálus	Velocidades muito baixas (mm a cm/ano). Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes, com nível d'água do lençol freático próximo à superfície. O movimento obedece à elevação do lençol d'água. Superfície de escorregamento paralela à do terreno.	
Complexos		Materiais diversos	Combinação de dois ou mais dos principais movimentos	



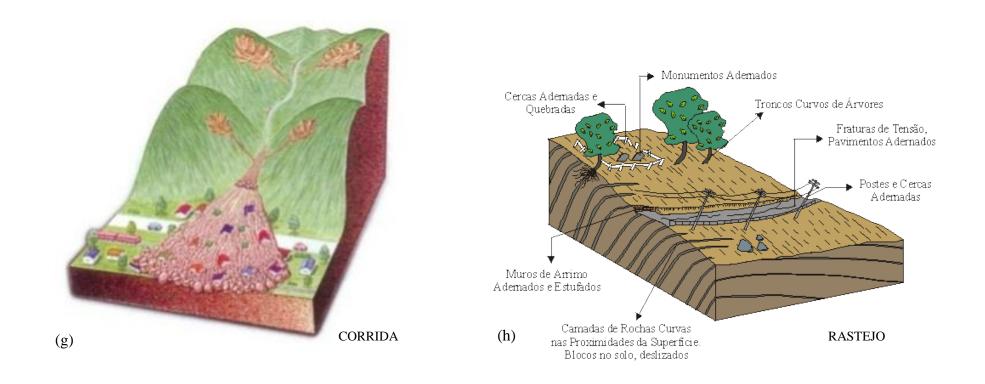


Figura 4: Tipos de movimento de massa: (a) Queda. (b) Tombamento. (c) Rolamento. (d) Escorregamento Rotacional. (e) Escorregamento Translacional. (f) Escorregamento em Cunha. (h) Rastejo. Fonte: UNESP, 2001. (g) Corrida. Fonte: BROLLO, 2010.

Um movimento de massa pode ser deflagrado por diversas causas, podendo ser o efeito combinado de vários fatores, sobretudo nas regiões que sofreram alterações antrópicas. Dentre as causas naturais, encontram-se fenômenos que provocam alterações mecânicas no solo, onde as principais são (GEORIO, 2014):

- Elevação do nível d'água no interior do solo: causado por chuva, inadequação da drenagem pluvial, ou rompimento de tubulações de água, esgoto e drenagem no interior do solo.
- ii. Diminuição da coesão aparente: causada pelo aumento da saturação no solo oriundo do excesso de água, pelas mesmas causas acima descritas.
- iii. Redução dos parâmetros de resistência: consequência de intemperismo.
- iv. Mudanças na geometria da encosta: causado por processos erosivos ou ações humanas de corte e aterro no terreno.
- v. Aplicação de sobrecargas: pela presença de construções, inserção de aterro, entulho e resíduos sólidos urbanos.
- vi. Oscilação térmica: para o caso de encostas rochosas propensas à variação de temperatura.
- vii. Erosão superficial: por remoção da vegetação em desmatamentos e queimadas.
- viii. Perda do efeito estabilizador das raízes: remoção da vegetação também pelo efeito de desmatamento e queimadas.

Pode-se classificar também os movimentos de massa os analisam por suas faixas de velocidade, importante para escolher medidas emergenciais a serem tomadas diante de uma velocidade rápida ou de uma lenta (Tabela 3).

Tabela 3: Classificação de movimentos de massa por velocidades.

Fonte: GEORIO, 2014.

Velocidade	Classificação
0,06 - 1,5 m/ano	Muito lento
1,5 m/ano - 1,5 m/mês	Lento
1,5 m/mês - 1,5 m/dia	Moderado
1,5 m/dia - 0,3 m/min	Rápido
0,3 m/min - 3 m/s	Muito rápido

2.1.3 Investigação e identificação dos movimentos de massa ocorridos

A identificação dos movimentos de massa já ocorridos e suas características é importante para que se possa prever a magnitude, duração e alcance de futuros possíveis deslizamentos, e assim poder planejar obras de prevenção de desastres.

A morfologia de uma determinada encosta geralmente apresenta os sinais de deslizamentos que já ocorreram, e a partir disso, também é possível prever futuros eventos e suas potenciais consequências, ou seja, as configurações de desastre. Os movimentos de massa devem ser analisados sob os seguintes aspectos (GEORIO, 2014):

- Geométricos e morfológicos dimensões e forma da superfície de ruptura, declividade do terreno e tipo de movimento ocorrido.
- ii. Natureza e estado dos materiais envolvidos a natureza pode ser material rochoso, solo ou vegetação; enquanto o estado analisa a homogeneidade, o faturamento e o grau de alteração entre outros no caso da rocha e granulometria, descontinuidades e presença de fragmentos rochosos e resíduos sólidos no caso do solo.
- iii. Estruturais das rochas orientação, foliação, fratura, falhas, dobramentos,
 diques, veios e feições do faturamento.
- iv. Mecânicos propriedades dos solos e das rochas, descontinuidades, condições de poro pressão, etc.
- v. Hidrológicos distribuição espacial, intensidade, duração e altura de chuva.
- vi. Mecanismos de movimentação causas, agentes e velocidades de movimento.
- vii. Superfície ou zona de cisalhamento região, origem, forma e presença de trincas.
- viii. Comportamento no tempo sazonalidade da ocorrência dos movimentos de massa.
- ix. Consequências locais impactos sociais, econômicos, perdas humanas, alterações morfológicas.

O processo de identificação pode ser feito pela observação por fotos aéreas ou pela observação de campo.

A observação por fotografias aéreas contribui para a análise de áreas extensas ou de difícil acesso sendo, geralmente, utilizadas escalas de 1:25.000 – 1:60.000 para a identificação de grandes deslizamentos e escalas mais detalhadas entre 1:1.000 – 1:2.000 para movimentos menores e observação de detalhes específicos. São distinguidos pelas fotos: mudanças locais de topografia, embarrigamento de encostas, mudança de vegetação, depressões, fendas, linhas de drenagem superficial e descontinuidade nas linhas, ressurgência de água, estreitamento no leito dos cursos de água, represamento natural de água e estreitamento de vales entre outros. (GUIDICINI & NIEBLE, 1984)

O outro tipo de investigação é a observação realizada em campo. Esta possui limitações quanto ao alcance, mas consegue proporcionar um detalhamento maior do movimento, da composição do solo, do caminho de percolação da água, e até mesmo indícios de que um novo deslizamento poderá acontecer. Uma investigação de campo procura a existência e a localização dos seguintes elementos: presença de matacões, zonas de quedas de blocos, fendas de tração do solo, troncos e postes inclinados, raízes expostas, blocos deslocados, elementos de drenagem subterrânea; afundamentos no solo, descontinuidade da vegetação, deformação em elementos da construção civil e solo saturado. (GUIDICINI & NIEBLE, 1984)

Embora existam em ambientes naturais preservados, os deslizamentos costumam, entretanto, ser alvo de notícias quando ocorrem em locais habitados, pelos riscos que impõem à população. Embora as causas de deflagração dos movimentos de massa descritas anteriormente possam ser de origem natural, a modificação das encostas pelo processo de ocupação urbana intensifica sua tendência a se movimentar, caracterizandose em ações antrópicas nocivas a estabilidade das encostas. A ocupação urbana de encostas agrava seu perigo de sofrer deslizamento pelos seguintes motivos (MENDONCA & GUERRA, 1997; GONÇALVES & GUERRA, 2006):

- O desmatamento que ocorre com a expansão dos limites urbanos e deixa o solo sem a resistência proporcionada pelas raízes;
- A ausência de cobertura vegetal deixando a encosta exposta a erosão;
- > Impermeabilização de áreas aumentando a capacidade de transporte da água;
- A falta de drenagem e até mesmo de esgotamento sanitário criam regiões de percolação de água que fragilizam o contato solo-rocha;
- Cortes de taludes realizados sem planejamento;
- Falta de muros de arrimo nos cortes;

- Sobrepeso de aterros e construções;
- Aumento de escoamento superficial devido à retirada de cobertura vegetal;
- > Vazamentos de esgoto e de drenagem tornando o solo saturado.

Dentre todos os fatores antrópicos que influem na estabilidade da encosta, os relacionados ao transporte e movimento de água são os que deflagram mais rápida e violentamente os deslizamentos, como o surgimento de locais de convergência de fluxo, a saturação de solo e o aumento de escoamento superficial. A ocupação urbana realizada em áreas de encosta pode alterar o ciclo hidrológico, provocando estocagem de água em alguns pontos e a impermeabilização do solo, e causar diminuição de infiltração e, portanto, a concentração de enxurradas (OLIVEIRA, 2004; STEIN et al., 1990).

2.2 Relação entre deslizamentos e pluviometria

2.2.1 Influência da água nos movimentos de massa

A partir dos perigos identificados em áreas ocupadas, os estudos acerca dos movimentos de massa são importantes na medida em que os eventos podem ser esperados e os desastres reduzidos ou evitados. Torna-se assim, importante a caracterização geológica e geotécnica de uma encosta e os fatores que influenciam sua estabilidade (SILVA, 2006).

Entre os fatores responsáveis por desencadeadores de movimentos de massa os eventos de pluviometria são os principais (GUIDICINI & NIEBLE, 1984).

Como visto na seção anterior, algumas condições em que o solo se encontra são responsáveis por torná-lo mais propenso ao deslizamento, sendo algumas delas resultantes da ação da água no solo, estando, portanto, relacionadas com a chuva. As ações promovidas pela água são:

- Diminuição da coesão aparente do solo (sucção) devido ao aumento do grau de saturação ou aumento da poropressão positiva pela elevação do nível d'água;
- Aumento do peso da massa de solo;

A explicação física para que o solo fique mais susceptível a movimentos de massa quando aumenta a infiltração de água encontra-se no entendimento da relação mecânica

entre a água no solo. Primeiramente, a água presente no lençol freático ocupando os vazios do solo exerce uma pressão sobre os grãos de solo, chamada de poropressão. A poropressão existente em um solo é determinada pela Equação (1). (GUIDICINI & NIEBLE, 1984)

$$u = \gamma_w \times h_p \ . \tag{1}$$

Onde:

u é a poro pressão

 γ_{w} é o peso específico da água;

 h_p é a carga de pressão nesse ponto;

Considerando que a relação entre a resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante atuante é o que determina se uma encosta permanece estável ou sofre deslizamento, é preciso entender como a presença de água no solo é capaz de influenciar sua resistência ao cisalhamento. A resistência de cisalhamento em um determinado plano (possível superfície de deslizamento) de um ponto da massa de solo contendo água pode ser expressa pela Equação (2):

$$\tau = (\sigma - u)tg\phi' + c' \ . \tag{2}$$

Onde:

7 é a resistência ao cisalhamento;

 σ é a tensão normal total;

 $tg\phi'$ é a tangente do ângulo de atrito do solo;

c' é a coesão efetiva do solo.

Pela Eq. 2 é possível perceber que a resistência ao cisalhamento diminui com o aumento da altura piezométrica, ou seja, da poropressão, o que ocorre justamente durante uma chuva devido a infiltração de água na massa de solo ou de rocha.

Quando a massa de solo não está saturada, existe uma coesão aparente ou poropressão negativa (sucção), o que faz com que o solo apresente uma resistência maior

do que se não tivesse água. Esse efeito, porém, diminui ou desaparece com o aumento da entrada de água no solo.

2.2.2 Correlação entre chuva e movimentos de massa

Como anteriormente abordado, os movimentos de massa resultam da sinergia de diversos fatores, de forma que determinar o momento em que ocorrerá um deslizamento de uma encosta real é um desafio, sobretudo aquele que ocorre rapidamente. No entanto, como o aumento da poropressão quase sempre é o fator deflagrador dos deslizamentos e, na maioria dos casos, isso ocorre em função da chuva, os estudos contemporâneos de previsão de deslizamentos, têm sido, então, baseados nos limiares pluviométricos definidos a partir de dados históricos.

Para o entendimento de como são elaborados alguns dos estudos baseados em valores de pluviometria é necessário o entendimento de dois conceitos (CALBETE et al., 1996):

- Intensidade pluviométrica é a medida de chuva por tempo, geralmente expressada em milímetros por minutos (mm/min) ou por hora (mm/h).
- ➤ Pluviometria acumulada ou chuva acumulada é a medida utilizada para períodos longos, como 24, 48, 72 ou 96h.

Boa parte dos modelos de correlação entre chuvas e deslizamentos consiste em determinar valores de chuva acumulada num determinado período e de chuva intensa em menor período onde se espera que ocorra um deslizamento baseando-se em séries históricas.

Um dos primeiros trabalhos sobre a relação de movimento de massa e pluviosidade foi realizado por Nielsen e Turner (1975 apud D'ORSI, 2011) e tornou-se referência internacional no assunto. O trabalho indica que para o estudo de movimentos de massa, devem ser observadas a intensidade de uma determinada chuva, a quantidade de chuva acumulada antes do evento e sua duração. Esse estudo também indica que existe um valor limite de precipitação acima do qual os deslizamentos são inevitáveis baseando-se em dados históricos.

LUMB (1975) observou durante o período de 1950 e 1973 a relação entre ocorrência de deslizamentos e o par de pluviometrias acumuladas de 15 dias e de um dia em Hong Kong, segundo zonas de severidade, onde cada uma possuía uma faixa de ocorrência de deslizamentos. Dessa forma, determinou-se o limiar de 200 mm acumulados antes da chuva que deflagraria o evento nesse período de 15 dias e de 350 mm no mesmo período, para eventos considerados por ele como desastrosos (Figura 5). Estudos posteriores, conduzidos por BRAND (1989) mostraram resultados diferentes, onde foi encontrado que o par de períodos mais relevante para a relação com a ocorrência de deslizamentos era o de um dia associado ao de uma hora. (D'ORSI, 2011)

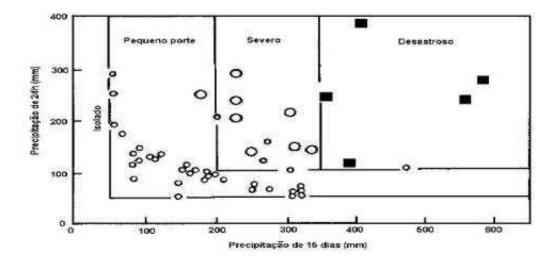


Figura 5: Delimitação de zonas de severidade das ocorrências de deslizamentos em uma pluviometria acumulada de 15 dias e do dia do evento em Hong Kong. Fonte: D'ORSI, 2011.

A diferença entre os pares de períodos considerados por esses dois autores dá à investigação sobre os históricos de deslizamentos e pluviometria um caráter muito importante: o limiar de chuva mais relevante deve encontrar consistência com o tipo de movimento de massa observado em campo, o que depende dos condicionantes locais naturais e antrópicos. E ainda, os diferentes tipos de movimentos de massa podem ter uma relação diferente com o tempo de infiltração de água no terreno. BRAND (1989) justificou seu resultado de período mais relevante mais curto com a taxa elevada de impermeabilização da região observada e que as infiltrações ocorriam através de rupturas repentinas.

Outro estudo, realizado por GUIDICINI & NIEBLE (1984), reuniu o registro de 100 chuvas intensas que ocorreram em nove diferentes locais em meio tropical úmido em intervalos que variam entre 20 e 70 anos, relacionados com a ocorrência ou não de deslizamentos. Por esses dados pode-se observar que quando uma chuva alcança valor superior a 250 mm, o que ocorreu geralmente em períodos de chuva acumulada de pelo menos 48h, existe grande probabilidade de ocorrência de deslizamento. No entanto, o gráfico da Figura 6 mostra que houve casos de deslizamento em níveis de chuva muito menores, mostrando que um sistema de previsão deve levar em consideração a variação local na correlação entre chuva e movimento de massa.

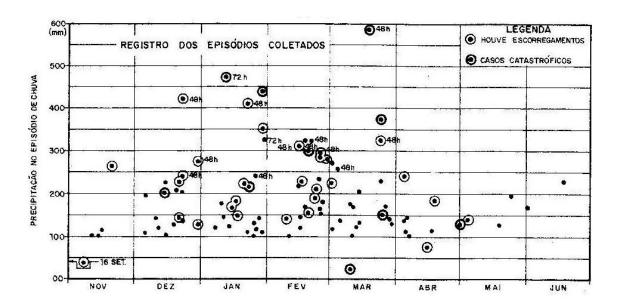


Figura 6: Registros de chuvas que que resultaram e que não resultaram em deslizamentos em nove cidades brasileiras, onde os pontos não circulados mostram as chuvas que não causaram deslizamentos, e os pontos onde não é indicado o período equivalem a 24h. Fonte: GUIDICINI & NIEBLE, 1984.

GUIDICINI e IWASA (1976), em um estudo de correlação entre chuvas e movimentos de massa trouxeram à tona três novos conceitos: o de coeficiente do ciclo que é o valor de chuva acumulada até o episódio de chuva intensa; o coeficiente do episódio que se trata do episódio de chuva em questão em relação à média anual da região, e o coeficiente do final, que é a soma dos dois coeficientes anteriores (Equação 3):

$$Cf = Cc + Ce.$$
 (3)

Onde:

Cc: Coeficiente de ciclo ou histórico da pluviosidade (razão entre o registro acumulado até a data do evento e a média anual da pluviosidade).

Ce: Coeficiente de episódio (razão entre o registro pluviométrico do episódio e a média anual da pluviosidade).

A partir desses valores é possível observar a influência da chuva acumulada e da chuva intensa isoladamente na ocorrência de deslizamentos. Foi constatado, por exemplo, que o coeficiente de ciclo, ou seja, a pluviometria acumulada antes da chuva intensa, geralmente apresenta um valor elevado, entre 250 e 300mm, em situações onde houve deslizamento. Este estudo também é importante para mostrar que um episódio de uma única chuva apresenta verdadeiro perigo se ocorrer após um registro de acumulo de chuva de vários dias.

Tatizana et al. (1987 apud GEORIO, 2014), sugeriu um modelo de investigação que correlaciona chuvas e deslizamentos, combinando os valores de intensidade horária e chuva acumulada em 96 horas, para a região da Serra do Cubatão, SP (Figura 7). Seu trabalho definiu níveis de pluviometria crítica para diferentes tipos de ruptura, como escorregamento induzido e corrida de detritos.

GUZZETTI et al (2007) apresenta dois valores de limiares de chuva que podem ser determinados, chamados de *limiar pluviométrico mínimo*, abaixo do qual não ocorrem movimentos de massa, e o *limiar pluviométrico máximo*, acima do qual eles ocorrerão com chance de 100%. Muitos trabalhos são elaborados com base em limiares intermediários entre esses dois.

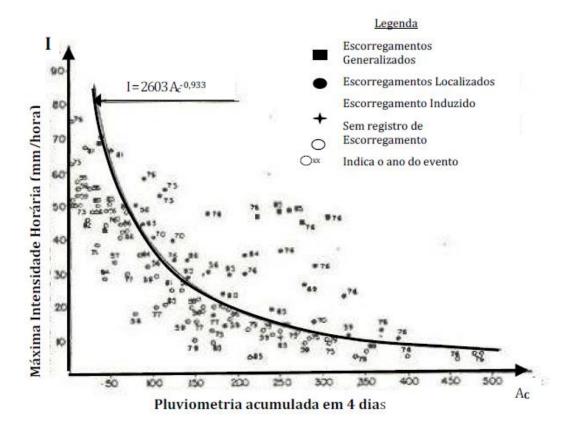


Figura 7: Gráfico de escorregamentos observados na Serra do Cubatão – Ac refere-se ao acumulado de chuva e I à intensidade pluviométrica. Fonte: D'ORSI, 2011.

Almeida et al. (1993 apud D'ORSI 2011) realizou um estudo para a cidade de Petrópolis visando estabelecer limiares de chuva para os postos de Itamarati e Petrópolis, em três diferentes situações, onde cada uma remete a uma quantidade de deslizamentos por dia. A análise foi feita baseada em 1131 ocorrências, observadas entre 1940 e 1980. Este trabalho, mostrou, antes de tudo, que ao longo dos anos a cidade tornou-se mais suscetível à deslizamentos, fato esse esperado pelo aumento da ocupação e desmatamento em áreas de encostas. Analisando intervalos entre 1 e 5 dias, este trabalho concluiu que o período de chuva acumulada que possui melhor correlação com deslizamentos é o de 4 dias. Este estudo propôs ainda limiares de pluviosidade acumulada baseada nessa observação de 4 dias, como mostra a Tabela 4.

Embora seja aparente a simplicidade dos modelos empíricos baseados em séries históricas de chuvas e deslizamentos, é importante ressaltar que os resultados encontrados devem ser norteados pelo comportamento que se espera fisicamente. Uma limitação desses modelos é basear-se em series históricas que podem não considerar modificações

físicas ocorridas num determinado terreno desde o momento de ocorrência dos eventos que entram nas estatísticas, até o momento em que estas são usadas. Por exemplo, uma encosta que sofreu deslizamentos poderá ter um comportamento diferente devido à ocorrência desses eventos como pela interferência do homem na mesma devido à sua ocupação.

Tabela 4: Limiares de chuva acumulada para três estados de risco, nos dois primeiros distritos de Petrópolis, proposto por ALMEIDA et al (1993). Fonte: D'ORSI, 2011.

Condição de Risco	Acumulada pluviométrica em 4 dias (apenas para acumuladas > 30mm)	Conseqüências	Número de escorregamentos esperados
Estado 1	≥ 40mm no Posto de Petrópolis	isolados a esparsos em	1 a 5
	≥ 30mm no Posto de Itamarati	regiões mais susceptíveis a escorregamentos	
Estado 2	≥ 90mm no Posto de Petrópolis	Estado preparatório para eventos de maior porte	6 a 30
	≥ 60mm no Posto de Itamarati		
Estado 3	≥ 150mm no Posto de Petrópolis	maior porte, con	Acima de 30
	≥ 130mm no Posto de Itamarati	possibilidade de eventos catastróficos	

É possível perceber ainda que uma determinada localidade apresenta uma determinada susceptibilidade a deslizamentos em função da intensidade, duração e acumulação de chuva e que esse padrão varia espacialmente com os diferentes condicionantes. Cada região possui períodos de pluviometria cuja associação com os dados de ocorrência de deslizamentos fornecem melhores resultados. Portanto, considerando tais diferenças, é necessário que se façam estudos separados por regiões que apresentem condicionantes relativamente similares, com o objetivo de determinar os períodos de chuva acumulada que apresentam uma maior correlação com a ocorrência dos deslizamentos e, para estes, os valores de limiares de pluviometria.

2.3 Análise de risco de movimentos de massa

Um importante fator no estudo de instabilidade de encostas e desastres geológicos é a análise de suscetibilidade. Segundo o *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes* (FELL et al., 2008), o termo suscetibilidade é empregado com o seguinte significado: "análise quantitativa ou qualitativa de classificação, volume ou área e distribuição espacial de deslizamentos que existem ou podem ocorrer em uma área". A suscetibilidade pode inclusive, indicar fatores como velocidade e intensidade de um movimento de massa, e não necessariamente leva em conta a frequência do evento. Quando atribuída a uma determinada área, quer dizer apenas que essa área é afetada por deslizamentos. (GEORIO, 2014)

Uma forma de estudar a suscetibilidade de uma região e informar tomadores de decisão política e a população, é a aplicação de cartografia geotécnica, pois esse tipo de material é de fácil compreensão. Mapas de suscetibilidade podem conter diversos valores como de probabilidade, tipo de movimento de massa e velocidades. O tipo mais comum é baseado no inventário de eventos ocorridos e de movimentos de massa ativos. Existem também várias categorias de mapas, como cartas de suscetibilidade, cartas de risco, carta geológica e carta geotécnica (GEORIO, 2014).

O termo mais importante nesse tema é o de "risco". No presente trabalho considera-se risco é "uma medida da probabilidade e severidade de um efeito adverso à saúde, propriedade ou meio ambiente", sendo "frequentemente estimado pelo produto da probabilidade de um fenômeno de uma dada magnitude multiplicado por suas consequências" (FELL et al., 2008). Esse conceito é também considerado pela United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR, 2009). No presente estudo, os eventos adversos são os deslizamentos e as consequências podem ser perdas de vidas humanas, danos à saúde e qualidade de vida ou perdas econômicas. Esse conceito pode ser expresso pela Equação (4).

 $Risco = Probabilidade de ocorrência de um evento adverso \times Consequências. (4)$

Destaca-se, que a definição expressa pela Equação (3) não é a definição atuarial usual de risco. (KAAS et al., 2001)

As classes de suscetibilidade ou de risco podem ser: muito alto, alto, médio e baixo; sendo baseados em critérios técnicos para definir as suscetibilidades e consequências, sendo porém de caráter subjetivo, dependendo do indivíduo ou conjunto de indivíduos que as definem.

São, então, definidas as áreas de risco, quando porções inteiras de encostas que apresentam níveis variados de risco, e compreendem inclusive áreas que não susceptíveis, podem ser atingidas por um movimento. Uma análise de risco, portanto, deve ser feita da seguinte forma:

- 1. Análise da probabilidade e das características geológicas
- 2. Identificação dos elementos de risco
- 3. Estudo da vulnerabilidade dos elementos em risco
- 4. Cálculo do risco

Um diagnóstico de risco de uma área pode combinar a análise de especialistas, modelagens numéricas e métodos empíricos, envolvendo diversas variáveis (Figura 8 - GEORIO, 2014)

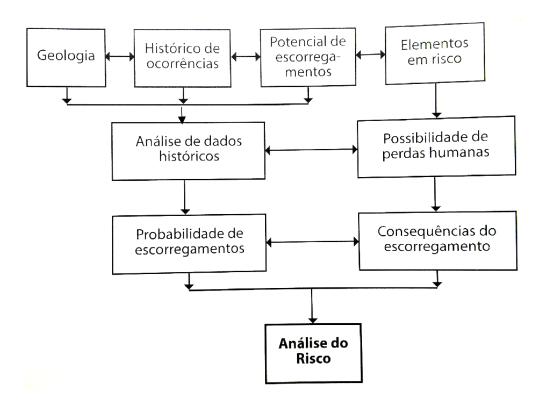


Figura 8: Fluxograma de investigação e coleta de dados necessários para a realização de análises de risco. Fonte: GEORIO, 2014.

Outro conceito importante a respeito de risco é o de risco aceitável (ou risco tolerável), que é aquele com o qual uma determinada população está disposta a conviver, considerando que os bens os quais a sociedade considera essencial sejam protegidos, e as variáveis que controlam esse risco sejam controladas (OLIVEIRA, 2004). Este tipo de risco tem uma importante função nos planos municipais de gerenciamento de riscos associados a deslizamentos, no sentido que buscam encontrar uma condição que reduza o risco o suficiente para deixar a população segura tentando evitar medidas extremas como remoção ou como o acionamento muito frequente de estados de alerta. Na prática, é uma tarefa muito difícil unir a expectativa de segurança que a população deseja e o risco que o poder púbico está disposto a se submeter – que geralmente são altos – com as condições reais de ocupação de encostas. Dessa forma, é raro que algum plano de gestão de risco chegue a apresentar valores de riscos aceitáveis (OLIVEIRA, 2004).

O cálculo da probabilidade de deslizamentos é de extrema importância, pois pode ser usado tanto para estimar o risco, como para servir de referência para os níveis aceitáveis de risco dentro de um processo de gerenciamento do mesmo.

Os valores de probabilidade de ocorrência de deslizamento calculados são usados para prever o que se espera diante de uma determinada chuva e, por isso, os limiares de ocorrência de movimento de massa em diferentes probabilidades são determinados a partir desses valores. No caso da cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, segundo D'ORSI (2011), o sistema de alerta considera o nível de "atenção" quando a chuva acumulada atinge o valor de 75% do limiar de chuva em pelo menos três postos telemétricos; e nível de "alerta" caso três postos em uma mesma macrobacia atinjam esse valor, nível esse no qual os meios de comunicação e as sirenes são acionadas.

2.4 Sistemas de alerta

Sistema de alerta e alarme é um tipo de medida não estrutural cujo objetivo é informar, com um determinado grau de confiabilidade, a ocorrência de eventos, como deslizamentos, e avisar a população e os órgãos que compõem o sistema de defesa civil de cada município a tempo de evacuar a área que se encontra em risco, incluindo a divulgação por rádio, televisão, sites de internet, redes sociais e sirenes que emitem avisos

sonoros em locais próximos de onde se espera ocorrer o deslizamento (ANDRADE, 2006).

Os sistemas de alerta fazem parte integrante de um plano de contingência, que é, segundo AMORIM (2014), o conjunto de procedimentos a serem seguidos pelos órgãos em situações de risco iminente associados a diversos eventos cujos impactos podem ocasionar perdas humanas. O funcionamento dos planos de contingência voltados para desastres associados a deslizamentos, e de forma particular dos sistemas de alerta, dependem da previsão da ocorrência de eventos que, por sua vez, depende do conhecimento prévio dos elementos deflagradores dos mesmos.

Visto que a grande maioria dos eventos de movimento de massa ocorrem pelos efeitos do aumento da poropressão causado pelas chuvas, esse tipo de sistema costuma ser baseado em limiares pluviométricos, acima dos quais se espera que aconteçam deslizamentos. Por esse motivo, os sistemas de alerta baseiam-se na observação de valores de precipitação medidos em pluviômetros próximos ou no local que se deseja monitorar (ANDRADE, 2006).

Por outro lado, sistema de alarme a ele associado, é o conjunto de formas de divulgação adotadas para orientar a população a se deslocar de regiões que apresentam perigo de deslizamentos quando as chuvas atingem um determinado nível (OLIVEIRA, 2004). Dessa forma, diante de uma condição física a partir da qual se configura a iminência da ocorrência de movimentos de massa, são emitidos avisos à população e aos órgãos competentes.

Segundo OLIVEIRA (2004) o primeiro registro da implementação de um Sistema de Alerta foi proposto pelo *Geotechnical Engineering Office* (GEO) em 1984, entidade pública de Hong Kong criada em 1977 para controlar os riscos envolvendo deslizamentos. Chamado de "Sistema de Alerta de Movimentos de Massa", esta iniciativa contou inicialmente com 20 pluviômetros automáticos que transmitiam dados a cada 5 minutos por telefone. Este sistema foi baseado em um estudo de correlação feito sobre valores de intensidade de chuva registrados durante 24h e a quantidade de ocorrências de deslizamentos registrados durante este período. O alerta era emitido via rádio e televisão para a população. É importante ressaltar ainda que o sistema foi integrado à outras medidas, como a remoção de pessoas em situação de risco e a análise de obras que envolvam encostas e taludes em Hong Kong.

Um exemplo de utilização do sistema de alerta de Hong Kong pôde ser observado durante as chuvas de maio de 1992, onde foram registrados 3 eventos de deslizamentos antes do acionamento do sinal de alerta e 69 após a emissão do sinal, poupando assim a população de ser mais fortemente atingida. Este sistema foi posteriormente aprimorado e o período de observação antes diário passou a ser horário (OLIVEIRA, 2004).

A primeira fase para a composição desses sistemas é a determinação dos limiares de pluviometria, e em segundo lugar, a análise técnica leva à escolha de um nível de risco que seja aceitável para o acionamento do sistema de alerta. O que é importante na escolha de um risco aceitável é ponderar que aceitar um risco muito alto é uma decisão irresponsável perante a população, ao passo que um nível muito baixo pode deixar o acionamento do alarme muito afastado da realidade de deslizamento e tornar baixa a confiabilidade da população no alerta enviado pelo órgão competente.

Uma dificuldade encontrada na implantação dos sistemas de alarme é justamente a dificuldade de encontrar valores dos limiares de chuva que precedem os movimentos de massa. Como já abordado no item 2.2.2, cada local possui diferentes condicionantes que influenciam na deflagração dos deslizamentos e, por isso, os limiares atribuídos a uma localidade não podem ser repassados a outro, de forma que um sistema eficiente pressupõe a realização de um estudo individualizado para cada área e propor um limite para cada uma. Para assegurar o funcionamento do sistema baseado em uma investigação insuficiente são comumente adotados altos valores de fator de segurança nos limiares, e por isso, os alarmes são acionados mesmo para baixos níveis de probabilidade de ocorrência de deslizamentos. O alto número de vezes em que um alarme soa sem que ocorra um deslizamento leva a população a desacreditar do sistema e não obedecer às instruções de evacuação, prejudicando a eficiência do plano de contingência.

O sistema deve ainda ser calibrado durante seu funcionamento, com base nos novos registros de deslizamentos, a fim de revisar periodicamente os níveis críticos de ocorrência de deslizamentos. A Figura 9 apresenta um conjunto de procedimentos necessários para a concepção de um sistema de alerta da Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GEORIO, 2014).

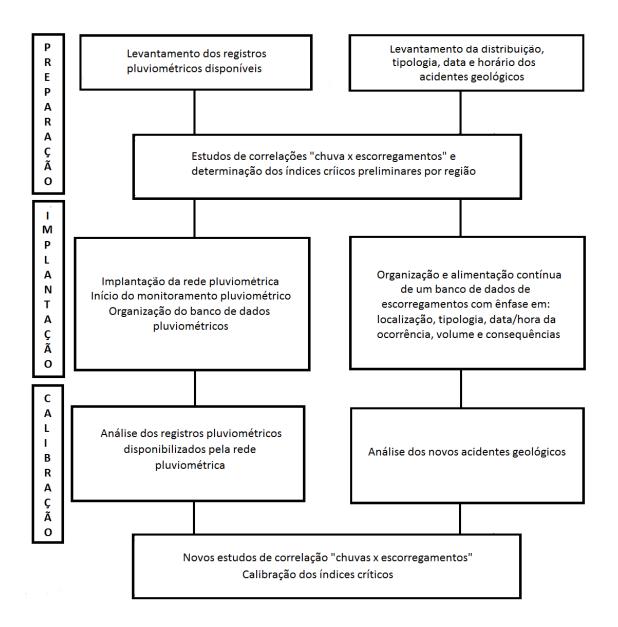


Figura 9: Etapas necessárias para a utilização de um sistema de alerta de deslizamentos usado na determinação de índices pluviométricos críticos. Fonte: GEORIO, 2014.

A quantidade de estações telemétricas varia em função de topografia, distancias e do tipo de rede telemétrica adotada. Em geral, adota-se uma distância de até 15km em centros urbanos. A operação dos seus centros de controle das estações telemétricas deve acontecer 24h por dia durante todos os dias da semana, analisar os dados recebidos, e emitir rapidamente os avisos de alerta aos interessados e a população em geral pelos meios de comunicação disponíveis para este fim. (GEORIO, 2014)

O caso específico de monitoramento de encostas adotado no Rio de Janeiro é o Alerta Rio. Trata-se de um sistema telemétrico (monitoramento remoto) utilizado na cidade do Rio de Janeiro desde o ano de 1996, para os casos de deslizamentos de encostas e inundações. A informação do estado das chuvas ocorre a cada 15 minutos, através de informações coletadas em 33 postos pluviométricos espalhados por toda a cidade, e são enviados à GEORIO, que atua como central de informações. A partir da análise dos dados coletados, são gerados boletins informativos, que inicialmente eram divulgados em rádio e TV, e mais recentemente são divulgados através do site alertario.rj.gov.br e de redes sociais, que disponibiliza simultaneamente o mapa de enchente e o de deslizamento. (ANDRADE, 2006)

Para fins do sistema de alerta, a cidade do Rio de Janeiro é dividida por áreas e para cada uma é definida uma determinada situação de probabilidade de ocorrência de eventos, que pode ser: sem risco, risco moderado e risco alto. Como exemplo, no sistema da Praça da Bandeira, existem 165 sirenes de aviso instantâneo de perigo de inundações e deslizamentos, e 150 pontos de apoio à população. (ALERTA RIO, 2017)

As informações do Alerta Rio são disponibilizadas para acesso da população: são descritas as situações de chuva e probabilidade de movimento de massa por área da cidade. Além disso, essas informações também são disponíveis em mapas, onde cada cor remete a um estado de alerta.

3. Área estudada

3.1 Informações gerais sobre o Município de Petrópolis

O município de Petrópolis localiza-se em uma das oito regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro, chamada de Região Serrana, como mostra a Figura 10, e possui uma área total de 795,798 km² (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2016). É formado por cinco distritos (Figura 11), sendo que o primeiro é o que compreende o centro histórico, econômico, político e comercial da cidade, além da maior população e maior área urbanizada. É neste distrito também que são registrados periodicamente a maioria dos casos de movimento de massa (GONÇALVES & GUERRA, 2006).

A população de Petrópolis, segundo dados do senso do IBGE (2010), é de 296.004 habitantes, dos quais 249.000 residem em território urbano, sendo a maior parte no primeiro distrito.



Figura 10: Mapa de Localização do município de Petrópolis e da Região Serrana no estado do Rio. Fonte: CECIERJ, 2016.

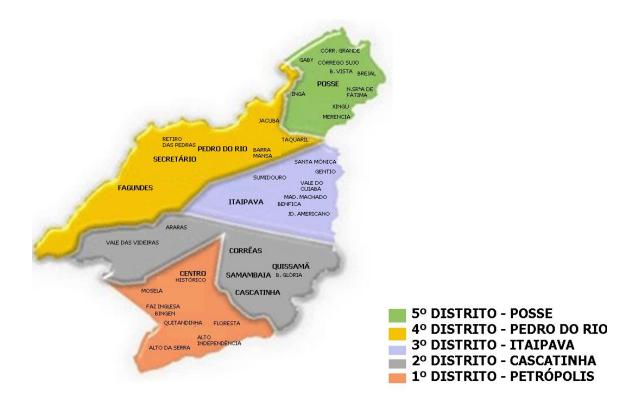


Figura 11: Mapa dos distritos de Petrópolis. Sem escala. Fonte: PETRONEWS, 2015.

3.2 Informações sobre a bacia do rio Quitandinha

A região contemplada neste estudo compreende a área delimitada pela bacia do rio Quitandinha envolvendo alguns bairros do primeiro distrito do município, como mostrado na Figura 12. Na Figura 13 é possível observar a delimitação da bacia do Quitandinha em fotografia aérea. A bacia hidrográfica do rio Quitandinha foi delimitada no software AutoCad, com base nos divisores de água, relevo e ruas presentes em um aerofotogramétrico da PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS (2008), com escala de 1:2.000.

É importante ressaltar que a delimitação dos bairros e a ocupação urbana existente na cidade não coincide com o traço dessa bacia. Como trata-se de uma bacia hidrográfica, os limites da área de estudo são justamente os divisores de água, isto é, os pontos de maior altitude. Por esse motivo, muitas ruas e localidades de alta declividade e suscetibilidade de deslizamento habitadas foram deixadas de fora da área de estudo, tais como os bairros que também sofrem deslizamentos e encontram-se além do ponto de exutório considerado, no obelisco da Rua do Imperador (bairro do Centro).

A bacia hidrográfica do Rio Quitandinha e seus afluentes passa então a delimitar a área de estudo, contendo partes de dez bairros: Quitandinha, Siméria, Independência, Alto da Serra, Castelânea, Bingen, Valparaíso, Taquara, Indaiá e Centro, com 12,81 km² de área. A maior parte da população da cidade habita este distrito, e por isso há um alto número de pessoas nesta área, além do centro comercial e administrativo do município, escolas, escritórios, clínicas e outros estabelecimentos culturais e turísticos, que fazem com que muitas pessoas transitem por esta área durante todos dias.

A principal via de acesso a Petrópolis é a BR-040 (Figura 13), rodovia que liga a cidade do Rio de Janeiro a Brasília, e que cruza a cidade de Petrópolis no bairro Quitandinha, que é um dos bairros mais afetados por deslizamentos (VARANDA, 2006) e parte da região de estudo deste trabalho. Os desastres que ocorrem nesta região, além de afetarem a população diretamente, prejudicam seu deslocamento para o centro da cidade e a conexão da cidade com seu principal acesso.

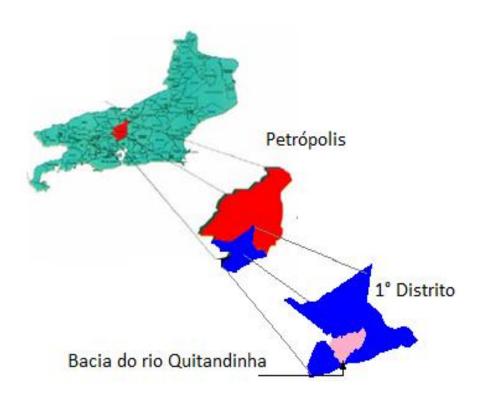


Figura 12: Localização da área de Estudo no Estado do Rio de Janeiro, na cidade de Petrópolis e no primeiro distrito. Sem escala.



Figura 13: Localização da bacia do rio Quitandinha sobre a malha urbana e da BR-040. Sem escala.

Fonte: GOOGLE EARTH, 2016.

A Tabela 5 apresenta a população estimada em cada um dos bairros do primeiro distrito). Pela quantidade de pessoas habitando nos bairros Castelânea, Centro, Independência, Quitandinha, São Sebastião, Siméria, Taquara, Thouzet e Valparaíso e nas localidades de Parque São Vicente, Cremerie e Duques, que fazem parte total ou parcialmente da área de estudo, estima-se que mais de 80 000 habitantes se encontrem residindo na bacia do rio Quitandinha, o que equivale a quase um terço dos habitantes de todo o município.

Tabela 5: Quantidade de habitantes por bairro ou localidade no primeiro distrito de Petrópolis estimados no ano de 2005. Fonte: VARANDA, 2006.

	NÚMERO DE
BAIRROS 1° Distrito	HABITANTES
ALTO DA SERRA	8.758
BAIRRO ESPERANÇA	3.736
BINGEN	5.118
CAPELA	3.755
CASTELANEA	8.016
CASTRIOTO	2.411
CAXAMBU	5.541
CENTRO	29.789
CHACARA FLORA	5.064
CREMERIE	591
DUARTE DA SILVEIRA	5.295
DUCHAS	814
DUQUES	1.901
ESTRADA DA SAUDADE	6.198
FAZENDA INGLESA	1.605
FLORESTA	2.875
INDEPENDENCIA	8.001
ITAMARATI	9.454
MEIO DA SERRA	4.554
MOINHO PRETO	1.693
MORIN	5.095
MOSELA	10.595
PARQUE SÃO VICENTE	1.607
PEDRAS BRANCAS	2.074
QUARTEIRAO BRASILEIRO	5.629
QUARTEIRAO INGELHEIN	2.643
OUITANDINHA	12.703
RETIRO	8.440
SÃO SEBASTIAO	6.673
SIMERIA	3.465
TAQUARA	1.301
THOUZET	2.143
VALPARAISO	5.486
VILA FELIPE	3.619
VILA MILITAR	2.002
TOTAL	188.644

3.3 Ocupação e uso do solo

A cidade de Petrópolis apresenta grande valor histórico e cultural por ter sido uma cidade sede de veraneio para a família imperial e pela colonização alemã. A cidade teve sua origem no ano de 1830, quando o então imperador D. Pedro I efetuou a compra de um território que até então era conhecido como fazenda do Córrego Seco, e foi elevado

ao status de cidade no dia 27 de junho de 1859. O plano de urbanização e ocupação da cidade foi executado anos depois pelo engenheiro militar Major Julio Frederico Köeler, bem como a construção do palácio imperial que veio a tornar-se residência de veraneio de D. Pedro II e da família imperial (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2015).

Köeler foi responsável pela canalização dos rios, pela abertura da estrada que ligava Petrópolis ao Rio de Janeiro e pelo loteamento e distribuição de propriedades para os colonos. Em seu plano, o engenheiro institucionalizou a preservação dos elementos naturais da cidade, como os rios e algumas árvores, como parte integrante do paisagismo através de seu projeto e de um conjunto de regulamentos sobre a ocupação do território urbano (SILVA, 2006). As tendências de urbanismo da época apontam que o engenheiro Köeler idealizou um projeto extremante sustentável até mesmo para os padrões encontrados na Europa e nas colônias europeias contemporâneas. Os rios, que geralmente ficavam aos fundos das casas e recebiam seus esgotos foram incorporados como um elemento paisagístico importantíssimo da cidade, sendo preservado de poluição e tendo as casas com sua frente voltada para ele. Tal era sua importância, que até mesmo foi feita uma canalização artificial do rio Quitandinha para que este passasse na frente de onde foi construído o palácio Imperial (GONÇALVES & GUERRA, 2006).

Segundo Rabaço (1985 apud GUERRA et al. 2007), o engenheiro foi responsável pela formulação de um verdadeiro código de obras, onde suas proposições incluíam:

- ➤ Os lotes seguiam-se ao longo dos rios e tinham mais profundidade que largura (55m x 110m), subindo as encostas dos morros, adaptando-se à topografia acidentada;
- ➤ Era proibido utilizar o topo dos morros; proibida também a subdivisão dos lotes; as áreas com maior declividade não poderiam ser ocupadas, preservando-se a sua cobertura vegetal para evitar deslizamentos;
- ➤ Os proprietários tinham que plantar árvores nativas na testada dos terrenos; realizar a construção de calçada com 2,20 m de largura em alvenaria, no prazo de 1 ano e em pedra, no prazo de 8 anos;
- Eram obrigados a cercar ou murar os lotes de terra, dentro de um ano, no máximo;
- As fachadas dos prédios estavam sujeitas à aprovação prévia;
- ➤ Havia a obrigação de construir dentro de 2 a 4 anos;

- Aos proprietários exigia-se que fosse conduzida a água dos telhados para as ruas, por meio de canos;
- ➤ Todas as residências fariam frente para os rios, sendo que os esgotos seriam lançados em fossas no fundo dos terrenos, distantes dos cursos d'água, evitandose assim qualquer tipo de contaminação dos mesmos.

Nota-se que, se fosse obedecido, este plano contaria com várias medidas que poderiam diminuir as ações antrópicas nocivas a estabilidade das encostas e, consequentemente, a quantidade dos movimentos de massa nas regiões ocupadas. Manter cobertura vegetal no terreno iria manter a resistência que as raízes proporcionam ao solo, evitar regiões de encosta muito íngremes como áreas próximas aos topos de morro poderia além de manter a cobertura vegetal evitar a exposição da população às situações de risco, e a obrigatoriedade de soluções individuais de drenagem poderia contribuir não permitindo a acumulação de água no solo. Além disso, a proibição de subdividir os lotes impedia que a população ocupasse o alto das encostas, uma vez que os lotes iam desde a menor altitude, onde localizava-se os rios, até o divisor de águas, ao mesmo tempo em que as altas declividades não podiam ser ocupadas.

GONÇALVES & GUERRA (2006) afirma que a ocupação do território de Petrópolis ocorreu diferentemente em quatro períodos:

- No primeiro período entre 1845 e 1945, como citado anteriormente, a cidade teve sua ocupação ocorrendo apenas nas regiões de fundo de vale, e as encostas permaneciam preservadas.
- O segundo período compreende de 1945 a 1964, onde houve mudança na legislação do município e aumento da ocupação, fazendo com que as encostas começassem a ser ocupadas.
- iii) Entre os anos de 1964 e 1976, áreas mais perigosas das encostas e de mais difícil acesso começam a ser ocupadas. Desse período preservou-se apenas as áreas com mais de 75% de declividade, e a porção de solo localizada sobre as linhas de drenagem
- iv) Entre 1976 até os anos 2000, houve a ocupação de áreas de dificílimo acesso e risco de ocupação, sobretudo pela forma de invasões, em áreas inclusive pertencentes a APA (Área de Proteção Ambiental) de Petrópolis.

Petrópolis é uma cidade que ainda possui muitas áreas preservadas, se comparada com a realidade de muitas pastagens e área urbana presentes no estado do Rio de Janeiro. É possível perceber, no entanto, uma mudança no uso dolo solo ao longo dos anos em que, como grande parte do estado, a cobertura natural deu lugar à vegetação secundária (Tabela 6).

Tabela 6: Percentuais de cobertura arbórea em Petrópolis entre os anos de 1956 e 1975 e em 2001. Elaboração baseada em dados do ICMBIO (2006).

	Mata/Floresta (%)	Vegetação Secundária (%)
1956 - 1975	31,84	7,11
2001	13,15	33,77

Dentre os fatores históricos que levaram ao desmatamento no primeiro distrito de Petrópolis é importante citar que, além da própria ocupação urbana, entre os séculos XIX e início do século XX houve uma tentativa por parte dos colonos que moravam em Petrópolis em implantar uma atividade agrícola que possibilitasse a comercialização. Não sendo possível, pela limitação dos lotes e pelo clima frio, houve um período de comercialização de madeira, levando a administração da cidade a implantar um código de postura para evitar o desmatamento. (GONÇALVES & GUERRA, 2006)

Dessa forma, enquanto se buscava uma vocação dentro da economia, no final do século XIX começava a se desenvolver a atividade industrial em Petrópolis, incialmente de fabricação têxtil, que teve sua maior expansão por volta de 1960. Essa nova atividade passou a atrair moradores de diversas regiões do Brasil, sobretudo entre 1960 e 1990, e assim surgiram diversos bairros que anteriormente estavam previstos no plano de Köeler como área a ser preservada. Na década de 70, a competição interna com o estado de São Paulo fez com que a produção industrial petropolitana entrasse em decadência, tornando mais pobre a população local. Este fato, combinado com a ausência de políticas habitacionais, levou os moradores a ocupar irregularmente regiões mais desvalorizadas da cidade, representada pelo alto das encostas (GUERRA et al., 2007).

É possível perceber pela evolução do uso e cobertura do solo de 1994 a 2001 (Tabela 7) que o território florestal sofreu uma diminuição de 33% para 13%, enquanto a área de pastagens aumentou de 18% para 37%, e a área urbana aumentou de 6% para 10% em 7 anos. (TCE, 2003)

É importante ressaltar ainda que a área urbana do município se encontra concentrada no primeiro distrito de Petrópolis, onde há a maior concentração de desastres envolvendo deslizamentos, e que em 14 anos desde que o estudo realizado pelo Tribunal de Contas do Estado (TCE, 2003) foi realizado, o aumento populacional no município indica que o percentual de área urbana provavelmente sofreu aumento. Com o aumento populacional ocorrendo na área mais habitadas do município, o vetor de expansão de ocupação continuou a apontar para áreas de difícil acesso antes desocupadas, isto é, as encostas.

Tabela 7: Comparação de percentuais de ocupação do uso do solo em Petrópolis em 1994 e 2001. Elaboração baseada em dados do TCE, 2003.

Tipo de uso do solo	Percentual em 1994	Percentual em 2001
Floresta Ombrófila Densa	33%	13%
Vegetação Secundária	35%	35%
Área Urbana	6%	10%
Pastagens	18%	37%
Área Degradada	3%	*
Afloramento Rochoso	5%	*

*Dados não disponíveis

3.4 Legislação de ocupação

O Código Florestal brasileiro, lei 4771 de 15 de setembro de 1965, modificado pela lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, possui em seus artigos medidas de proteção em regiões de encostas pelo entendimento de que a presença de cobertura vegetal ajuda a prevenir movimentos de massa. A legislação prevê que determinadas áreas devem ser consideradas áreas de proteção ambiental por características de revelo em ambiente urbano ou rural. (BRASIL, 2012)

Em seu artigo 2º o Código Florestal (BRASIL, 2012) considera como APP (Área de Proteção Permanente) topos de morro e montanhas com altura mínima de 100 m e inclinação mínima de 25%, encostas com inclinação maior do que 45º e altitudes maiores do que 1.800m, onde é proibida a derrubada de florestas. Em locais que há inclinação entre 25 e 45º só é permitida extração de madeira onde o uso é racional. A lei estabelece também que as áreas privadas devem ser reflorestadas pelos proprietários, e caso isso não ocorra, o governo pode responsabilizar-se pelo reflorestamento do terreno sem que haja desapropriação. Algumas leis estaduais, inclusive estabelecem um percentual de área a ser conservado em cada propriedade. (MELO & OLIVEIRA, 2012)

No âmbito de Petrópolis, a primeira legislação de ocupação do solo desde Köeler, ocorreu na década de 70 através do Plano Diretor Local Integrado, feito através de um consórcio entre a Câmara Municipal de Vereadores e o SERFHAU (Serviço Federal de Habitação e Urbanismo). Este plano estabeleceu zoneamentos, licenciamentos e fiscalização e foi seguida pelo decreto 143/76, que dividiu o território em zonas urbanas, industriais e rural, além de minimamente tentar promover a preservação de áreas verdes e dos rios (GUERRA et al., 2007).

Em 1992, a Conferência Mundial pelo Meio Ambiente sediada no Brasil, a Rio 92, juntamente com a Agenda 21, fez com que todo o país voltasse suas atenções para as questões ambientais e para sustentabilidade. Como impacto dessa nova política, Petrópolis ganhou seu primeiro Plano Diretor, que teve como objetivo propor medidas de preservação ambiental e recuperação de áreas degradadas. Além disso, no ano de 1992 foi decretada a criação da Área de Preservação Ambiental (APA) de Petrópolis. A presença da APA no território municipal passava a submeter, com a força de uma legislação federal, diversas atividades ao licenciamento do IBAMA. (GONÇALVES & GUERRA, 2006)

Pela Lei nº 5.393 de 25 de maio de 1998, conhecida como Lei de Uso, Parcelamento e Ocupação do Solo (LUPOS), Petrópolis passou a contar com um zoneamento de seu território, que tem por objetivo regulamentar as construções nas suas diferentes áreas e estabelecer parâmetros de ocupação para as mesmas. (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2016)

O zoneamento é um instrumento previsto pelo Estatuto das Cidades para o Plano Diretor, que estabelece que tipo de ocupação deve ocorrer em cada área do município, e quais áreas não devem ser ocupadas por constituírem áreas de preservação ou por apresentarem riscos para a população (BRASIL, 2001). Embora seja previsto por lei para municípios de 20 mil habitantes ou mais, muitos ainda hoje não possuem plano diretor e zoneamento, fazendo com que muitas pessoas habitem em regiões suscetíveis a movimentos de massa. O zoneamento deve inclusive estar submetido ao Código Florestal, que impede que área de muita declividade e altitude sejam ocupadas, de forma que muitas das áreas que hoje oferecem risco aos seus moradores deveriam ser impedidas de receber novas construções. (KOBIYAMA et al., 2006)

O artigo 3º da Lei de Uso, Parcelamento e Ocupação do Solo de 1998 institui que o município contém as seguintes zonas: Rural (ZRL); Rururbana (ZRB); Urbana (ZRU); Proteção Especial (ZPE). A zona de proteção especial corresponde a área de preservação ambiental, na qual a lei veda qualquer tipo de construção. As quatro zonas, por sua vez, são divididas em setores aos quais é determinado a que se destina cada área, de acordo com a condição de ocupação predominante, vocação da área e infraestrutura. (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2016)

Dentro da área de estudo, existem duas zonas: zona de proteção e zona urbana. Dos subsetores da zona urbana, esta região contempla: Setor Residencial (SRE), Setor de Uso Diversificado (SUD), Setor de Atividades Urbanas (SAU) e Setor Histórico (SEH), onde todos permitem ocupação urbana. É necessário notar, no entanto, que embora a ocupação seja permitida existe uma regulamentação dos parâmetros construtivos, como uma taxa de ocupação que é 70% no setor de uso diversificado e no setor de atividades urbanas, e varia de 25 a 50% nos setores residenciais e uma taxa de permeabilidade do terreno de 10% no SUD e SAU, e 15 a 25% nos SREs (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2016). Taxa de permeabilidade é o valor percentual de área de cada terreno que deve permanecer em solo natural, ou com cobertura verde, sem receber cobertura impermeabilizante (como asfalto ou concreto).

Percebe-se em Petrópolis que, as construções não respeitam os parâmetros e os limites das zonas, causando sobrecarga nas encostas, excessiva impermeabilização do solo e colocando mais pessoas em situação de risco. Por se tratar de algumas regiões de ocupação informal, muitas construções não passam pelo processo de legalização, de forma que as encostas se submetem a ações antrópicas que as tornam mais suscetíveis a deslizamentos. Nota-se, ainda, que o número de moradores aumenta sem que a prefeitura e os tomadores de decisões tenham dados reais sobre isso e seus efeitos.

Pela Figura 14 é possível perceber o predomínio da zona ZPE e a presença de setores residenciais, setor de uso diversificado, de atividades urbanas e histórico.

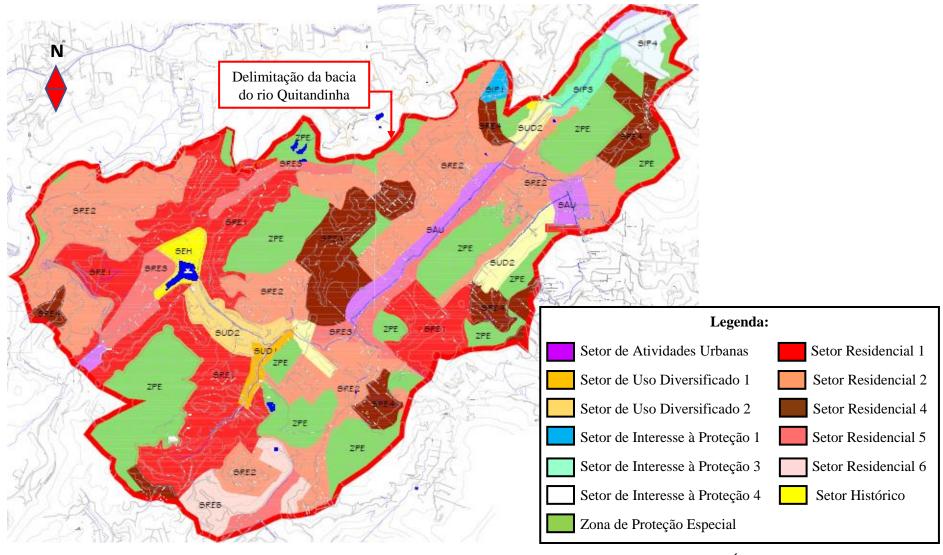


Figura 14: Zoneamento existente na área de estudo. Sem escala. Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2016.

3.5 Características físicas

3.5.1 Relevo

O Município de Petrópolis encontra-se dentro da Unidade Geomorfológica da Serra dos Órgãos, que por sua vez está inserida na Região das Escarpas e Reversos da serra do Mar, onde a média de altitudes no município é de 845 m (SILVA, 2006). A Figura 15 a seguir mostra o percentual das declividades encontradas no primeiro distrito do município.

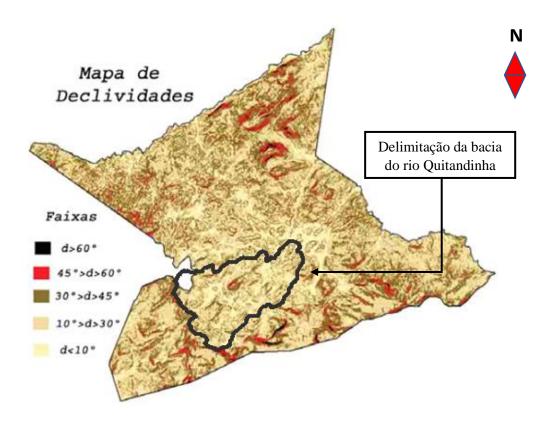


Figura 15: Mapa de declividades do primeiro distrito de Petrópolis. Sem escala. Fonte: VARANDA (2006).

Neste relevo predominantemente montanhoso e escarpado, encontram-se muitos bairros residenciais e ocorre ainda hoje uma expansão do espaço urbano por meio de invasões, e cada vez mais, a expansão se aproxima de locais extremamente perigosos e sujeitos a movimento de massa.

3.5.2 Clima

O clima da região, é resultado da localização geográfica com altas altitudes, que ultrapassam as vezes 1000 metros em relação ao nível do mar, e assim, é classificado como tropical de altitude. É caracterizado por temperaturas menores do que tropical ao nível do mar e ao mesmo tempo, a presença das encostas faz com que esse clima seja extremamente úmido (GONÇALVES & GUERRA, 2006).

A classificação climática de Köppen (apud ICMBIO, 2007) separa os tipos climáticos em grupos que consideram temperatura, relevo, regime de chuva e outros. Os tipos climáticos existentes no Brasil são:

- Cfa inverno frio e verão quente;
- Cfb climas mesotérmicos, úmido e verão brando;
- Cwa temperaturas moderadas com verão quente;
- Cwb inverno frio e verão brando;
- Awa temperaturas elevadas com chuvas de verão;
- Bsh semiárido com temperaturas elevadas.

Nesta classificação, Petrópolis se insere no tipo **Cfb**, clima mesotérmico, sempre úmido e com chuvas de verão e verões brandos, também chamado de clima tropical de altitude. Este tipo climático é caracterizado por verões frescos com muita presença de chuva e pouca estação seca. (CLIMATE-DATA, 2016)

A temperatura média é de 18,4° C, baixa se comparada às regiões ao entorno, enquanto a umidade relativa média é de 83%. (CLIMATE-DATA, 2016)

Este alto valor de umidade relativa pode ser explicado pela barreira formada pela cadeia montanhosa, que deixa a umidade que vem do oceano confinada sobre uma porção da cidade. A massa de ar úmido perde temperatura com o aumento da altitude favorecendo a condição de alta pluviosidade anual. (NIMER, 1989)

A precipitação média anual é de 2.200 mm, com maiores níveis pluviométricos nos primeiro e segundo distritos (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2016). A Figura 16 mostra as médias de temperatura e pluviosidade mensal na estação pluviométrica de Petrópolis (localizada no centro da cidade) entre os anos de 1938 e 2005,

onde a linha vermelha mostra a oscilação das médias mensais de temperatura, e as barras azuis as medias pluviométricas observadas para esses meses.

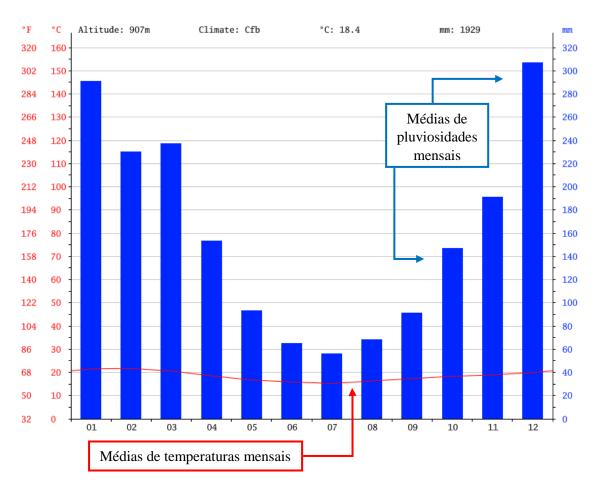


Figura 16: Médias mensais de temperatura e pluviosidade encontradas na Estação pluviométrica de Petrópolis. Fonte: (CLIMATE-DATA, 2016).

O primeiro distrito de Petrópolis, em particular o bairro do Quitandinha e os bairros de entorno apresentam altos valores pluviométricos devido às características de altitude e da proximidade da encosta ao mar, que retém a umidade. As altas encostas interferem na dinâmica atmosférica e provocam uma turbulência do ar que aumenta a ocorrência de chuvas do lado a barlavento da montanha. O nível pluviométrico médio anual do município varia entre 1500 mm e 2600 mm, segundo o ICMBIO (2007), com destaque aos altos valores nos meses de verão, que geralmente excede 200mm/mês. É neste período mais chuvoso que ocorrem os movimentos de massa em Petrópolis e em toda a Região Serrana (Figura 17).

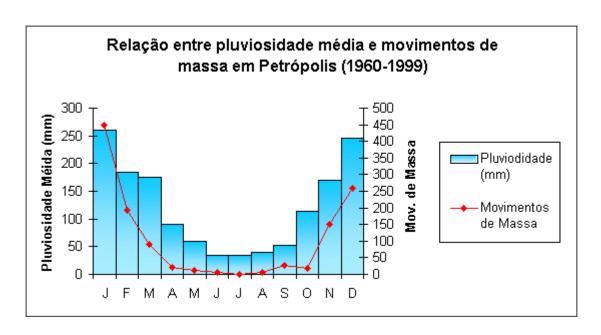


Figura 17: Comparação da quantidade total de movimentos de massa observados entre 1960 e 1999 com das médias mensais pluviométricas. Fonte: OLIVEIRA et al, 2013.

Petrópolis recebe a massa tropical Atlântica a maior parte do tempo, e por vezes recebe a massa Polar que traz frentes frias e linhas de instabilidade. O confronto dessas duas massas, no entanto, geralmente ocorre no inverno e resultam em quedas de temperatura, nevoeiro e diminuição da umidade. Se esse encontro ocorre no verão, por outro lado, o resultado é fortes chuvas com tempestades de raios (ICMBIO, 2006).

3.5.3 Cobertura Vegetal

Por tratar-se de um clima tropical de altitude muito úmido, a cobertura florestal que permaneceu intacta em Petrópolis é principalmente composta de floresta ombrófila densa (GONÇALVES & GUERRA, 2006). Este tipo de floresta é dividido em subtipos classificados segundo sua altitude, os quais foram identificados no primeiro distrito de Petrópolis:

- Floresta Submontana - Faixa de altitude: entre 50 e 500 m - Ocorre em serras litorâneas, em maciços isolados e em encostas de interior, como é o caso da região em questão.

Apresenta um estrato de até 30 metros, e pode ocorrer em regiões de alta declividade. Encontra-se em Petrópolis nas áreas ainda preservadas.

- Floresta Montana Faixa de altitude: entre 500 e 1.500 m Apresenta um estrato de cerca de 25m. Dentro de Petrópolis, ocorre em áreas de altas declividades e altitudes, em geral dentro de unidades de conservação, o que contribui para sua preservação.
- Floresta Alto Montana Faixa de altitude: superior a 1.500m Também conhecida por mata de altitude, essa vegetação resiste a temperaturas mais baixas, e apresenta um estrato de 5 a 10 m de altura. Este tipo de floresta foi o que mais sofreu desmatamento na região devido a ocupação urbana e encontra-se na cidade também sob a forma de pequenas ilhas.
- Vegetação Secundária Este tipo de vegetação surge na região de Petrópolis sobretudo na forma de substituição dos tipos anteriores de floresta que foi retirada. É importante ressaltar que este tipo de vegetação apresenta raízes mais superficiais do que os anteriores, e por isso maior propensão a sofrer movimentos de massa.

3.5.4 Geologia

A cidade de Petrópolis apresenta quatro unidades litológicas, das quais duas aparecem predominantemente na região estudada. São elas as unidades Bingen e Santo Aleixo, ambas pertencentes ao Granitóide Complexo Rio Negro, além de partes do Granito Nova Friburgo e da presença de depósitos aluviais, como pode ser observado no mapa da Figura 18.

A unidade Santo Aleixo, ou migmatito, é assim chamada por ser formada principalmente por migmatitos heterogêneos (ICMBIO, 2007). Possui relevo acidentado e estruturas paralelas à foliação NE das rochas, tendo suas encostas SE muito inclinadas, enquanto na direção NW as encostas possuem declividades mais suaves conforme o sentido da foliação. Há também nessa unidade, diques de composições variadas que continuam inclusive pela unidade Bingen.

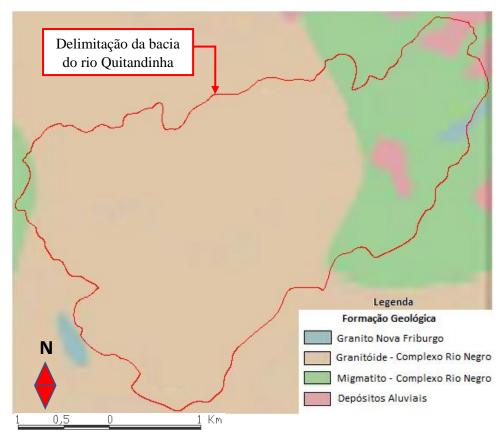


Figura 18: Formação geológica presente na bacia do rio Quitandinha. Elaboração baseada em CEG RIO, 2006.

A unidade Bingen, ou granitóide, segundo o relatório de CPRM (2012), difere-se da última unidade no que diz respeito à presença homogênea de gnaisses graníticos, que resulta no relevo de serras alinhadas, assimétricas e paredões lisos e verticais, com a presença de diversos afloramentos rochosos. As direções dos vales são condicionadas pelas falhas das rochas, por onde naturalmente existe uma passagem de drenagem, acentuando ainda mais os sulcos.

A rocha basal que se encontra sob o município de Petrópolis, assim como toda a geologia regional em que se insere, contém muitas fraturas, com extensão de até centenas de quilômetros. (COSTA NUNES et al., 1990)

A Figura 19 a seguir mostra um mapa de falhas e fraturas encontrados no primeiro distrito, segundo VARANDA (2006).

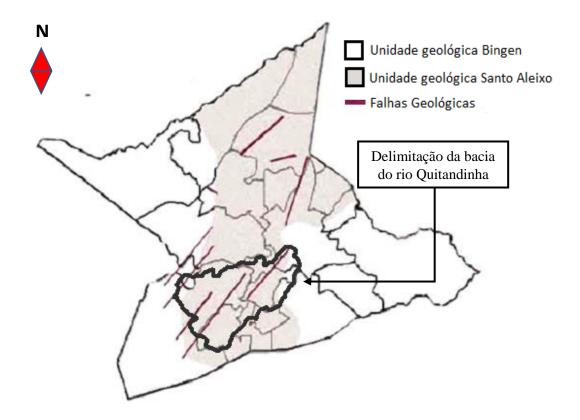


Figura 19: Mapa de falhas geológicas presentes no primeiro distrito de Petrópolis. Sem escala. Fonte: VARANDA, 2006.

Segundo SILVA (2006), a porção sul do município, onde se encontram os bairros pertencentes à área de estudo delimitada (Centro, Quitandinha, Bingen, Siméria, Independência) verifica-se a maior densidade de descontinuidades identificadas como fraturas e falhas. Como consequência, sobre a zona de falhamentos o relevo formado é acidentado, possui escarpas, paredões rochosos e vales sulcados.

Segundo COSTA NUNES et al. (1990), as falhas presentes na região de Petrópolis têm dimensões de no máximo alguns decímetros, mas profundidades que podem alcançar centenas de metros, formando reservatórios onde a água circula e se aloja.

É possível observar na região alguns locais onde o padrão de fratura é bem definido, devido ao afloramento da rocha, como o exemplo da Figura 20, registrado no bairro Duques. Há neste local, fraturas entre 5 e 20 cm que são preenchidas com fragmentos de rocha (VARANDA, 2006), permitindo a existência de zonas mais permeáveis no maciço rochoso.



Figura 20: Rocha fraturada na rua Ferreira da Cunha, no bairro Duques. Fonte: VARANDA, 2006.

Embora o material rochoso por si só seja impermeável, as fraturas criam uma rede por onde pode passar o fluxo de água subterrâneo. Esse fenômeno é evidenciado pela presença de olhos d'agua encontrados nas encostas naturais e em cortes de taludes rochosos. Dessa forma, toda a região de Petrópolis encontra-se sobre uma vasta rede de drenagem entalhada pelas falhas e fraturas formando vales profundos (COSTA NUNES et al., 1990).

A presença de aquífero entre as rochas pode gerar poropressões significativas na base da cobertura de solo sobre a camada rochosa reduzindo a resistência ao cisalhamento contribuindo para a sua instabilidade. Este fenômeno é capaz de explicar, por exemplo, porque chuvas de baixa intensidade podem desencadear movimentos de massa: por que o acréscimo de uma pequena quantidade de água em um solo já encharcado de chuvas anteriores acumuladas pode reduzir a resistência do solo o suficiente para que ele deslize (COSTA NUNES et al., 1990)

3.5.5 Geomorfologia

Na análise geomorfológica, o primeiro distrito de Petrópolis encontra-se na Unidade Geomorfológica das Serras dos Órgãos, onde o tectonismo ativo existente na região é percebido pela presença de encostas íngremes e grandes desníveis altimétricos no relevo, vales longos, rios encaixados e matacões soltos apoiados. As feições geomorfológicas encontradas na área são predominantemente: rampas (41,35%), embasamentos (41,8%), terraços fluviais (9,3%) e afloramentos rochosos (6,3%). Somada a atividade tectônica com a ocorrência de sucessivas fases de erosão, a geomorfologia da região apresenta-se acidentada, e por isso também suscetível aos deslizamentos. (GONÇALVES & GUERRA, 2006)

A Figura 21 mostra as formações geomorfológicas encontradas na bacia do rio Quitandinha.

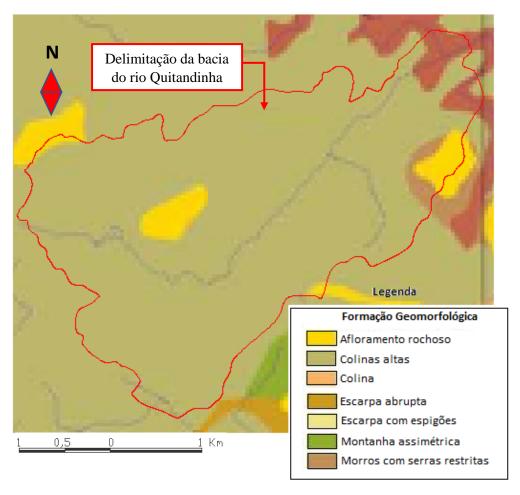


Figura 21: Mapa de Geomorfologia da bacia do Rio Quitandinha. Elaboração baseada em CEG RIO, 2006.

3.5.6 Solos

Segundo SILVA (2006), os solos residuais da região do bairro do Quitandinha possuem uma camada pouco espessa, além de apresentarem uma abrupta transição entre o solo e a rocha. Este fato, combinado às altas declividades encontradas na região tornam o solo propenso a deslizamentos, sobretudo onde há falhas e fraturas.

Dentre os tipos de solo identificados por VARANDA (2006) no primeiro distrito de Petrópolis, encontram-se:

- Afloramento rochoso: locais onde é possível identificar a rocha matriz sem sinais de intemperismo, falhas e fraturas;
- ➤ Alteração de rocha: encontra-se em geral estável;
- ➤ Solos rasos sobre as rochas: camadas de 1,00 a 2,00 metros que contém blocos de rochas, frequente em regiões acidentadas;
- ➤ Solos saprolíticos pouco intemperizados: solos reliquiares de 7,00 a 15,00 metros de espessura que contém blocos pouco intemperizados na base do perfil;
- ➤ Solos saprolíticos muito intemperizados: rochas já muito intemperizadas com blocos na base do perfil, variando de 10,00 a 20,00 metros;
- > Sedimentos inconsolidados: sedimentos de rocha e resíduos que ainda se espera que sofra transporte.

Segundo VARANDA, (2006), solos rasos sobre rocha é a classe de solo mais encontrada no primeiro distrito de Petrópolis e apresenta muita suscetibilidade à deslizamentos.

É importante, no entanto, ressaltar que essa área se encontra em intenso estado de urbanização, onde muito do solo natural encontra-se modificado, muitas vezes coberto ou misturado com camadas de lixo.

3.6 Movimentos de massa na área de estudo

3.6.1 Histórico

Sinais físicos de que as encostas já sofreram e sofrem movimentos de massa dentro da área de estudo, como marcas de processos erosivos, blocos soltos e convergências de fluxos de escoamentos podem ser encontrados nos bairros do Quitandinha, Siméria,

Independência, Alto da Serra, Castelânea, Bingen, Valparaíso, Taquara, Indaiá e Centro (LAGESOLOS, 2006).

Ao observar as características físicas da área de estudo detalhadas nesse capítulo, percebemos que o conjunto formado por tipo de solo, relevo e pluviosidade entre outros, torna essa área bastante suscetível a movimentos de massa. Entretanto, o fato de as pessoas habitarem locais suscetíveis a deslizamentos potencializa essas suscetibilidades, configurando situações de risco para a população. Nas regiões preservadas, por exemplo, da APA de Petrópolis, há menos deslizamentos notificados do que em áreas ocupadas, ainda que se trate do mesmo tipo de solo e igualmente de altas declividades (ICMBIO, 2007).

A Defesa Civil de Petrópolis alega que além de topografia acidentada, muitas áreas suscetíveis a deslizamentos presentes no primeiro distrito de Petrópolis são densamente habitadas e, em grande maioria, apresentam baixos padrões construtivos, onde não há captação de águas pluviais ou estabilização de taludes de cortes. (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013)

O crescimento demográfico e ocupação do primeiro distrito do município demonstra através de dados que a urbanização desordenada agrava a ocorrência de movimentos de massa. Historicamente, os movimentos de massa começaram a ser registrados em áreas habitadas após a década de 60, que coincide justamente com o aumento populacional ocasionado pela industrialização de Petrópolis (GONÇALVES & GUERRA, 2006). A Figura 22 mostra que o crescimento populacional no município de Petrópolis e sua relação com a ocorrência de movimentos de massa, indicando que até a década de 80 o aumento de deslizamentos deve estar associado ao aumento populacional.

Na Figura 23 são mostradas as quantidades de movimentos de massa ocorridos em cada um dos cinco distritos de Petrópolis entre os anos de 1960 e 1999, indicando que a maioria ocorre no primeiro distrito, que é a região com a maior população.

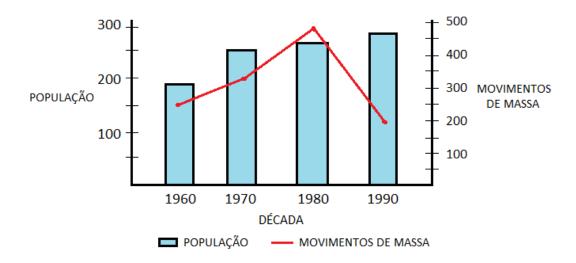
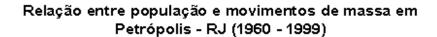


Figura 22: Comparação entre crescimento populacional e ocorrências de movimentos de massa entre os anos de 1960 e 1999. Fonte: OLIVEIRA et al., 2013.



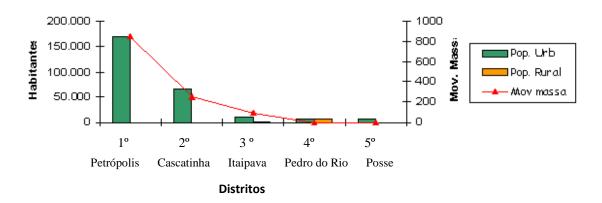


Figura 23: Quantidade de deslizamentos observados em cada distrito de Petrópolis entre 1960 e 1999. Fonte: OLIVEIRA et al., 2013.

Embora estes números de deslizamentos individualmente sejam considerados altos, seu valor ganha um significado diferente quando a partir deles é levantada a quantidade de perdas de vidas resultante dos desastres por movimentos de massa.

A década de 1980 apresentou um histórico de altos valores pluviométricos e desastres em Petrópolis, como os eventos de fevereiro de 1988, que alcançou conhecimento nacional, por ter resultado em 171 mortes além dos elevados prejuízos

materiais (NAKAZAWA & CERRI, 1990). Nesta ocasião foram percebidos 120 movimentos de massa, alguns dos quais constaram nos primeiros registros oficiais nas localidades do Quitandinha, Siméria, São Sebastião, Cremerie e Parque São Vicente. A partir desse evento de 1988, foi elaborado o primeiro mapa de suscetibilidade de deslizamentos no município de Petrópolis em escala de 1:10.000, onde foram identificadas 66 áreas de risco, ocupando 7,2 km² (NAKAZAWA & CERRI, 1990).

Após os anos de 1990, um extenso programa as obras de contenção realizadas (DANZIGER et al., 1992; MENDONÇA & TEMÓTEO, 1993) iniciaram uma fase de diminuição de eventos de deslizamento, como também pode ser observado na Figura 22. No entanto, a falta de um plano efetivo urbano e o aumento populacional, ainda que baixo, fizeram com que áreas perigosas ainda passassem a ser ocupadas que resultou em muitos eventos catastróficos dos anos 2000 em diante (Figura 24). (GONÇALVES & GUERRA, 2006)



Figura 24: Escorregamentos em encosta na Rua João Goulart, no bairro Valparaíso, em dezembro de 2002. Fonte: OLIVEIRA, 2004.

No evento de 2011, que ocorreu nos dias 11 e 12 de janeiro, a região serrana do Rio de janeiro teve um dos mais graves desastres de deslizamentos já ocorridos no Brasil, atingindo os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo (AVELAR et al, 2011), onde foram registradas 947 mortes e 50.000 desabrigados. Na ocasião do evento, houve registro de 241,8 mm de chuva acumulados em 24h, somando um total de 573,6 mm nos 12 primeiros dias do ano (DOURADO et al, 2012). A chuva intensa mais forte registrada nesse evento de 2011 em Petrópolis teve o valor de 61,8 mm em uma hora (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013)

Os eventos que ocorreram nos dias 17 e 18 de março de 2013 resultaram em mais de 100 notificações e apresentaram um quadro grave de ocorrências de deslizamentos e de registro de chuva intensa e acumulada (GUERRA & JORGE, 2014). Do inventário de deslizamentos que ocorreram nesta ocasião, 75% deles foram nos bairros do Quitandinha e Independência, e dos locais atingidos, 30% foram em locais que já haviam deslizado anteriormente. 70% dos deslizamentos aconteceu em taludes escavados para a construção de casas e de vias de acesso sem drenagem ou com uma drenagem que não correspondeu às necessidades, 28% foram corridas de entulho, solo e alguns blocos em locais que aconteceram concentrações pontuais de água e 2% ocorreu em taludes naturais. Só na rua Espirito Santo (bairro Quitandinha), ocorreram 12 mortes e a destruição de 20 casas, além de corridas do solo e o colapso de um muro de arrimo de concreto ciclópico. (DRM-RJ, 2013)

A Tabela 8 a seguir apresenta alguns dados dos grandes desastres que ocorreram nos últimos 30 anos em Petrópolis.

A Figura 25 mostra o número de ocorrência de vítimas fatais em deslizamentos por bairros entre os anos de 1943 e 1989, mostrando que no bairro Centro de Petrópolis, por exemplo, 143 e no bairro Quitandinha 62 vidas foram perdidas em 46 anos devido à movimentos de massa.

Tabela 8: Vítimas dos deslizamentos em Petrópolis entre os anos de 1988 e 2013. Elaboração baseada em dados de GUERRA & JORGE, 2014.

Ano	Vítimas fatais	Ocorrências na Defesa Civil	Chuva acumulada
1988	171	*	*
2001	50	1.000	200mm/12h
2008	9	*	*
2010	1	35	*
2011	71	*	180mm/12h
2013	33	100**	400mm/12h

^{*}dados não disponíveis

^{**}dado disponível em DRM-RJ, 2013

PERÍODO DE 1943-1989 160 150 140 130 120 110 101 NÚMERO DE ACIDENTES 100 90 80 70 60 51 49 50 40 30 22 22 20 20 10 REGIÕES Alto da Serra □ Carango a Araras Bingen ■ Cascatinha ■ Castelânea ■ Centro Caxambu ■ Corrêas Cuiabá □ Estrada da Saudade ■ Floresta Independência Itaipava tamarati Morin Mosela 🔲 Pedro do Rio Nogueira Presidencia Quitandinha Quarteirão Brasileiro Quissamã Retiro Roseiral Saldanha Marinho Samambala São Sebastião ■ Siméria ■ Valparaíso ■ Vila Felipe

FREQÜÊNCIA DE ACIDENTES POR REGIÃO

Figura 25: Número de vítimas fatais em acidentes com deslizamentos por bairros entre os anos de 1943 e 1989. Fonte: OLIVEIRA, 2004.

3.6.2 Caracterização dos movimentos

Os tipos de movimentos de massa presentes na cidade de Petrópolis são movimentos de ocorrência rápida, como escorregamentos de solo e rocha, mais especificamente, os escorregamentos planares e as quedas de blocos. (NAKAZAWA & CERRI, 1990)

Os tipos de movimentos ocorridos no primeiro distrito do município de Petrópolis, de acordo com VARANDA (2006), categorizados pelo critério de faixas de declividade da encosta, são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9: Tipo de movimento predominante por faixa de declividade no primeiro distrito de Petrópolis. Fonte: VARANDA, 2006

DECLIVIDADE	TIPOLOGIA DE MOVIMENTO
Abaixo de 10°	Encosta estável
Entre 10° a 30°,	Rastejos e escorregamentos
Entre 30° e 45°	Escorregamentos
Entre 45 e 60°	Escorregamentos
Acima de 60°	Queda de fragmentos

Interpretando este resultado de acordo com o mapa de declividades encontradas no município, na seção 3.3.1, podemos perceber que, como a maior parte das encostas possuem entre 10 e 45° de declividade, espera-se que os movimentos de massa mais registrados sejam do tipo "escorregamentos".

AVELAR et al. (2011) identifica como o tipo de movimento de massa mais comum encontrado na região serrana do Rio de Janeiro o escorregamento translacional, encontrando-se também a corrida de detritos, o escorregamento rotacional e queda de bloco.

DUTRA (2014) em seu estudo sobre os movimentos de massa sobre os distritos de Petrópolis concluiu, através de registros, que para as áreas compreendidas pela região de estudo deste trabalho os tipos de movimentos de massa mais comuns são os escorregamentos e as quedas ou rolamentos de blocos. As Figuras 26 e 27 mostram exemplos desses tipos de movimento.

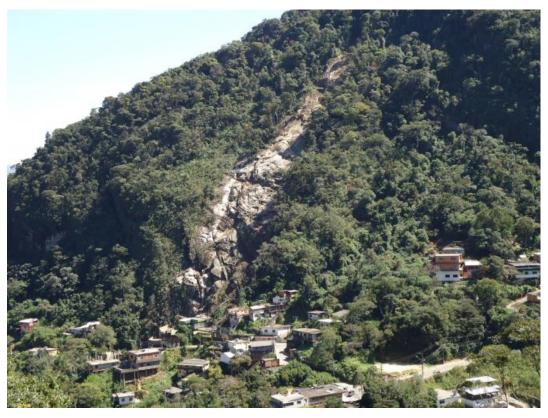


Figura 26: Escorregamento de solos rasos no bairro do Morin (primeiro distrito).

Fonte: DUTRA, 2014.



Figura 27: Quedas de blocos no bairro do Quitandinha. Fonte: G1, 2017.

3.6.3 Gestão de risco de deslizamento

No ano de 2007, a prefeitura de Petrópolis apresentou um plano municipal de redução de riscos (PMRR) para o primeiro distrito, que tinha como objetivo identificar as áreas de risco alto e muito alto de deslizamentos e assim poder planejar as intervenções necessárias. O PMRR possui como objetivos (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2008):

- Mapeamento das Áreas de Risco Alto e Muito Alto com assentamentos precários;
- Proposição das medidas estruturais e não estruturais necessárias para mitigação do risco;
- ► Georreferenciamento dos dados;
- Quantificação prévia dos custos das ações estruturais e não estruturais;

O PMRR identificou 96 setores de risco em 15 diferentes regiões do município, delimitando as áreas suscetíveis a deslizamentos de que se encontravam ocupadas por habitações irregulares, passíveis de receber intervenções de caráter estrutural e não estrutural.

As regiões, então, foram inseridas em categorias de acordo com as características que cada uma apresentava, e foram calculados para cada uma delas fatores de risco, levando em conta vários fatores condicionantes. O fator de risco atribuído a cada categoria segue a seguinte ordem:

1°: categoria IV, com fator de risco = 0,9

2°: categoria VII, com fator de risco = 0,8

 3° : categoria V, com fator de risco = 0.7

 4° : categoria II, com fator de risco = 0,5

 5° : categoria III, com fator de risco = 0.4

 6° : categoria I, com fator de risco = 0,3

A Defesa Civil de Petrópolis, por meio deste PMRR, classifica como áreas de alto e muito alto risco no primeiro distrito de Petrópolis regiões nos bairros: Quitandinha, Duques, Independência, São Sebastião, Siméria, Valparaíso, Dr. Thouzet, Alto da Serra,

Chácara Flora, Sargento Boening, Centro, 24 de Maio, Bingen e Duarte da Silveira. (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013)

A Figura 28 mostra uma parte do mapa de riscos que onde está inserida a área de estudo, com os respectivos setores de risco. A descrição das categorias encontra-se na Tabela 8. A análise de alguns locais pertencentes a área de estudo teve o resultado mostrado na Tabela 10 e por ele pode-se observar que muitas moradias, e consequentemente muitas pessoas moradoras da área encontram-se em situação de risco.

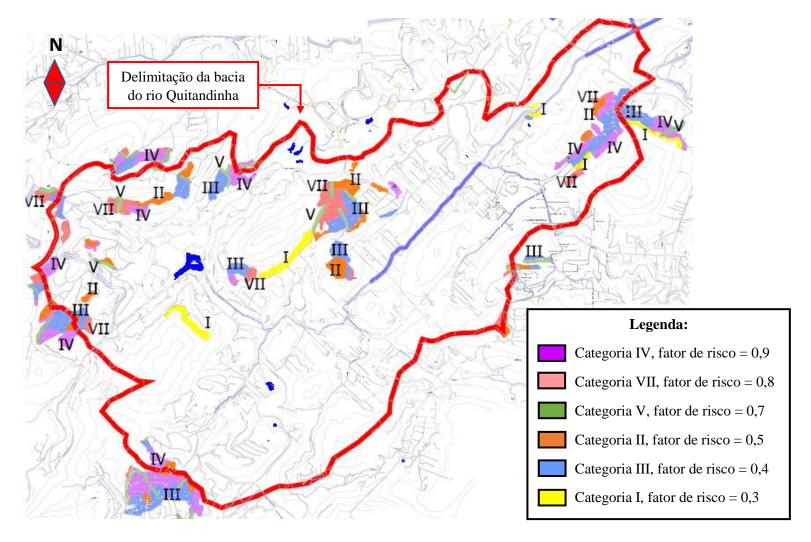


Figura 28: Categorias do plano municipal de redução de risco presentes da bacia do Rio Quitandinha. Sem escala. Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013.

Tabela 10: Categorias de fator de risco do PMRR de deslizamento para o primeiro distrito de Petrópolis, com suas características físicas, problemas recorrentes e medidas a serem tomadas em cada uma delas. Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013.

	Característica Física	Problemas existentes e/ou previstos	Ações Estruturais	Ações Não Estruturais
	Área de proteção localizada imediatamente a jusante das encostas rochosas e das encostas muito ingremes.			
	Áreas de impactos e deposição de materiais provenientes dos movimentos de massa originados da encosta a montante.	Instabilização de corpos de tálus por alteração em sua geometria e/ou drenagem;	 Remoção de moradias precárias muito vulneráveis; 	
т	Declividade variada predominantemente inferiores a 60°. Constituído por solo "in situ" e por corpos de talus.	Sujeição de impactos e deposição de matérias rochosos e terrosos provenientes de movimentos de massa a montante.	 Construção de estruturas de impacto de fragmentos de rocha; 	 Delimitação de faixas "non aedificandi"; Monitoramento e Mapeamento Geológico
-	 Os solos "in situ" são constituídos por solos superficiais e solos de alteração e aindas constituídos de fragmentos de rocha de dimensões variadas envoltos em matriz areno- 	 Rolamento de matacões por descalçamento (escavação e/ou erosão de sua base); 	 Construção de canaletas de drenagem chumbadas na rocha; 	detalhado para detecção de fragmentos de rocha instáveis;
	siltosa.	 Recalques diferenciais de fundações parcialmente apoiado em matacões. 	 Demarcação e Reflorestamento de faixas "non aedificadis". 	
	Nos corpos mais antigos os fragmentos podem estar intemperizados a ponto de formar solos bem desenvolvidos, de característica similares aos solos superficiais.			
	❖ Áreas ocupadas irregularmente em terrenos com declividade baixa (entre 10° e 30°);	Escorregamentos de terras induzidos pela ocupação, nas bordas:	 Construção de anéis de drenagem; 	
	 Localização em cotas elevadas, à meias encosta ou em topos de morros; 	 Ruptura de taludes por sobrecarga de lixo, entulho ou aterro na crista; 	 Saneamento básico e destino finais para condução dos efluentes à jusante; 	Conscientização da população quanto ao despeja de lixo e entulho nas bordas da encosta:
п	As condições precárias de ocupação oferecem risco devido a ação antrópica às construções ou áreas localizadas à	 Ruptura de taludes por ausência de rede de drenagem das águas de montante; 	 Remoção de moradias precárias de locais inadequados; 	 Cadastramento das moradias existentes e restrição de expansão para áreas de perigo, florestadas ou
	jusante (esgotos, lixo e entulhos, águas superficiais, aterros, desmatamento, etc.);	 Ruptura de taludes e assoreamento dos rios por desmatamento das áreas de montante; 	❖ Maior eficiências na coleta de resíduos;	protegidas por lei;
	 Construções localizadas nas bordas de encostas muitos ingrimes. 	 Contaminação de solo a águas superficiais e de nascentes; 	 Reflorestamento das áreas degradadas; 	

ш	 Åreas de encostas íngremes com declividade natural entre 30° e 60° constituídos predominantemente por solos superficiais ou rasos (SRSR) e solos saprolítico muito intemperizados (SSMI); Åreas constituídas de assentamentos precários ou com risco agravado pela condicionante antrópica; Áreas com alterações nas características originais da encosta resultante da implantação de edificações menos dotadas de medidas e obras de estabilização e infraestrutura; Áreas dotadas de alguma infra-estrutura urbana; Áreas adensadas com construções de padrão médio e baixo. 	 Escorregamentos de terras induzidos pela ação antrópica; Ruptura de taludes de corte e corpos de aterro por altura e inclinações excessivas, ausência de obras de estabilização, drenagem e proteção superficial; Instabilização de fragmentos de rocha por escavação ou erosão; Erosão induzida em sulcos e ravinas, pela exposição do solo de alteração e/ou a condução das águas superficiais (pluviais ou servidas);. 	 Remoção parcial de moradias muito precárias; Melhorias habitacionais: Construção e implantação de drenagem em lotes ou grupo de lotes; Implantação de destinos finais de águas e esgotos samitários; Saneamento básico e demais serviços de infra-estrutura; Urbanização em terrenos de encosta. 	 Conscientização da população quanto ao despeja de lixo e entulho nas encostas; Cadastramento das moradias existentes e restrição de expansão para áreas de perigo, florestadas ou protegidas por lei; Identificação das moradias com problemas de drenagem (destino de águas pluviais). Orientação da população sobre novas construções em áreas de perigo;
IV	 Áreas de encostas ingremes com declividade natural entre 30° e 60° constituídos predominantemente de solos superficiais ou rasos (SRSR) e solos saprolítico muito intemperizado (SSMI); Áreas pouco adensadas, constituídas de assentamentos muito precários e com risco agravado pela condicionante antrópica; Alteração excessivas nas características originais da encosta resultantes da implantação de moradias sem as mínimas condições de segurança e ausência de obras de estabilização; Áreas desprovidas de infra-estrutura, inclusive saneamento básico. 	 Edificações construídas sem estrutura, com risco de desabamento. Desmoronamento da edificação por escorregamentos provenientes de taludes muito próximo a construção; Ausência de saneamento básico, infra-estrutura e urbanização; 	 Remoção de moradias muito precárias localizadas em terrenos muito vulneráveis; Reflorestamento das áreas degradadas e implantação de limites ecológicos; Melhorias habitacionais; Saneamento básico e infra-estrutura. 	 Conscientização da população quanto ao despeja de lixo e entulho nas encosta; Cadastramento das moradias existentes e restrição de expansão para áreas de perigo, florestadas ou protegidas por lei; Orientação da população sobre novas construções em áreas de perigo;

v	7	 Áreas com presença de linhas de drenagem caracterizadas por linhas sulcadas na encosta ou nos fundos de vale que concentram e conduzem as águas superficiais e subsuperficiais de forma perene ou intermitente; Locais com potencial para a condução através das águas superficiais e subsuperficiais de materiais provenientes de movimentos de massa ocorridos a montante ("debris flow"); Caracterizados, ainda, pelo acúmulo de depósitos de colúvio, tálus, tálus-colúvio, lixo, entulho e aterros simplesmente jogados encosta abaixo. 	 Inundação ou desmoronamentos causados por enxurradas ou movimentos de massa ocorridos à montante; Solapamento das cabeceiras de drenagem; Os materiais estocados nestas áreas acabam sendo conduzidos para as redes pluviais causando obstrução ou então resultando no assoreamento dos rios e córregos. 	 Demarcação de faixas de proteção das linhas de drenagem natural e/ou galerias existentes; Canalização e tratamento de esgotos sanitários; Renaturalização através de reflorestamento; Demarcação de faixas de proteção das linhas de drenagem perenes ou intermitentes; Conscientização da população quanto ao risco o moradias localizadas em linhas de drenagem talvegues;
VI	I	 Áreas de planícies, quase planas situadas em fundos de vales. Formas geralmente alongadas e estreitas, acompanhando os principais rios do município. Constituída por sedimentos predominantemente arenosos e junto às encostas, por coluviões e matacões. Possui nível de água bastante alterado em períodos de alta densidade pluviométrica. 	 Enchentes e inundações; Dificuldade de escoamento e infiltração das águas servidas causados por assoreamento; Erosão e solapamento das margens dos rios e córrego; Danificação de pavimentos viários; Ruptura em redes de água e esgoto por recalque dos terrenos de fundação. 	hidráulicos visando o desenvolvimento de projetos de macro e meso drenagem para possibilitar, assim, uma maior acurácia na quantificação de recursos
VI	II	 Áreas em processo de expansão com crescimento desordenado e construções muito precárias implantadas em terrenos com declividade variada; Vetor de crescimento em direção a áreas de perigo alto e muito alto, em cotas mais elevadas, fundos de vales ou ainda faixas de domínio de estradas e margens de rio; Áreas com potencial de risco devido à alteração descontrolada do meio ambiente; Áreas pouco adensadas com infra-estrutura precária ou inexistente; Áreas impróprias à ocupação urbana e protegidas por lei. 	encosta;	 ❖ Reflorestamento de áreas degradadas. ❖ Implantação de eco-limites; ❖ Orientação da população da necessidade o proteção da área, com a proibição de nove

Tabela 11: Classificação dos riscos existentes em bairros e localidades da bacia do rio Quitandinha, segundo o plano municipal de redução de riscos para o primeiro distrito de Petrópolis. Dados retirados de PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013.

		CATEGORIAS DE INTERVENÇÃO												
	ÁREAS DE INTERVENÇÃO		I		П		III]	IV		V	7	VII	
		n° casas	Fator Risco 0,3	n° casas	Fator Risco 0,5	n° casas	Fator Risco 0,4	n° casas	Fator Risco 0,9	n° casas	Fator Risco 0,7	n° casas	Fator Risco 0,8	TOTAL CASAS
2	ALTO INDEPENDÊNCIA		0	64	32	300	120	220	198	96	67	14	11	428
10	AMAZONAS		0	170	85	120	48	100	90	3	2	17	14	239
13	DUQUES		0	134	67		0	116	104	6	4	40	32	208
17	24 DE MAIO		0	24	12	120	48	110	99		0	11	9	168
29	DR. THOUZET	100	30	100	50	52	21		0		0	9	7	108
37	ESTRADA DO PARAÍSO	12	4	67	34	41	16		0	45	32		0	85
40	MINAS GERAIS	24	7	13	7	35	14	30	27	10	7	21	17	79
47	RIO DE JANEIRO /SÃO PAULO		0		0	28	11	40	36	25	18		0	65
58	MATO GROSSO		0		0	24	10	25	23	15	11	12	10	52
64	VENEZUELA		0		0	40	16	16	14		0	20	16	46
67	SERVIDÃO INDAIÁ		0		0		0	19	17	10	7	23	18	43
78	RUA PARÁ		0	29	15		0	12	11		0		0	25
82	BAHIA		0		0	14	6		0		0	17	14	19
91	HONDURAS	40	12		0		0		0		0		0	12
96	VALPARAÍSO		0	20	10		0		0				0	10
98	CUBA		0	5	3		0		0	9	6		0	9
100	WASHINGTON LUIZ	12	4		0	7	3		0		0		0	6
101	GETÚLIO VARGAS		0	10	5		0		0		0		0	5

No ano de 2013 foi criado um Plano de Contingência para desastres naturais em Petrópolis, contemplando prevenção e medidas emergenciais para lidar com deslizamentos e inundações, onde foi inclusive implantado um sistema de alerta e alarme. O Sistema de Alerta existente hoje em Petrópolis é baseado no serviço meteorológico do Centro Estadual de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais do Rio de Janeiro (CEMADEN-RJ), pelo Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais (CEMADEN) e pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Estes órgãos são responsáveis tanto pela medição das pluviometrias quanto pela emissão de avisos em caso de chuvas que apresentem valores acima dos considerados toleráveis (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013).

Os limiares de chuva previstos pelo Plano de Contingencia da Prefeitura municipal de Petrópolis, (2013) para situações de movimentos de massa, estão mostrados na Tabela 12 a seguir. Os alertas emitidos pelo CEMADEN e pelo INEA, por sua vez, apresentam as ações associadas a cada uma das situações: vigilância, atenção, alerta e alerta máximo (Tabela 13). Para que ocorra a desmobilização das medidas adotadas pelo plano de contingência nas situações de alerta máximo, foi estabelecido que seja detectada ausência de chuva na localidade por pelo menos seis horas.

Tabela 12: Níveis críticos de pluviometria adotados para compor quatro estados de perigo de deslizamentos no município de Petrópolis. Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013.

	NORMAL	ATENÇÃO	ALERTA	ALERTA MÁXIMO
Últimos 15 minutos	5 mm	10 mm	15 mm	50 mm
1h	20 mm	30mm	40mm	90mm
4h	40mm	50mm	60mm	130mm
24h	80mm	90mm	100mm	210mm
72h	120mm	130mm	140mm	250mm
96h	160mm	170mm	180mm	370mm

Tabela 13: medidas a serem adotadas em cada um dos estados de previsão de deslizamentos apresentados anteriormente no município de Petrópolis.

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013.

NÍVEIS DE AVISO	AÇÕES DESENVOLVIDAS
VIGILÂNCIA	Momento em que é realizado o monitoramento, ou seja, a rotina de acúmulo de informações das diversas situações que podem gerar ou não um desastre.
ATENÇÃO	As agências municipais ficam prevenidas da possibilidade de serem chamadas para contingência. Todas as providências de ordem preventiva, relativas ao pessoal e ao material, e impostas pelas circunstâncias decorrentes da situação são tomadas pelas diversas chefias, logo que a organização receba a ordem de Sobreaviso . As pessoas envolvidas na emergência permanecem em seu local de trabalho ou em suas residências, mas, neste caso, em estreita ligação com a organização e em condições de poder deslocar-se imediatamente para o local do trabalho, em caso de ordem ou qualquer eventualidade.
ALERTA	Os órgãos municipais e entidades participantes do plano ficam preparados para sair da sua base tão logo recebam ordem para desempenhar qualquer missão constante do Plano de Contingências. Quando informada a situação de PRONTIDÃO , todas as pessoas envolvidas no Plano de Contingências deverão comparecer a sua organização no mais curto prazo possível. Todos ficam equipados e preparados no interior da organização.
ALERTA MÁXIMO	Os órgãos municipais e entidades participantes do Plano ficam preparados, com todos os recursos necessários à sua base e em condições de deslocar-se e desempenhar as atividades conforme matriz de responsabilidades, dentro do mais curto prazo ou daquele que lhe for determinado pelo Plano de Contingências.

Quando necessária a mobilização, os órgãos responsáveis por assistência de saúde, trânsito e outros são acionados e é reponsabilidade da Defesa Civil o acompanhamento da área e orientação da população quanto a posto de comando, área de espera, áreas de evacuação, rotas de fuga, pontos de encontro, pontos de apoio e abrigos (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS, 2013).

4. Materiais e métodos

4.1 Metodologia empregada

No presente estudo é avaliado o par de períodos de observação de chuva acumulada com maior correlação. Como os dados de pluviometria coletados referem-se a acumulados diários de chuva, o período curto desse par é de 24h e o outro variando entre 48h, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216 e 240h. Para encontrar o par de períodos de maior dependência com a ocorrência de deslizamentos, este trabalho realizou o teste do Qui Quadrado, com a determinação de seu coeficiente de contingência, método estatístico para calcular a dependência entre dois eventos distintos. O teste do Qui Quadrado foi aplicado sobre as frequências de dias com ocorrência de movimentos de massa observadas em 1597 dias entre os anos de 2003 e 2009.

Para cada período de chuva a pluviometria acumulada foi dividida em faixas de pluviometria, sendo a primeira 10 - 20 mm, e depois 20 - 40 mm, 40 - 60 mm, e seguindo de 20 em 20 mm até 280 mm. E para cada uma dessas faixas foi observada a frequência de ocorrência de dias com deslizamentos, a partir de dados de notificações feitas à defesa civil no período de observação.

Foram calculadas, finalmente, as probabilidades de ocorrer pelo menos um, pelo menos três e pelo menos cinco deslizamentos dentro do território da bacia do rio Quitandinha a partir das frequências de par de períodos com deslizamentos considerando as diferentes combinações de faixas de altura pluviométrica.

A variação da probabilidade com as faixas de alturas pluviométricas para um determinado par de períodos permite definir, por interpolação, curvas de probabilidade. No caso de se adotar valores de probabilidade aceitável de ocorrência de deslizamentos como critério para demarcar os diferentes níveis de alerta, é possível se definir os respectivos limiares de chuva através de tais curvas.

As etapas de obtenção, tratamento e organização e cruzamento diário de dados de pluviometria e deslizamentos expostos no presente trabalho foram obtidos de pesquisas realizadas anteriormente por MENDONÇA et al. (2013).

Todo o processamento de dados, bem como cálculos foram realizados com fórmulas e funções desenvolvidas na própria planilha Excel onde constava a tabela de dados.

4.2 Obtenção e tratamento de dados

4.2.1 Dados de chuva

Foram coletados os dados de chuva acumulada em um período de 24h registrados no posto pluviométrico localizado dentro do Laboratório Nacional de Computação Científica (Avenida Getúlio Vargas, 333, Quitandinha - Figura 29) no período referente entre 01/01/2005 e 16/05/2009. As medições desse posto são consideradas representativas da bacia do rio Quitandinha,

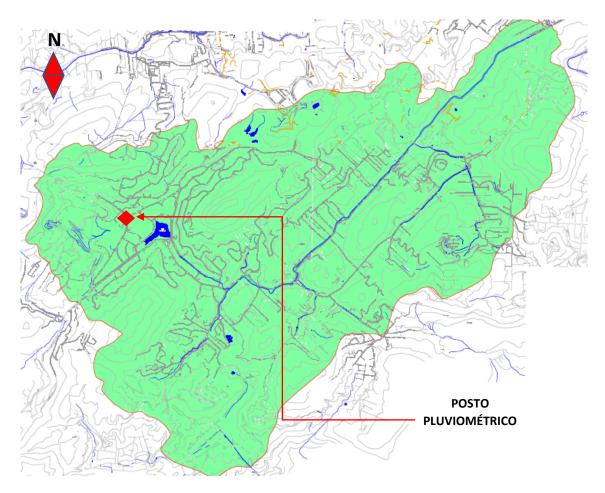


Figura 29: Delimitação da bacia do rio Quitandinha e localização do posto pluviométrico onde foram realizadas as medições. Sem escala.

Nos 1597, dias em que foi registrada a quantidade de chuva em milímetros nesse posto pluviométrico, 561 dias, ou seja, 35% dos dias observados, registraram pelo menos um centímetro de chuva.

Como exposto, o presente trabalho utiliza como mínimo período de registro de chuvas o valor de 24h, justamente por que assim foi aferida a quantidade de chuva no posto pluviométrico no período em questão. Foi contabilizada a cada dia a pluviometria acumulada nessas 24h e nos períodos anteriores que variaram de 48h a 240h. Os períodos de observação de chuva são:

- Período 1 de chuva acumulada: 48h, 72h, 96h, 120h, 144h, 168h, 192h, 216h ou 240h.
- Período 2 de chuva acumulada: 24h.

As pluviometrias em cada período foram classificados dentro de intervalos disjuntos e complementares. Para 24h foram definidas as classes: 0 a 20mm; 20 a 40mm; 40 a 60mm; 60 a 80mm; 80 a 100mm; 100 a 120mm; 120 a 140mm. As faixas pluviométricas consideradas para os períodos entre 48 e 240h estão na Tabela 14.

Tabela 14: Faixas de pluviometria consideradas para a observação de ocorrência de deslizamentos na área de estudo.

Mínimo (mm) Máximo (mm)

10,0	19.9
20	39.9
40	59.9
60	79.9
80	99.9
100	119.9
120	139.9
140	159.9
160	179.9
180	199.9
200	219.9
220	239.9
240	259.9
260	279.9

4.2.3 Obtenção e tratamento de dados de deslizamento

Os dados de deslizamento obtidos junto a defesa civil foram analisados em período idêntico ao dos dados de chuva para os dez bairros citados anteriormente, além de eventos registrados nas localidades das ruas Coronel Veiga, Saldanha Marinho e Ponte Fones. Deve-se entender por "evento de deslizamento" a ocorrência de um único deslizamento e não de um conjunto de deslizamentos.

O trabalho de MENDONÇA et al. (2013) realizou uma triagem das notificações feitas à defesa civil a fim de identificar quais das chamadas feitas à defesa civil previamente, selecionadas pelo dia de ocorrência, indicariam algum tipo de deslizamento. Alguns dos registros foram eliminados por não serem considerados indicativos de movimentos de massa, por multiplicidade de registros de um mesmo deslizamento e por possuírem informações não confiáveis. Os registros considerados como notificação de movimentos de massa foram:

- Deslizamentos:
- Afundamento de via:
- Quebra de muro;
- Queda de árvore;
- Rachaduras no solo;
- Queda de blocos rochosos;
- Identificação de vazamentos no solo;
- Rachadura em muros e em residências;
- Queda de parte de residência;
- ldentificação de vazamentos em muros de contenção.

Para o presente trabalho foi realizada uma seleção dos dados referentes a deslizamentos ocorridos dentro da bacia do Rio Quitandinha. A Tabela 15 mostra um resumo da quantidade de dados coletados.

Tabela 15: Resumo das observações de chuva e ocorrência de deslizamentos coletados entre 01/01/2005 e 16/05/2009.

Total de dias observados	1.597
Total de dias com chuva mais de 10mm em 24h	561
Total de dias com deslizamento	133
Total de deslizamentos registrados	420

4.2.4 Cruzamento de dados de ocorrência de deslizamentos e pluviometria.

A partir dos dados de deslizamentos e pluviometria, foi construída uma tabela com dados diários da quantidade de deslizamentos ocorridos e as respectivas faixas pluviométrica nas 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216 e 240h anteriores. Para poder relacionar a ocorrência dos deslizamentos com os acumulados diários de chuva, os deslizamentos foram considerados como se ocorressem às 0h do dia de seu registro. Portanto, o período de pluviometria acumulada antecedente foi contado a partir dessa 0h do dia do deslizamento, conforme indicado na Figura 30.

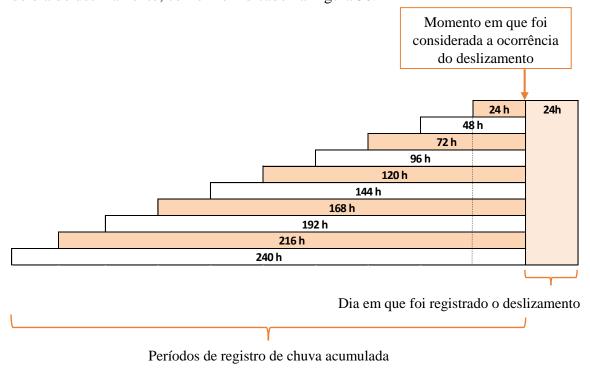


Figura 30: Identificação dos períodos de chuvas acumuladas e do período de ocorrência de deslizamentos.

Após separar a quantidade de deslizamentos por dia, foi então calculada a quantidade total de dias em que foram observadas as diferentes combinações de faixas pluviométricas para cada par.

Foi adotado um critério de exclusão de registros de deslizamentos que consistiu em considerar válidos aqueles que ocorreram em situações de acumulados pluviométricos maiores que 10 mm para as 24 horas, 20 mm para as 48 horas e 40 mm para 72 horas. A justificativa para tal é a falta de confiabilidade nesses registros, posto que esses valores de pluviometria são muito pequenos para deflagrar tais eventos.

4.3 Medição da dependência entre a pluviometria nos períodos de observação e ocorrência de deslizamentos

4.3.1 Análise de dependência

Um dos objetivos específicos desse trabalho é quantificar a dependência entre um par de períodos de pluviometria e a ocorrência ou não de deslizamentos. Para isso existem diversos métodos estatísticos que tem como objetivo quantificar o grau de associação entre duas variáveis isoladas (pluviometria e ocorrência de deslizamento). A abordagem sobre estatística e teste qui quadrado explorada neste capítulo foram baseadas em BUSSAB & MORETTIN (2010) na seção 14.4, onde é possível encontrar um maior detalhamento sobre o teste de independência e exemplos de aplicação.

Dentre os diversos métodos que a estatística oferece para medir a dependência entre dois eventos, tem-se o teste do qui quadrado de Person (representado por χ^2). Este trabalho, então, utilizou este método para medir a dependência entre o par de períodos em que foi feita a medição de chuva acumulada e a ocorrência de pelo menos um deslizamento.

Antes de explicar o teste do Qui Quadrado, é necessário conhecer o conceito de valores observados e valores esperados:

➤ Valores observados é quantidade real encontrada de ocorrência de determinado evento. Para o presente trabalho, valor observado é a quantidade de dias onde foi observada a ocorrência de deslizamento para cada par de classes de pluviometrias associadas aos períodos observados.

➤ Valores esperados, por outro lado, é a quantidade esperada de ocorrência desse mesmo evento mediante a hipótese de que este é independente do outro evento, que é a segunda variável. Neste trabalho, valor esperado seria a quantidade de dias em que ocorreu deslizamento mediante a hipótese que a ocorrência dos deslizamentos é independente das pluviometrias registradas para o par de períodos observados.

O princípio da aplicação do teste qui quadrado é medir a diferença entre valores observados e valores esperados de ocorrências de um determinado evento. Neste caso, a medição de dependência entre a ocorrência ou não de deslizamento e a pluviometria em um determinado par de períodos de chuva foi baseada na diferença entre os valores observados de número de dias em que ocorreu ou não deslizamento por par de períodos e os valores de dias esperados em que ocorreu ou não deslizamento para o mesmo par de períodos. O valor do qui-quadrado é calculado para cada par de períodos de pluviometria considerado.

Para mostrar o quão confiável esse teste é, deve-se adotar um nível de significância α para o mesmo. Nível de significância indica o grau em que este resultado é "verdadeiro". O valor de α é arbitrário e, em geral, é estipulado como 5%, 10% ou 1%. Quanto menor o α adotado, mais significante é a rejeição de um valor que se encontra fora do valor crítico estabelecido (χ_c^2), e menor é a probabilidade de que a estatística da amostra pertença à região crítica. Região crítica é o nome dado à área onde se encontram os valores a serem rejeitados para tratamento estatístico.

Foi, então, adotado para este teste um nível de significância de 5% (α = 0,05). Isto significa que pode ser determinado um χ_c^2 , chamado de valor crítico de qui quadrado, no qual se pode garantir que os valores de χ^2 menores que o valor crítico possuem 95% de chance de ocorrer, se a hipótese de independência for verdadeira. O gráfico da Figura 31 a seguir mostra como é construída a curva de distribuição de probabilidades e a região crítica de acordo com o nível de significância, para um exemplo onde α = 0,05.

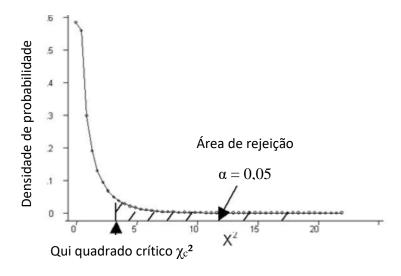


Figura 31: Curva de densidade de probabilidade e área de rejeição do teste qui-quarado.

Para a definição do valor de qui quadrado crítico, é necessário determinar um valor chamado grau de liberdade. O grau de liberdade é um parâmetro utilizado em testes de qui quadrado para cada valor de qui quadrado calculado, isto é, cada par de períodos de chuva onde será calculada a dependência da ocorrência ou não de deslizamento terá um grau de liberdade diferente.

O grau de liberdade (GL) é calculado pela Equação (5):

$$GL = (quantidade \ de \ linhas - 1) \times (quantidade \ de \ colunas - 1)$$
. (5)

Onde linhas e colunas são as da tabela de valores observados e valores esperados. Para a Tabela 16, referente aos períodos de 24 e 48h, foram encontradas 41 linhas associados a pares de pluviometria distintos e 2 colunas referente a ocorrência ou não de deslizamento. O grau de liberdade do teste para este par de períodos, portanto, é $GL = (41 - 1) \times (2 - 1) = 40$.

Tabela 16: Exemplo de tabela de períodos com e sem deslizamento de acordo com valores de pluviometria em 24 e 48h.

	Períodos de	observação	Valores O	bservados	
	24 h	48 h	Dias com deslizamentos	Dias sem deslizamentos	TOTAL
	10-20	20-40	20	105	125
	20-40	20-40	9	68	77
	10-20	40-60	5	38	43
	20-40	40-60	2	24	26
	40-60	40-60	4	16	20
	10-20	60-80	7	13	20
	20-40	60-80	2	10	12
	40-60	60-80	1	10	11
	60-80	60-80	1	13	14
41 linhas	10-20	80-100	3	5	8
	20-40	80-100	2	7	9
Ξ Ι	40-60	80-100	2	3	5
4	60-80	80-100	1	2	3
	80-100	80-100	2	6	8
	10-20	100-120	1	8	9
	20-40	100-120	0	2	2
	40-60	100-120	1	0	1
	60-80	100-120	0	2	2
	80-100	100-120	0	1	1
	100-120	100-120	1	4	5
			•	•	•
	•	•	•	•	
	•	•	•	•	•
	120-140	260-280	1	0	1
	ТО	TAL	70	359	429
		'	2 c	γ olunas	1

A partir do grau de liberdade e do nível de significância escolhido, através de uma tabela de distribuição de qui quadrado (Tabela 17), é encontrado o valor de χ^2 crítico. Por exemplo, para o caso mostrado anteriormente (Tabela 16), tem-se o valor de $\chi_c^2 = 55,758$ para o nível $\alpha = 5\%$ e $\chi_c^2 = 51,805$ para 10%, que significa que valores de χ_c^2 maiores que 55,758 serão rejeitados para $\alpha = 5\%$ e maiores que 51,805 rejeitados para $\alpha = 10\%$.

Tabela 17: Valores da função de densidade de probabilidade do teste qui-quarado. Fonte: TECNICO LISBOA, 2017.

Distribuição do Qui-Quadrado - χ²

Os valores tabelados correspondem aos pontos x tais que: P($\chi_n^2 \le x$)

 $P(\chi_n^2 \le x)$ 0,005 0,01 0,025 0,05 0,25 0,5 0,75 0,9 0,95 0,975 0,995 0,1 0,99 3,93E-05 0,000157 0,000982 0,003932 0,016 0,102 0,455 1,323 2,706 3,841 5,024 6,635 7,879 0,020 0,051 0,103 0,211 0,575 1,386 2,773 4,605 5,991 7,378 9,210 10,597 0,010 2 3 0,072 0,115 0,216 0,352 0,584 1,213 2,366 4,108 6,251 7,815 9,348 11,345 12,838 3 1,923 0,207 0,297 0,484 0,711 1,064 3,357 5,385 7,779 9,488 11,143 13,277 14,860 4 0,412 0,554 0,831 1,145 1,610 2,675 4,351 6,626 9,236 11,070 12,832 15,086 16,750 5 0,872 1,635 3,455 5,348 10,645 12,592 14,449 0,676 1,237 2,204 7,841 16,812 18,548 6 0,989 1,239 1,690 2,167 2,833 4,255 6,346 9,037 12,017 14,067 16,013 18,475 20,278 1,344 1,647 2,180 2,733 5,071 7,344 10,219 13,362 15,507 17,535 20,090 21,955 3,490 2,088 2,700 3,325 5,899 8,343 11,389 14,684 16,919 19,023 23,589 1,735 4,168 21,666 2,156 2,558 3,247 3,940 4,865 6,737 9,342 12,549 15,987 18,307 20,483 23,209 25,188 10 2,603 3,053 3,816 4,575 5,578 7,584 10,341 13,701 17,275 19,675 21,920 24,725 26,757 11 3,074 3,571 5,226 6,304 8,438 11,340 18,549 21,026 23,337 28,300 12 4,404 14,845 26,217 13 3,565 4,107 5,009 5,892 7,041 9,299 12,340 15,984 19,812 22,362 24,736 27,688 29,819 13 4,075 4,660 5,629 6,571 7,790 10,165 13,339 17,117 21,064 23,685 26,119 29,141 31,319 14 5,229 24,996 32,801 15 4,601 6,262 7,261 8,547 11,037 14,339 18,245 22,307 27,488 30,578 5,142 5,812 6,908 7,962 9,312 11,912 15,338 19,369 23,542 26,296 28,845 32,000 34,267 16 17 5,697 6,408 7,564 8,672 10,085 12,792 16,338 20,489 24,769 27,587 30,191 33,409 35,718 17 18 6,265 7,015 8,231 9,390 10,865 13,675 17,338 21,605 25,989 28,869 31,526 34,805 37,156 18 19 6,844 7,633 8,907 10,117 11,651 14,562 18,338 22,718 27,204 30,144 32,852 36,191 38,582 19 7,434 8,260 9,591 10,851 12,443 15,452 19,337 23,828 28,412 31,410 34,170 37,566 39,997 20 10,283 8,034 8,897 11,591 13,240 16,344 20,337 24,935 29,615 32,671 35,479 38,932 41,401 21 22 9,542 10,982 12,338 17,240 21,337 30,813 33,924 36,781 40,289 42,796 22 8,643 14,041 26,039 23 23 9,260 10,196 11,689 13,091 14,848 18,137 22,337 27,141 32,007 35,172 38,076 41,638 44,181 24 24 9,886 10,856 12,401 13,848 15,659 19,037 23,337 28,241 33,196 36,415 39,364 42,980 45,558 25 25 10,520 11,524 13,120 19,939 24,337 29,339 34,382 37,652 40,646 44,314 46,928 14,611 16,473 11,160 12,198 13,844 15,379 17,292 20,843 25,336 30,435 35,563 38,885 41,923 45,642 48,290 26 27 12,878 14,573 21,749 26,336 31,528 36,741 40,113 43,195 46,963 49,645 27 11,808 16,151 18,114 22,657 27,336 37,916 41,337 50,994 28 12,461 13,565 15,308 16,928 18,939 32,620 44,461 48,278 29 13,121 14,256 16,047 17,708 19,768 23,567 28,336 33,711 39,087 42,557 45,722 49,588 52,335 29 30 13,787 14,953 18,493 20,599 24,478 29,336 40.256 43,773 46,979 50,892 53,672 16,791 34,800 40 20,707 39,335 51,805 55,758 59,342 22,164 24,433 26,509 29,051 33,660 45,616 63,691 66,766 40 27,991 29,707 32,357 34,764 37,689 42,942 49,335 56,334 63,167 67,505 71,420 76,154 79,490 50 37,485 40,482 43,188 46,459 52,294 59,335 66,981 74,397 79,082 83,298 88,379 91,952 60 35,534 70 43,275 45,442 48,758 51,739 55,329 61,698 69,334 77,577 85,527 90,531 95,023 100,425 104,215 70 51,172 53,540 57,153 60,391 64,278 71,145 79,334 88,130 96,578 101,879 106,629 112,329 116,321 80 59,196 61,754 65,647 69,126 73,291 80,625 89,334 98,650 107,565 113,145 118,136 124,116 128,299 90 74,222 99,334 100 67,328 70,065 77,929 82,358 90,133 109,141 118,498 124,342 129,561 135,807 140,170

4.3.2 Valores observados e frequência observada de deslizamentos

Os dados de entrada deste trabalho reúnem valores de duas variáveis de interesse (pluviometria em um par de períodos e ocorrência de deslizamento) que, posteriormente, serão divididos por categorias e agrupadas em uma tabela de dupla entrada, uma de valores observados e outra de valores esperados. Isto é, o teste qui quadrado será resultante da comparação dessas duas tabelas: a de valores observados e a de valores esperados de dias que ocorreram e de dias que não ocorreram deslizamentos. As duas categorias serão os dias em que ocorreram e os que não ocorreram movimentos de massa para cada combinação de classes de pluviometria referentes ao par de períodos considerados.

A identificação das quantidades de dias em que ocorreram classes de pluviometria em 24h combinadas com as classes de pluviometria em períodos de 48h até 240h foi dividida em: pelo menos um deslizamento; nenhum deslizamento e a soma desses dois últimos valores. Essa soma representa o total de dias em que ocorre uma determinada chuva para os dois períodos de tempo combinados. A Tabela 18 mostra um exemplo de como foram organizados os dados na chamada de tabela de valores observados, que será uma das entradas para realizar o teste de dependência posteriormente.

Tabela 18: Valores observados de dias com e sem deslizamentos por faixas pluviométricas nos períodos de 24 e 48h.

Períodos de observação **Valores Observados** Dias com Dias sem 24 h 48 h deslizamentos deslizamentos **TOTAL** 10-20 20-40 125 20 105 20-40 20-40 9 68 77 10-20 40-60 5 38 43 20-40 40-60 2 24 26 Faixas Pluviométricas (mm) 40-60 40-60 4 20 16 7 20 10-20 60-80 13 20-40 60-80 2 10 12 40-60 60-80 1 10 11 60-80 60-80 1 13 14 3 5 10-20 80-100 8 20-40 80-100 2 7 9 40-60 80-100 2 3 5 60-80 80-100 1 2 3 2 80-100 80-100 6 8 1 8 100-120 9 10-20 0 2 2 20-40 100-120 40-60 100-120 1 0 1 0 2 2 60-80 100-120 0 80-100 100-120 1 1 100-120 100-120 1 4 5 0.163 0.837 1.000

A partir dos valores observados de dias com pelo menos um deslizamento, foi calculada a frequência observada em que ocorre e que não ocorre deslizamento em cada combinação de faixas pluviométricas, exemplificada pela Tabela 19 elaborada para o caso dos períodos de 24 e 48h.

A frequência observada foi calculada a partir dos eventos de deslizamento ocorridos em cada faixa pluviométrica dos pares de períodos considerados anteriormente, a probabilidade de ocorrência e de não ocorrência de deslizamento, sendo elas:

Seja B o evento determinado pela ocorrência de deslizamento e pluviometrias referentes a um par de períodos considerados, dentro de faixas (x,y) especificadas, denotamos por o(B) a frequência observada do evento B, dada por:

$$o(B) = \frac{B(x,y)}{T} \tag{6}$$

Onde:

B(x,y) é a quantidade de dias com deslizamento e pluviometria no par de períodos considerados dentro das faixas (x,y) especificadas;

T é o total de dias dos períodos considerados.

Analogamente:

> Se A é o evento de não ocorrência de deslizamento com o par de pluviometrias dentro das faixas especificadas, então:

$$o(A) = \frac{(w_B(x,y) - B(x,y))}{T}.$$
 (7)

Onde:

 $w_B(x,y)$ é o total de dias com e sem deslizamentos no par de períodos considerados dentro das faixas (x,y) de pluviometria.

Tabela 19: Frequência observada de dias com deslizamento para alguns pares de faixa pluviométrica nos períodos de 24 e 48h.

Período de Observação Frequencia observada Dias com Dias sem 24 h 48 h deslizamentos deslizamentos Total de dias 10-20 20-40 0.047 0.245 0.291 20-40 20-40 0.021 0.179 0.159 10-20 40-60 0.012 0.089 0.100 20-40 40-60 0.005 0.056 0.061 40-60 40-60 0.009 0.037 0.047 10-20 60-80 0.016 0.030 0.047 20-40 0.005 60-80 0.023 0.028 40-60 0.026 60-80 0.002 0.023 60-80 60-80 0.002 0.030 0.033 10-20 80-100 0.007 0.012 0.019 20-40 80-100 0.005 0.016 0.021 40-60 0.005 0.007 0.012 80-100 60-80 80-100 0.002 0.005 0.007 80-100 80-100 0.005 0.014 0.019 10-20 100-120 0.002 0.019 0.021 20-40 0.000 0.005 0.005 100-120 40-60 100-120 0.002 0.000 0.002 60-80 100-120 0.000 0.005 0.005 80-100 100-120 0.000 0.002 0.002 100-120 100-120 0.002 0.009 0.012 0.163 0.837 1.000

4.3.3 Valores esperados e frequências esperadas

Faixas Pluviométricas (mm)

A diferença observada entre os valores esperados e os valores encontrados, como dito anteriormente, é que determinam a dependência entre as pluviometrias de um par de períodos e a ocorrência ou não de deslizamentos. Ou seja, se essa diferença for pequena, significa que os valores esperados e observados se aproximam e, portanto, há independência entre os períodos escolhidos e a ocorrência de deslizamentos.

As frequências esperadas são os percentuais que se espera que tenha deslizamento em relação ao total de dias do par de período em questão considerando que não há dependência entre chuva e deslizamento. Portanto, a frequência esperada de ocorrência

de um deslizamento para cada combinação de faixas pluviométricas de um par de períodos é o resultado da multiplicação da frequência de ocorrência dessas faixas (total marginal da linha) e da frequência de ocorrência ou não ocorrência de deslizamento (total marginal de uma das colunas). Assim, a frequência esperada (e(x)), é calculada da seguinte forma:

$$e(x) = Total \ marginal \ da \ linha \times Total \ marginal \ da \ coluna$$
 (8)

Onde:

Total marginal da linha é a soma dos valores das frequências da linha;

Total marginal da coluna é a soma dos valores das frequências da coluna da tabela de frequência observada (ex: Tabela 19).

A Tabela 20 mostra um exemplo de como ficam as frequências esperadas para os períodos de 24 e 48h.

Tabela 20: Frequência esperada de ocorrência de dias com deslizamentos em alguns pares de faixas pluviométricas nos períodos de 24 e 48h.

	Período de	Observação	Frequênci	a Esperada	
	24 h	48 h	Dias com	Dias sem	
	2411	4011	deslizamentos	deslizamentos	Total de dias
	10-20	20-40	0.048	0.244	0.291
	20-40	20-40	0.029	0.150	0.179
	10-20	40-60	0.016	0.084	0.100
	20-40	40-60	0.010	0.051	0.061
٦)	40-60	40-60	0.008	0.039	0.047
Ē	10-20	60-80	0.008	0.039	0.047
s (20-40	60-80	0.005	0.023	0.028
Ca	40-60	60-80	0.004	0.021	0.026
Faixas Pluviométricas (mm)	60-80	60-80	0.005	0.027	0.033
πé	10-20	80-100	0.003	0.016	0.019
<u>.</u>	20-40	80-100	0.003	0.018	0.021
≥	40-60	80-100	0.002	0.010	0.012
	60-80	80-100	0.001	0.006	0.007
as	80-100	80-100	0.003	0.016	0.019
<u>:</u>	10-20	100-120	0.003	0.018	0.021
щ	20-40	100-120	0.001	0.004	0.005
	40-60	100-120	0.000	0.002	0.002
	60-80	100-120	0.001	0.004	0.005
	80-100	100-120	0.000	0.002	0.002
	100-120	100-120	0.002	0.010	0.012
			•	•	
		•	•	•	
	•		•	•	
			0.163	0.837	1.000

Tendo sido encontradas as frequências esperadas, os valores esperados de dias com e sem deslizamentos para cada par de faixas de pluviometrias são então calculados da seguinte forma:

$$Valor\ esperado = e(x) \times Total\ de\ dias\ um\ período$$
 (9)

Onde:

e(x) são as frequências esperadas calculadas anteriormente;

Total de dias um período equivale ao total de dias de cada tabela de valores observados.

A Tabela 21 mostra um exemplo dos resultados dos cálculos dos valores esperados de dias com e sem deslizamentos. Esta tabela será a outra entrada usada no teste qui quadrado, junto com os valores observados (ex: Tabela 18).

Tabela 21: Valores esperados de dias com ocorrência e não ocorrência de deslizamentos para algumas faixas pluviométricas nos períodos de 24 e 48h.

	Período de	Observação	Valores E	sperados	
	24 h	48 h	Dias com	Dias sem	
	2411	4011	deslizamentos	deslizamentos	Total de dias
	10-20	20-40	20.40	104.60	125.00
	20-40	20-40	12.56	64.44	77.00
	10-20	40-60	7.02	35.98	43.00
	20-40	40-60	4.24	21.76	26.00
(٦	40-60	40-60	3.26	16.74	20.00
Ē	10-20	60-80	3.26	16.74	20.00
s (20-40	60-80	1.96	10.04	12.00
ca	40-60	60-80	1.79	9.21	11.00
Faixas Pluviométricas (mm)	60-80	60-80	2.28	11.72	14.00
πé	10-20	80-100	1.31	6.69	8.00
<u>ō</u>	20-40	80-100	1.47	7.53	9.00
2	40-60	80-100	0.82	4.18	5.00
₫	60-80	80-100	0.49	2.51	3.00
as	80-100	80-100	1.31	6.69	8.00
Ξ̈́	10-20	100-120	1.469	7.531	9.000
Ϋ́	20-40	100-120	0.326	1.674	2.000
	40-60	100-120	0.163	0.837	1.000
	60-80	100-120	0.326	1.674	2.000
	80-100	100-120	0.163	0.837	1.000
	100-120	100-120	0.816	4.184	5.000
		•	•	•	•
	•		•		•
			70	359	429

4.3.4 Cálculo do Qui quadrado e coeficiente de contingência

Como já observado no início desta seção, o teste qui quadrado, é capaz de fornecer o afastamento global dos valores encontrados e esperados, isto é, medir os desvios de forma relativa aos valores esperados, como mostra a Equação (10):

$$desvio\ relativo = \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}. \tag{10}$$

Onde:

 o_i é o valor de dias observado com ou sem deslizamento para uma determinada combinação de classes de pluviometria;

 e_i é o valor de dias esperado com ou sem deslizamento para uma determinada combinação de classes de pluviometria.

A Figura 32 mostra um exemplo de como é calculado o desvio relativo de cada item da tabela.

Este cálculo foi feito para todos os pares de valores de dias esperados e observados para todas as faixas de pluviometria, envolvendo as duas colunas (com e sem deslizamentos). Na sequência, foram calculados os valores de χ^2 para cada par de períodos, segundo a Equação (11):

$$\chi^{2}_{(a-1)(b-1)} = \sum \frac{(o(x,y) - e(x,y))^{2}}{e(x,y)}.$$
 (11)

Onde:

 χ^2 é o valor do Qui Quadrado para cada par de períodos;

a é o número de linhas da tabela, equivalente a quantidade de faixas de pluviometria;

b é o número de colunas da tabela, que para todos os períodos de observação será igual a dois, pois corresponde aos dias com deslizamento e aos dias sem deslizamento;

o(x, y) são os valores observados de dias com deslizamento registrado em cada período x e para cada dois intervalos correspondentes y;

e(x, y) são os valores esperados de dias com deslizamento registrado em cada período x e para cada dois intervalos correspondentes y.

O que se espera para que a não dependência entre um par de pluviometrias e a ocorrência de deslizamentos seja verdadeira é que os valores de χ^2 sejam o mais próximo

possível de zero. Caso exista dependência, o que se espera é que o χ^2 apresente valores altos.

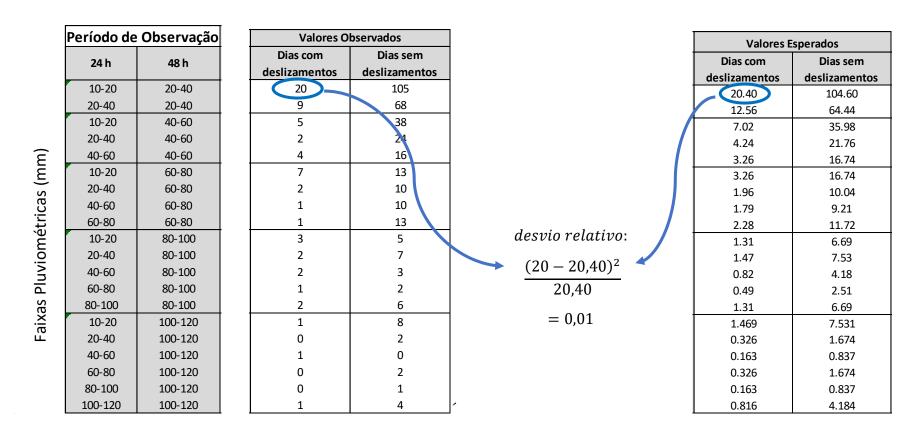


Figura 32: Demonstração de cálculo de desvio relativo, para obtenção do valor de qui quadrado, baseado em uma tabela de dupla entrada.

Como existem combinações de pluviometrias num determinado par de períodos que não ocorreram, o valor de qui quadrado neste caso é calculado desconsiderando essas combinações de pluviometrias para as quais o valor de quantidade de dias é nulo.

Os valores de qui quadrado encontrados, no entanto, não fornecem por si só uma resposta significativa a respeito da dependência que se deseja medir, sendo necessário um coeficiente de associação. Os coeficientes de associação ou de correlação, são valores obtidos através de medidas como o qui quadrado para possibilitar a medição da dependência entre dois eventos. Geralmente fornecem um valor entre 0 e 1,0, onde conforme a associação aumenta, o coeficiente se aproxima de 1,0. Neste trabalho será usado o *Coeficiente de Contingência de Pearson* (C) para cada par de períodos, calculado a partir dos valores de qui quadrado, conforme apresentado anteriormente.

O coeficiente (C) é encontrado pela Equação (12) a seguir:

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{\chi^2 + n}}. (12)$$

Onde:

 χ^2 é o valor do somatório do qui quadrado calculado anteriormente;

n é o total de observações, que no presente trabalho é a quantidade de combinações de classes de pluviometria multiplicada por 2 (com e sem deslizamento), desconsiderando os pares em que a quantidade de dias é nulo.

Como medida absoluta, qualquer coeficiente que apresente valores superiores a 0,3 já é considerado como afastamento da hipótese zero (independência) e, portanto, dependência entre os eventos Por fim, os valores de *C* encontrados para os diferentes pares de período serão comparados para determinar o par de períodos onde há maior dependência e, portanto, maior relevância de observação.

A Tabela 22 abaixo mostra um exemplo de resultado de cálculo de χ^2 , n e C para os períodos de 24 e 48h. Pelo valor encontrado para o par de períodos 24h x 48h de χc^2 = 53,644 e pelos de qui quadrado crítico citados anteriormente (χc^2 = 55,758 para o nível de 5% e χc^2 =51,805 para 10%), nota-se que a estatística do teste fica entre os valores encontrados para 5 e 10%, e que, sendo maior do que o χc^2 de 10%, a hipótese de independência seria rejeitada a este nível de significância.

Tabela 22: Valores de Qui quadrado, total de valores somados (n) e coeficiente de contingência (C) encontrado na associação dos períodos de 24 e 48h.

53,644	Σχ² (a - 1)(b-1):
82	n:
0,629	C:

4.4 Análise das probabilidades de deslizamento

Após verificar a existência de dependência entre as combinações de pluviometria e ocorrência de deslizamento e determinar o par de períodos mais relevante, baseando-se no coeficiente de contingência, procedeu-se o cálculo das probabilidades de ocorrência de deslizamento e as classes de pluviometria para esse par de períodos.

A probabilidade de um evento é o valor numérico que representa a frequência de ocorrência deste evento ou, de forma equivalente, sua chance de ocorrência, sendo uma das mais importantes ferramentas na estimativa de ocorrência de fenômenos naturais.

A probabilidade em espaços discretos é calculada a partir dos seguintes passos:

 \triangleright Considerar um espaço amostral Ω finito ou enumerável, que é a enumeração dos w_i resultados possíveis:

$$\Omega = (w_1, w_2, ..., w_n).$$

Onde para cada w_j existe um valor de $P(w_j) \in [0,1]$, que representa a frequência de ocorrência do resultado w_j , que pode variar de 0 a 1.

➤ Identificar um subconjunto A que contempla alguns valores de w, sendo que a probabilidade P(A) de um evento é:

$$P(A) = \sum_{w_j \in A} P(w_j).$$
 (13)

A probabilidade de ocorrência de deslizamento foi calculada como sendo a frequência de dias em que ocorreram deslizamentos dado que se tenha uma determinada combinação de faixas pluviométricas no par de períodos de maior relevância (Equação 14).

 $q_{N_1,N_2}(x,y) = \frac{\begin{array}{c} n\'umero\ de\ dias\ onde \\ ocorreram\ deslizamentos \\ associados\ a\ um\ par\ de\ per\'iodos \\ com\ N1\ e\ N2\ horas\ tendo\ pluviometrias \\ \hline n\'umero\ de\ dias\ associados \\ a\ um\ par\ de\ per\'iodos\ com\ N1\ e\ N2 \\ horas\ tendo\ pluviometrias \\ respectivamente\ nas\ classes\ x\ e\ y \end{array}} \ (14)$

Onde $q_{N_1,N_2}(x,y)$ é a probabilidade de ocorrência de deslizamentos quando previstas pluviometrias na classe x e y nos próximos períodos de N_1 e N_2 horas.

A Tabela 23 mostra um exemplo de valores de probabilidade encontrados, conforme a Equação 14.

A partir desses cálculos e baseando-se em valores de probabilidade desejados para os diferentes níveis de um sistema de alerta é possível se definir diferentes limiares de pluviometria para o par de períodos de maior relevância.

Devido ao número reduzido de observações em cada classe, para que exista significado, os valores de probabilidade foram considerados como o maior valor que há entre ele e os referentes às classes de menor pluviometria. Um exemplo de valores ajustados, conforme esse procedimento, são apresentados na Tabela 24.

A partir dos valores de probabilidade como os apresentados na Tabela 24 e com o auxílio de interpolação do tipo *spline* cúbica, por ser um tipo de interpolação que transforma a função em polinômios de até terceiro grau, proporcionando uma suavização da curva, foram elaborados gráficos através do software MatLab (MATH WORKS, 2017), mostrando o valor da probabilidade para quaisquer combinações de faixas de pluviometria para os dois períodos de maior relevância.

Tabela 23: Probabilidade de ocorrência de pelo menos um deslizamento em diferentes faixas pluviométricas para 24 e 48h.

	q(x)													
24 48	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	200-220	220-240	240-260	260-280
0-20	0.01	0.16	0.12	0.35	0.38	0.11	0.00	0.00	=	0.00	=	=	=	-
20-40		0.12	0.08	0.17	0.22	0.00	0.00	-	1.00	-	-	-	-	-
40-60			0.20	0.09	0.40	1.00	-	0.50	-	0.00	-	-	-	0.00
60-80				0.07	0.33	0.00	0.00	-	-	-	1.00	-	-	-
80-100					0.25	0.00	0.00	-	-	-	0.00	-	-	-
100-120						0.20	0.00	-	-	1.00	-	-	-	-
120-140							0.00	0.00	1.00	-	-	-	-	1.00
140-160								-	-	0.00	-	-	-	-
160-180									-	-	-	-	-	-
180-200										0.00	-	-	-	-
200-220											-	-	-	-
220-240												0.00	-	-

Tabela 24: Probabilidade de ocorrência de pelo menos um deslizamento em diferentes faixas pluviométricas para 24 e 48h, considerando os valores de probabilidade máxima anterior encontrados.

	q(x) - máximo anterior													
24 48	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	200-220	220-240	240-260	260-280
0-20	0.01	0.16	0.16	0.35	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
20-40		0.16	0.16	0.35	0.38	0.38	0.38	0.38	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
40-60			0.20	0.35	0.40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60-80				0.35	0.40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
80-100					0.40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100-120						1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
120-140							1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
140-160								1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
160-180									1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
180-200										1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
200-220											1.00	1.00	1.00	1.00
220-240												1.00	1.00	1.00

5. Apresentação e análise dos resultados

5.1 Análise de dependências entre pluviometria e ocorrência de deslizamentos

Na Tabela 25 e na Figura 33 estão os resultados dos coeficientes de contingência encontrados nos testes qui quadrado para avaliar a dependência entre as pluviometrias medida em pares de períodos (N₁ e: 24h; N₂: variável entre 48h e 240h) e a ocorrência de deslizamentos.

Tabela 25: Coeficientes de Contingência (C) encontrados nos testes qui quadrado (χ^2) para o período de 24h associado a outros períodos de pluviometria (48h a 240h) e ocorrência de deslizamentos.

Coeficientes de Contingência										
Período 1 (h)					24					
Período 2 (h)	48	72	96	120	144	168	192	216	240	
	0.629	0.684	0.771	0.708	0.716	0.736	0.754	0.773	0.776	

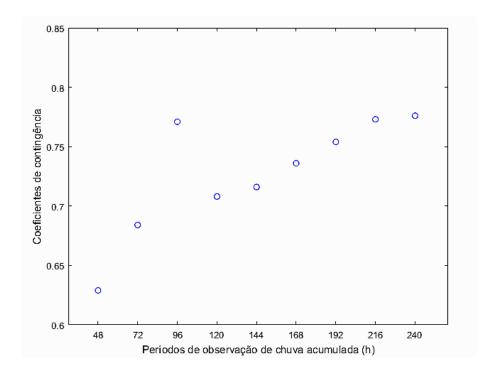


Figura 33: Variação dos coeficientes de contingência (C) encontrados nos testes qui quadrado (χ^2) para o período de 24h associado a outros períodos de pluviometria (48h a 240h) e ocorrência de deslizamentos.

Como citado anteriormente, os valores superiores a 0,3 já serão considerados dependência entre os eventos. Dessa forma, o primeiro resultado obtido é que na bacia do rio Quitandinha existe dependência entre ocorrência de deslizamentos e a pluviometria considerando os períodos apresentados.

Esta constatação é esperada posto que, conforme exposto no Capítulo 3 (Seção 3.6.2), os deslizamentos considerados no presente trabalho são deflagrados pelo aumento da poropressão resultante da infiltração da água da chuva no terreno, sendo confirmado, inclusive, pelo fato de os deslizamentos em sua maioria serem registrados na época chuvosa.

É possível observar também que os valores do coeficiente de contingência encontrados são significativamente crescentes até o período de 96h onde apresenta uma leve queda seguida de estabilização, levando a crer que a dependência mais importante encontrada é a do par de períodos de 24h com 96h. Isso indica que esse par de períodos é o mais adequado para a observação dos limiares de chuva que provocam deslizamentos

Esse resultado é consistente com ALMEIDA (op. cit – vide seção 2.2.2) que, analisando a correlação entre deslizamentos ocorridos no primeiro e segundo distrito de Petrópolis e as chuvas acumuladas de 1 a 5 dias, verificou uma melhor correlação com a de 4 dias (96 horas).

Resgatando o que foi apresentado no terceiro capítulo, os movimentos de massa mais comuns no primeiro distrito de Petrópolis são os deslizamentos translacionais ou rasos. Esses tipos de movimento são associados normalmente com terrenos que apresentam uma fina camada de solo sobre a rocha (AUGUSTO FILHO, 1992) e, cuja deflagração está mais associada a curtos períodos de chuva (BRÖNNIMANN et al., 2013). Isso não estaria em consonância com o resultado observado da maior dependência do deslizamento com o par de períodos de 24h associado com 96h. O estudo estatístico aqui apresentado, portanto, indica que a perda de resistência ao cisalhamento do solo é destacadamente influenciada tanto pelo período de 24h de chuva como pelo acumulado em 96h.

Embora este trabalho não tenha por objetivo investigar profundamente o que de fato ocorre nos deslizamentos do primeiro distrito de Petrópolis, o resultado do estudo estatístico permite formular uma hipótese de mecanismo deflagrador desses deslizamentos. A hipótese é de que deslizamento seria deflagrado pelo aumento da

poropressão resultante não só da infiltração de água pela superfície do talude potencialmente instável, influenciada pelas 24h, como da percolação da água proveniente de áreas de recarga que encontra caminhos permeáveis em fraturas na rocha e exfiltra lentamente na interface entre o solo e a rocha, sendo influenciada pelas 96h.

Esse tipo de percolação da água no maciço rochoso é característico de áreas que possuem falhas e fraturas na rocha sob o solo (BRÖNNIMANN et al., 2013), configuração amplamente relatada no primeiro distrito de Petrópolis (COSTA NUNES et al., 1990; SILVA, 2006; VARANDA, 2006; CPRM,2012). Conforme COSTA NUNES et al. (1990), as falhas presentes em Petrópolis criaram uma enorme rede de fluxos nas rochas por onde a água pode passar, o que é evidenciado pela presença de diversos olhos d'agua encontrados nas encostas naturais e em cortes taludes rochosos.

LANNI et al. (2013) corrobora tal hipótese ao afirmar que durante um período de pluviometria acumulada (até 72h), a chuva vai percorrendo regiões permeáveis que existem nas fraturas nas rochas, fazendo com que o solo da área onde ocorre a exfiltração vá perdendo resistência, até que ocorra a chuva que irá deflagrar o deslizamento.

Segundo os autores supracitados, nesse tipo de mecanismo de deflagração de deslizamento é possível encontrar as seguintes condições:

- camada de solo potencialmente instável de até dois metros de profundidade; (BRÖNNIMANN et al., 2013)
- tempo de exfiltração podendo durar alguns dias. (LANNI et al., 2013)

Conforme abordado no Capítulo 3, AVELAR et al. (2011) observou que as cicatrizes de deslizamentos na região serrana indicam que as camadas de solo deslizadas possuem entre 0, 5 e 2,0 m de profundidade, estando de acordo com a situação predisponente indicada por BRÖNNIMANN et al. (2013).

As Figuras 34 a 38 referem-se a ocorrências na área de estudo, onde é possível observar deslizamentos típicos da região de estudo: rasos e deixando aparente a rocha sob o solo e blocos de rocha.



Figura 34: Deslizamento raso no bairro do Quitandinha, dezembro de 2016. Fonte: Autora.



Figura 35: Deslizamento Rua Eugenio Werneck, Morin. Fonte: MENDONÇA, 2017.



Figura 36: Deslizamento na Av. Ayrton Sena, Quitandinha. Fonte: FOLHA, 2017.



Figura 37: Rua Amaral Peixoto, Quitandinha (deslizamento raso seguido de corrida). Fonte: MENDONÇA, 2017.



Figura 38: Deslizamento - Rua Ceará, Quitandinha. Fonte: MENDONÇA, 2017.

5.2 Probabilidades ocorrência de deslizamentos

Sendo então 24h e 96h o par de períodos mais adequado para o estudo dos limiares de chuva, foram estimadas as probabilidades de ocorrência de deslizamentos a partir das pluviometrias observadas nesses períodos. As Tabelas 26 a 28 mostram os valores de probabilidades de pelo menos um, pelo menos três e pelo menos cinco deslizamentos.

Tabela 26: Probabilidades de ocorrência de pelo menos um deslizamento para observações em chuvas acumuladas de 24h e 96h.

	q(x) - máximo anterior - pelo menos 1 deslizamento													
24 96	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	200-220	220-240	240-260	260-280
10-20	0.00	0.04	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.33	0.50	0.50	0.50
20-40		0.08	0.12	0.12	0.36	0.36	0.36	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
40-60			0.20	0.20	0.36	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60-80				0.20	0.36	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
80-100					0.36	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100-120						0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
120-140							1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
140-160								1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
160-180									1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
180-200										1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
200-220											1.00	1.00	1.00	1.00
220-240												1.00	1.00	1.00

Tabela 27: Probabilidades de ocorrência de pelo menos três deslizamentos para observações em chuvas acumuladas de 24h e 96h.

	q(x) - máximo anterior - pelo menos 3 deslizamentos													
24 96	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	200-220	220-240	240-260	260-280
10-20	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.33	0.50	0.50	0.50
20-40		0.00	0.02	0.04	0.14	0.14	0.14	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
40-60			0.02	0.10	0.22	0.22	0.22	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
60-80				0.10	0.22	0.22	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
80-100					0.22	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100-120						0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
120-140							1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
140-160								1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
160-180									1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
180-200										1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
200-220											1.00	1.00	1.00	1.00
220-240												1.00	1.00	1.00

Tabela 28: Probabilidades de ocorrência de pelo menos cinco deslizamentos para observações em chuvas acumuladas de 24h e 96h.

	q(x) - máximo anterior - pelo menos 5 deslizamentos													
24 96	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	200-220	220-240	240-260	260-280
10-20	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.33	0.33	0.33	0.33
20-40		0.00	0.01	0.03	0.14	0.14	0.14	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
40-60			0.01	0.10	0.14	0.14	0.14	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
60-80				0.10	0.20	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
80-100					0.20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
100-120						0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
120-140							0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
140-160								0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
160-180									0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
180-200										1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
200-220											1.00	1.00	1.00	1.00
220-240												1.00	1.00	1.00

A partir desses valores da probabilidade q(x) foram elaborados gráficos de q(x) versus pluviometrias em 24h e 96h através da interpolação baseada nas tabelas 26 a 28 (Figuras 39 a 41). Nesses gráficos são apresentadas as curvas de limiares de pluviometria para as probabilidades de 25%, 50%, 75% e 100% de ocorrência de pelo menos 1, pelo menos 3 e pelo menos 5 deslizamentos.

Como citado no Capítulo 2, Rio de Janeiro atualmente utiliza o valor de 75% de possibilidade de ocorrência de deslizamento para três postos dentro de uma mesma bacia para o nível de "alerta", quando a população deve ser removida da área de risco (D'ORSI, 2011). Embora a probabilidade em que se apoia a GeoRio não seja calculada da mesma forma que a deste trabalho, este valor de 75% foi aproveitado neste trabalho como um exemplo de limiar de probabilidade. Baseando-se nesse valor, fez-se a comparação dos resultados de ocorrência de pelo menos 1, pelo menos 3 e pelo menos 5 deslizamentos para as probabilidades de 75% e 100% (Figura 42).

Observa-se claramente a influência da quantidade mínima de deslizamentos (1, 3 e 5) nos valores de probabilidade de ocorrência desses eventos para as mesmas classes de pluviometria. Quanto maior a quantidade mínima, menor é a probabilidade para as mesmas pluviometrias no par de períodos.

Pode-se perceber que entre 120 mm e 200 mm de chuva acumulada em 96h, as probabilidades são bem parecidas para as 3 quantidades de deslizamentos. Isso ocorre porque a probabilidade de pelo menos um deslizamento engloba a probabilidade de que ocorra três, e nessa faixa, na maioria dos dias em que se observou deslizamentos, ocorreram três ou mais.

A probabilidade de ocorrer deslizamento para as três faixas passa a ser de 100% de chance depois de cerca de 200 mm acumulados em 96h e 180 em 24h, mostrando que diante desses eventos muito extremos, é esperado que ocorram deslizamentos generalizados na área de estudo.

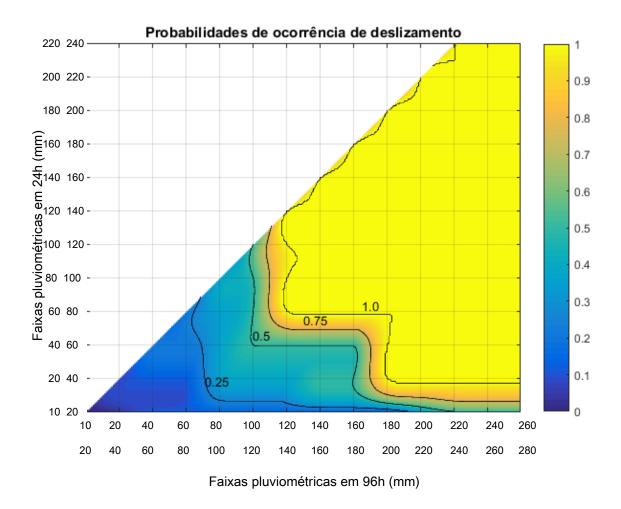


Figura 39: Probabilidades de ocorrência de pelo menos um deslizamento em diferentes faixas de pluviometria.

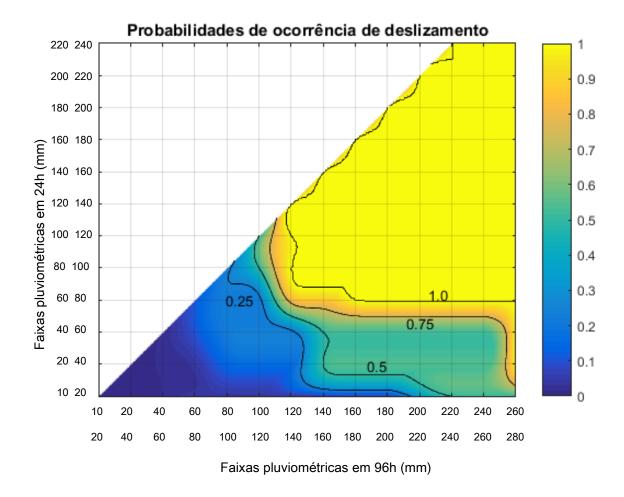


Figura 40: Probabilidades de ocorrência de pelo menos três deslizamentos em diferentes faixas de pluviometria.

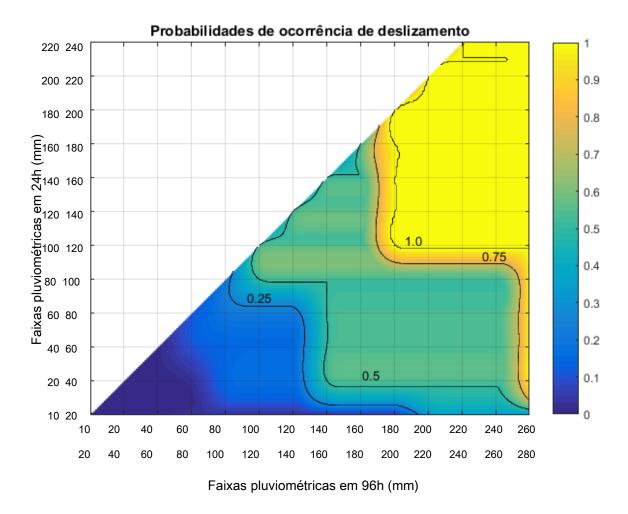


Figura 41: Probabilidades de ocorrência de pelo menos cinco deslizamentos em diferentes faixas de pluviometria.

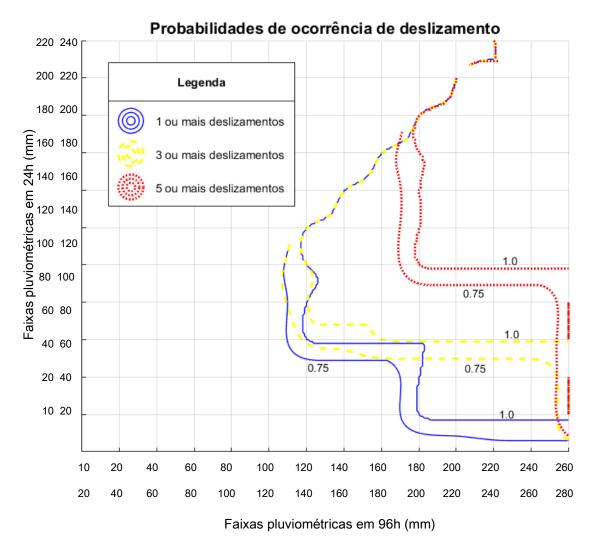


Figura 42: Comparação entre as probabilidades de 0,75 e 1,00 de ocorrência de pelo menos um, pelo menos três e pelo menos cinco deslizamentos em diferentes faixas de pluviometria.

ALMEIDA (op. cit) propôs estados de alerta com as respectivas quantidades de deslizamentos esperadas (1 a 5; 6 a 30; mais de 30), de acordo com valores de chuva acumulada encontrados em 96h (Tabela 4). Porém, este trabalho contemplou todo o primeiro e segundo distrito, área que equivale a cerca de 417 km², que é mais do que 30 vezes a área 12,81 km² da região de estudo do presente trabalho. Portanto, se a distribuição de deslizamentos fosse uniforme em toda a área analisada por ALMEIDA (op. cit), o estado em que é esperado mais de 30 deslizamentos equivale a condição de pelo menos 1 deslizamento considerada no presente trabalho. O limiar proposto por este autor para o estado em que prevê a ocorrência de mais de 30 deslizamentos é de 150mm

de chuva em 96h. A Figura 43 apresenta esse limiar no gráfico de variação de probabilidade de ocorrência de pelo menos 1 deslizamento para a área estudada. Observase que esse limiar de 150mm em 96% se mostra coerente com uma probabilidade de 100% quando a pluviometria de 24mm é maior que 60mm. Essa proposta de limiar baseado somente no período de 96mm é deficiente, pois a probabilidade de ocorrência de deslizamento é bastante influenciada pela chuva das últimas 24h.

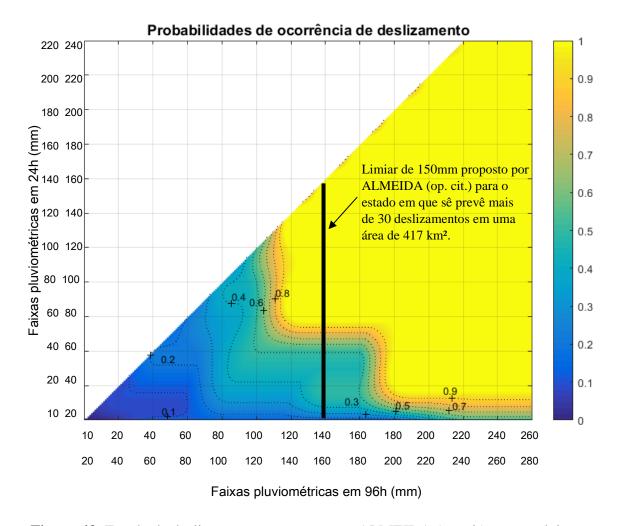


Figura 43: Estado de deslizamentos propostos por ALMEIDA (op. cit) para os dois primeiros distritos de Petrópolis comparados com as probabilidades de ocorrência de pelo menos um deslizamento.

Como mostrado no Capítulo 3 (Seção 3.6.3), o sistema de alerta de Petrópolis considera atualmente diferentes valores de limiares de chuva (Tabela 12). A Figura 44

apresenta os limiares dos estados de "normal", "atenção" e "alerta" considerados por este sistema de alerta sobre o gráfico de variação de probabilidade para pelo menos 1 e pelo menos 5 deslizamentos. Baseando-se nesse gráfico, nesses limiares tem-se uma probabilidade de 100% de ocorrência de pelo menos 3 deslizamentos quando a chuva de 24h é maior que 80mm. Novamente, evidencia-se que o limiar não deve se basear somente na chuva de um só período, posto que nesse gráfico observa-se uma forte influência da chuva de 24h para uma mesma chuva de 96h.

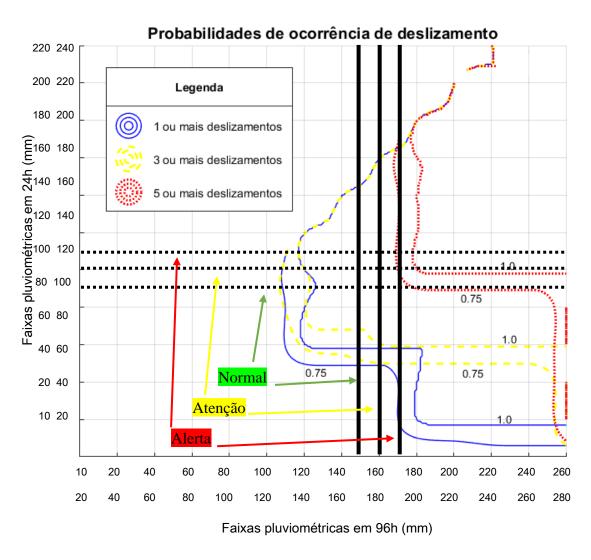


Figura 44: Nível crítico de chuva adotado no Plano de Contingência do município de Petrópolis comparado com as probabilidades de ocorrência de pelo menos um, pelo menos três e pelo menos cinco deslizamentos.

5.3 Análise de eventos recentes

Foi feita uma avaliação da coerência dos valores de probabilidade encontrados pelo método proposto com conjuntos de deslizamentos recentemente observados em três dias (08/02/2015, 15/12/2016 e 20/03/2017) na região da bacia do rio Quitandinha.

Os dados dos deslizamentos foram obtidos da imprensa e os valores pluviométricos de CEMADEN (2017). Existem dentro da área de estudo cinco postos de medição de pluviometria realizada pelo CEMADEN desde 2013, a saber: Independência, Independência 2, Rua Amazonas (Quitandinha), Rua Araruama (Quitandinha) e Rua Paraná (Quitandinha), conforme são mostrados no mapa da Figura 45.

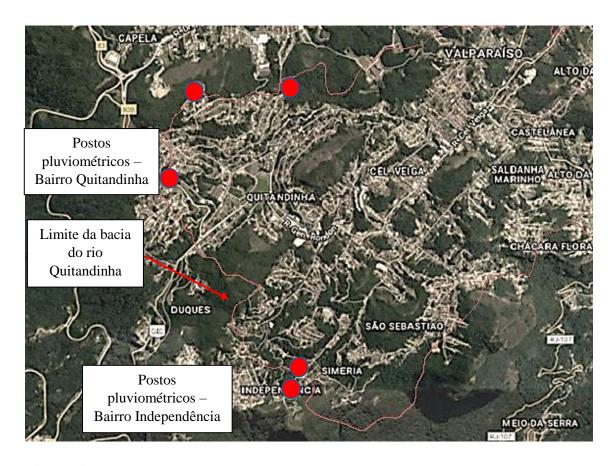


Figura 45: Localização dos postos pluviométricos em funcionamento hoje na área de estudo. Sem escala. Fonte: CEMADEN, 2017.

A seguir são apresentados os dados referentes a tais eventos e a análise dos mesmos, e a Figura 46, a localização dos bairros onde foram registradas as ocorrências.

- Deslizamentos do dia 08/02/2015

Foram notificados neste dia, cinco ruas bloqueadas no bairro do Quitandinha, dois deslizamentos no Independência, além de registros nos bairros Siméria e Dr. Thouzet. Houve o acionamento de sirenes para a evacuação da área em alguns pontos da cidade (G1, 2015). A Tabela 29 apresenta os valores medidos de pluviometria. De acordo com os valores registrados no bairro Independência, a probabilidade estimada seria de menor que 20% de ocorrer pelo menos 1 deslizamento e menor ainda para uma quantidade mínima maior (Figura 47). Para os eventos do bairro Quitandinha essas probabilidades foram menores ainda.

Tabela 29: Valores de pluviometria acumulada encontrada em 96h entre os dias 04/02/2015 e 07/02/2015, e em 24h no dia 07/02/2015.

Deslizamentos de 08/02/2015

	Pluviometria (mm)								
Posto Pluviométrico	ultimas 96h	ultimas 24h							
Independência	71.55	43.54							
Independência 2	78.79	49.41							
Rua Araruama/Quitandinha	45.81	3.95							
Rua Parana/Quitandinha	46.99	1.59							
Rua Amazonas/Quitandinha	41.75	3.54							

- Deslizamentos do dia 15/12/2016:

Foram registrados 67 deslizamentos em 24h, sendo algumas no bairro do Quitandinha, Siméria, e São Sebastião (G1, 2016). Pelos dados de pluviometria de todos os postos (Tabela 30), haveria 100% de chance de ocorrer ao menos cinco deslizamentos (Figuras 48).

Tabela 30: Valores de pluviometria acumulada encontrada em 96h entre os dias 11/12/2016 e 14/12/2016, e em 24h no dia 14/12/2016.

Deslizamentos de 15/12/2016

	Pluviometria (mm)				
Posto Pluviométrico	ultimas 96h	ultimas 24h			
Independência	187.05	124.60			
Independência 2	187.86	126.72			
Rua Amazonas/Quitandinha	201.10	116.45			
Rua Araruama/Quitandinha	212.76	116.11			
Rua Parana/Quitandinha	171.00	110.97			

- Deslizamentos do dia 20/03/2017:

Foi registrado um deslizamento no bairro do Siméria (G1, 2017). Segundo os dados de pluviometria (Tabela 31) nos postos do bairro Independência (próximo da área que deslizou), haveria 40% de chance de ocorrer ao menos um deslizamento (Figuras 47).

Tabela 31: Valores de pluviometria acumulada encontrada em 96h entre os dias 16/03/2017 e 19/03/2017, e em 24h no dia 19/03/2017.

Deslizamentos de 20/03/2017

	Pluviometria (mm)			
Posto Pluviométrico	ultimas 96h	ultimas 24h		
Independência	97.07	78.37		
Independência 2	90.56	71.44		
Rua Parana/Quitandinha	34.74	26.81		
Rua Araruama/Quitandinha	40.72	31.96		

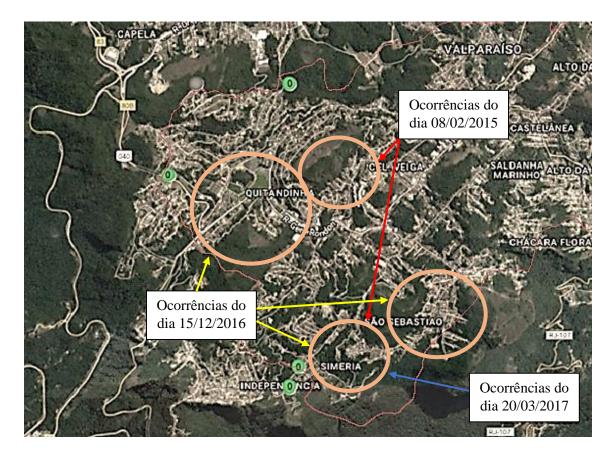


Figura 46: Localização das ocorrências dos dias 08/02/2015, 15/12/2016 e 20/03/2017.

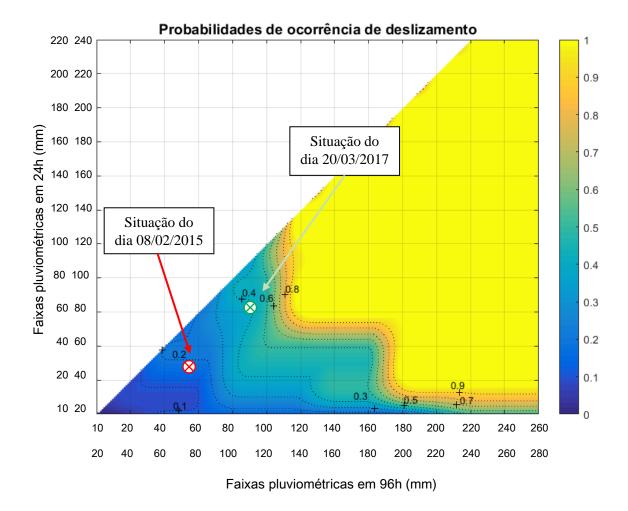


Figura 47: Probabilidade de ocorrência de pelo menos um deslizamento nos valores de pluviometria encontrados entre os dias 04/02/2015 e 07/02/2015 e entre os dias 16/03/2017 e 19/03/2017.

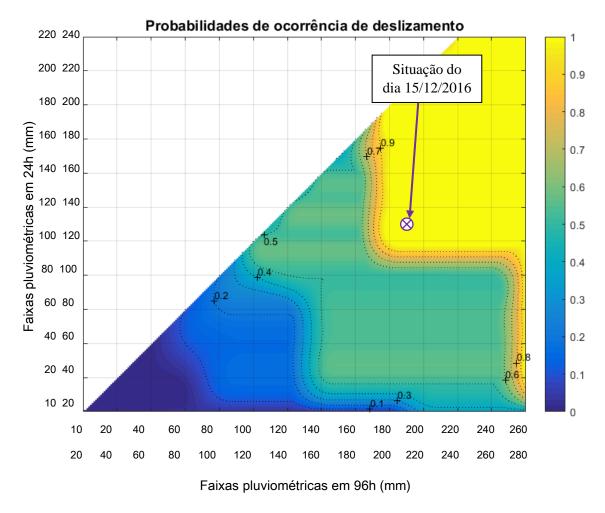


Figura 48: Probabilidade de ocorrência de pelo menos cinco deslizamento nos valores de pluviometria encontrados entre os dias 11/12/2016 e 14/12/2016.

6. Conclusões

Dadas a frequência com que ocorrem desastres envolvendo movimentos de massa na cidade de Petrópolis e em tantas outras do Brasil e suas consequências, muitas vezes, catastróficas, a previsão de deslizamentos torna-se um tema urgente para ser aprofundado pela engenharia urbana. Para a aplicação de um plano preventivo baseado em sistemas de alerta cujos níveis são determinados por limiares de pluviometria, é necessário se conhecer previamente os períodos de pluviosidade acumulada com os quais os deslizamentos têm a maior dependência.

Este trabalhou apresentou um método de estimativa de probabilidade de ocorrência de deslizamentos de acordo com os acumulados de pluviometria em um par de períodos de tempo antecedente. Utilizando-se este método foi possível fazer essas estimativas de probabilidades para diferentes quantidades mínimas de deslizamentos. Utilizou-se o teste do qui-quadrado para determinar os períodos de pluviometria que possuem maior dependência com a ocorrência de deslizamentos.

O método foi aplicado para a bacia do rio Quitandinha, em Petrópolis, RJ. Foram considerados como dados, os registros de ocorrências de deslizamentos e de pluviometrias acumuladas diariamente entre as datas de 01/01/2005 e 16/05/2009.

Constatou-se, através de cálculos estatísticos, que há dependência entre os deslizamentos e as pluviometrias medidas em diferentes pares de períodos, sendo um deles 24h e o outro 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216 e 240h, como era de se esperar segundo os fundamentos físicos para a deflagração de deslizamentos na região.

O par de períodos de pluviometria que apresentou significativamente uma maior dependência foi o de 24 e 96h. Essa constatação pode ser justificada pelo tipo de mecanismo deflagrador do deslizamento, em que o aumento da poropressão, responsável pela queda da resistência ao cisalhamento do solo, seria resultante não só da infiltração de água pela superfície do talude potencialmente instável, influenciada por um período relativamente curto (24h), mas também da percolação da água proveniente de áreas de recarga remotas percolando por fraturas da rocha e exfiltrando lentamente na interface entre o solo e a rocha, sendo influenciada por um período mais longo (96h). Diante de estudos de diversos pesquisadores, esse mecanismo é condizente com as características geológico-geotécnicas da região serrana e da área de estudo, mais especificamente, onde

se constata deslizamentos translacionais de camada rasa de solo sobre rocha com falhas e fraturas por onde se verifica fluxo de água.

Quanto a influência da quantidade mínima de deslizamentos (1, 3 e 5), observouse que quanto maior a quantidade mínima, menor é a probabilidade para os mesmos valores de pluviometria acumulada no par de períodos de 24 e 96h.

Ficou clara a influência de um segundo período de pluviometria na estimativa da probabilidade de ocorrência de deslizamentos. A partir dessa constatação, concluiu-se deficiências do estabelecimento de limiares existentes que baseados num único período de chuya.

Embora os valores apresentados por este estudo não possam ser reproduzidos para outras localidades devido às diferenças físicas encontradas, é possível aplicar a metodologia de teste de dependência e probabilidades para outros locais. Destaca-se, portanto, a importância dos registros confiáveis de pluviometria e de movimentos de massa coletados de forma continuada.

A falta de dados horários e de um período de observação mais extenso que possibilite uma quantidade maior de dados e falta de confiabilidade nas datas de ocorrência dos deslizamentos faz com que os valores encontrados neste trabalho não devam ser ainda aplicados para os sistemas de alerta de Petrópolis. Os resultados encontrados, no entanto, são muito importantes, uma vez que apresenta o par de períodos de pluviometria que apresenta a maior dependência com os deslizamentos e evidencia que o método de análise tem um grande potencial para a determinação de limiares de chuva para sistemas de alerta.

É importante ressaltar que embora o uso de sistemas de alerta seja um passo importante, um plano de mitigação de desastres deve envolver diversas medidas, como intervenções estruturais e medidas não estruturais.

Destaca-se a deficiência na gestão pública do território que está por trás da ocupação desordenada das encostas, a falta de informação direcionada à população no sentido de preservar as áreas instáveis, não construir sem a devida técnica e a ocupação de áreas que não são apropriadas para habitação. Mais importante do que empregar a técnica para resolver esse e outros problemas urbanos, um passo muito importante para a aplicação de uma gestão de risco, inclusive quando há utilização de sistema de alerta, é a

conscientização da população. Mais do que problemas de construção civil, os desastres de deslizamentos precisam ser vistos como uma questão socioambiental, e sua solução residir não só em soluções técnicas normalmente empregadas, mas na prática de preservação do meio ambiente e também no acesso da sociedade à educação.

Como sugestões para trabalhos futuros nessa linha de pesquisa propõe-se:

- um estudo que tenha como período de leitura de chuvas uma variação menor do que a diária, possibilitando resultados mais detalhados;
- um estudo para a determinação de valores de probabilidades aceitáveis para os diferentes níveis do sistema de alerta;
- investigação geológica-geotécnica de campo para avaliar a coerência dos mecanismos reais de deslizamentos com os períodos de pluviometria com os quais os deslizamentos tiveram maior dependência;

7. Referências Bibliográficas

ALMEIDA, M.C.J, NAKAZAWA, A e TATIZANA, C. "Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos no Município de Petrópolis, RJ". In: **Anais do 7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, pp. 129-137, Poços de Caldas (MG), ABGE, 1993.

ANDRADE, J. P. M. DE. **Previsão hidrometeorológica visando sistema de alerta antecipado de cheias em bacias urbanas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006.

ALERTA RIO. **Sistema de alerta da Prefeitura do Rio de Janeiro**. Disponível em: <alertario.rio.rj.gov.br>. Acesso em 30 de maio de 2017.

AUGUSTO FILHO, O. "Caracterização Geológico-Geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica". In: **I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, pp. 721-733, Rio de Janeiro, 1992.

AVELAR, A. S. et al. "Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil". In: **Landslide Science and Practice: Global Environmental Change**, v. 4, p. 265–270, October, 2011.

BRASIL. Estatuto da Cidade - Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos**. Brasília, Julho, 2001.

BRASIL. Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. **Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos**. Brasília, DF, Maio, 2012.

BRASIL. Código Florestal - Lei Nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. **Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos**. Brasília, DF, Outubro, 2012.

BROLLO, M. J. "Atuação do Instituto Geológico na prevenção de desastres naturais". In: **Seminário de Defesa Civil de Lins**, Governo de São Paulo, São Paulo, 2010.

BRÖNNIMANN, C. et al. "Bedrock exfiltration as a triggering mechanism for shallow landslides". In: **Water Resources Research**, v. 49, n. 9, p. 5155–5167, 2013.

BUSSAB, W. O. & MORETTIN, P. A. Estatística Básica. Saraiva, 6ª Ed, 2010.

CALBETE, N. O.; CALBETE, S. R.; ROZANTE, J. R.; LEMOS, C. F. **Precipitações intensas ocorridas no período de 1986 a 1996 no Brasil**, 1996. Disponível em: http://www.cptec.inpe.br. Acesso em 29 de abril de 2016.

CEG RIO. Plano da área de proteção ambiental, Petrópolis. 2006

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. **Histórico**. 2011. Disponível em: <cemaden.gov.br>. Acesso em 12 de setembro de 2016.

- CEMADEN Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. **Mapa Interativo**. Disponível em: <cemaden.gov.br>. Acesso em 23 de maio de 2017.
- CLIMATE-DATA. **Clima: Petrópolis**. Disponível em: <pt.climate-data.org/location/4484>. Acesso em 03 de setembro de 2016.
- COSTA NUNES, A. J. & FERNANDES, C. E. M. Contribuição ao conhecimento do risco geológico urbano da cidade de Petrópolis / RJ. I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano, pp 102-114, São Paulo, 1990.
- DANZIGER, F. A. B. et al. **Soluções de estabilização de encostas na cidade de Petrópolis**. 1a COBRAE, v.1. p.119-133, Rio de Janeiro, 1992.
- D'ORSI, R. N. Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da serra dos órgãos da rodovia federal BR-116 RJ (Rio-Teresópolis). Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2011.
- DOURADO, F. ARRAES, T. C. & SILVA, M. F. "Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre". In: **Anuário do Instituto de Geociências UFRJ**, v. 35, p. 35-54, 2012.
- DRM-RJ Departamento de Recursos Minerais . **Desastre março/13 de escorregamentos em Petrópolis**, Governo do Estado do Rio de Janeiro SEDEIS, 2013.
- DUTRA, A. C. "Movimentos de massa associados aos maciços rochosos granitognáissicos do município de Petrópolis, RJ". In **47º Congresso Brasileiro de Geologia**. Salvador, Brasil, 2014.
- EM-DAT. The Internacional Disaster Database. Disponível em: < emdat.be>. Acesso em 30 de abril de 2017.GEORIO. **Manual Técnico de encostas**. Prefeitura do Rio de Janeiro, 2014.
- FELL, R. et al. "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning". In: **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 85–98, 2008.
- G1. Casas inundam e são invadidas pela lama após chuva em Petrópolis, no RJ. 08 de fevereiro de 2015. Disponível em: <g1.globo.com>. Acesso em 03 de maio de 2017.
- G1. **Deslizamento de rochas por conta da chuva deixa soterrados em Petrópolis**. 15 de novembro de 2016. Disponível em: <g1.globo.com>. Acesso em 20 de novembro de 2016.
- G1. **Deslizamento de terras destrói casa em Petrópolis, no RJ**. 15 de dezembro de 2016. Disponível em: <g1.globo.com>. Acesso em 03 de maio de 2017.
- G1. Chuva na madrugada desta segunda causa deslizamentos em Petrópolis. 20 de março de 2017. Disponível em: <g1.globo.com>. Acesso em 03 de maio de 2017.
- GEORIO. **Manual Técnico de Encostas**. Fundação Geo-Rio, Prefeitura do Rio de Janeiro, v.1, 2014.
- GONÇALVES, L.F.H. & GUERRA, A.J.T. "Movimentos de Massa na Cidade de Petrópolis (Rio de Janeiro)". In: **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. Ed. Bertrand, v.1. p.189-251, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

GOOGLE. **Aplicativo Google Earth**. Versão 7.1.8.3036. 2017. Disponível em: <google.com.br/earth/download>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

MATH WORKS. **Aplicativo MatLab**. Versão 9.0.0.341360. 2017. Disponível em: <google.com.br/earth/download>. Adquirido em fevereiro de 2016.

GOOGLE MAPS. **Petrópolis**. Disponível em: <maps.google.com.br>. Acesso em 20 de novembro de 2016.

GUERRA, A. J.; GONÇALVES, L. F. H.; LOPES, P. B. M. "Evolução histórico-geográfica da oupação desordenada e movimentos de massa no município de petrópolis, nas últimas décadas" In: **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 1, p. 35–43, 2007.

GUERRA, A. J. T. & JORGE, M. C. O. **Desastre na Região Serrana -Petrópolis - RJ**. Lagesolos/ UFRJ, 2014.

GUERRA, A. J.; LOPES, P. B. M.; SANTOS FILHO, R. D. "Caracteristicas Geográficas e Geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ". In **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 1, p. 77–86, 2007.

GUIDICINI, G. & IWASA, O. Y., Ensaio de Correlação entre Pluviosidade e Escorregamentos em Meio Tropical Úmido. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. Publicação Nº 1080, 1976.

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Edgard Blucher/EDUSP, 1984.

GUZZETTI, F. et al. "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe". In **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 98, p. 239–267, 2007.

IBGE –Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010.** Diponível em: http://www.ibge.gov.br. Acesso em 14 de março de 2016.

IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Estatística do Século XX**. Comunicação Social, 2003.

IBGE –Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Setor Censitário.** Rio de Janeiro. 2005.

IGCE - UNESP. **Riscos Geológicos**. Disponível em: <www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/riscos>. Acesso em 06 de setembro de 2016.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Área de Proteção Ambiental da Região Serrana de Petrópolis**. Brasília, DF, março de 2007.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra dos Órgãos**. Brasília, DF, 2006.

KAAS, R.; GOOVAERTS, M.; DHAENE, J.; DENUT, M. Modern Actuarial Risk. Theory, Springer, 2001.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Organic Trading, 1ª Ed, 2006.

KOBIYAMA, M. et al. Papel da Comunidade e da Universidade no Gerenciamento de Desastres Naturais. **Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais**, p. 834–846, 2004.

LAGESOLOS - Laboratório de Geomorfologia Experimental e Erosão dos Solos.

Projeto Mapa de Risco de deslizamentos em áreas de encosta na cidade de Petrópolis, RJ. UFRJ, 2006.

LANNI, C.; MCDONNELL, J.; HOPP, L. & RIGON, R. "Simulated effect of soil depth and bedrock topography on near-surface hydrologic response and slope stability". In **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 2, p. 146–159, 2013.

MELO, F. & OLIVEIRA, G. E. Direito Ambiental. Ed. Impetus, 2012.

MENDONÇA, M.B.; GUERRA, A.T. "A Problemática dos Processos Geodinâmicos frente à Ocupação de Encostas". In: **Anais of the 2nd Panamerican Symposium on Landslides**, Rio de Janeiro, vol. 2, p.935-940, 1997.

MENDONÇA, M. B. & TEMÓTEO, J.P.S. Observações Sobre Intervenções em Áreas de Risco Geológico-Geotécnico em Petrópolis, RJ, Anais, COPPEGEO'93, pp. 173-179, 1993.

MENDONÇA, M. B. DE; VALLE, G. S. C. & CERUTTI, R. M. B. "Análise Estatística da Dependência entre Deslizamentos e Pluviometria no Bairro do Quitandinha, Petrópolis, RJ". In: VI Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Angra dos Reis, 2013.

MENDONÇA, M. B. Imagens do arquivo pessoal. Disponíveis em julho de 2017.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. IBGE, 2ª Ed, 1989.

NAKAZAWA, V.A. & CERRI. T.E.S., Os Escorregamentos Ocorridos em Petrópolis – **Rj em fevereiro de 1988**: Ações Emergenciais. I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano, pp 325-333, São Paulo, 1990.

OLIVEIRA, F. L.; GUERRA, A. J. T. & GONÇALVES, L. F. H. "Análise comparativa dos dados históricos de movimentos de massa ocorridos em Petrópolis RJ, das décadas de 1960 até 1990". In: **X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, pp. 1175 a 1180, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, L. C. D. DE, Análise Quantitativa de Risco de Movimentos de Massa com Emprego de Estatística Bayesiana. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

PETRONEWS. **Deslizamentos no Quitandinha**. Disponível em: <portalpetronews.blogspot.com >. Acesso em 30 de julho de 2016.

PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. "Considerações a respeito dos condicionantes utilizados em pesquisas envolvendo movimentos de massa". In: **Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, v. 5, n. 1, p. 102–124, 2013.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. Lei Nº 1 5393 de 25 de maio de 1998. Estabelece normas para as atividades de uso, parcelamento e ocupação do solo do município de Petrópolis. **Câmara Municipal de Petrópolis**. Petrópolis, RJ, Maio, 1998.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. Restituição Aero Fotogramétrica - **DWG**. Petrópolis, RJ, 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. Plano de contingência de proteção e defesa civil. Petrópolis, RJ, 2013.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. Plano municipal de redução de

- riscos do primeiro distrito de Petrópolis / RJ. Petrópolis, RJ, 2014.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. **Secretaria de Defesa Civil: Sirenes**. Disponível em: cpetropolis.rj.gov.br/dfc/index.php/sirenes>. Acesso em 05 de junho de 2016.
- R7. Volta a chover em Petrópolis e vias já desobstruídas são novamente tomadas por terra. 19 de março de 2013. Disponível em: <noticias.r7.com>. Acesso em 30 de janeiro de 2017.
- RSIM. Chuvas no RJ: duas pessoas morrem após deslizamento de terra em **Petrópolis**. 15 de novembro de u2016. Disponível em: <www.rsim.com.br>. Acesso em 30 de janeiro de 2017.
- SERRA, A. Climatologia do Brasil. **Boletim Geográfico**, p. 102–3, 1975.
- SILVA, D. C. O. Aplicação do modelo shalstab na previsão de deslizamentos em **Petrópolis**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2006.
- STEIN, J.; BARBOSA, M. & COLARES, J. Os processo de Escorregamento na Cidade de Petrópolis na Serra do Mar e Medidas Possíveis para Redução de Acidentes Ecológicos no Brasil. I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano, pp. 411-420, São Paulo, 1990.
- TCE Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro. **Estudo Socioeconômico 2003 Petrópolis**. Coordenadoria de Comunicação Social, Imprensa e Editoração, Rio de Janeiro, 2003.
- TECNICO LISBOA. **Tabela de distribuição qui quadrado**. Disponível em: <fenix.tecnico.ulisboa.pt >. Acesso em 07 de Fevereiro de 2017.
- UNISDR United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction**. Geneva, Switzerland, 2009.
- VARANDA, E. Mapeamento Quantitativo de risco de escorregamentos para o primeiro distrito de petropolis, RJ utilzando sistemas de informacoes geograficas. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2006.
- VARNES, D.J. Landslide Harzard Zonation a Review of Principles and Practice. Natural Harzard, 3, UNESCO, 1984.
- XIMENES, E. F.; ARRAES, E. F.; GOMES, J. O. "Socio-environmental vulnerability, disaster risk-reduction and resilience-building: lessons from the earthquake in Haiti and torrential rains in the mountain range close to Rio de Janeiro in Brazil". In: **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1577, 2012.