

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Rosana Lino de Faria

**ZONEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE
ESCORREGAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO YUNG**

JUIZ DE FORA
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Rosana Lino de Faria

**ZONEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE
ESCORREGAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO YUNG**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Ricardo Tavares Zaidan
Área de Concentração: Geografia Física
Linha de Pesquisa: Dinâmicas Socioambientais
Agência Financiadora: Universidade Federal de Juiz de Fora

JUIZ DE FORA
2013

ROSANA LINO DE FARIA

**ZONEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE
ESCORREGAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO YUNG**

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ricardo Tavares Zaidan (orientador)

Departamento de Geografia – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Prof. Dr. Roberto Marques Neto

Departamento de Geografia – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Prof^a. Dr^a. Bianca Carvalho Vieira

Departamento de Geografia – Universidade de São Paulo (USP)

DEDICATÓRIA

*Aos meus primeiros mestres, Lourdes e Atayde cujo
exemplo me inspirou nessa jornada...*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me dado força, paciência e perseverança para que eu realizasse este estudo.

Aos meus pais, Atayde e Lourdes, pelo exemplo de vida e apoio sem limites. Obrigada por tudo. Amo muito vocês!

Ao meu irmão Alexandre “*meu socorro bem presente na hora de angústia*”!

Ao meu irmão Fernando, pelo apoio e incentivo e à minha cunhada Helen pelas alegrias dos nossos encontros...

À minha irmã Heloísa pelos conselhos intermináveis...

Á minha irmã Rosemary pelo apoio inquestionável!!!!

Ao Gustavo Oliveira que esteve irredutível ao meu lado em todos os momentos. Os meus dias são mais alegres ao seu lado!

Às minhas amigas, Anne Carvalho e Priscila Fontainha pela amizade sincera e aos meus amigos de LGA, Waltencir, Caio, Alan e Marcelle pelas muitas ajudas.

Agradeço à Prof^a. Bianca Carvalho Vieira e ao Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes (UNB) pelas sugestões fornecidas.

Agradeço ainda àquele que cuja paciência é interminável e cujos conselhos sempre me fizeram ver o melhor em todas as situações: ao meu professor, orientador e amigo Ricardo Tavares Zaidan. Obrigada por acreditar em mim quando eu mesma descreditava.

Agradeço também à Defesa Civil de Juiz de Fora e à Prefeitura de Juiz de Fora pela disponibilização dos dados utilizados nesse estudo.

Finalmente, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, à Universidade Federal de Juiz de Fora e ao CNPq por oferecer subsídios para esta pesquisa.

EPIGRAFE

***“O mundo muda constantemente, e, na Natureza,
ser constante seria uma inconstância”.***
(Abraham Cowley)

RESUMO

No Brasil, o estudo dos processos relacionados a movimentos de massa em áreas urbanas tem crescido devido ao elevado número de ocorrências e, muitas delas com vítimas fatais. Na cidade de Juiz de Fora, e em seu contexto a Bacia do Córrego do Yung, o crescimento do número de ocorrências de movimentos de massa está relacionado às características físico-ambientais e à ocupação irregular das encostas. Para a predição desse tipo de processo inúmeras metodologias têm sido propostas no mundo científico, e dentre muitas, o modelo matemático determinístico SHALSTAB (Shallow Stability), tem se sobressaído por apresentar resultados muito bons em várias regiões do mundo, como EUA, Itália, Canadá, Brasil, dentre outros. A partir disso, o objetivo desse trabalho foi criar um Mapeamento de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung através da análise da instabilidade à movimentos de massa e da análise do tipo de cobertura e uso da terra. Para isso foi necessário gerar um modelo digital de elevação, para obter os parâmetros geomorfológicos (declividade e área de contribuição), base para o mapeamento da susceptibilidade à movimentos de massa. Para o mapeamento da cobertura e uso da terra foi utilizada a cobertura aerofotogramétrica da área, fornecido pela Defesa Civil/PJF, onde se destacaram 6 classes de uso, dentre elas as áreas edificadas, as áreas com cobertura vegetal e as áreas referentes à corpos d'água. Os resultados apontaram que a Bacia do Córrego do Yung ainda se encontra em processo de urbanização, uma vez que apenas 12,2% da sua área se encontra edificada e outros 58,5% se encontra ocupada apenas por vegetação rasteira ou pastagem. Em relação à análise da instabilidade da bacia percebeu-se que grande parte das áreas classificadas com algum grau de instabilidade está localizada na porção sul e sudeste da bacia, região com alto índice de ocupação. Nesta análise verificou-se que 0,25 km² ou 0,55% da área da bacia é considerada Instável pelo modelo SHALSTAB, dentro das quais foram mapeadas 47 das cicatrizes. Em relação ao Zoneamento de Risco a Movimentos de Massa percebeu-se que 0,02 km² ou 0,10% da área total da bacia é considerada de altíssimo risco e que apenas 25,25% é considerada de baixo risco. Com base nesses resultados percebeu-se que o uso de modelos matemáticos para a previsão de movimentos de massa associado ao conhecimento da cobertura e uso da terra é uma ferramenta fundamental para se mapear as condições de risco em áreas ocupadas em bacias hidrográficas. Espera-se que este estudo possa orientar pesquisas posteriores e auxiliar os diversos órgãos competentes na gestão de áreas de risco na cidade de Juiz de Fora.

Palavras-chave: Movimentos de Massa. Áreas de Risco. Bacia do Córrego do Yung.

ABSTRACT

In Brazil, the study of the processes related to the mass movements in urban areas has increased due to the high number of occurrences with fatal victims. In city of Juiz de Fora which belongs the Stream of Yung Basin, the growth of the occurrences of mass movements is related to the physical-environmental features and with the inappropriate occupancy of slopes. For the prediction of such type of process, several methods have been proposed in the scientific context. Among these, the determinist mathematical model SHALSTAB (Shallow Stability) deserves attention since it produces good results in several parts of world, like EUA, Italy, Canadian and Brazil. The aim of this work was to create a mapping of risk to mass movements in the Stream of Yung Basin by means an analysis of instability to the mass movements and an analysis of the type of coverage and use of earth. To obtain the mapping of risk, it was necessary to generate a digital model of elevation to get the geomorphologic parameters (declivity and area of contribution) which are the base of the mapping of susceptibility to the mass movements. For the mapping of coverage and use of earth, was used the aerophotogrammetric coverage of the area furnished by the Civil Defense/PJF highlighting six classes of use e.g., built-up areas, vegetal coverage area and areas related to water bodies. The results show that the Stream of Yung Basin is still in urbanization process, since only 12,2% of its area contains buildings, and 58,5% is occupied only by underwood or pasture. With respect to the analysis of instability of the basin, an extensive part of the areas classified with some grade of instability are located in the south and southeast of the basin, a region with a high index of occupation. The analysis show that 0,25 km² or 0,55% of the basin area is considered unstable by the model SHALSTAB. It were mapped 47 of the scars. With respect to the risk zoning to the mass movements, 0,02 km² or 0,10% of the total area of the basin is considered of very high risk to occupancy, and only 25,25% is considered as low risk. These results permit to conclude that the use of mathematical models associated to the knowing of the coverage and use of earth for predicting the mass movements is an important method to map the risk conditions in occupied areas in hydrographic basins. It is expected that this present work may serve as guidance for further researches as well as to help several competent public agents on management of areas of risk in the city of Juiz de Fora.

Keywords: Mass Movements, Risk Areas, Basin Stream Yung.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Instabilidade na Bacia do Córrego do Yung.....	5
Figura 2: Classificação dos movimentos de massa	9
Figura 3: Principais tipos de escorregamentos.....	11
Figura 4: Demonstrativo do Modelo SHALSTAB.	19
Figura 5: Componentes da força peso.	20
Figura 6: Componentes da força peso relacionadas com as tensões que agem em um escorregamento translacional	21
Figura 7: Modelo Hidrológico de O’Loughlin.	23
Figura 8: Modelos de estabilidade e hidrológico em função da razão de h/z.	24
Figura 9: Modelos de estabilidade (SEM COESÃO) e hidrológico em função da razão de h/z.	24
Figura 10: Mapa de localização da Bacia do Córrego do Yung em Juiz de Fora – MG.....	26
Figura 11: Modelo Digital de Elevação Sombreado da Bacia do Córrego do Yung.	29
Figura 12: Tipos de ocupação predominante na Bacia do Córrego do Yung.	30
Figura 13: Imagem aerofotogramétrica da Bacia do Córrego do Yung.	36
Figura 14: Exemplos de algumas áreas de pastagem e vegetação arbórea ou arbustiva na Bacia do Córrego do Yung.....	39
Figura 15: Exemplos de algumas áreas edificadas na Bacia do Córrego do Yung.....	40
Figura 16: Exemplos de algumas áreas com vegetação mista (rasteira e de médio porte).	41
Figura 17: Mapa de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung.	42
Figura 18: Mapa de Declividade da Bacia do Córrego do Yung - Juiz de Fora / MG.....	44
Figura 19: Perfis de ocupação da Bacia do Córrego do Yung.	46
Figura 20: Exemplo de uma área com movimento de massa induzido em uma porção do relevo com grande concentração de fluxo d’água	48
Figura 21: Mapa de Área de Contribuição da Bacia do Córrego do Yung - Juiz de Fora/MG.	49
Figura 22: Mapa de Susceptibilidade a Ocorrência de Escorregamentos na Bacia do Córrego do Yung.	51
Figura 23: Área classificada como Instável pelo modelo SHALSTAB.....	53
Figura 24: Comparação entre os parâmetros topográficos Declividade e Área de Contribuição com o Modelo de Susceptibilidade a Escorregamentos.	57
Figura 25: Zoneamento de Risco à Ocupação na Bacia do Córrego do Yung.....	59

- Figura 26:** Mapa de Risco a Ocupação na Bacia do Córrego do Yung e em detalhe exemplos de áreas classificadas como de Altíssimo Risco (1 e 3) e de Alto Risco (2 e 4). 61
- Figura 27:** Imagens de uma área de pastagem classificada como de Alto Risco. 62
- Figura 28:** Mapa de Risco à Ocupação na Bacia do Córrego do Yung e em detalhe exemplos de áreas classificadas como de Médio Risco (1 e 3) e de Baixo Risco (2 e 4). 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quadro representativo das classes de estabilidade geradas pelo modelo SHALSTAB.	25
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gráfico dos desastres naturais no Brasil.	2
Gráfico 2: Gráfico representativo das classes de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung.	37
Gráfico 3: Gráfico da distribuição das classes de susceptibilidade a escorregamentos na Bacia do Córrego do Yung.	52
Gráfico 4: Gráficos representando a distribuição dos escorregamentos para classes com algum grau de instabilidade.	55
Gráfico 5: Gráfico representativo do Risco à Ocupação da Bacia do Córrego do Yung.	60

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Movimentos Gravitacionais de Massa.....	7
2.1.1. Tipologia e Classificação dos Movimentos de Massa.....	8
2.1.2. Fatores Condicionantes.....	11
2.1.2.1. Parâmetros geomorfológicos ou topográficos	12
2.1.2.2. Parâmetros antrópicos.....	13
2.2. Metodologias de Previsão de Movimentos de Massa.....	14
2.3. Modelo SHALSTAB	17
2.3.1. Modelo de Estabilidade de Encosta.....	19
2.3.2. Modelo Hidrológico	22
2.3.3. Combinação entre Modelo de Estabilidade de Encosta e o Modelo Hidrológico	23
2.3.4. Classes de Estabilidade Geradas pelo Modelo SHALSTAB	25
2.4. A Bacia do Córrego do Yung no contexto da cidade de Juiz de Fora.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1. Para a Análise da Cobertura e Uso da Terra.....	32
3.2. Para a Análise de Instabilidade a Movimentos de Massa.....	33
3.3. Para a Análise do Zoneamento de Risco a Movimentos de Massa	33
4. RESULTADOS	35
4.1. Análise do Mapeamento de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung	35
4.2. Análise de Instabilidade a Movimentos de Massa.....	43
4.2.1. Distribuição e frequência das classes de declividade e cicatrizes de escorregamentos..	43
4.2.2. Distribuição e frequência das classes de área de contribuição e cicatrizes de escorregamentos	47
4.2.3. Análise da Susceptibilidade a Movimentos de Massa.....	50

4.2.4. Análise da Susceptibilidade a Movimentos de Massa associado às Cicatrizes.....	53
4.2.5. Análise da Susceptibilidade a Movimentos de Massa associado à declividade e área de contribuição	55
4.3. Análise do Zoneamento de Risco na Bacia do Córrego do Yung	58
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

A superfície terrestre, palco das atividades do homem, vive em constante mudança. Desde os primórdios da humanidade há registros das intervenções antrópicas no espaço a fim de melhor adequá-lo às suas necessidades. As alterações sofridas pela paisagem podem ocorrer tanto de forma natural, resultante da dinâmica terrestre ou pode ser produto da interferência humana.

O tipo de uso predominante em cada espaço e a intensidade com que ele ocorre pode contribuir para a degradação ou a preservação do sistema ambiental. Nesse sentido, é possível compreender a relação entre o crescimento urbano desordenado e o aumento das ocorrências de desastres naturais, como os movimentos de massa em encostas, uma vez que esse crescimento populacional em áreas urbanas nem sempre vem acompanhado de investimentos adequados em infraestrutura e planejamento.

Para Tobin e Montz (1997), um desastre pode ser definido como um evento perigoso que perturba de modo significativo o funcionamento da sociedade. Este evento pode ou não levar à morte, mas geralmente tem impactos econômicos graves. De acordo com a ONU (2012), cerca de metade da humanidade vive hoje em cidades e até 2030, quase 60% da população mundial viverá em áreas urbanas. Afirma ainda que 60% da população urbana mundial está localizada em regiões expostas a pelo menos um tipo de desastre natural.

Os desastres naturais, no âmbito da dinâmica terrestre, podem ser considerados um dos eventos que alteram mais rápida e significativamente a paisagem podendo gerar tanto danos econômicos quanto à vida humana. No âmbito dos desastres naturais, os movimentos de massa são os que mais aumentaram o número de ocorrências nas últimas décadas, e de acordo com o CRED (*The International Disaster Database Centre for Research on the Epidemiology Disasters*) foi o desastre responsável pela morte de 30.901 pessoas em todo o mundo entre os anos de 1900 a 2012, e o comprometimento de outras 6.674.400 pessoas.

Nas cidades algumas causas para o aumento desse tipo de desastre está relacionado ao crescimento desordenado, à falta de planejamento do território, à ocupação inadequada das encostas, à falta de manutenção dos cortes de estradas e de moradias, aos desmatamentos, à disposição irregular do lixo e das águas servidas, no déficit das políticas de prevenção a riscos, entre outros. De acordo com Sidle et al (1985), Amaral (1997), Listo (2011), entre outros, o impacto dos movimentos de massa nos países em desenvolvimento está associado na

maioria das vezes a perdas humanas em áreas urbanas densamente ocupadas, enquanto que nos países desenvolvidos as perdas são em grande parte apenas econômicas. A explicação para este fato está na diferença entre os altos investimentos na prevenção de acidentes e minimização do grau de risco nos países desenvolvidos enquanto nos países em desenvolvimento o descaso político impede que medidas sejam tomadas a fim de evitar maiores danos.

No Brasil, seguindo a tendência mundial, a ocorrência dos movimentos de massa tem aumentado (**Gráfico 1**). Deve-se este fato aos condicionantes naturais (geomorfologia, geologia, pedologia, entre outros) e aos agente deflagradores, como por exemplo, as condições climáticas nas quais predominam as intensas chuvas de verão. Além da frequência elevada dos eventos naturais ocorrem também eventos causados pela ação antrópica, que vem aumentando principalmente devido à ocupação das encostas, uma vez que os cortes inadequados de taludes, a deposição do lixo, propiciam uma maior susceptibilidade à ocorrência dos movimentos de massa.

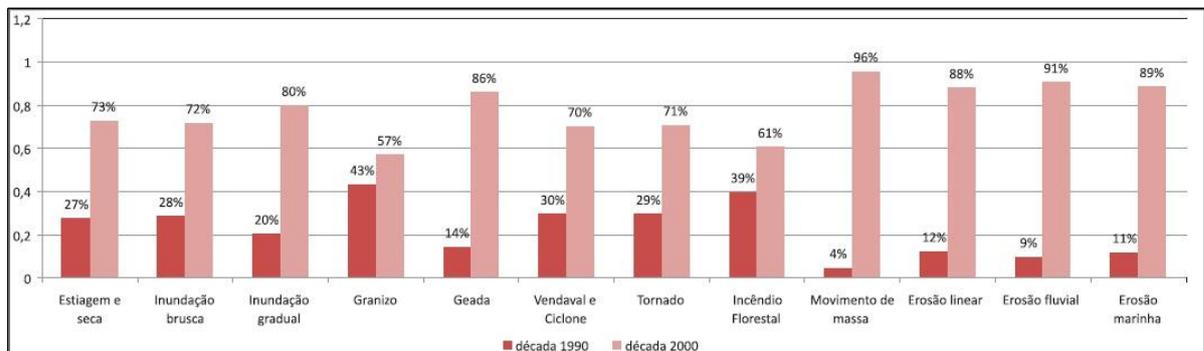


Gráfico 1: Gráfico dos desastres naturais no Brasil. Fonte: CEPED/UFSC (2012).

Desde a década de 90, diferentes estudos de geógrafos, geólogos, engenheiros civis, entre outros, se despontaram ao abordar as principais causas e mecanismos dos movimentos de massa nas encostas. Sharpe em 1938, após uma revisão de estudos anteriores, desenvolve uma classificação dos movimentos de massa e suas relações com os agentes de transporte, como a água, o ar e o gelo. Em seguida, no âmbito internacional, despontaram os estudos de Varnes (1958), Hutchinson (1968), Zaruba e Mencl (1976). Já no Brasil, destacam-se os estudos de Freire (1965), Guidicini e Nieble (1976), Crozier (1986), Sassa (1989) e Fernandes e Amaral (2009).

Dessa forma, diversas metodologias têm sido propostas para a previsão da ocorrência dos movimentos de massa, como por exemplo, os estudos baseados nos inventários dos

eventos, que relaciona o padrão de distribuição atual à futuros padrões de instabilidade no relevo (AMARAL, 1996). Existem ainda os estudos baseados nas análises estatísticas de correlação entre as áreas onde ocorreram esses processos e atributos morfológicos e uso do solo, como por exemplo, Carrara (1983); Carrara et al (1991), entre outros. Outras metodologias criam mapeamentos de áreas de riscos associando diversos tipos de planos de informação, como, geologia, vegetação, uso da terra, declividade, onde são atribuídos “pesos” e “notas” para cada atributo, determinando assim seu grau de importância na deflagração do movimento (XAVIER-DA-SILVA; CARVALHO FILHO, 1993, entre outros).

Por último, as metodologias baseadas em modelos matemáticos, desenvolvidos em bases físicas, ou seja, baseadas em leis físicas da natureza, têm sido cada vez mais utilizadas para a predição dos movimentos de massa. Utilizadas em todo o mundo, estas metodologias conferem bons resultados uma vez que não delegam às técnicas de SIG o poder de decisão das áreas susceptíveis a ocorrência desses movimentos e sim às leis inerentes à natureza como a relação entre os processos hidrológicos e mecânicos das encostas (GOMES, 2002; GOMES et al., 2004; GOMES et al., 2005, ZAIDAN, 2009).

Dentre muitos modelos de previsão de movimentos de massa, o modelo matemático determinístico SHALSTAB (Shallow Stability), desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994), tem sido bastante utilizado por apresentar alto índice de acerto. Este modelo avalia a susceptibilidade por meio da combinação de um modelo de estabilidade de encosta, baseado na teoria do talude infinito, e no modelo hidrológico.

A cidade de Juiz de Fora, como outras grandes cidades brasileiras, como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, enfrenta grandes problemas relacionados à expansão urbana que nem sempre vem acompanhada de investimentos em planejamento e gestão do território. O processo de crescimento da cidade de Juiz de Fora se iniciou no vale principal do Rio Paraibuna e com o seu desenvolvimento os vales secundários também começaram a ser ocupados. Recentemente, com quase todo o vale central ocupado, as vertentes tem sido alvo de grande parte das novas ocupações, muitas delas feitas de forma desordenada e sem planejamento. O reflexo dessas ações pode ser visto através do grande número de ocorrências da Defesa Civil associadas aos movimentos de massa, causados pela intervenção antrópica inadequada nos terrenos.

Nesse contexto, cresce e expande a Bacia do Córrego do Yung localizada à margem esquerda do Rio Paraibuna, no setor leste da cidade. Com uma ocupação altamente densa na porção sul, esta bacia é dotada principalmente por assentamentos precários o que configura

um cenário marcado por um crônico desequilíbrio socioambiental. Associado às condições naturais da bacia, a grande variação altimétrica de 673 a 1040 m e a ocupação inadequada das encostas, contribuem para o aumento da dinâmica superficial gerando consecutivos processos erosivos e movimentos de massa.

Inúmeras ocorrências desse tipo de movimento já foram registradas na área de estudo, e muitas delas com vítimas fatais. O principal agente deflagrador de movimentos de massa na Bacia do Córrego do Yung é a água, seja devido à intensas chuvas ou vazamentos na rede de drenagem e disposição das águas servidas. Um exemplo desse tipo de ocorrência pôde ser observado no dia 18 de março de 2012, onde após o rompimento de uma rede de drenagem da CESAMA, na encosta localizada na Rua Roberto Hargreaves n°353, um enorme volume de solo se movimentou, soterrando parte de uma casa e matando duas jovens (**Figura 1**).

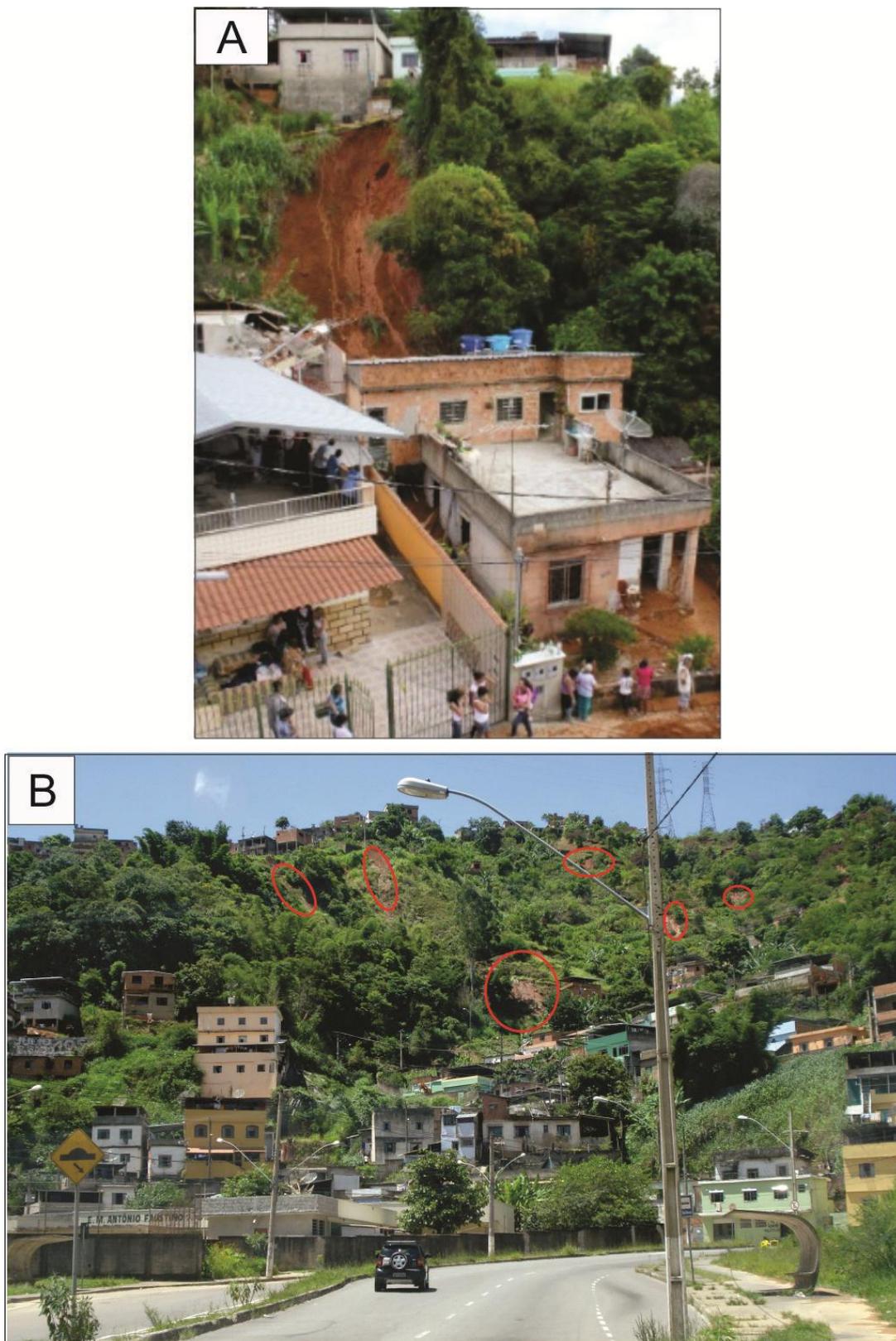


Figura 1: Instabilidade na Bacia do Córrego do Yung. A imagem (A) mostra um movimento de massa ocorrido no Bairro Linhares no dia 18/03/2012. Observa-se que a alta declividade do terreno associado ao corte irregular da encosta contribuiu para deflagração do movimento de massa. Na imagem (B) percebe-se 6 cicatrizes de movimentos de massa pretéritos demonstrando a característica instável da bacia.

Eventos como os apresentados estão se tornando comuns na Bacia do Córrego do Yung, principalmente durante os períodos chuvosos. Devido ao elevado número de ocorrências de movimentos de massa nesta bacia, outros estudos já foram realizados nesta área, como por exemplo, o estudo de Rinco (2003), onde utilizou-se um modelo com bases estatísticas baseados em pesos e notas. No entanto, ainda não se tem registros de aplicação de modelos determinísticos na área, como o modelo SHALSTAB. Para outras áreas da cidade de Juiz de Fora, esse modelo determinístico já foi usado e apresentou resultados satisfatórios, como no caso do estudo da Bacia do Córrego Independência (ZAIDAN, 2009).

Assim, espera-se que com este estudo possa se conhecer a localização das áreas susceptíveis a movimentos de massa e assim determinar o potencial do risco, seja nas áreas ocupadas ou naquelas onde ainda não há ocupação humana, de forma que se possa orientar medidas estratégicas de futuras ocupações.

Dessa forma, a proposta deste trabalho foi criar um modelo espacial representando o Mapeamento de Riscos à Ocorrência de Movimentos de Massa para a Ocupação Humana na Bacia do Córrego do Yung localizado no município de Juiz de Fora – MG. Visando atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- a) Analisar a Cobertura e Uso da Terra na Bacia do Córrego do Yung;
- b) Proceder a Análise de Instabilidade a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung;
- c) Analisar o Zoneamento de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tema central desse estudo tem como foco a avaliação do risco a movimentos de massa na Bacia do Córrego do Yung com base nos dados referentes aos tipos de uso da bacia e no levantamento da susceptibilidade a movimentos de massa. A fim de subsidiar os resultados dessa pesquisa, nesse capítulo serão descritos e analisados a tipologia e classificação dos movimentos de massa, assim como, os fatores condicionantes relativos à topografia, geomorfologia e à intervenção antrópica. Serão abordadas ainda algumas metodologias de previsão de movimentos de massa, seguido da apresentação do modelo SHALSTAB, através do qual foi gerado o modelo de susceptibilidade a movimentos de massa na Bacia do Córrego do Yung.

2.1. Movimentos Gravitacionais de Massa

O termo *movimento de massa* é a denominação comum que abrange todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independente da diversidade dos processos, causas, velocidades, formas e demais características. Dessa forma, os movimentos de massa configuram um dos maiores processos de evolução e de desenvolvimento das encostas, especialmente em regiões íngremes (SELBY, 1993; GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

As paisagens são compostas por vertentes ou encostas com variados tipos de formas e declividades. Suas alterações são constantes e podem ser tanto de origem antrópica quanto natural. As mudanças na forma das vertentes relacionadas aos fatores naturais estão associadas a processos dominantes do intemperismo, erosão e movimentos de massa. Assim como os demais processos gravitacionais, os escorregamentos fazem parte do conjunto dos movimentos de massa integrados à dinâmica das encostas (INFANTI JR.; FORNASARI FILHO, 2004; FERNANDES; AMARAL, 2009).

Quando as alterações naturais da paisagem causam danos, mortes, prejuízos econômicos e sociais dá-se origem os chamados desastres naturais. Vários fenômenos se destacam nesse cenário, como por exemplo, os terremotos, as inundações e os movimentos de massa, este considerado pela Defesa Civil Nacional, através do Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (2012), como o segundo desastre natural que mais matou no ano de 2011.

De acordo com este estudo da Defesa Civil, no Brasil, foi relatada oficialmente a ocorrência de 795 desastres naturais em 2011, os quais causaram 1.094 óbitos e afetaram 12.535.401 pessoas. Em relação aos movimentos de massa, verificou-se que no ano de 2011 as regiões mais afetadas foram a sudeste com 70% das ocorrências e a região sul com 25%. No total de registros referentes aos movimentos de massa no Brasil, no ano de 2011, foram registrados cerca de 472 óbitos, 7.228 desabrigados, 44.519 desalojados e 676.399 afetados.

Devido às condições climáticas, com intensas chuvas de verão, e grandes extensões de maciços rochosos, o Brasil está sujeito a desastres ambientais relacionados aos movimentos de massa nas vertentes. No sudeste do Brasil, dois fatores contribuem para a ocorrência desses movimentos, também conhecidos como deslizamentos: a prolongada estação chuvosa e a declividade relativamente acentuada das vertentes. Nas cidades, a susceptibilidade a ocorrência desses eventos pode ser acentuada devido à ocupação irregular, cortes de estradas sem manutenção, desmatamentos desordenados, entre outros fatores (AMARAL, 1996 (a); AMARAL, 1996 (b); ZAIDAN, 2009; entre outros).

2.1.1. Tipologia e Classificação dos Movimentos de Massa

Existem na natureza diferentes tipos de movimentos de massa que se diferem a partir das condições físicas do local e, por envolverem uma grande variedade de materiais, processos e fatores condicionantes, esse tipo de desastre natural pode ter diversas classificações.

Dentre os critérios utilizados para a diferenciação destes movimentos destacam-se os tipos de material, a velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação, a geometria da massa movimentada e o conteúdo de água (SELBY, 1993) (**Figura 2**):

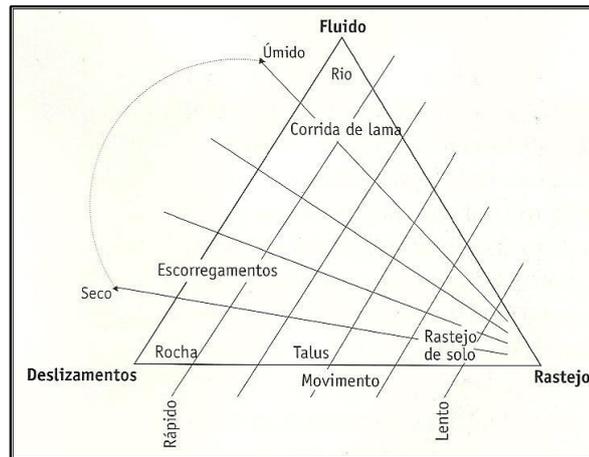


Figura 2: Classificação dos movimentos de massa de acordo com o grau de umidade e de velocidade. Fonte: Modificado de Carson & Kirkby, 1972.

Na literatura vários autores descreveram e classificaram os movimentos de massa. Dentre os autores estrangeiros, destacam-se: Sharpe (1938), Varnes (1978), Hutchinson (1988) e Sassa (1989). Sharpe (1938) desenvolveu a primeira classificação de amplo aceite no meio científico, mas a classificação proposta por Varnes (1978) é a mais utilizada internacionalmente e baseia-se no tipo de movimento e no tipo de material transportado. Já Hutchinson (1988), criou uma das classificações mais complexas, baseada na morfologia da massa movimentada, no tipo de material envolvido, no mecanismo de ruptura, na velocidade do movimento, entre outras características intrínsecas à composição do solo.

Em 1993, foi publicado o Glossário Multilíngue de Deslizamentos criado pelo Grupo Internacional do Inventário Mundial de Deslizamentos, com o objetivo de homogeneizar os conceitos utilizados pelos pesquisadores de todo o mundo. De acordo com esse glossário, os tipos de movimentos são: quedas (*fall*), tombamentos (*topple*), escorregamentos (*slide*), espraiaamentos (*spread*) e corridas (*flow*). No Brasil, destacam-se as classificações propostas por Freire (1965), Guidicini e Nieble (1984), IPT (1991), Augusto Filho (1992) e Fernandes e Amaral (2009).

De acordo com Augusto Filho (1992) os movimentos de massa são classificados em quatro grandes grupos: rastejo (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*). É caracterizado rastejo (*creep*), o movimento descendente, lento e contínuo da massa de solo. Sua geometria não é bem definida e não apresenta uma nítida superfície de ruptura. Esse tipo de movimento ocorre em horizontes superficiais de solo, horizontes de transição solo/rocha ou até mesmo em rochas alteradas/fraturadas. As quedas de blocos (*falls*), consistem no deslocamento, por gravidade, de blocos e/ou lascas de rocha. Ocorrem em encostas íngremes de paredões rochosos e tem grande contribuição para a formação de

depósitos de tálus (FERNANDES; AMARAL, 2009). As corridas (*flows*) são movimentos gravitacionais de massa de grandes dimensões com característica viscosa e com velocidade de deslocamento muito grande. Sua ocorrência geralmente encontra-se associada a uma concentração excessiva de fluxo d'água superficiais em algum ponto da encosta (FERNANDES; AMARAL, 2009).

Os escorregamentos (*slides*) são definidos como movimentos rápidos de massas de solos ou de rochas, de duração relativamente curta, com plano de ruptura bem definido, permitindo a distinção entre o material deslizado e aquele não movimentado e, com centro de gravidade se deslocando para baixo e para fora do talude (natural, de corte ou aterro). A causa dos escorregamentos está associada ao aumento das tensões atuantes ou queda da resistência levando os terrenos a se romperem por cisalhamento. De acordo com sua geometria e o tipo de material que instabilizam, os escorregamentos podem se dividir em translacionais ou planares, circulares ou rotacionais (FERNANDES; AMARAL, 2009)

Os escorregamentos rotacionais ou circulares (*slumps*) são caracterizados por possuírem uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, que desloca normalmente uma grande quantidade de material de forma rotacional (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; IPT, 1991). Estão associados a condições artificiais como aterros, cortes da encosta para a construção de estradas, pacotes de solo ou depósitos mais espessos, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas (INFANTI JR.; FORNASARI FILHO, 2004).

Os escorregamentos translacionais ou planares, mais frequentes na paisagem, envolvem solos superficiais, frequentemente até o contato com a rocha subjacente, alterada ou não (INFANTI JR; FORNASARI FILHO, 2004). Esse tipo de escorregamento pode ocorrer durante chuvas intensas, quando é elevada a poro-pressão em uma superfície de descontinuidade. Em sua maioria, os escorregamentos translacionais são compridos e rasos e os planos de ruptura encontram-se em profundidades que variam de 0,5 a 5,0 metros (FERNANDES; AMARAL, 2009) (**Figura 3**).

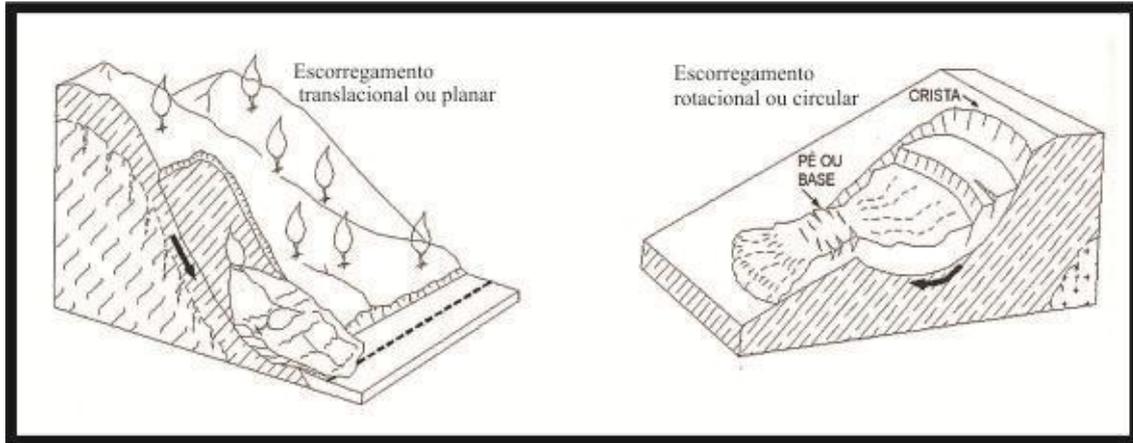


Figura 3: Principais tipos de escorregamentos. Fonte: Adaptado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (2004).

2.1.2. Fatores Condicionantes

A instabilização de encostas e taludes está associada a uma série de eventos que tem sua origem inter-relacionada a fatores antrópicos e a fatores naturais. Os fatores antrópicos estão relacionados ao desmatamento e às diversas formas de uso e ocupação da terra (agricultura, obras civis, urbanização, etc.). Os fatores naturais englobam desde a origem e a formação das rochas e sua história geológica até os fatores geomorfológicos (parâmetros topográficos como declividade, forma da encosta, área de contribuição, orientação da encosta (aspecto), espessura do solo, comprimento da encosta, simetria dos vales e elevação) e climáticos (chuvas) (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; DIETRICH et al, 1986; SELBY, 1993; AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 2004; RABACO, 2005; FERNANDES; AMARAL, 2009; entre outros).

De maneira ampla, a instabilização de encostas está condicionada a determinadas *causas* e *agentes*. As *causas* são originadas a partir da atuação de um determinado agente e em relação ao talude. Podem ser subdivididas em *internas* (relacionadas ao efeito das oscilações térmicas e a redução da resistência devido à atuação do intemperismo), *externas* (como mudanças na geometria do sistema, efeitos de vibrações e às mudanças nas inclinações das camadas) e *intermediárias* (diminuição do efeito da coesão aparente, erosão subterrânea retrogressiva, rebaixamento rápido do lençol freático, entre outros) (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Já os *agentes* ou *fatores* podem ser subdivididos em *predisponentes* e *efetivos*. Os agentes *predisponentes* referem-se a um conjunto de características naturais e intrínsecas dos

terrenos, onde o movimento pode ocorrer. Estes fatores referem-se às características dos materiais da encosta antes que ocorra o movimento, como por exemplo, as características do complexo geológico, do complexo morfológico, do complexo climato-hidrológico, da gravidade, do calor solar e da vegetação (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 2004).

Os agentes *efetivos* são os responsáveis por provocar as instabilizações da encosta, incluindo a ação antrópica. Estes podem ser subdivididos em *preparatórios* (pluviosidade, erosão pela água e vento, variação térmica, dissolução química, ação das nascentes e mananciais, variação do nível freático e ação antrópica e de animais) e *imediatos* (chuvas intensas, erosão, ondas, vento e ação antrópica) e sua atuação deve ser considerada no momento antes da ruptura.

De acordo com Augusto Filho; Virgili (2004), os principais condicionantes dos escorregamentos baseados na dinâmica ambiental brasileira estão relacionados às características climáticas, às características e distribuição dos materiais que constituem o substrato das encostas, como os solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas, às características geomorfológicas, com destaque para a inclinação, amplitude e forma do perfil da encosta, ao regime das águas de superfície e subsuperfície e, às características do uso e ocupação, incluindo a cobertura vegetal e alterações antrópicas como os cortes e aterros.

Considerando o enfoque desse estudo, alguns fatores condicionantes citados anteriormente tem particular importância, sendo discutidos com mais detalhes a seguir:

2.1.2.1. Parâmetros geomorfológicos ou topográficos

Estes parâmetros tratam das relações entre a forma e a hidrologia (superficial e subsuperficial) da encosta, englobando parâmetros tais como: declividade, forma da encosta, área de contribuição, orientação da encosta (aspecto), espessura do solo, comprimento da encosta e as simetrias dos vales e elevação.

A atuação direta, dada pela tendência de correlação entre a declividade e a ocorrência de movimentos de massa é conhecida há muito tempo e pode ser entendida através da equação de Coulomb (GUIDICINI; NIEBLE, 1984), quando esta descreve que o aumento do ângulo da encosta implica em uma diminuição do fator de segurança. No entanto, diversos mapeamentos comprovam que o maior número de escorregamentos não ocorre

necessariamente nas encostas mais íngremes ($>35^\circ$), mas sim nas encostas com declividades entre $21^\circ - 25^\circ$ (FERNANDES; AMARAL, 2009). Em tais estudos, a ocorrência dos movimentos de massa foi atribuída às variações no tipo de cobertura vegetal e ao fato de que nas encostas mais íngremes os solos já teriam sido removidos em eventos anteriores.

A forma da encosta pode influenciar na sua estabilidade gerando zonas de convergência e divergência de fluxos das águas superficiais e subsuperficiais principalmente nos momentos de rápida descarga de água durante os episódios chuvosos. As porções côncavas (*hollows*), em planta e em perfil, que concentram o maior volume de água e sedimentos podem levar durante eventos pluviométricos intensos, à subida rápida da pressão e conseqüentemente à redução da estabilidade da encosta (DIETRICH; DUNNE, 1978; DIETRICH et al, 1986; MONTGOMERY et al, 1991; MONTGOMERY; DIETRICH, 1995, entre outros).

Outro fator de grande importância é a área de contribuição (por unidade de contorno), que se refere à concentração dos fluxos de água vindo das porções mais altas da encosta, e que conseqüentemente pode levar à saturação dos solos. Este parâmetro é calculado numa bacia hidrográfica, por unidade de contorno para cada ponto (célula) dentro da bacia e possui um papel relevante na análise da susceptibilidade (DIETRICH et al, 1995; FERNANDES et al, 2004; ZAIDAN, 2009).

A orientação da vertente refere-se à posição das faces do terreno frente à distribuição da radiação solar. Este fator pode influenciar na umidade do terreno e conseqüentemente na tipologia da cobertura vegetal e espessura do solo. Dessa forma a variação no teor da umidade da encosta irá determinar as características físico-químicas do solo que, por sua vez, influenciam no comportamento geotécnico, principalmente a espessura, porosidade, composição química, mineralógica que determinam o comportamento geomecânico (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 2004).

2.1.2.2. Parâmetros antrópicos

Muitos movimentos de massa ocorrem devido à grande e persistente interferência do homem. De acordo com Augusto Filho e Virgili (2004), as principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos são: a remoção da cobertura vegetal, o lançamento inadequado e a concentração das águas servidas, os vazamentos na rede de abastecimento e esgoto,

presença de fossas, execução de cortes com geometria inadequada, execução deficiente de aterros, lançamento de entulho e lixo nas encostas e as vibrações produzidas pelo tráfego pesado e explosões.

A presença da vegetação é um fator de redistribuição da água sobre a encosta, e pode ser considerado um fator mecânico que influi positivamente ou negativamente na encosta. Os fatores positivos seriam a interceptação das águas da chuva e dissipação das gotas de água no solo através das folhas, diminuindo a infiltração e decréscimo da resistência do solo provocado pelo sistema radicular. Os fatores negativos seriam o efeito cunha e efeito alavanca provocado através das forças cisalhantes transferidas pelos troncos no terreno. Esse efeito pode ocorrer quando a copa das árvores é atingida por ventos, bem como pelo efeito cunha/alavanca representado pela pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar nas fendas ou fissuras do solo ou rocha, além da sobrecarga exercida pela vegetação no solo, contribuindo assim, para a deflagração dos movimentos de massa (SIDLE et al, 1985; GREENWAY, 1987; LISTO, 2011; entre outros).

A construção de estradas e casas também pode contribuir para a instabilização do terreno. No caso das construções de estradas a estabilidade da encosta pode ser afetada por meio do aumento do peso da encosta, da alteração da declividade no corte, da remoção do suporte da base do talude e da reorganização da rede de drenagem. O mal planejamento da rede urbana e a falta de fiscalização das obras civis contribuem para o aumento das ocorrências de escorregamentos nas áreas ocupadas (INFANTI JR.; FORNASARI FILHO, 2004; VIEIRA, 2007; ZAIDAN, 2009; FERNANDES; AMARAL, 2009).

O mal planejamento na execução de aterros é outra ação antrópica de grande importância na deflagração dos movimentos de massa ou escorregamentos. No corpo do aterro os problemas podem estar relacionados à má compactação do terreno, ao uso de materiais inadequados, à geometria inadequada, à deficiência da drenagem superficial, à inadequação dos pontos de linha de drenagem e à falta de proteção superficial.

2.2. Metodologias de Previsão de Movimentos de Massa

Diversas metodologias têm sido propostas para a previsão de movimentos de massa. Alguns estudos baseiam-se em análises estatísticas de correlação entre as áreas que sofreram algum processo de movimento de massa e certos atributos da paisagem como declividade,

geologia, vegetação, entre outros. Nesta linha, Carrara (1983), determinou áreas estáveis e instáveis, através da análise de função discriminante, baseado em 14 tipos de atributos geológicos-geomorfológicos, nas cicatrizes de escorregamentos. Mais tarde, Carrara, et al (1991) aperfeiçoaram esta metodologia ao utilizar as técnicas de SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) e concluíram que esse tipo de metodologia torna-se indispensável uma vez que é possível identificar quais variáveis são mais importantes na ocorrência desses movimentos.

Atualmente existe uma série de métodos de previsão de áreas susceptíveis a movimentos de massa que utilizam os Sistemas de Informações Geográficas. Nesse ambiente as informações são inseridas, processadas e analisadas gerando os mapas de susceptibilidade, sob diferentes abordagens. De acordo com Fernandes et al (2001), os principais procedimentos utilizados na previsão de áreas susceptíveis a movimentos de massa podem ser agrupados em quatro grandes grupos: a) análise da distribuição dos movimentos de massa no campo, b) análises a partir de mapeamentos geomorfológicos e/ou geotécnicos, c) modelos em bases estatísticas, d) modelos determinísticos.

A primeira metodologia enfoca a análise da distribuição dos movimentos de massa no campo. A hipótese que dá sustentação a este tipo de metodologia é que a distribuição das cicatrizes e depósitos recentes pode controlar futuros padrões de distribuição de instabilidade das encostas. Tais metodologias utilizam-se de mapas que refletem a densidade dos escorregamentos no campo (mapas feitos a partir de inventários de escorregamentos), seja para um único evento ou para uma série temporal. Entretanto, as informações geradas por este tipo de metodologia se limitam às áreas onde ocorreram escorregamentos no passado e que foram catalogados. Para a elaboração dos mapas de inventários, os escorregamentos ocorridos no passado são localizados e identificados por meio de interpretação de fotografias aéreas ou imagens de satélites, visitas de campo, etc. A localização espacial juntamente com outras informações como tipologia, forma, tamanho, volume do material movimentado, pode subsidiar os demais métodos uma vez que oferece um registro dos processos ocorridos no passado e no presente. Dentre as principais vantagens do uso dos mapas de inventário podemos citar a simplicidade para sua execução, a análise da distribuição dos escorregamentos na paisagem, a integração com fatores condicionantes, e, a utilização como ferramenta de validação de produtos da modelagem matemática (GUZZETI et al, 1999; VAN WESTEN, 2006, entre outros). No entanto, existem limitações no uso dos mapas de inventário, uma vez que os dados fornecidos por estes mapas são limitados, pois alguns

parâmetros como litologia, morfologia, desconsiderando uma escala geológica, são invariáveis no tempo, mas os demais fatores ambientais, como uso e ocupação do solo, clima, podem ser diferentes para cada tempo analisado (VIEIRA, 2007).

As análises heurísticas ou análises feitas a partir de mapeamentos geomorfológicos e /ou geotécnicos caracterizam-se pela grande subjetividade uma vez que depende diretamente do nível de conhecimento do problema pelo pesquisador (GUZZETI et al, 1999). Nestas análises, utilizam-se a combinação de planos de informações como mapas de pedologia, geologia, cobertura vegetal, entre outros, onde são dadas “notas” e “pesos” aos diversos planos, a partir da experiência cognitiva do especialista. De acordo com Xavier-da-Silva & Carvalho Filho (1993), Guzzeti et al (1999), Van Westen (1993), Vieira (2007) a aplicação desses dados pode resultar em dados eficientes conforme o grau equivalente dessa experiência e a distribuição de dados, sendo considerado, portanto um método altamente subjetivo.

Os modelos com bases estatísticas utilizam o princípio da existência de relações funcionais entre os fatores condicionantes e a distribuição dos escorregamentos, ou seja, os fatores que causaram a instabilização em certo local no passado serão os mesmos que gerarão futuros escorregamentos (GUZZETI et al, 1999). Neste método, os critérios de combinação são baseados em fatos, ou seja, padrões mensurados a partir de observações de campo, ao invés da simples experiência do pesquisador. Para isso são necessários extensos bancos de dados representativos dos processos a serem pesquisados.

Na abordagem da análise determinística é utilizada a modelagem matemática que possui em maior ou menor grau, bases físicas, ou seja, que descrevem alguns dos processos e leis físicas naturais, que controlam a estabilidade das encostas. A maioria das pesquisas com este enfoque associa matematicamente os registros de movimentos de massa, modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos (DIETRICH et al, 1992; DIETRICH et al, 1995; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY, 1994; entre outros). A utilização dos modelos em bases físicas ou em processos vem crescendo por permitirem, entre outras coisas, que hipóteses bem específicas possam ser testadas, tanto na escala de encosta quanto na bacia de drenagem inteira (FERNANDES; AMARAL, 2009). Este tipo de modelo não tem interferência direta do operador no resultado, ou seja, a subjetividade está relacionada à escolha dos parâmetros a serem utilizados no modelo e não no seu resultado final, tornando a decisão baseada em processos seguindo as leis da natureza, não delegando às técnicas dos SIG's o poder de decisão (GOMES, 2002; GOMES et al, 2004; GOMES et al, 2005; ZAIDAN, 2009). Existem, todavia, limitações na execução desse tipo de metodologia, como o

conhecimento incompleto que possuímos de muitos processos envolvidos e à dificuldade de obtenção dos dados requeridos pelo modelo, em especial quando aplicados a grandes áreas.

Dentre os métodos destacados, todos possuem vantagens e desvantagens quanto ao seu uso, à sua execução e aos resultados obtidos. Por isso, a escolha de um determinado modelo dependerá dos objetivos da pesquisa, do volume e da qualidade dos dados disponíveis para sua aplicação.

2.3. Modelo SHALSTAB

O SHALSTAB é um modelo matemático determinístico, *steady-state* (de equilíbrio, ou não-transiente) e distribuído, ou seja, permite que o usuário incorpore a variação espacial das propriedades do solo (coesão, ângulo de atrito, espessura, massa específica, entre outras) e da precipitação. Caso seja necessário pode-se utilizar o modelo sem a coesão do solo. Seu desenvolvimento teve início na década de 1990, na Universidade da Califórnia em Berkeley (DIETRICH et al, 1992; DIETRICH et al, 1993; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994), e no final da década de 90, foi lançada uma versão para ser utilizada em ambiente Windows através de uma extensão do software Arcview, na versão 3.x (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

O SHALSTAB combina um *modelo de estabilidade de encosta*, com base na teoria do Fator de Segurança (FS) (MORGENSTERN & SANGREY, 1978 *apud* ZAIDAN, 2009) e na Equação do Talude Infinito, proveniente de Mohr-Coulomb, com um *modelo hidrológico*, baseado no modelo desenvolvido por O’Loughlin (1986), que define um padrão de saturação na topografia baseado na relação entre a área drenada (a), o seu fechamento ou exutório, através do comprimento do contorno ao longo de sua curva de nível (b) e o ângulo da encosta do aterro (θ), dentro de um ambiente SIG (**Figura 4**).

O modelo SHALSTAB, derivado de *SHALlow STABility Model*, é utilizado para previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais rasos, onde estejam bem definidos um plano de transição com forte diminuição do processo de infiltração, como transição solo e rocha, não sendo tão eficaz para aplicações em áreas de solo espessos, áreas com baixa declividade, afloramentos de rocha, e áreas escarpadas (GUIMARÃES, 2000).

Esta metodologia foi aplicada pela primeira vez por Montgomery e Dietrich (1989). Posteriormente os autores do modelo realizaram diversos estudos em várias regiões

desmatadas da costa oeste dos EUA (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998), e observou-se que o desempenho do modelo variava de acordo com a bacia estudada, sendo mais eficiente naquelas com declividades médias e presença de superfícies rasas entre solo e a rocha.

Desde então, a metodologia vem sendo aplicada em diversos países como **Itália** (MEISINA; SCARABELLI, 2007; FIORILLO; GUADAGNO, 2007; SALCIARINI; CONVERSINI, 2007; AVANZI et al, 2009; SANTINI et al, 2009; SORBINO et al, 2010; CERVI et al, 2010), **Argentina** (RAFAELLI et al, 2001), **Nova Zelândia** (CLAESSENS *et al*, 2005), em **Taiwan** (HUANG; KAO, 2006; HUANG et al, 2007; LIN et al, 2009; TAROLLI et al, 2011), **EUA** (GORSEVSKI et al, 2006; MINDER et al, 2009), **Reino Unido** (REID et al, 2007), **Canadá** (GOETZ et al, 2011), sob diversos tipos de resolução, testada e comparada com diversos modelos de previsão.

Atualmente o SHALSTAB vem sendo aplicado também em áreas tropicais. No Brasil, diversos estudos têm sido feitos no estado do Rio de Janeiro (GUIMARÃES, 2000; FERNANDES et al, 2001; GOMES, 2002; GUIMARÃES et al, 2002; FERNANDES et al, 2004; GOMES et al, 2004; GUIMARÃES et al, 2007; GOMES et al, 2008; GOMES et al, 2010; SILVA et al, 2013). No estado de Minas Gerais, foi aplicado nas margens da rodovia 356, no município de Ouro Preto (REDIVO et al, 2004) e no Quadrilátero Ferrífero (RAMOS et al, 2002; GUIMARÃES et al, 2003) e em bacias hidrográficas em áreas urbanas (ZAIDAN, 2009; FARIA, 2010; ZAIDAN; FERNANDES, 2013). Na cidade de São Paulo destaca-se o estudo de Listo e Vieira (2013), também aplicado em uma bacia urbana.

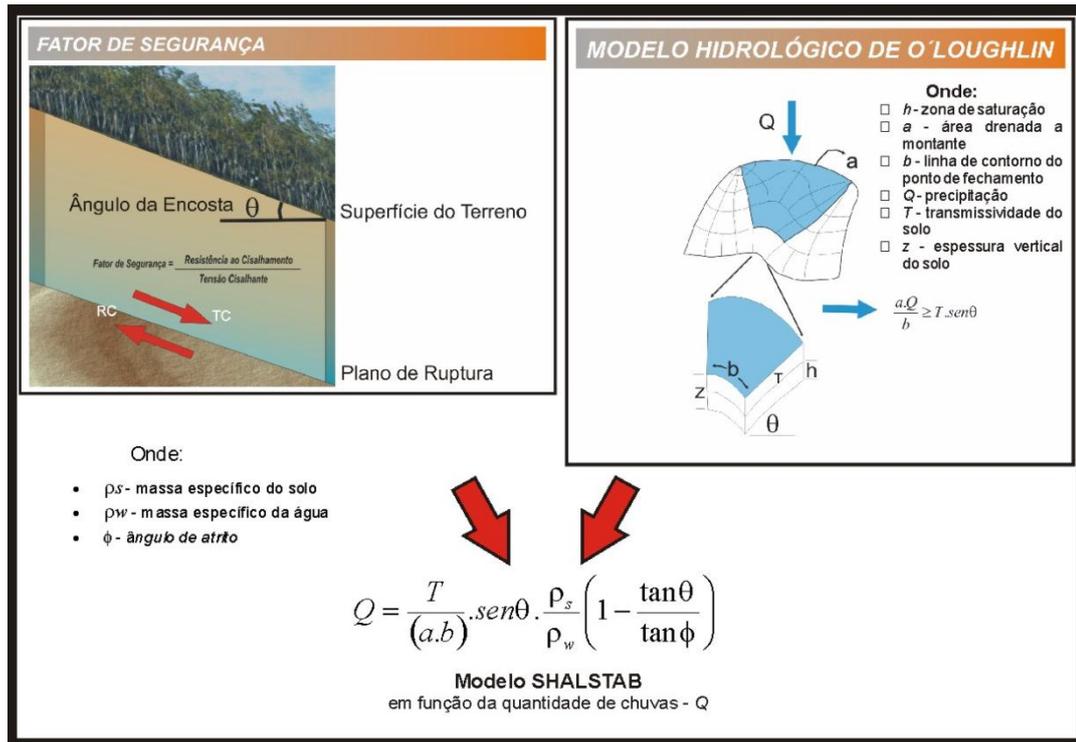


Figura 4: Demonstrativo do Modelo SHALSTAB (DIETRICH; MONTGOMERY, 1994) a partir dos modelos de estabilidade e hidrológico. Fonte: Zaidan, 2009.

2.3.1. Modelo de Estabilidade de Encosta

A estabilidade de uma encosta pode ser expressa pela razão entre as tensões responsáveis pela sustentação do material da encosta (σ) e as tensões responsáveis por sua desestabilização (τ) (COULOMB *apud* CARSON; KIRKBY, 1972) (**Figura 5**). Dessa forma, o Fator de Segurança, F_s , pode ser definido como a razão entre as forças de resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante conforme a equação 1.

$$F_s = \frac{\sum \text{Forças Resistentes}}{\sum \text{Forças Cisalhantes}} \quad (1)$$

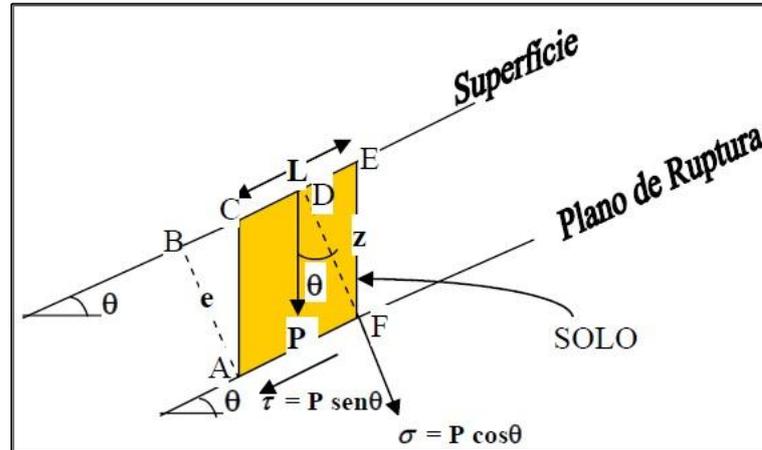


Figura 5: Componentes da força peso relacionadas com as tensões que agem em um escorregamento onde a declividade é θ e P é o peso do solo. Fonte: GUIMARÃES, 2000.

O modelo de estabilidade de encosta é baseado na Teoria do Talude Infinito, elaborada por Mohr-Coulomb (equação 2), que define que a tensão resistente, no momento da ruptura, pode ser expressa pela seguinte fórmula (COULOMB apud CARSON & KIRKBY, 1972):

$$\tau = C' + (\sigma - \mu) \tan \phi \quad (2)$$

Onde:

- τ : tensão tangencial
- C' : coesão efetiva
- σ : tensão normal
- μ : poro-pressão
- ϕ : ângulo de atrito interno do solo

Na análise do Modelo de Talude Infinito, o bloco a ser deslocado está inserido no interior do regolito como um material homogêneo, onde devem ser desprezados os efeitos causados pelo atrito nas laterais e nas extremidades (**Figura 6**), pois a análise é considerada em relação a um plano infinito de solo sobre um plano inclinado através de um contato abrupto, levando em consideração as tensões tangencial e normal (GUIMARÃES, 2000). Com essas constatações é possível afirmar que esse modelo de estabilidade ajusta-se melhor a escorregamentos translacionais rasos de contato abrupto solo-rocha.

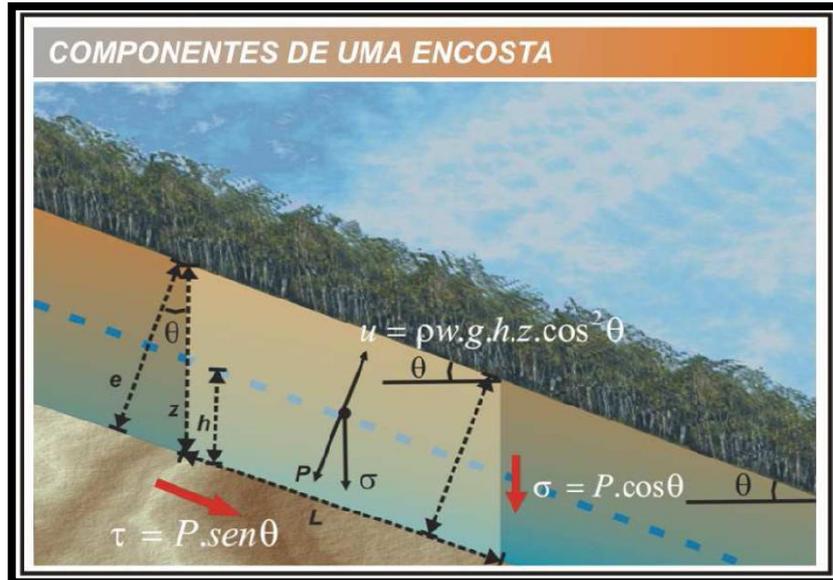


Figura 6: Componentes da força peso relacionadas com as tensões que agem em um escorregamento translacional, demonstrada em um bloco de terreno com seu plano de ruptura definido. Fonte: Zaidan, 2009.

Onde:

- P: peso do bloco
- z: espessura vertical do solo
- e: espessura perpendicular do solo
- L: comprimento do bloco
- ρ_s : massa específica do solo
- ρ_w : massa específica da água
- h: altura da coluna da água
- g: aceleração da gravidade
- θ : declividade

Com base no esquema proposto na figura 6, podemos extrair e relacionar as principais forças intrínsecas em um bloco de solo, como por exemplo, a importante relação entre as tensões tangencial ou cisalhante e a tensão normal. Se associarmos essas duas tensões à poro-pressão e à equação de Mohr-Coulomb teremos (equação 3):

$$\begin{aligned} \tau &= \rho_s g z \cos \theta \sin \theta && \text{(tensão tangencial)} \\ \sigma &= \rho_s g z \cos^2 \theta && \text{(tensão normal)} \\ u &= \rho_w g h \cos^2 \theta && \text{(poro-pressão)} \\ \tau &= C' + (\sigma - u) \tan \phi && \text{(Mohr- Coulomb)} \end{aligned}$$

$$\rho_s g z \cos \theta \sin \theta = C' + (\rho_s g z \cos^2 \theta - \rho_w g h \cos^2 \theta) \tan \phi \quad (3)$$

Essa equação pode ainda ser desenvolvida em função da razão de h/z , que consiste na proporção da coluna de solo saturado. Neste momento, o parâmetro coesão poderá ou não ser considerado como mostrado nas equações 4 e 5, respectivamente:

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad (4)$$

$$\frac{h}{z} = \frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \quad (5)$$

2.3.2. Modelo Hidrológico

O modelo hidrológico (*steady-state*) utilizado pelo SHALSTAB considera os fluxos superficiais constantes e está baseado nos estudos desenvolvidos por Beven e Kirkby (1979) e O'Loughlin (1986). Este modelo busca representar, para um estado de equilíbrio hidrológico o comportamento de h/z durante uma chuva, onde h é a altura da coluna d'água no subsolo e z a espessura do solo. De acordo com a **figura 7**, para que exista uma zona de saturação é necessário que o produto entre a área drenada a montante (a) e a precipitação (Q) que passa por um elemento de contorno de comprimento (b), seja maior que o produto da transmissividade do solo (T) e o seno do ângulo da encosta (θ):

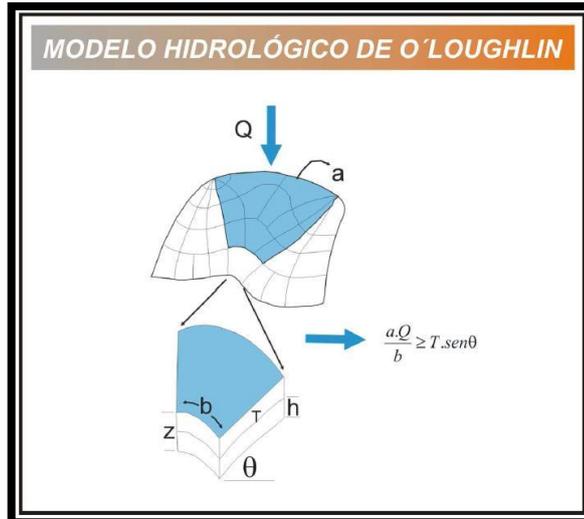


Figura 7: Modelo Hidrológico de O'Loughlin. A área sombreada (área de contribuição) refere-se à área drenada acumulada a montante (a) que passa pelo comprimento de contorno unitário (b). Fonte: O'Loughlin (1986) apud Zaidan (2009).

Já o padrão de h/z , para uma dada chuva, é determinado por uma razão hidrológica Q/T , que representa a magnitude da precipitação (Q) relativa à capacidade de transmissividade do solo (T) a jusante, o que significa que um valor de Q relativo a T levará provavelmente à saturação (equação 6):

$$\frac{h}{z} = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} \quad (6)$$

2.3.3. Combinação Entre o Modelo de Estabilidade de Encosta e o Modelo Hidrológico

A combinação entre o modelo de estabilidade de encosta e o modelo hidrológico pode se dar de duas formas: a primeira contempla todas as variáveis do modelo e a segunda desconsidera o fator coesão do solo (C'). Assim, a **figura 8** mostra o resultado da combinação entre o modelo de estabilidade de encosta e o modelo hidrológico considerando a coesão do solo:

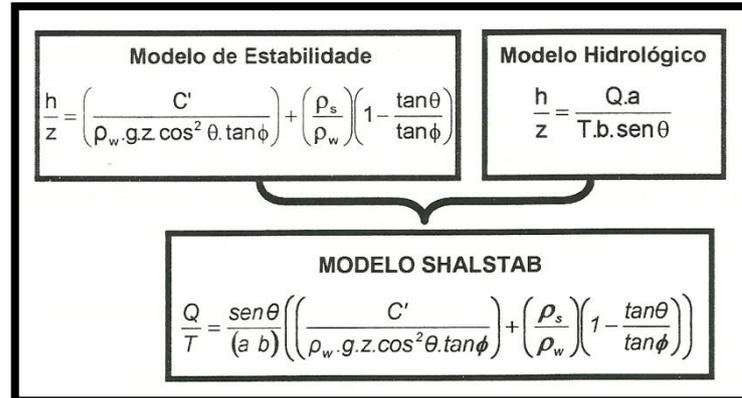


Figura 8: Modelos de estabilidade e hidrológico em função da razão de h/z. O resultado desta combinação é o modelo SHALSTAB. Fonte: Montgomery e Dietrich (1994).

A partir da equação final do modelo SHALSTAB, é gerado para cada célula (*pixel*) da grade (*grid*), dentro de um ambiente SIG, um valor de susceptibilidade a escorregamento raso, gerando assim o mapa de susceptibilidade a escorregamentos para a área estudada (bacia hidrográfica).

A segunda forma de combinação do modelo de estabilidade de encosta e do modelo hidrológico é desconsiderar o fator coesão do solo. Assim o modelo SHALSTAB pode ser escrito da seguinte forma (**Figura 9**):

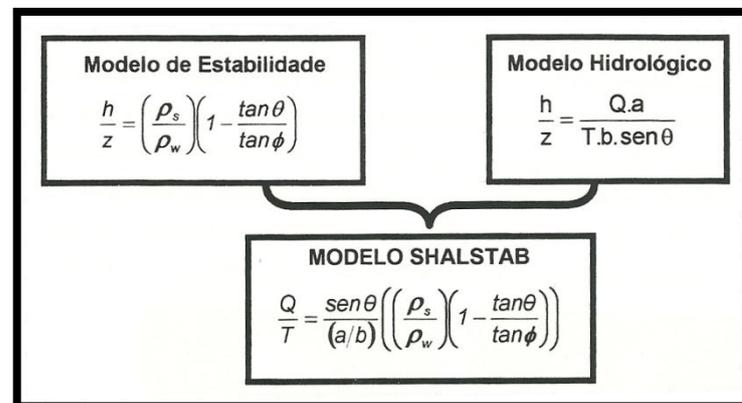


Figura 9: Modelos de estabilidade (SEM COESÃO) e hidrológico em função da razão de h/z. O resultado desta combinação é o modelo SHALSTAB sem coesão. Fonte: Montgomery e Dietrich (1994).

O modelo apresentado na figura anterior, apesar de não considerar a coesão do solo tem apresentado resultados satisfatórios, como ressaltado por Guimarães (2000), onde de acordo com o autor, apresentou resultados melhores que outras combinações do modelo.

2.3.4. Classes de Estabilidade Geradas pelo Modelo SHALSTAB

As classes geradas pelo modelo SHALSTAB são sete e seguem a condição entre a razão área drenada e unidade de contorno (a/b) e, a razão hidrológica (Q/T) (**Tabela 1**):

Tabela 1: Quadro representativo das classes de estabilidade geradas pelo modelo SHALSTAB.

CLASSE DE ESTABILIDADE	CONDIÇÃO
(A) Incondicionalmente Estável e saturado	$a/b > \left(\frac{T}{Q}\right) \sin \theta$ e $\tan \theta \leq \tan \phi \left(1 - \rho_w/\rho_s\right)$
(B) Incondicionalmente Estável e não saturado	$a/b < \left(\frac{T}{Q}\right) \sin \theta$ e $\tan \theta \leq \tan \phi \left(1 - \rho_w/\rho_s\right)$
(C) Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{T}{Q} \sin \theta$ $a/b < \left(\frac{T}{Q}\right) \sin \theta$ e $\tan \phi \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) < \tan \theta < \tan \phi$
(D) Instável e não saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{T}{Q} \sin \theta$ $a/b < \left(\frac{T}{Q}\right) \sin \theta$ e $\tan \phi \left(1 - \rho_w/\rho_s\right) < \tan \theta < \tan \phi$
(E) Instável e saturado	$\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \frac{T}{Q} \sin \theta$ $a/b > \left(\frac{T}{Q}\right) \sin \theta$ e $\tan \phi \left(1 - \rho_w/\rho_s\right) < \tan \theta < \tan \phi$
(F) Incondicionalmente Instável e não saturado	$\tan \theta > \tan \phi$ e $a/b < \left(\frac{T}{Q}\right) \sin \theta$
(G) Incondicionalmente Instável e saturado	$\tan \theta > \tan \phi$ e $a/b > \left(\frac{T}{Q}\right) \sin \theta$

Fonte: Dietrich e Montgomery, 1998.

2.4. A Bacia do Córrego do Yung no contexto da cidade de Juiz de Fora

A Bacia do Córrego do Yung, foco deste estudo, está localizada na Região da Zona da Mata Mineira, no município de Juiz de fora e é afluente pela margem esquerda do Rio Paraibuna. Localizada na porção leste de Juiz de Fora, esta bacia ocupa uma área de aproximadamente 19,5 km² e abrange os bairros Vitorino Braga, Santos Anjos, Santa Cândida, Três Moinhos, Bom Jardim, Linhares, Grajaú, Alto Grajaú e Vila Alpina (**Figura 10**).

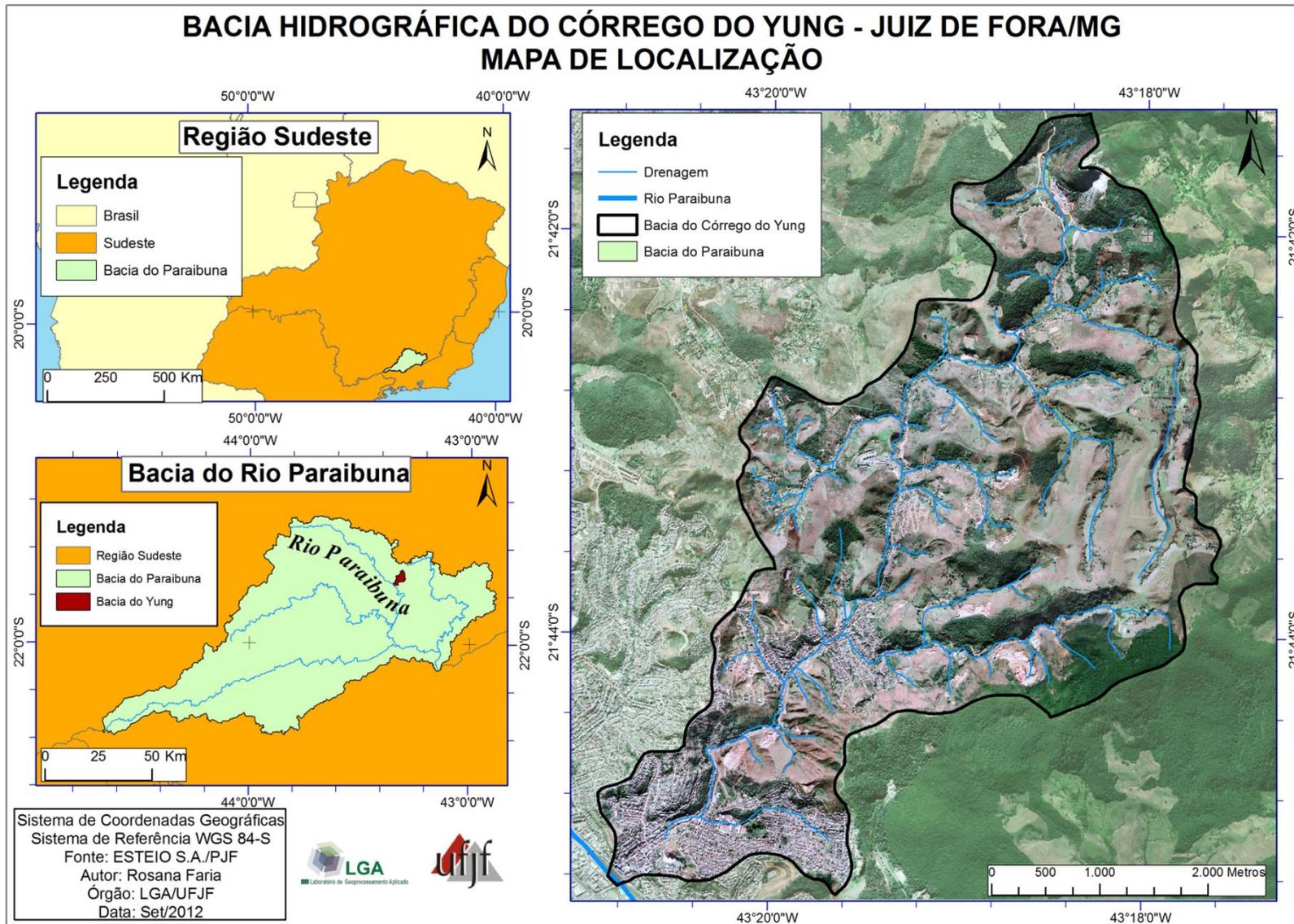


Figura 10: Mapa de localização da Bacia do Córrego do Yung em Juiz de Fora – MG no contexto da região sudeste.

A Bacia do Córrego do Yung, assim como a cidade de Juiz de Fora, apresenta as maiores temperaturas e precipitações pluviométricas nos meses de outubro a abril, já nos meses de maio a setembro as temperaturas são mais baixas e com menor presença de chuvas. Nesta região predomina o clima mesotérmico, com verões quentes e chuvosos, podendo ser definido também como Tropical de Altitude. De acordo com a classificação de W. Köppen, o vale do Rio Paraibuna pode ser classificado como Cwa (*C: warm temperate, w: winter dry, a: hot summer*) e as partes mais elevadas da cidade como Cwb (*C: warm temperate, w: winter dry, b: warm summer*). A precipitação total na cidade, no ano de 2011, foi de 1677,3mm sendo que, o mês de dezembro apresentou o maior volume de precipitação, 345,4mm. Em relação às médias das temperaturas, o mês que apresentou a maior temperatura máxima foi o mês de fevereiro, 30°C e o mês mais frio foi junho com 12,26°C (INMET, 2012).

A correlação da ocorrência dos movimentos de massa com a dinâmica climática tem sido foco de grandes discussões entre os pesquisadores. Na Bacia do Córrego do Yung este tipo de correlação foi abordado por Rinco (2003), que afirma que as instabilizações nas vertentes da bacia são determinadas pela saturação progressiva do solo, ocasionadas principalmente pelo acúmulo de chuva em dias consecutivos. Em um estudo de caso, a autora constatou que totais acumulados de 120 a 174 mm de chuvas em 4 dias (30,0 a 43,5 mm por dia), apresentam 28% de probabilidade de deflagrar os processos.

As características geomorfológicas da Bacia do Córrego do Yung são também um fator determinante na deflagração dos movimentos de massa. De acordo com o RADAMBRASIL, a bacia encontra-se inserida no domínio das Faixas de Dobramentos Remobilizados na região da Mantiqueira Setentrional, na unidade geomorfológica das Serras da Zona da Mata Mineira. O relevo na área de estudo é caracterizado como ondulado a montanhoso, com topos arredondados, e as vertentes são classificadas como convexas e côncavo-convexas. As características das vertentes associadas à enorme variação altimétrica, 1042m nos topos e 674m nos vales, tem grande influência na alta incidência de movimentos de massa na bacia, uma vez que contribui para a convergência do fluxo d'água e no aumento da energia e velocidade da água ao longo da encosta (**Figura 11**).

Em relação à geologia, o sul da área de estudo é composto por rochas da Megassequência Andrelândia, (sillimanita–granada–biotita–gnaisse) com intercalações de quartizito impuro, rocha calcissilicática, anfíbolito e gondito) e com orientação norte-sul as rochas classificadas como biotita–gnaisse bandado, com intercalações de quartizito impuro, gnaisse quartzoso, rocha anfíbolítica e, subordinadamente, granada gnaisse e rocha

calcissilicática. Há ainda rochas do Complexo da Mantiqueira, classificadas como hornblenda-biotita gnaisse tonalítico a granítico, rocha anfibolítica. Por fim, a oeste da bacia há presença de rochas do Complexo Juiz de Fora, como ortogranulito enderbítico a charnockítico, com tipos gabróicos subordinados (CODEMIG, 2002). Esses compartimentos geológicos são caracterizados por rochas metamórficas muito antigas, duras e resistentes, no entanto, a presença de falha indiscriminada e de empurrão ao norte e a oeste da bacia contribui para o aumento da instabilidade da área.

De acordo com Carvalho (2010), os solos da Bacia do Córrego do Yung são constituídos por Latossolos Vermelho-Amarelo (álico e distrófico) e ocupam os topos e as encostas menos íngremes. Nas encostas mais íngremes são encontrados os Neossolos e Cambissolos e em alguns casos afloramentos rochosos. Já os fundos de vales são compostos por Gleissolos Háplicos e Fluvissolos, provenientes de material fluvial. A textura dos latossolos na região varia de argilosa a muito argilosa.

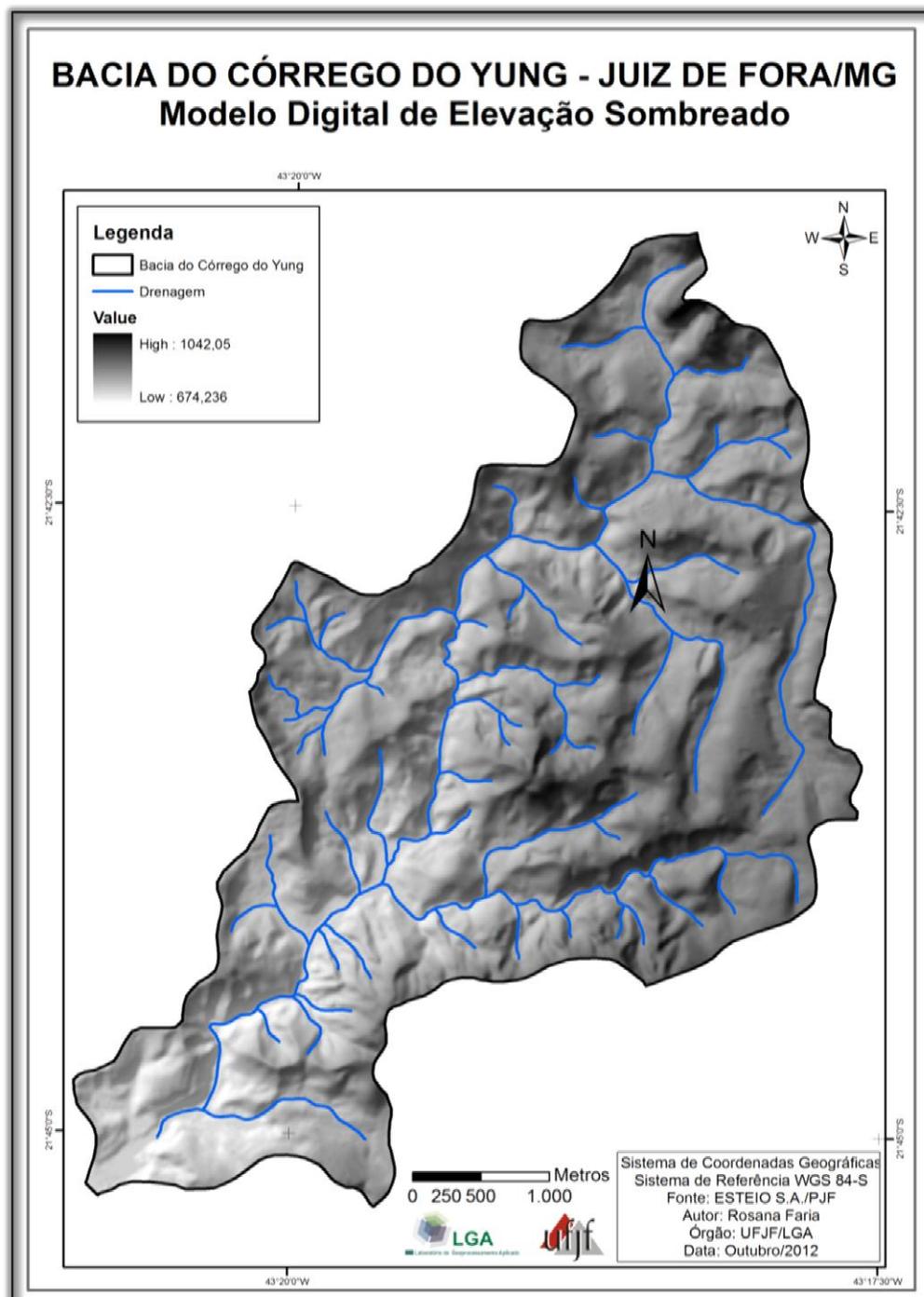


Figura 11: Modelo Digital de Elevação Sombreado da Bacia do Córrego do Yung.

Em se tratando da cobertura e uso, a Bacia do Córrego do Yung é caracterizada por uma ocupação bastante adensada. Essa ocupação é configurada principalmente por assentamentos subnormais/precários, ou seja, ocupações inadequadas e até mesmo invasões. A extração de recursos minerais na área de estudo, principalmente o saibro, foi durante muito tempo uma importante fonte de recursos para construção civil e industrial. Por outro lado, a

exploração desses recursos trouxe também diversos prejuízos ambientais e sociais para os bairros vizinhos, como por exemplo, a alteração na qualidade das águas do córrego (na forma de assoreamento, poluição e inundação), alteração nas formas das vertentes e nos fluxos superficiais de água (**Figura 12**).

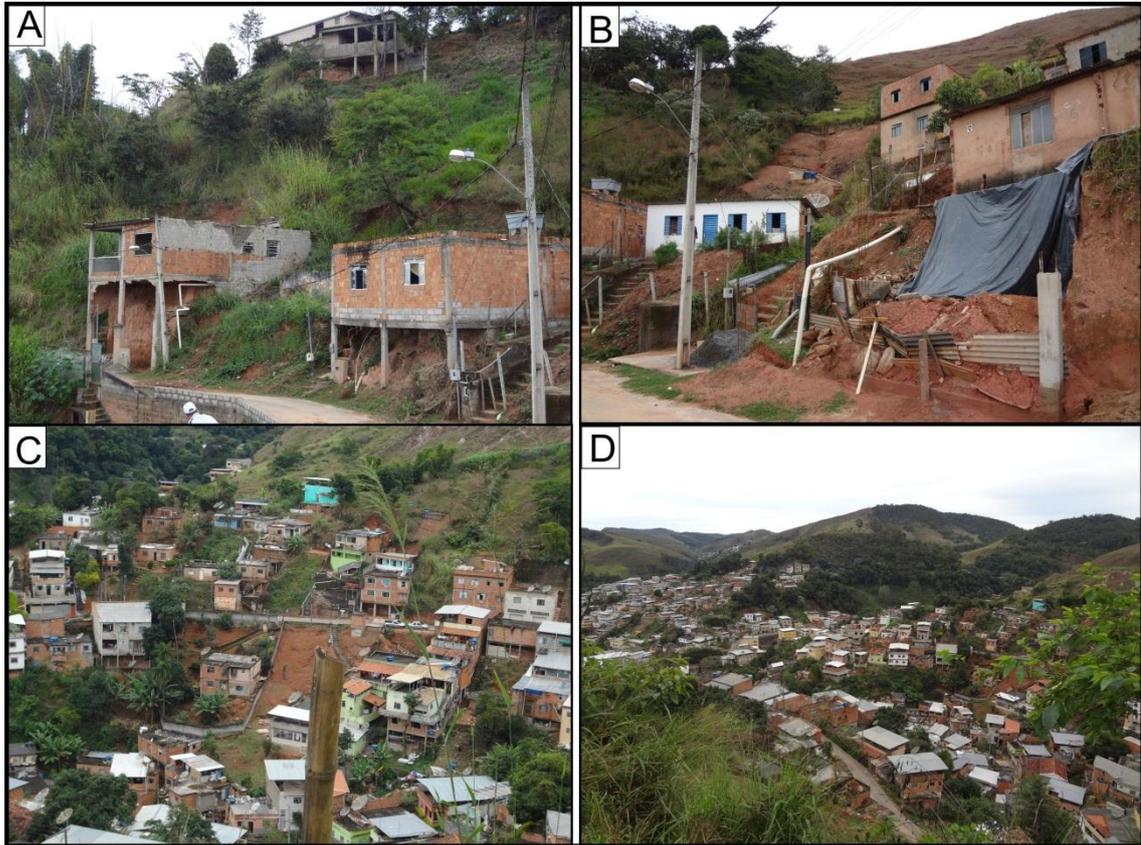


Figura 12: Tipos de ocupação predominante na Bacia do Córrego do Yung. Na imagem A é possível perceber um exemplo de uma ocupação irregular com base das edificações já destruídas pela movimentação do terreno. Na imagem B percebe-se algumas tentativas de contenção da encosta em uma área já movimentada. Nas imagens C e D é possível perceber que a ocupação se estende desde as porções mais planas do terreno até às encostas mais íngremes.

Se associarmos todas as características físico-ambientais e sociais da bacia do Córrego do Yung apresentadas anteriormente, ficarão claros os motivos desta bacia ser considerada pela Defesa Civil de Juiz de Fora a mais problemática no município. De acordo com este órgão governamental, os movimentos de massa podem ser considerados um dos piores problemas enfrentados pela população local, uma vez que já foram registradas mortes relacionadas a esse evento. Só no período de 2002-2010, a Defesa Civil registrou um total de 1028 pontos de movimentos de massa na bacia do Córrego do Yung. Se considerarmos os danos causados pelos reflexos destes eventos, como trincas e rachaduras nas casas, ameaças

de escorregamentos entre outros, esse número sobe para mais de 2200 registros de ocorrências. Vale ressaltar que esses números referem-se não apenas aos movimentos de massa, mas, também aos danos e reflexos oriundos desses eventos. Neste mesmo período a cidade de Juiz de Fora, registrou cerca de 19000 ocorrências de movimentos de massa, ou seja, do total de registros da cidade, cerca de 11% foi na Bacia do Córrego do Yung, bacia esta que tem somente 4,5% da área urbana e 1,3% da área de toda cidade.

Com base nos dados das características físicas, sociais e registros de movimentos de massa na Bacia do Córrego do Yung, é notável a necessidade desse estudo de risco a fim de que possa se orientar a ocupação de novas áreas que não representem risco de movimentos de massa e uma possível readequação das áreas já ocupadas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir foram descritos os procedimentos necessários para a elaboração do Zoneamento de Áreas de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung, passando pelas seguintes etapas: análise da cobertura e uso da terra e análise da instabilidade a movimentos de massa na Bacia do Córrego do Yung.

3.1. Análise da Cobertura e Uso da Terra na Bacia do Córrego do Yung

Na elaboração do Mapa de Cobertura e Uso da Terra na Bacia do Córrego do Yung foi utilizado o levantamento aerofotogramétrico de 2007, realizado pela ESTEIO S.A., com resolução de 1 metro por pixel e levantamento topográfico por LIDAR, também com 1 metro de resolução, adequados para trabalhos na escala de 1:2000. Todo este material foi cedido pela Defesa Civil/PJF. Este mapa foi criado a partir da análise visual das imagens onde foram distinguidas as seguintes classes: vegetação rasteira ou pastagem, vegetação mista (rasteira e de médio porte), vegetação arbórea ou arbustiva, corpo d'água, área agrícola e áreas edificadas.

Para a determinação das classes de cobertura e uso da terra foi utilizado o Manual de Uso da Terra, (IBGE, 2006), buscando priorizar a necessidade do conhecimento das áreas já ocupadas, principalmente as áreas edificadas, uma vez que são nessas áreas onde podem se localizar os maiores danos em caso de ocorrência de movimentos de massa e, portanto, as possíveis áreas de risco. Para execução do mapeamento de cobertura e uso foi utilizado o software Arcgis.

3.2. Análise de Instabilidade a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung

Para a análise da instabilidade utilizou-se um modelo matemático determinístico para se prever as áreas susceptíveis a movimentos de massa na Bacia do Córrego do Yung. Para tal, foi necessária a elaboração de um MDE (modelo digital de elevação) através das curvas de nível, com equidistância de 1 metro, do levantamento aerofotogramétrico de 2007 e perfilhamento a laser LIDAR, realizado pela empresa ESTEIO S.A. e cedido pela Defesa Civil/PJ. A execução desse procedimento foi através do módulo de análise espacial do ArcGis *Topo to Raster*.

Em seguida, esses dados foram trabalhados na plataforma ArcView através do módulo SHALSTAB (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998). Em relação aos parâmetros de solo foram utilizados os valores retirados de estudos regionais, ou seja, 45° para o ângulo de atrito interno do solo e 1800 kg/m³ para a massa específica do solo (ZAIDAN; FERNANDES, 2009). Neste estudo foi desconsiderada a coesão. Foram ainda gerados mapeamentos da declividade e área de contribuição da bacia, ambos obtidos através dos módulos *slope* e *contributing area*, do modelo SHALSTAB.

O resultado obtido a partir do processamento dos dados anteriores foi o Mapeamento de Susceptibilidade a Movimentos de Massa da Bacia do Córrego do Yung. Para a validação dos resultados desse mapeamento foi utilizado um inventário de cicatrizes de movimentos de massa, obtidos através da imagem aerofotogramétrica de 2007, obtida através do banco de imagens de fotografias aéreas da Prefeitura de Juiz de Fora e da CEMIG. Após vários testes, para um melhor funcionamento do modelo, adotou-se a resolução espacial de 2 metros por pixel.

3.3. Análise do Zoneamento de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung

Para a elaboração do Zoneamento de Risco à Movimentos de Massa da Bacia do Córrego do Yung foi realizado o cruzamento das informações contidas no Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra Bacia do Córrego do Yung e no Mapeamento de Susceptibilidade a Ocorrência de Movimentos de Massa, gerado através do modelo SHALSTAB. Esse procedimento foi efetuado no software ArcGis através da multiplicação dos dois mapas

(cobertura e uso da bacia e do mapeamento de susceptibilidade a movimentos de massa) seguido de um ordenamento das novas classes geradas no novo mapa.

Inicialmente para determinar o potencial de risco foi preciso ponderar os 6 tipos de uso da terra, pois a existência e o grau do risco está intrinsecamente relacionado à danos ou à perda econômica (CERRI; AMARAL, 1998). Dessa forma, o peso maior foi dado às porções da bacia hidrográfica classificadas como *Áreas Edificadas* por se entender que caso ocorresse algum evento de movimento de massa nessa classe o dano seria maior, uma vez que são áreas ocupadas por edificações comerciais e residenciais. A classe *Área Agrícola* foi considerada a segunda classe com o maior potencial de risco pois compreende áreas com cultivo de hortaliças e portanto gera renda aos produtores. A classe *Vegetação Rasteira ou Pastagem* foi considerada a classe com o terceiro maior potencial de risco uma vez que os possíveis danos iriam atingir apenas áreas que se destinam à alimentação de gado ou repouso da terra. Já as classes *Vegetação Mista (rasteira e de médio porte)*, *Vegetação Arbórea ou Arbustiva* e *Corpo d'água* foram consideradas as classes com o menor peso por se tratar de áreas onde caso ocorresse algum movimento de massa causariam poucos prejuízos econômicos.

Em relação ao Zoneamento de Susceptibilidade a Movimentos de Massa foi feita uma reclassificação a fim de se organizar as classes em *Alta* (-10 a -3,1), *Média* (-3,1 a -2,5), *Baixa* (-2,5 a 9,8) e *Estável* (9,8 a 10,1). O objetivo dessa nova classificação de susceptibilidade foi evidenciar as áreas classificadas com Alta suscetibilidade uma vez que estas são determinantes para a classificação de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego Yung.

O resultado foi um mapeamento classificatório de análise do Risco a Movimentos de Massa da Bacia do Córrego do Yung, na escala de 1:2000, com resolução espacial de 2 metros.

4. RESULTADOS

4.1. Análise do Mapeamento de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung

A Bacia do Córrego do Yung localizada na região leste de Juiz de Fora, se encontra atualmente em processo de expansão urbana. Conforme pode ser observado através da imagem aerofotogramétrica, o crescimento das áreas edificadas (áreas residenciais e comerciais) na bacia se distribui a partir da porção sul indo em direção à porção norte acompanhando a rede de drenagem principal, o Córrego do Yung. Percebe-se ainda que na porção norte da Bacia, as áreas edificadas se encontram mais esparsas e em porções do terreno com relevo mais suave, se comparadas às edificações da porção sul (**Figura 13**).

Percebe-se ainda que distribuído ao longo de toda a bacia há a presença de alguns fragmentos de mata, principalmente nas porções leste e central. Observa-se ainda a presença de alguns poucos fragmentos de mata na porção sul da bacia, em áreas geralmente de alto declive, e portanto, de difícil acesso para a ocupação urbana. Também é evidente através da cobertura aerofotogramétrica, a presença de grandes áreas desocupadas e aqui classificadas como áreas compostas por vegetação rasteira ou pastagem, principalmente na porção leste da bacia.

A fim de auxiliar na detecção de áreas de risco foram definidas 6 classes de uso para o Mapeamento de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung: vegetação rasteira ou pastagem, vegetação mista (rasteira e de médio porte), vegetação arbórea ou arbustiva, corpo d'água, área agrícola e áreas edificadas. Essas classes estão representadas através do Mapa de Cobertura e Uso da Terra da Bacia do Córrego do Yung.

A classe mais frequente na bacia foi a **classe vegetação rasteira ou pastagem** que corresponde às áreas destinadas à pecuária bovina extensiva e composta por vegetação secundária. Esta classe é predominante na porção norte da bacia podendo ser encontrada em menor quantidade na porção sul, entre as áreas edificadas. De acordo com o **gráfico 2**, esta classe corresponde a 58,5% da área total da bacia ou 11,39 km².

A segunda classe com maior frequência na bacia foi a **classe vegetação arbórea ou arbustiva** com cerca de 15,2% da área total da bacia ou 2,96 km². Esta classe é composta por vegetação secundária e em algumas áreas há a exploração de madeira, em um sistema com baixo uso de tecnologia e insumo (regime familiar). Essa classe é encontrada com maior

frequência nas áreas próximas aos topos de morro, em áreas com altas declividades e geralmente próximas a divisores de águas. Na Bacia do Córrego do Yung, esta classe é encontrada principalmente nas proximidades do limite leste da bacia e na sua porção norte. Mais esparsamente, pode ser encontrada nas proximidades das áreas edificadas da porção sul, em partes do relevo mais íngremes, onde a edificação não foi possível (**Figura 14**).

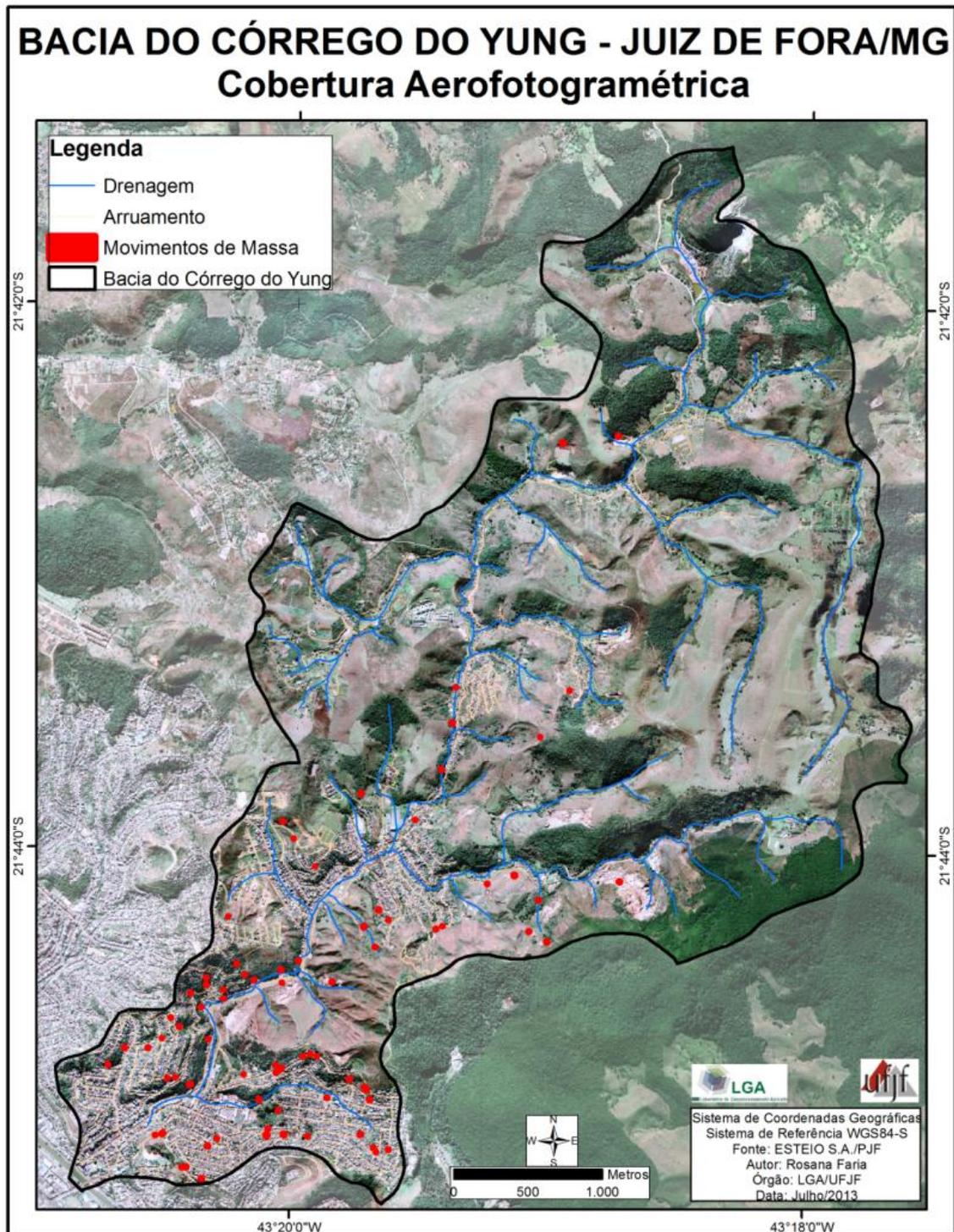


Figura 13: Imagem aerofotogramétrica da Bacia do Córrego do Yung. Percebe-se na imagem a concentração das áreas edificadas na porção sul da bacia e na região leste e central alguns fragmentos de vegetação arbórea.

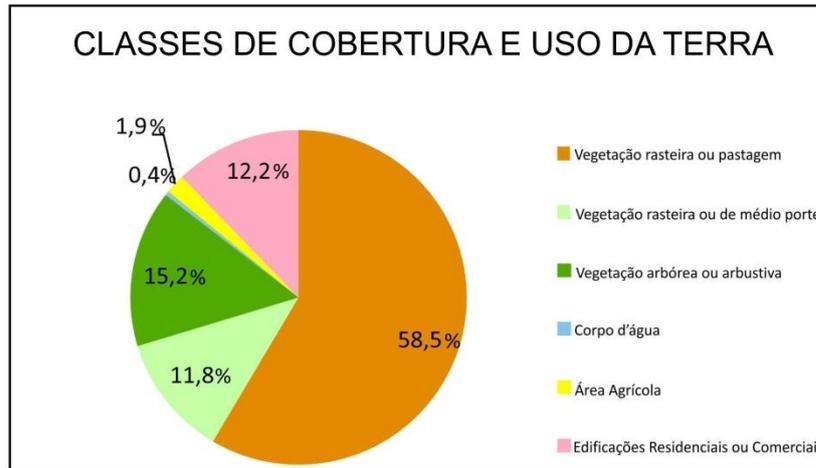


Gráfico 2: Gráfico representativo das classes de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung. Percebe-se que a classe predominante é a classe vegetação rasteira ou pastagem e que apenas 12,2% da área total da bacia é edificada.

A classe **áreas edificadas** corresponde a cerca de 12,2% da bacia ou 2,34 km². Essa categoria de uso é encontrada em grande concentração na porção sul da bacia, onde se encontra a maior parte das edificações residenciais e comerciais. As características das edificações variam ao longo da bacia, sendo mais comum as edificações com dois ou mais pavimentos localizadas na porção sul. Essas edificações na porção sul da bacia são destinadas ao uso comercial e/ou residencial e localizam-se desde às áreas mais planas da bacia às encostas mais íngremes. Já em direção à porção norte as edificações predominantes são compostas por um pavimento e em áreas mais planas do terreno (**Figura 15**).

A **classe vegetação rasteira ou de médio porte** é composta por áreas sem uso identificado e com presença de uma vegetação rasteira esparsa e em alguns casos vegetação de médio porte. Estas áreas estão geralmente associadas às áreas de pastagens e áreas de vegetação arbórea. Nota-se então que muitas destas áreas são resultantes da pressão antrópica ao longo dos anos, quando a vegetação original foi removida para o cultivo do café. Dada a proximidade das áreas de pastagem é possível encontrar nessa classe, a presença de alguns animais. Esta classe encontra-se distribuída por 2,3 km² o que corresponde a 11,8% da área total da Bacia do Córrego do Yung (**Figura 16**).

A **classe área agrícola** foi encontrada principalmente na porção oeste da bacia e em menor concentração nas porções leste e norte. Essas áreas correspondem às áreas de cultivo temporário (alface, couve, entre outros) e em menores quantidades, à culturas alimentares de subsistência. Dadas às características do cultivo, essas classes ocupam porções do terreno mais planas a suave onduladas. Essa classe corresponde a cerca de 1,9% da bacia em uma área de aproximadamente 0,37 km².

Finalmente, as áreas classificadas como **corpo d'água** correspondem à pequenos reservatórios com captação para o abastecimento das áreas agrícolas, e algumas áreas para a pesca extrativa artesanal. Esta classe corresponde cerca de 0,4% da área total da bacia ou 0,09 km².

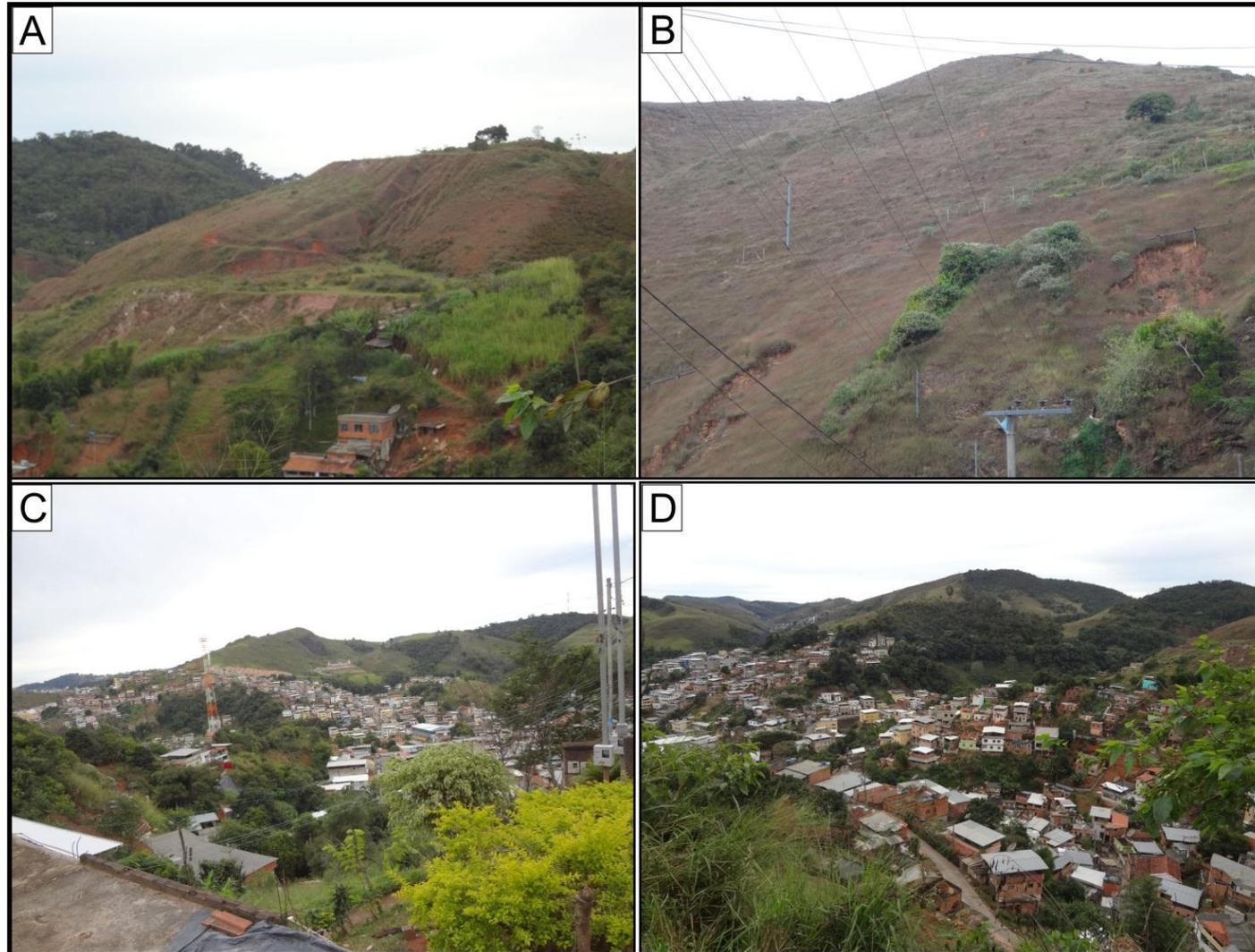


Figura 14: Exemplos de algumas áreas de pastagem e vegetação arbórea ou arbustiva na Bacia do Córrego do Yung. Na Imagem A percebe-se que a ausência de vegetação contribui para a aceleração de processos erosivos e na imagem B observam-se pequenos pontos de movimentos de massa causados principalmente pela remoção da cobertura vegetal. Nas imagens C e D percebem-se algumas áreas com presença de vegetação arbórea ou arbustiva próximas aos topos de morros e em áreas com alto declive e grande influência da pressão antrópica sobre essas pequenas áreas vegetadas.



Figura 15: Exemplos de algumas áreas edificadas na Bacia do Córrego do Yung. A imagem A mostra vista panorâmica da porção sul da bacia onde é possível perceber a predominância das edificações compostas por 2 ou mais pavimentos. Na imagem B percebe-se que o padrão das edificações nas encostas é menor quando comparados às edificações nas áreas mais planas. Já na imagem C percebe-se a falta evidente de planejamento urbano adequado com moradias distribuídas aleatoriamente ao longo da encosta.

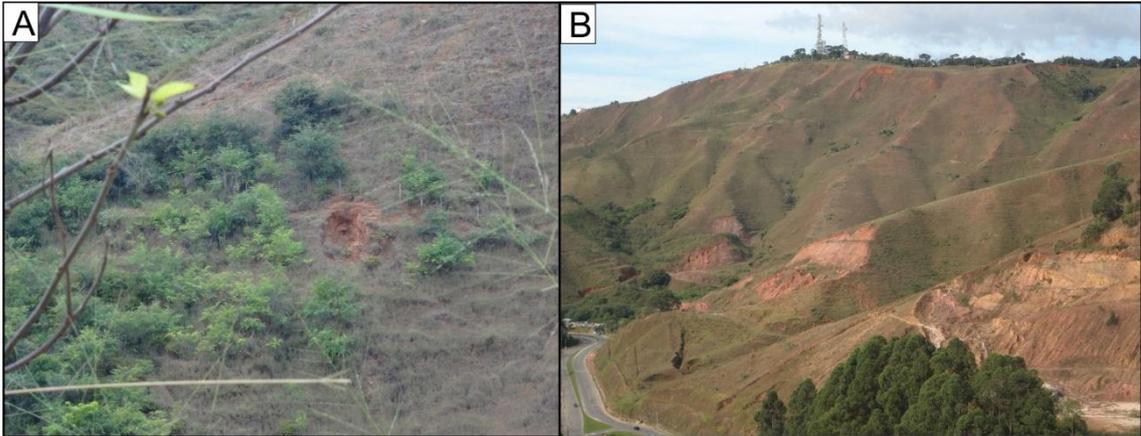


Figura 16: Exemplos de algumas áreas com vegetação mista (rasteira e de médio porte). Nota-se que a presença desse tipo de vegetação indica uma tentativa de recuperação da paisagem devido ao desmatamento local.

Em síntese, percebe-se através do Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra que a Bacia do Córrego do Yung encontra-se em processo de expansão, sendo o vetor de crescimento direcionado da porção sul para à porção norte (**Figura 17**). Ainda foi possível perceber que a ocupação da porção sul se estende desde as áreas mais planas da bacia, próximas ao canal principal, até as encostas mais íngremes do terreno, locais onde se concentram o maior número de ocorrências de movimentos de massa. Outro destaque mostrado no mapeamento são as extensas áreas desocupadas, classificadas como áreas de pastagem, concentradas na porção leste e norte da bacia. Estas porções da bacia por se localizarem em um relevo suave, com baixo declive, indica que futuramente esta área pode se tornar objeto da especulação imobiliária uma vez que permite a ocupação sem grandes investimentos estruturais.

Em relação às áreas agrícolas da bacia percebe-se que apesar de representarem apenas 1,9% da área total, essas áreas são de grande importância para parte do abastecimento dos pequenos mercados na cidade de Juiz de Fora, como as feiras livres. Em relação às áreas com cobertura vegetal, percebe-se que a intensa pressão antrópica na porção sul da bacia fez com que, atualmente, restassem apenas alguns fragmentos dessa classe. Sendo assim, a maior concentração dessa classe foi observada na porção leste e norte da bacia.

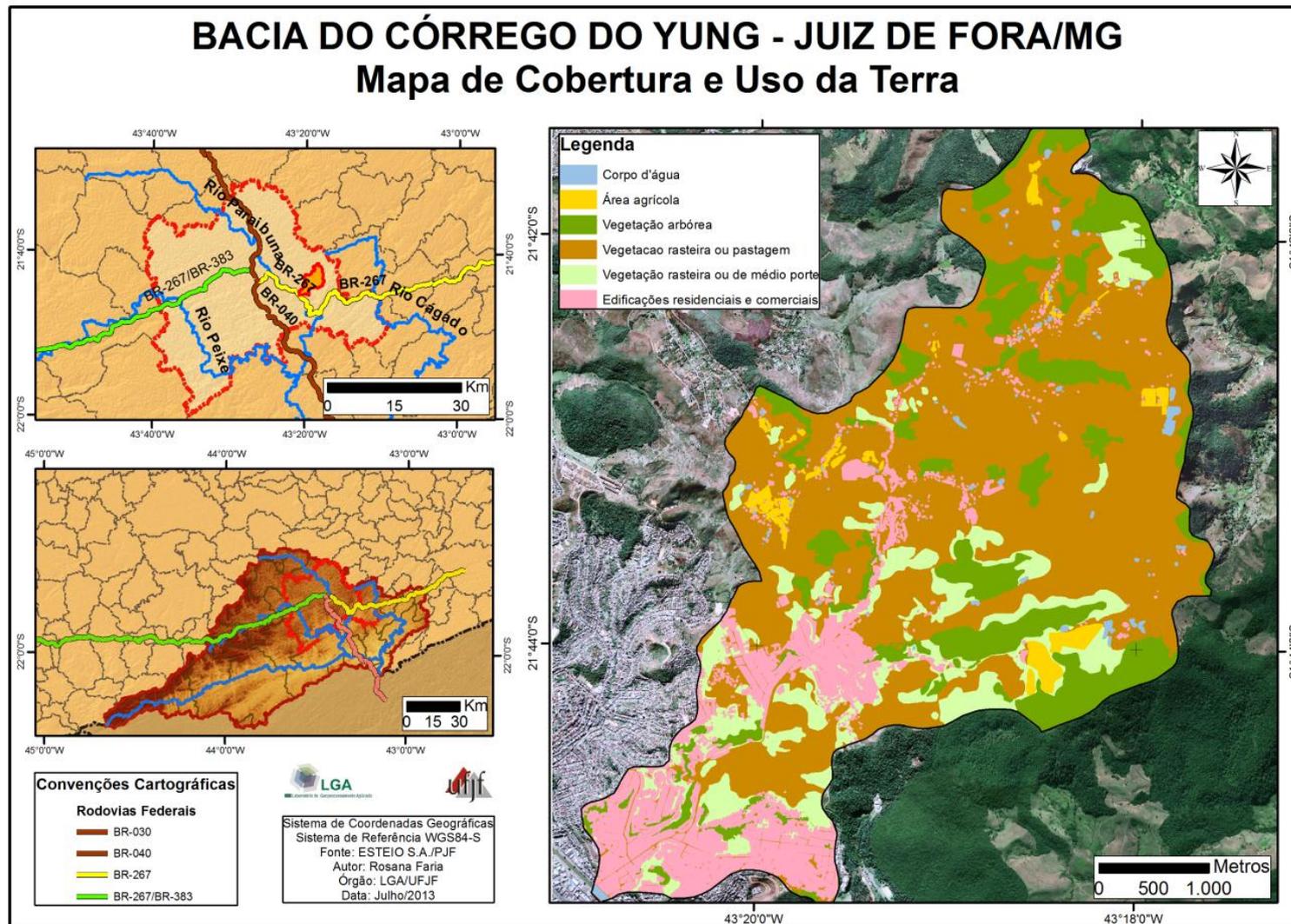


Figura 17: Mapa de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung. Percebe-se a predominância das classes de vegetação rasteira ou pastagem nas porções leste e norte da bacia e a concentração das áreas edificadas na porção sul.

4.2. Análise de Instabilidade a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung

Os resultados a seguir referem-se à Análise da Instabilidade a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung na escala de 1:2000 . Para tal serão apresentadas as análises da distribuição e frequência das classes de declividade e área de contribuição, relacionadas à ocorrência das cicatrizes de movimentos de massa. Por fim, será apresentada uma análise da susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa e sua validação com base no mapeamento de cicatrizes de escorregamentos.

4.2.1. Distribuição e frequência das classes de declividade e cicatrizes de escorregamentos

Nesta análise verificou-se a frequência das classes de declividade associadas ao mapeamento de cicatrizes de escorregamentos.

Em relação às classes de declividade, verificou-se que 62,4% da área da bacia (12,03 km²) encontra-se nas classes de até 41% de declividade. Acima de 41% de declividade nota-se uma diminuição da frequência das classes chegando até a classe acima de 100% de declividade, representando cerca 1,2% da área total da bacia.

A primeira e segunda classes (0-10% e 10 -20%, respectivamente) abrangem cerca de 5,02 km² ou 26% da área total da bacia e corresponde às feições mais suaves do relevo principalmente nas áreas de planícies fluviais.

Através da **figura 18** é possível perceber que a classe predominante apresenta declividade de 20 - 41% e abrange cerca de 7,02 km² ou 36,4 % da área total da Bacia do Córrego do Yung. De acordo com a Lei Federal 6766/79 (Lei de Lehman), o parcelamento do solo não é permitido em terrenos com declividade igual ou superior a 30%, salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes. Dessa forma, é possível afirmar que a partir dessa classe, a ocupação é restrita e deverá ser ocupada apenas se cumpridas todas as exigências legais.

Outro aspecto importante desse mapa são as áreas com valores acima de 100% de declividade que estão localizadas em sua grande maioria na parte sul da bacia, em áreas densamente ocupadas. Este fato associado às precárias edificações no local potencializa a ocorrência de movimentos de massa.

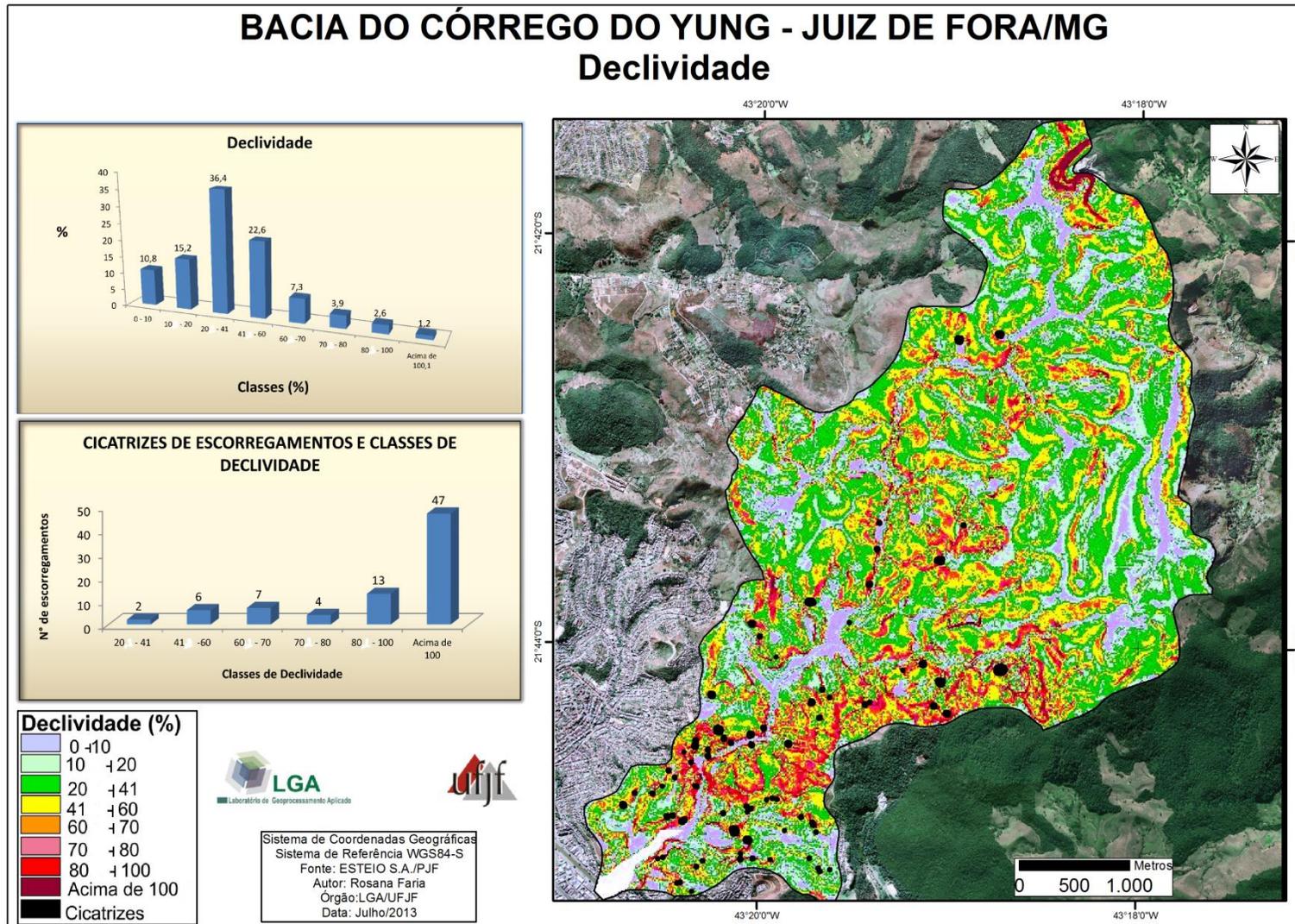


Figura 18: Mapa de Declividade da Bacia do Córrego do Yung - Juiz de Fora / MG. Percebe-se na imagem várias cicatrizes de escorregamentos concentradas principalmente na porção e sudeste da bacia.

De acordo com o mapeamento das cicatrizes de escorregamentos percebeu-se que 59,5% dos escorregamentos, 47, ocorreram nas porções mais altas do relevo sendo estas porções acima de 100% de declividade em uma área de apenas 0,23km². Desse total de cicatrizes, apenas 1 foi classificada como duvidosa por se apresentar bastante modificada devido ao tempo. As demais cicatrizes se apresentaram igualmente divididas entre naturais (23) e induzidas (23). A partir desses resultados percebe-se que se a Legislação Federal de Lehman fosse acatada na Bacia do Córrego do Yung, 49% desses ocorrências, que foram classificadas como induzidas pela ação antrópica, poderiam ter sido evitadas.

Na categoria de declividade de 41- 60% foram mapeadas 6 cicatrizes das quais 4 foram classificadas como induzidas e 2 como duvidosas. Na classe 60 -70% de declividade foram encontradas 7 cicatrizes, sendo que 2 foram classificadas como naturais e 5 como induzidas. Juntas as classes seguintes (70-80% e 80-100% de declividade) são responsáveis por abrigar cerca de 21,5% das cicatrizes mapeadas para a Bacia do Córrego do Yung, dentre as quais, 7 foram classificadas como naturais, 9 como induzidas e apenas 1 como duvidosa.

Em síntese percebe-se que do total de 79 cicatrizes mapeadas, 77 ocorreram em porções do relevo impróprias para moradia conforme a Legislação Federal de Lehman (Lei 6766/79). No entanto, ressalta-se que a influência da declividade do terreno não deve ser considerada como parâmetro único para a ocorrência de movimentos de massa.

A **figura 19** mostra imagens de determinados pontos da Bacia do Córrego do Yung onde foi possível visualizar os resultados da relação entre a falta de planejamento urbano adequado, a ocupação de áreas em altas declividades e também exemplos da ocorrência de movimentos de massa naturais em áreas ainda desocupadas.

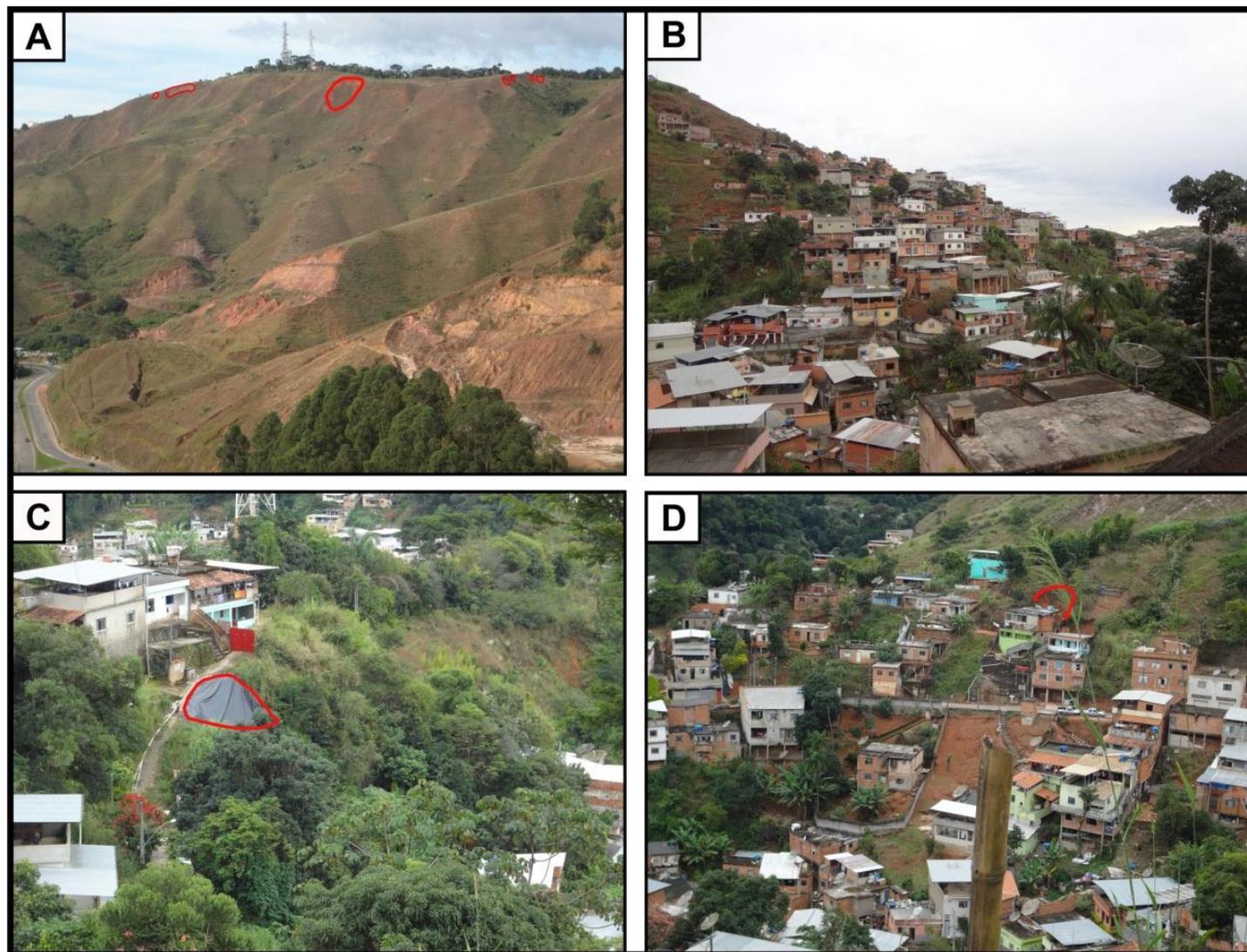


Figura 19: Perfis de ocupação da Bacia do Córrego do Yung. Na imagem A percebe-se um exemplo de uma cicatriz natural em uma encosta sem cobertura vegetal. Já na imagem B é possível visualizar o tipo de ocupação predominante na bacia. A imagem C destaca uma área coberta com lona onde ocorreu um movimento de massa de origem induzida e a imagem D destaca um exemplo de movimento de massa em uma área de alta declividade com a ocupação desordenada.

4.2.2. Distribuição e frequência das classes de área de contribuição e cicatrizes de escorregamentos

O parâmetro topográfico área de contribuição, define a localização dos segmentos convergentes na paisagem que estão diretamente relacionados com a concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais, que contribuem para a saturação do solo contribuindo para a definição das áreas críticas para escorregamentos (FERNANDES et al., 2004; BEVEN; KIRKBY, 1979; O'LOUGHLIN, 1986).

Nesta análise verificou-se que a classe de maior frequência na bacia é a classe *Abaixo de 25 pixels*, com um total de 4,54 km². No entanto, percebe-se que há uma diferença de apenas 1% para as duas classes seguintes (25-50 e 51-100 pixels). Juntas as três primeiras classes de menor valor de área de contribuição são responsáveis por 13,36 km² ou 69,2% da área da bacia (**Figura 21 - Gráfico 1**).

As classes com maior concentração de fluxo d'água, acima de 500 pixels, localizam-se basicamente nos canais principais da bacia e quando associado a altas declividades permite o aumento do escoamento superficial e subsuperficial e conseqüentemente de sua velocidade de transporte. Este fato pode desencadear a formação de processos erosivos podendo quando associado a grandes volumes de chuva deflagrar movimentos de massa.

Ao se associar a ocorrência de cicatrizes de movimentos de massa à área de contribuição percebe-se que há cicatrizes em praticamente todas as classes, exceto na classe 1000-2000 pixels. Apesar da baixa concentração de fluxo d'água nas classes com até 500 pixels, foram encontrados nesta classe cerca de 48 escorregamentos ou 60% do total mapeado. Desse total, 16 cicatrizes foram classificadas como naturais, 28 como induzidas e 4 como duvidosas (**Figura 21 – Gráfico 2**).

Sabe-se que acima de 500 pixels a concentração de fluxo d'água tem grande contribuição para a formação das principais redes de drenagem, mas apesar da saturação do solo nestas áreas isso não foi suficiente para concentrar a maioria das cicatrizes, uma vez que se encontram em porções mais suaves do relevo. Nessa categoria (de 501 a acima de 4000 pixels) foram encontrados 31 cicatrizes de escorregamentos, 14 classificadas como induzidas devido à ação antrópica na área, 16 como naturais e 1 como duvidosa (**Figura 20**).

Em síntese, percebeu-se que a maioria dos movimentos de massa (48) ocorreu nas áreas com até 500 pixels de área de contribuição e que 58,5% dessas cicatrizes foram induzidas pela ação antrópica.



Figura 20: Exemplo de uma área com movimento de massa induzido em uma porção do relevo com grande concentração de fluxo d'água conforme se observa no corte do terreno próximo à rua. Devido à combinação de alta declividade e a alta concentração de fluxo d'água houve no local o colapso de 3 casas.

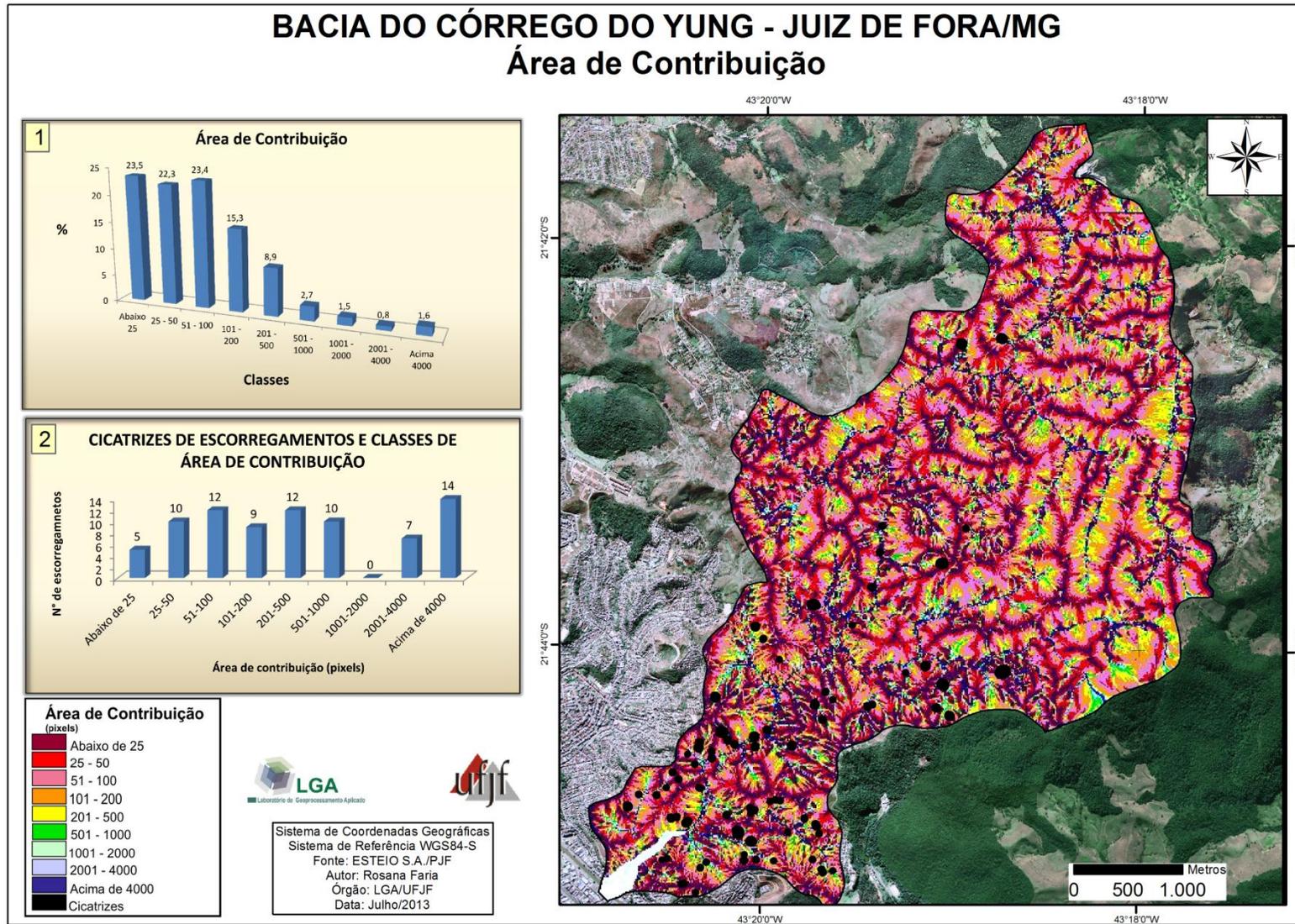


Figura 21: Mapa de Área de Contribuição da Bacia do Córrego do Yung - Juiz de Fora/MG. Percebe-se pela imagem a concentração das cicatrizes próximas à linhas de drenagem.

4.2.3. Análise da Susceptibilidade a Movimentos de Massa

Através do modelo de susceptibilidade a escorregamentos, SHALSTAB, foi possível determinar 7 classes de instabilidade para a Bacia do Córrego do Yung.

De acordo com a classificação original do modelo as classes variam de instável a estável condicionada à possível saturação do solo. A classe com maior potencial de escorregamentos é denominada como *Incondicionalmente Instável e Saturado* (-10,1 a -10 ou Instável), a segunda classe é denominada *Incondicionalmente Instável e Não Saturado* (-9,9 a -3,1 ou <3,1), a terceira é denominada como *Instável e Saturado* (-3,0 a -2,8) e a quarta é denominada como *Instável e Não-Saturado* (-2,7 a -2,5). As classes seguintes se referem às porções do relevo consideradas estáveis, mas condicionadas à saturação do solo. Dessa forma, a quinta classe é denominada *Estável e Não-Saturado* (-2,4 a -2,2), a sexta é denominada como *Incondicionalmente Estável e Não-Saturado* (-2,1 a -9,8) e a última classe de estabilidade do modelo SHALSTAB é denominada como *Incondicionalmente Estável e Saturado* (9,9 a 10,1).

A partir do Mapa de Susceptibilidade a Ocorrência de Movimentos de Massa, percebe-se que grande parte das áreas classificadas com algum grau de instabilidade está localizada na porção sul e sudeste da bacia, região com alto índice de ocupação (**Figura 22**).

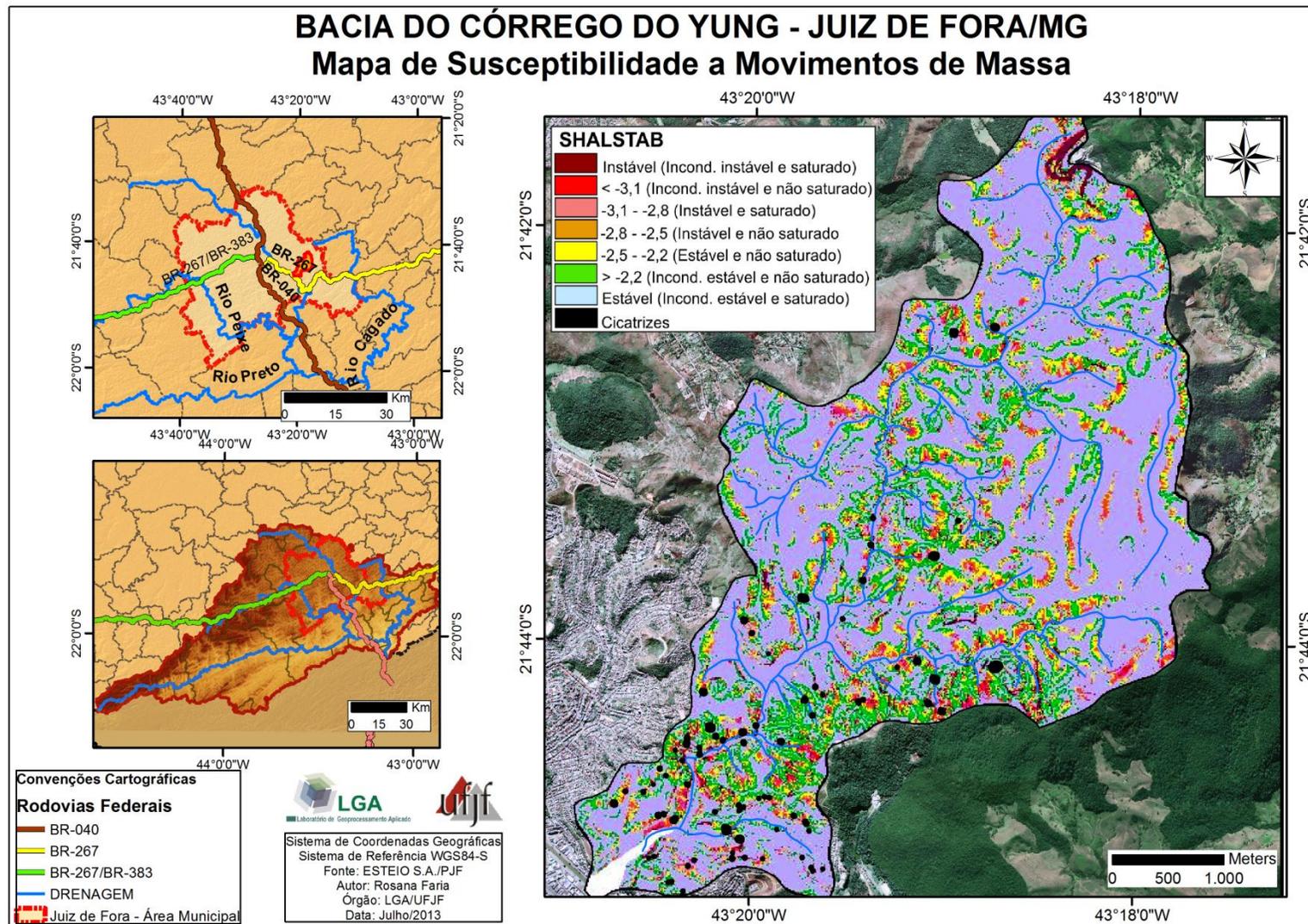


Figura 22: Mapa de Susceptibilidade a Ocorrência de Escorregamentos na Bacia do Córrego do Yung. Percebe-se a elevada concentração de áreas classificadas como Instáveis e <-3,1 na região sul e sudeste da bacia.

A partir do **gráfico 3**, percebe-se que a classe de susceptibilidade predominante na bacia é a classe estável, responsável por 84,34% da área total ou 12,83 km². Já a classe instável, que é responsável por abrigar a maioria dos movimentos de massa, representa cerca de 0,55% da área total da bacia ou 0,23 km². No entanto, de acordo com o modelo as classes <3,1, -3,0 a -2,8 e -2,7 a -2,5, também podem apresentar escorregamentos uma vez que apresentam algum grau de instabilidade. Juntas, as quatro classes classificadas com algum grau de instabilidade, abrangem cerca de 3,8% ou 1,57 km².

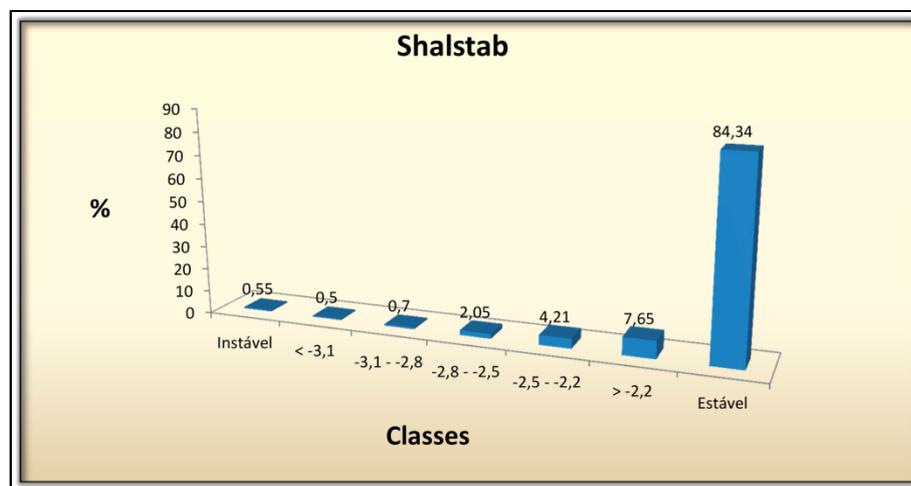


Gráfico 3: Gráfico da distribuição das classes de susceptibilidade a escorregamentos na Bacia do Córrego do Yung. Percebe-se que a maior parte da bacia foi considerada estável e apenas 3,8% classificado com algum percentual de instabilidade.

Através da **figura 23** é possível visualizar 3 cicatrizes de escorregamentos localizadas em uma área classificada como instável, de acordo com o modelo SHALSTAB.



Figura 23: Área classificada como Instável pelo modelo SHALSTAB. Percebe-se a presença de 3 movimentos de massa induzidos pela ação antrópica e potencializados pela declividade local

4.2.4. Análise da Susceptibilidade a Movimentos de Massa associado às Cicatrizes

A fim de se validar o modelo, inicialmente analisou-se o percentual de cicatrizes em cada classe de susceptibilidade a escorregamento. A partir do **gráfico 4** imagem 1 percebemos que do total de 79 cicatrizes mapeadas, **47** foram encontradas na classe *instável*, **18** na classe $<-3,1$, **3** na classe $-3,1$ a $-2,8$, **3** na classe $-2,8$ a $-2,5$, **2** na classe $-2,5$ a $-2,2$, **4** na classe $>-2,2$ e **2** cicatrizes na classe *estável*. Ao considerarmos apenas a classe Instável ou Incondicionalmente Instável e Saturado como as classes com maior possibilidade de ocorrência de escorregamentos, percebemos que o modelo apresenta cerca de 59,5% de acerto uma vez que 47 cicatrizes foram mapeadas nesse intervalo.

No entanto, de acordo com o modelo SHALSTAB, a classe seguinte, Incondicionalmente Instável e Não-Saturado, também oferece condições para que ocorram escorregamentos. Assim, percebemos através do gráfico 4 imagem 2 que 65 cicatrizes foram encontradas nessas duas classes de instabilidade (Instável e Incondicionalmente Instável e Não-Saturado). Desse total de 65 cicatrizes, 29 foram classificadas como naturais, 34 como

induzidas e 2 como duvidosas. Com base nessa análise percebemos que o percentual de acerto do modelo SHALSTAB para a bacia do Córrego do Yung sobe para 82,3%.

Considerando-se todas as classes do modelo que apresentam algum grau de instabilidade, ou seja, as 4 classes iniciais, incondicionalmente instável e saturado, incondicionalmente instável e não saturado, instável e saturado e a classe instável e não saturado, perceberemos que o percentual de acerto do modelo subirá para 89,9%, uma vez que foram mapeadas 71 cicatrizes das quais 31 foram classificadas como naturais, 37 como induzidas e 3 como duvidosas (**Gráfico 4** – imagem 3).

Ao se analisar apenas as cicatrizes classificadas como naturais encontradas nas quatro primeiras classes, percebemos que o modelo apresentou cerca de 39,2% de acerto. Já se considerar apenas as cicatrizes classificadas como induzidas pela ação antrópica percebemos que o acerto do modelo foi maior, cerca de 46,8%.

Em suma, pode-se afirmar que o modelo SHALSTAB apresentou um acerto de 89,9% para a Bacia do Córrego do Yung. No que se refere às cicatrizes encontradas em classes consideradas estáveis pelo modelo pode-se afirmar que suas ocorrências devem-se ao fato de estarem localizadas em áreas com grande intervenção antrópica.

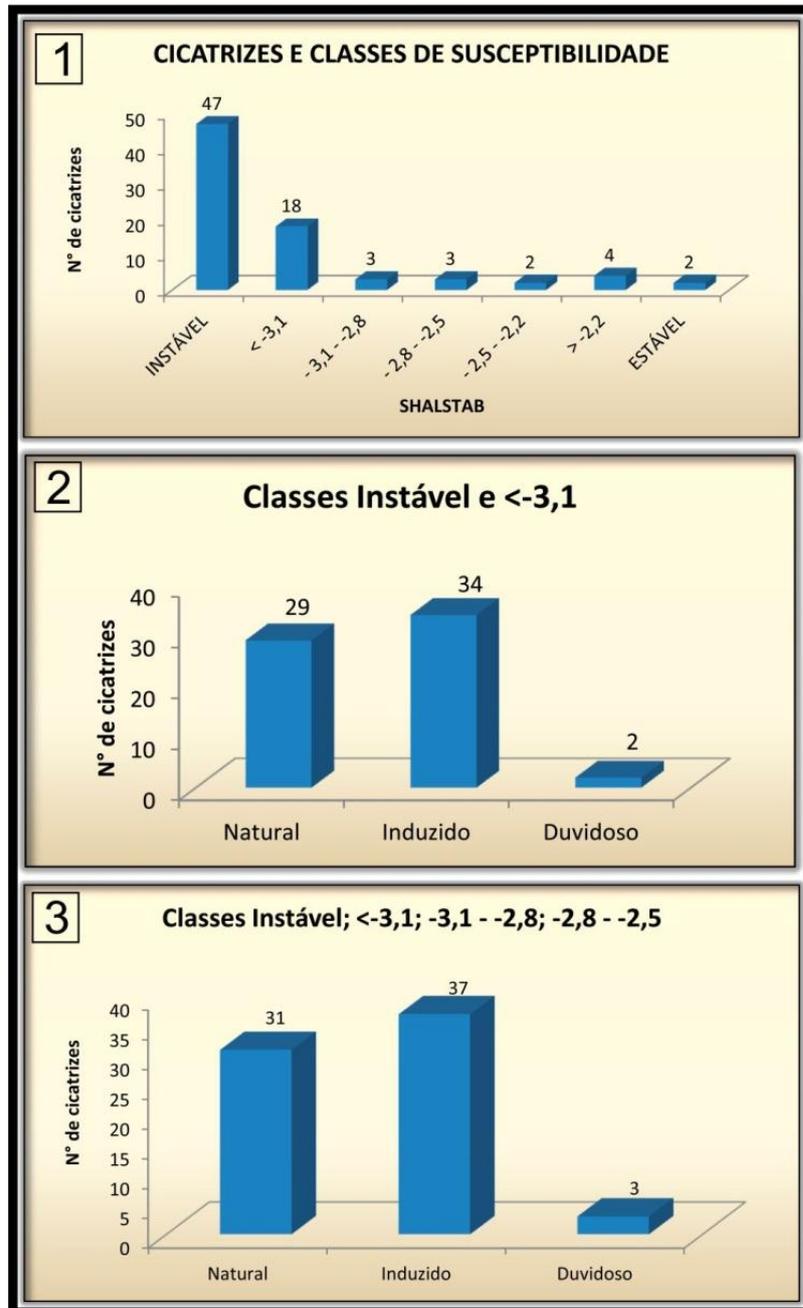


Gráfico 4: Gráficos representando a distribuição dos escorregamentos para classes com algum grau de instabilidade.

4.2.5. Análise da Susceptibilidade a Movimentos de Massa associado à declividade e área de contribuição

Através da associação dos mapeamentos de susceptibilidade a movimentos de massa com o mapeamento de declividade e área de contribuição ficou bem clara a influência dos agentes topográficos na determinação de áreas instáveis ou estáveis na bacia hidrográfica. Na

Bacia do Córrego do Yung percebeu-se que as classes denominadas como Incondicionalmente Instável e Saturado e Incondicionalmente Instável e Não-Saturado correspondem a porções do relevo com declividade acima de 80%. Já a classe denominada estável corresponde a porções do relevo com até 41% de declividade, ou seja, áreas planas a suavemente onduladas e estão localizadas em sua maioria na porção norte da bacia, áreas estas foco da expansão urbana uma vez que permite a ocupação sem grandes alterações na topografia do terreno.

Já em relação ao parâmetro área de contribuição percebeu-se que a susceptibilidade está atrelada à concentração de fluxo d'água. No entanto, sozinho este fator não determina a instabilidade de uma encosta uma vez que esta concentração pode ser encontrada também nas áreas planas e, portanto estáveis. Dessa forma, percebeu-se que o parâmetro área de contribuição deve apenas ser considerado se relacionado a outros parâmetros topográficos como, por exemplo, a declividade do terreno. Ressalta-se ainda que atrelados aos componentes topográficos declividade e área de contribuição, a influência antrópica deve ser considerada, uma vez que esta altera não apenas a configuração de uma encosta, mas também a dinâmica das águas superficiais e subsuperficiais. Um exemplo disso pode ser visto na **figura 24**, onde observa-se que onde a ocupação é mais densa e com maior concentração de fluxo d'água, a ocorrência de movimentos de massa também é maior.

Através dos dados apresentados neste capítulo foi possível perceber que o alto detalhamento dos dados topográficos obtidos através do perfilamento a laser-LIDAR, permitiu ao modelo de susceptibilidade SHALSTAB considerar não apenas as formas naturais do terreno, mas também as pequenas alterações antrópicas na bacia. Percebeu-se ainda que as áreas onde há cortes no terreno para construção civil e, que conseqüentemente tiveram alterações na declividade e na convergência dos fluxos d'água foram detalhadamente mostradas pelo LIDAR. Este fato permitiu que o modelo classificasse como susceptível não apenas as áreas com cicatrizes de movimentos de massa naturais, mas também aquelas de origem induzida. Em síntese, ressalta-se nesse estudo que a alta qualidade dos dados topográficos aliados ao mapeamento de cicatrizes de movimentos de massa e suas classificações em campo permitiu que o Mapeamento da Susceptibilidade a Movimentos de Massa em muito se aproximasse da realidade da Bacia do Córrego do Yung.

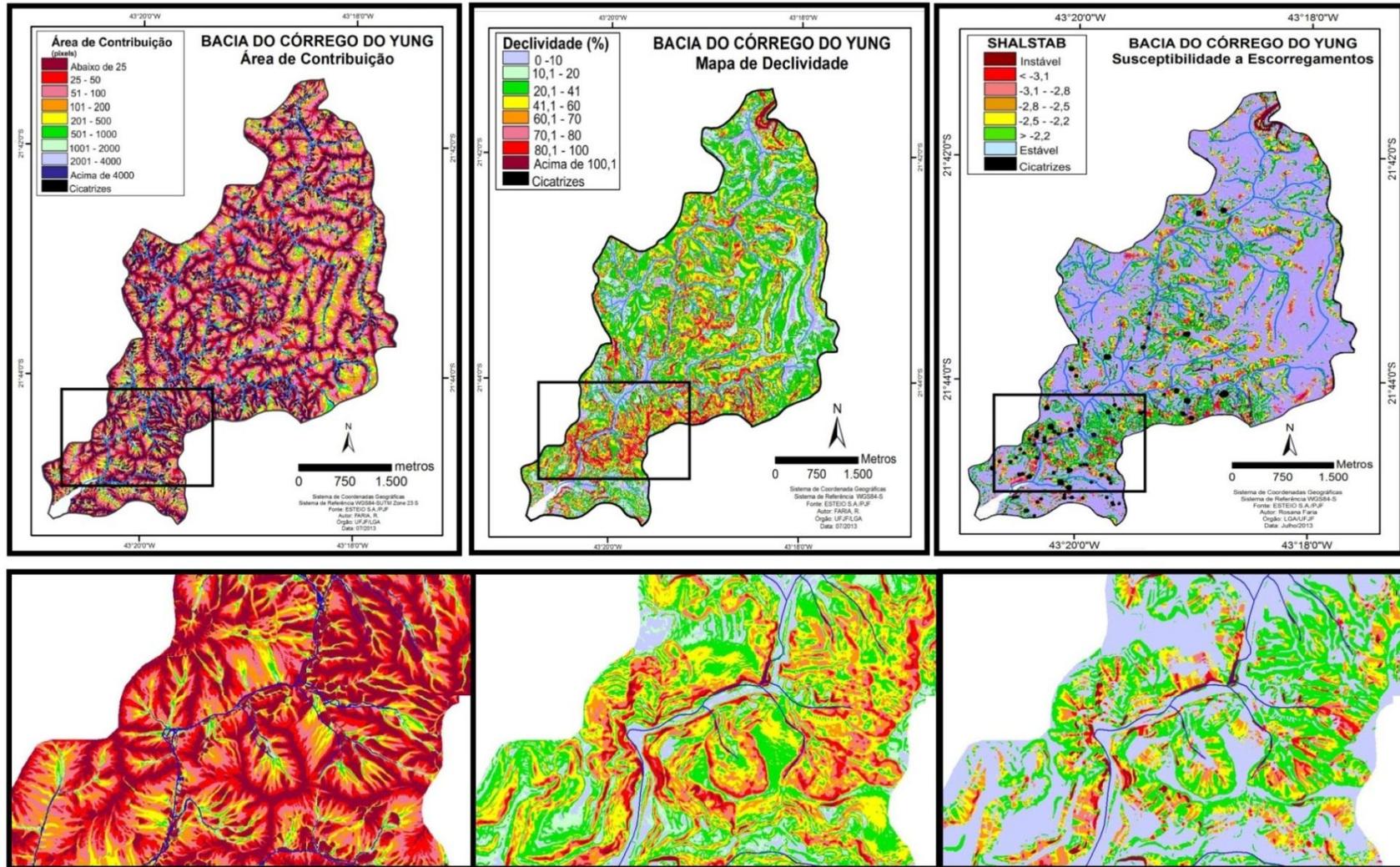


Figura 24: Comparação entre os parâmetros topográficos Declividade e Área de Contribuição com o Modelo de Susceptibilidade a Escorregamentos. Percebe-se que as áreas de maior instabilidade coincidem com as áreas de maior declividade e quando as altas declividades coincidem com a convergência de fluxo d'água esse potencial de escorregamentos se eleva.

4.3. Análise do Zoneamento de Risco na Bacia do Córrego do Yung

Através da análise conjunta do Mapeamento de Cobertura e Uso da Terra e do Zoneamento de Susceptibilidade a Movimentos de Massa obteve-se o Zoneamento de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung distribuído em 4 classes de Risco: altíssimo, alto, médio e baixo (**Figura 25**).

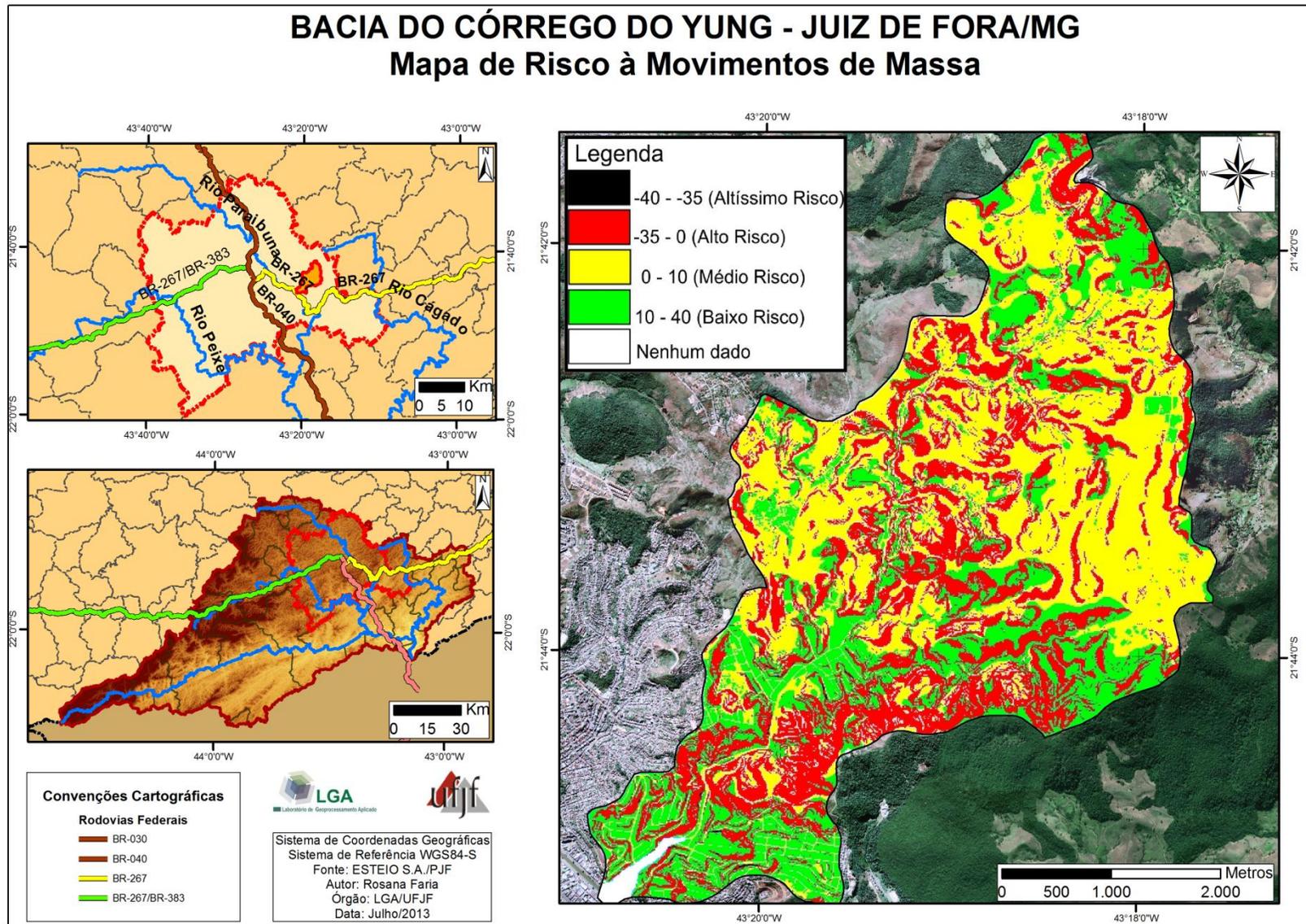


Figura 25: Zoneamento de Risco à Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung. Através da figura percebe-se que a classe Médio Risco foi predominante na bacia.

Os resultados mostraram que 0,02 km² ou 0,10% da área total da bacia é considerada de Altíssimo Risco. Já as áreas classificadas com Alto Risco correspondem a 6,38 km² da bacia ou 33,09% da área total. As áreas classificadas com Médio Risco foi a classe com maior área de ocorrência na bacia, cerca de 8,01 km² ou 41,54% da área total. Por último, a classe denominada Baixo Risco foi a terceira com maior área, cerca de 4,87 km² ou 25,25% da área total da bacia do Córrego do Yung (Gráfico 5).

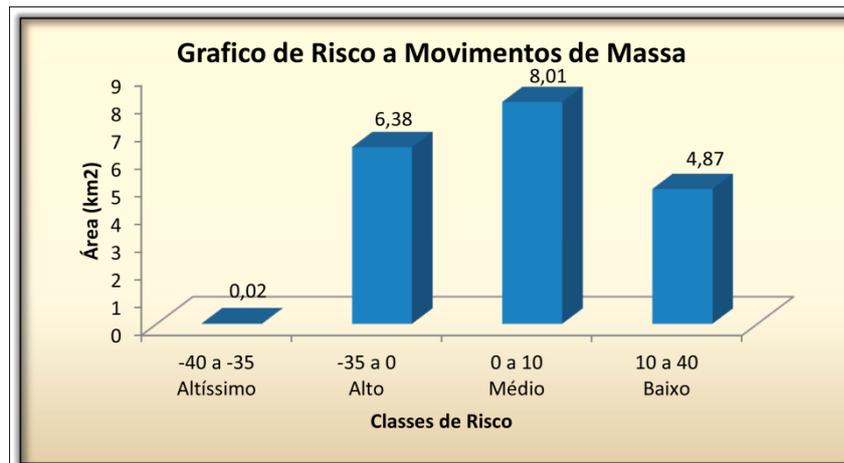


Gráfico 5: Gráfico representativo do Risco a Movimentos de Massa da Bacia do Córrego do Yung. Percebe-se que a classe Altíssimo Risco representa a menor porção da Bacia do Córrego do Yung, cerca de 0,02 km².

Através da **figura 26** é possível perceber que as áreas classificadas como de Altíssimo Risco estão concentradas principalmente na porção sul e sudeste da Bacia do Córrego do Yung, em áreas densamente edificadas. São nessas porções da bacia que se concentram a maior parte do comércio e moradias. Essas características de ocupação associadas às altas declividades e o pouco planejamento urbano local são fatores primordiais que favorecem a concentração das áreas de Altíssimo Risco na Bacia do Córrego do Yung. Através da **figura 26** imagem 1, percebe-se que as áreas de Altíssimo Risco se referem a pequenas áreas das encostas onde há grande instabilidade e que na maioria das vezes estão relacionadas às intervenções antrópicas mal planejadas. Ainda na **figura 26** imagem 3 é possível perceber que o risco foi potencializado através da construção de casas na meia encosta, fato este que permitiu a alteração da dinâmica das águas superficiais e subsuperficiais em uma área de alta declividade. Percebe-se ainda que as áreas de Altíssimo Risco estão sempre inclusas em porções do terreno classificadas como de Alto Risco, ou seja, o fator determinante para o aumento do risco nessas áreas está sempre relacionado à intervenção antrópica.

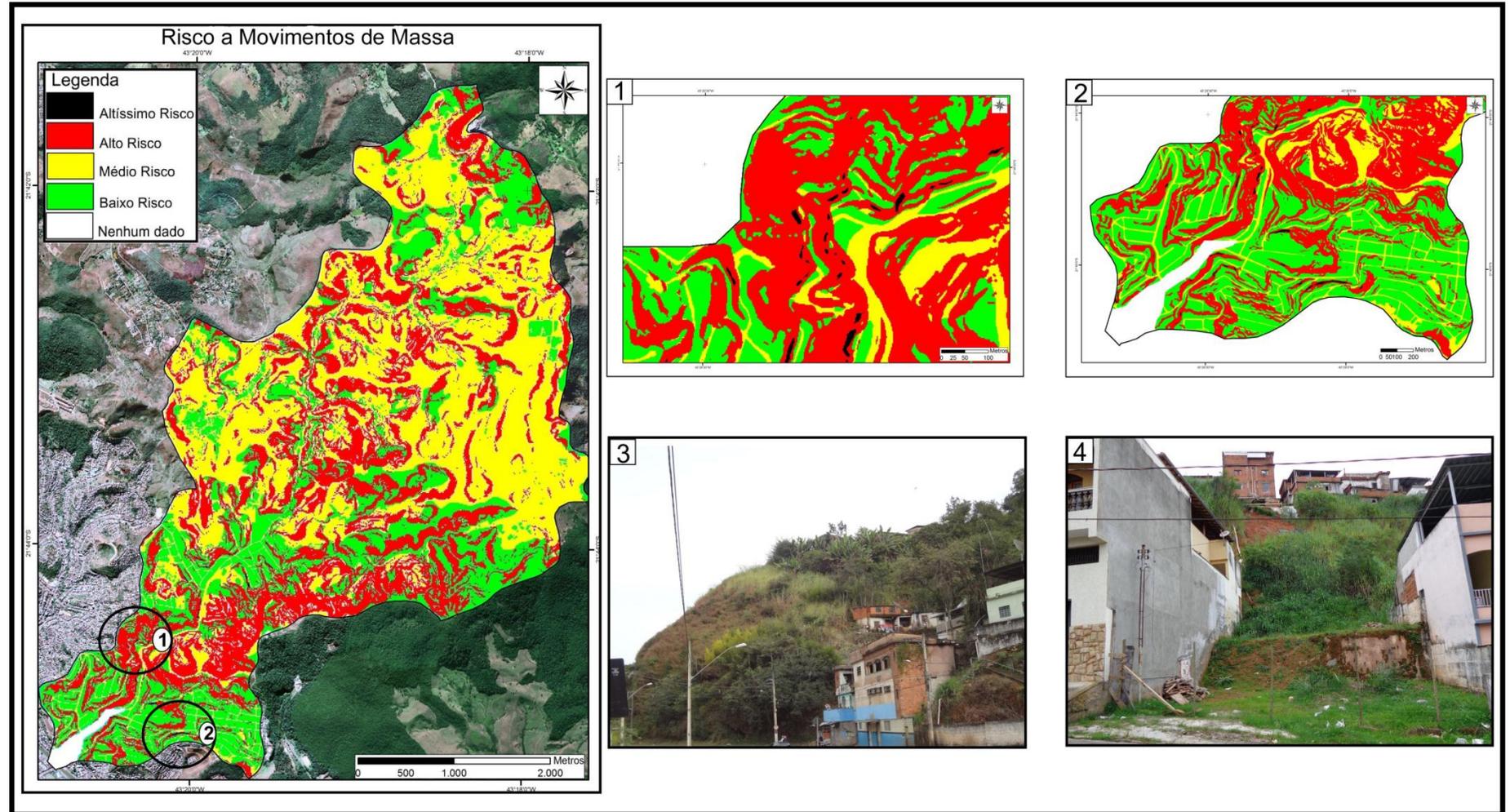


Figura 26: Mapa de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung e em detalhe exemplos de áreas classificadas como de Altíssimo Risco (1 e 3) e de Alto Risco (2 e 4).

Ainda na **figura 26** é possível ver em detalhe um exemplo de uma área classificada como de Alto Risco à ocupação (imagens 2 e 4). Localizada na porção sul da bacia, esta área possui um padrão de ocupação residencial com moradias de alvenaria geralmente com mais de um pavimento e com melhor planejamento na construção se comparadas à ocupação das áreas de altíssimo risco. Apesar das características das moradias serem melhores na área analisada percebe-se que o planejamento e preparo do terreno se limita apenas à área a ser construída, fazendo com que as porções do relevo adjacentes à moradia fiquem desprotegidas. Este fato pode ser visualizado através da imagem 4, onde nota-se que a construção no topo da encosta desestabilizou o terreno através da sobrecarga da construção, da ausência de vegetação no local e pela má disposição das águas servidas. Os danos causados nesse local podem ser visualizados através da cicatriz de escorregamento no local e dos restos de lona que foram colocados na tentativa de proteção do solo desnudo. Dessa forma, percebe-se que a área desocupada localizada entre as duas casas, uma no topo da encosta e outra na base está determinando o risco sofrido por ambas as moradias.

Além das áreas edificadas foram encontradas áreas de alto risco nas classes vegetação arbórea, vegetação rasteira ou de médio porte, vegetação rasteira ou pastagem e nas áreas agrícolas (**Figura 27**). Em síntese, foram classificadas como áreas de Alto Risco um total de 6,38 km² ou 33,09% da Bacia do Córrego do Yung.

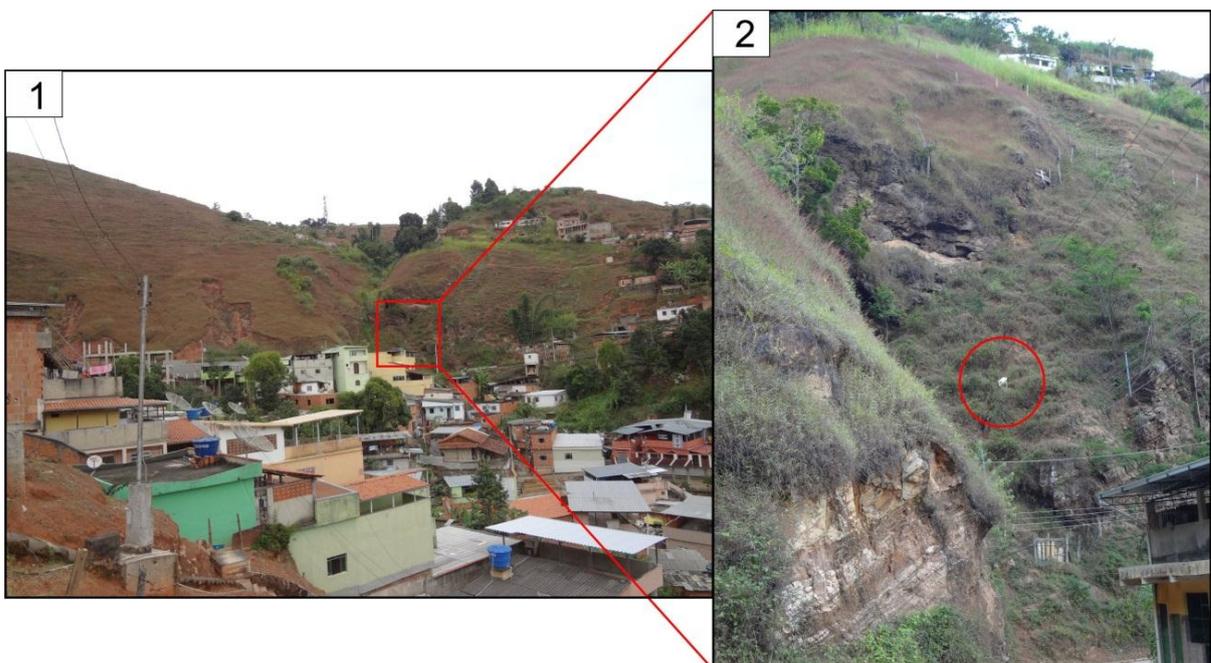


Figura 27: Imagens de uma área de pastagem classificada como de Alto Risco. Nota-se a presença de gado no detalhe da imagem 2.

Já a classe médio risco pode ser encontrada principalmente na porção norte e leste da Bacia do Córrego do Yung. A classe de uso da terra predominante nessa classe de risco é a classe composta por vegetação rasteira ou pastagem circundadas por áreas com moradias esparsas. O risco existente nessa área está intrinsecamente relacionado à topografia local com declividades em torno de 30% e ao tipo de uso da terra (pecuária extensiva - leite e/ou corte). Através da **figura 28** imagem 1 e 3 da percebe-se que as áreas classificadas como de médio risco correspondem a porções do terreno localizadas na média encosta com cobertura vegetal predominante de gramíneas e pouca vegetação de médio porte. Em síntese, essa classe apresentou cerca de 8,01 km² ou 41,54% da área total da Bacia do Córrego do Yung.

Em relação à classe baixo risco percebeu-se que esta se estende pelas porções mais planas do terreno com até 20% de declividade. Estas áreas estão localizadas principalmente na parte leste da bacia, mas podem ser encontradas também em menor concentração nas demais porções da bacia. Quanto ao tipo de uso relacionado percebeu-se que esta classe abrange as áreas compostas por vegetação arbórea, vegetação rasteira e de médio porte, áreas de corpos d'água, áreas agrícolas e algumas áreas edificadas. A imagem 4 da **figura 28** mostra um exemplo de duas áreas classificadas como de baixo risco, a da direita representando uma área de produção agrícola e a da esquerda uma área composta por vegetação arbórea. Nota-se ainda nessa imagem a baixa declividade do terreno e a pouca ocupação humana da área.

Em síntese foi possível perceber através do Mapa de Risco à Ocupação na Bacia do Córrego do Yung que as áreas classificadas como de Altíssimo Risco foram as áreas edificadas localizadas nas porções do relevo com altas declividades e com grande concentração de fluxo d'água. Percebeu-se ainda que a alteração antrópica no terreno, como cortes para construção civil e remoção da cobertura vegetal, tiveram grande contribuição para a classificação de risco dessas áreas. Em relação às classes de médio risco percebeu-se que se relacionaram principalmente às áreas de grande declividade e com uso da terra diversificado como vários tipos de vegetação e produção agrícola. Em relação às áreas classificadas como de médio risco percebeu-se que se referiram principalmente às áreas compostas por vegetação rasteira ou pastagens localizadas nas declividades médias de até 30%. Por fim, as áreas classificadas como de baixo risco corresponderam às porções do terreno com até 20% de declividade e com tipos de uso da terra diversificados.

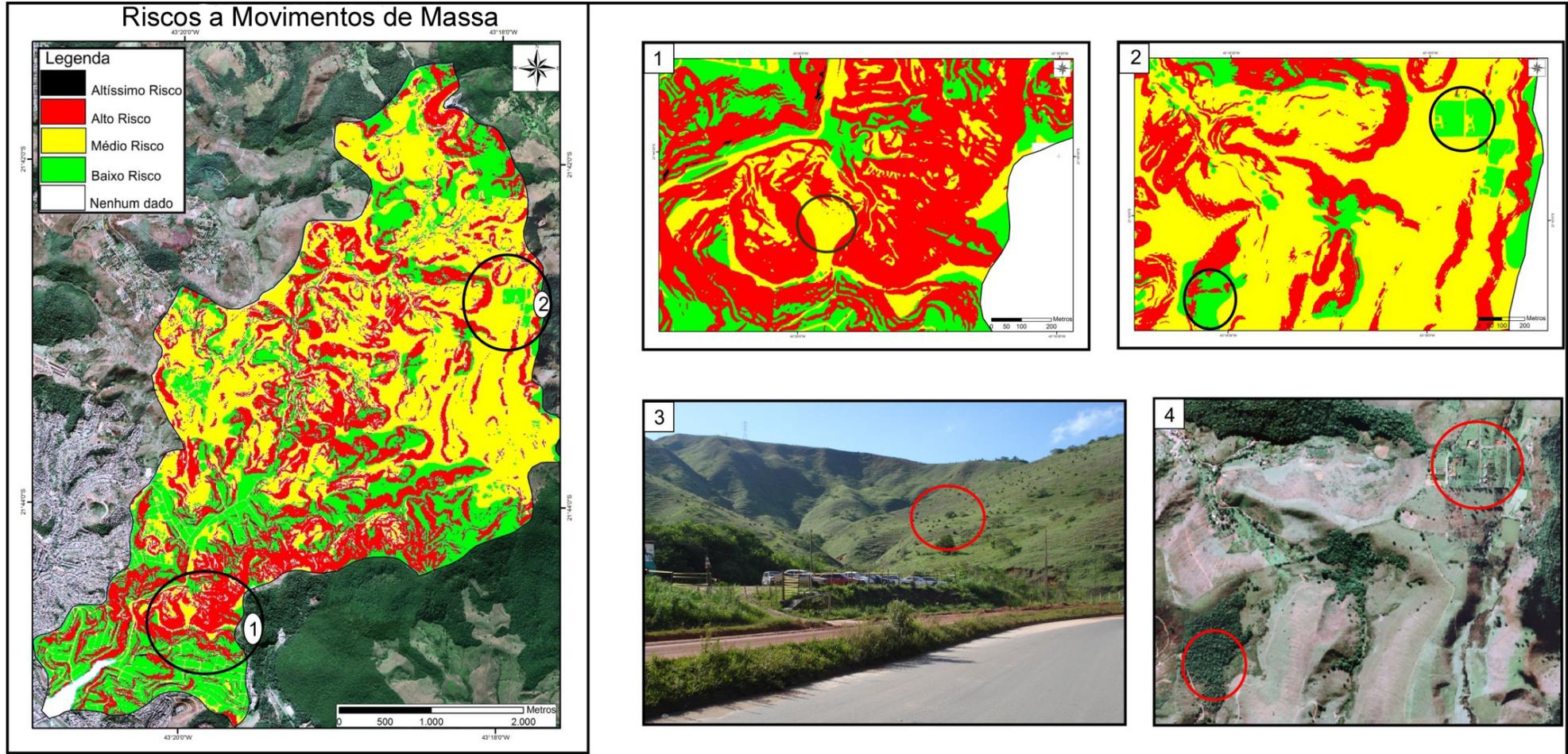


Figura 28: Mapa de Risco à Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung e em detalhe exemplos de áreas classificadas como de Médio Risco (1 e 3) e de Baixo Risco (2 e 4).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento dos elementos que compõe a paisagem e o entendimento de suas inter-relações é fundamental para o aprimoramento das técnicas de intervenção no meio ambiente e planejamento de ações corretivas. Nesse sentido, a aplicação das técnicas de geoprocessamento, o avanço do conhecimento dos sistemas de informações geográficas e o auxílio dos modelos matemáticos desenvolvidos em bases físicas, vêm para auxiliar tanto a compreensão da realidade quanto permitir o conhecimento de cenários futuros.

Neste estudo, a aplicação do conhecimento e técnica descritos acima permitiu conhecer o comportamento evolutivo da Bacia do Córrego do Yung, partindo da interferência antrópica no seu tipo de cobertura e uso à sua associação com os resultados da previsão das áreas susceptíveis a movimentos de massa.

Através do Mapeamento de Cobertura e Uso da Bacia do Córrego do Yung percebeu-se que a maior parte da bacia encontra-se coberta por vegetação rasteira ou pastagem devido ao intenso processo de desmatamento sofrido ao longo dos anos. Em relação ao crescimento urbano percebeu-se que a maior concentração se encontra na porção sul indo em direção à porção norte, acompanhando a calha principal do Córrego do Yung. As características das edificações são bem diversas nesta bacia, com moradias regulares nas porções mais planas até moradias em situações de altíssimo risco nas encostas mais íngremes.

Constata-se então que a bacia possui 12,2% (2,34 km²) de áreas edificadas, o que torna este tipo de estudo fundamental para orientar a ocupação de novas áreas, além de permitir o conhecimento daquelas áreas com risco já instalado. Em relação às áreas compostas por vegetação arbórea ou arbustiva percebeu-se que estas se encontram distribuídas em pequenas porções ao longo da bacia, em áreas cujo relevo é mais íngreme ou em áreas próximas à divisores de água. Percebeu-se ainda que os poucos remanescentes de mata nas proximidades das áreas edificadas contribuem para preservação das características das vertentes contribuindo para a estabilização do local.

Para a análise da instabilidade da Bacia do Córrego do Yung foi necessário relacionar os dados referentes à declividade da bacia, à área de contribuição e à cicatrizes de movimentos de massa. Em relação à declividade percebeu-se que 62,4% da bacia se encontra nas categorias de até 41% e que a maioria das altas declividades estão localizadas na porção sul próximas às áreas edificadas. Em relação às cicatrizes de movimentos de massa percebeu-

se que 59,5% se encontram nas porções do relevo acima de 100% de declividade, categoria esta com apenas 0,23 km². Em síntese, percebeu-se que das 79 das cicatrizes mapeadas, 77 ocorreram em porções do relevo impróprias para moradia conforme a Legislação Federal de Lehman (Lei 6766/79). Em relação ao parâmetro área de contribuição e ao inventário de movimentos de massa percebeu-se que 60% do total de cicatrizes mapeadas se encontra nas porções do relevo com baixa concentração de fluxo d'água (de até 500 pixels).

Em relação aos resultados gerados pelo modelo SHALSTAB percebeu-se que grande parte das áreas classificadas com algum grau de instabilidade está localizada nas porções sul e sudeste da bacia e que a classe instável apesar de possuir a menor área (0,23 km²), abriga a maioria dos escorregamentos (47). Observou-se ainda que 89,9% das cicatrizes mapeadas se encontra nas classes com algum grau de instabilidade apontado pelo modelo e que as 2 cicatrizes encontradas na classe estável ocorreram devido à grande alteração antrópica ocorrida no local. Verificou-se ainda que a classe denominada Incondicionalmente Instável e Saturado e a classe Incondicionalmente Instável e Não-Saturado correspondem à porções do relevo com declividade acima de 80%. Já as áreas estáveis se encontram em porções do relevo de até 41% de declividade.

Através do Zoneamento de Risco verificou-se que 0,02 km² da Bacia do Córrego do Yung é considerada de altíssimo risco e apenas 4,87 km² é considerada de baixo risco. Conclui-se ainda que a maioria das áreas de altíssimo risco foram apontadas nas porções sul e sudeste onde se concentra grande parte do comércio e moradias. Concluiu-se ainda que as áreas de altíssimo risco estão sempre associadas às áreas de alto risco que são potencializadas devido à alteração antrópica, como a remoção da cobertura vegetal e cortes no terreno. Já a classe de baixo risco teve predominância nas porções mais planas do terreno com até 20% de declividade localizadas principalmente na porção leste da bacia. Em síntese, o mapeamento de Risco a Movimentos de Massa na Bacia do Córrego do Yung apontou que a ocupação das áreas com alta declividade sem o devido planejamento estrutural associado à remoção da cobertura vegetal e alteração do fluxo das águas superficiais e subsuperficiais contribuem para a potencialização do risco.

Dessa forma, conclui-se que este estudo alcançou os objetivos propostos relacionados ao Mapeamento de Uso e Cobertura da Terra, à Análise de Instabilidade a Movimentos de Massa e ao Zoneamento de Risco. Em relação ao uso de modelagem matemática, no caso deste estudo o uso do modelo SHALSTAB, associado ao conhecimento dos tipos de cobertura e uso da terra constituem uma excelente ferramenta para a definição de áreas de risco. Em relação ao levantamento aerofotogramétrico LIDAR, concluiu-se que este produto foi de

fundamental importância para os resultados obtidos devido à alta precisão de seus dados, principalmente no que se refere ao Mapeamento de Instabilidade, uma vez que, a precisão desses dados foram fundamentais para a detecção de áreas susceptíveis a movimentos de massa, em escala de detalhe com resolução de 2m. Em relação aos dados utilizados neste estudo, sugere-se para estudos posteriores a aplicação de outros valores relacionados aos parâmetros físicos do solo a fim de que se possa conhecer o comportamento das condições de instabilidade sob diferentes condições do meio. Ainda sugere-se que em estudos posteriores seja feita uma associação dos resultados não apenas à Legislação Federal, mas também à Legislação Municipal contribuindo assim para entendimento e/ou melhorias da legislação de parcelamento, uso e ocupação da terra no Município de Juiz de Fora.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, C. **Landslides disasters management in Rio de Janeiro**. 2nd Pan-American Symposium on Landslides (II PSL/2a COBRAE), ABMS, ABGE & ISSMGE, Rio de Janeiro, 1997. p.209-212.
- AMARAL, C.P.D. **Analysis of Rio de Janeiro Landslide Inventory Data**. 7th International Symposium on Landslides. Trondheim, Norway, 1996a.
- AMARAL, C.P.D. **Escorregamentos no Rio de Janeiro: Inventário, Condicionantes e Redução do Risco**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996b. p. 262.
- AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: 1º Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (COBRAE). Rio de Janeiro, 1992. p. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A. M. D.S. & BRITO, S. N. A. D. (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 2004. p.243-269.
- AVANZI, G.; FALASCHI, F.; GIANNECCHINI, R.; PUCCINELLI, A. Soil slip susceptibility assessment using mechanical–hydrological approach and GIS techniques: an application in the Apuan Alps (Italy). **Nat Hazards**, 2009,p. 591-603.
- BEVEN, K.J.; KIRBY. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hidrological Sciences Bulletin*, 1979. p.43-69.
- CARRARA, A. Multivariate models for landslide hazard evaluation. **Mathematical Geology**, v.15, n.3, 1983. p. 403-426.
- CARRARA, A.; CARDINALI, M.; DETTI, R.; GUZZETTI, F.; PASQUI, V.; REICHENBACH, P. GIS Techniques and Statistical Models In Evaluating Landslide Hazard. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.16, n.5, Aug, 1991. p. 427-445.
- CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. **Hillslope form and process**. Cambridge University Press, 1972. p. 475.

- CARVALHO, A.C.B.; ROCHA,G.C.; ZAIDAN, R.T. **Zoneamento e Análise da Classificação dos Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraibuna a Partir do Projeto RADAMBRASIL**. XIII Simpósio Nacional de Geomorfologia. Recife, 2010.
- CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES. **Anuário brasileiro de desastres naturais**. Brasília: CENAD, 2012.
- CEPED, UFSC. **ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS – 1991 a 2010**: volume Brasil / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres. Florianópolis: CEPED UFSC, 2012.
- CERRI, L.E.S.; AMARAL, C.P. **Riscos Geológicos**. In: OLIVEIRA, A.M. dos S. & BRITO, S.N.A. de. (org). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE-CNPq-FAPESP, 1998. p. 301-310.
- CERVI, F.; BERTI, M.; BORGATTI, L.; RONCHETTI, F.; MANENTI, F. CORSINI, A. Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy). **Landslides**, v.7. p.433-444.
- CHRISTOFOLLETI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236 p.
- CLAESSENS, L.; HEUVELINK, G. B. M.; SCHOORL, J. M.; VELDKAMP, A. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.30, 2005. p. 461-477.
- Companhia Mineradora de Minas Gerais (CODEMIG). **Mapa Geológico - Projeto Sul de Minas**. Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG/IGC- Instituto de Geociências, 2002.
- CROZIER, M.J. **Landslides: causes, consequences and environment**. New Zeland. Capítulo 2. Classification of slope movements. 1986. p. 02-31.
- DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. *Z. Geomorph. N.F.*, v.29, 1978. p. 191-206.

- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential**. National Council for Air and Stream Improvement. February 1, 1998. p.26.
- DIETRICH, W. E., REISS, R., HSU, M.-L., AND MONTGOMERY, D.R. A Process-Based Model for Colluvium Soil Depth and Shallow Landsliding Using Digital Elevation Data. **Hydrol. Process.**, 1995. p: 383-400.
- DIETRICH, W.E.; WILSON, C.J.; MONTGOMERY, D.R.; McKEAN, J. Analysis of erosion threshold, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. **The Journal of Geology**, 1993, v.101. p. 259-278.
- DIETRICH, W. E.; WILSON, C. T.; MONTGOMERY, D. R.; MCKEAN, J.; BAUER, R. Erosion thresholds and land surface morphology. **Geology**, v.20, 1992. p. 675-679.
- DIETRICH, W. E.; WILSON, C.; RENEAU, S. Hollows, colluvium and landslides in soil-mantled landscapes. In: ABRAHAMS, A. D. (Ed.). **Hillslope Processes**. London: Allen; Unwin, 1986. p.361-388.
- ESTEIO-S/A. Levantamento Aerofotogramétrico do Município de Juiz de Fora. Curitiba: ESTEIO S/A, 2007. (1:2000).
- FARIA, R.L. **Zoneamento Municipal de Áreas Susceptíveis a Ocorrência de Escorregamentos: o caso da Bacia do Rio Paraibuna – MG/RJ**. Monografia de Conclusão de Curso. Departamento de Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010. p.113.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de Massa: Uma abordagem geológico-geomorfológico. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 7° ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p.123-194.
- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, F. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação do modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.1, p.51-71, 2001.

- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **CATENA**, v55, n.2, p.163-181, 2004.
- FIORILLO, F.; GUADAGNO, F.M. **Hydrological conditions leading to shallow landslides in the Sannio Area (Southern Italy)**. In: 4th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation – Mechanics, Prediction and Assessment. MILLPRESS SCIENCE PUBLISHERS, 2007. p.331-339.
- FREIRE, E. S. M. Movimentos Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática. **Construção**, Rio de Janeiro, v.8, 1965. p.10-18.
- GOETZ, J.N.; GUTHRIE, R.H.; BRENNING, A. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. **Geomorphology**, 2011.
- GOMES, R. A. T. **Condicionantes Geomorfológicos e o Efeito da Escala Cartográfica na Previsão de Áreas Críticas a Deslizamentos**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JR, O. A. D.; FERNANDES, N. F. Análise da influência da escala cartográfica no resultado de um modelo de previsão de áreas críticas a deslizamentos. **Ciência e Natura** – UFSM, 2004. p.269-286.
- GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JR., O. A.D.; FERNANDES, N. F. Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (SHALSTAB) em diferentes escalas cartográficas. **Revista Solos e Rochas** - ABGE/ABMS, v.28, n.1, Janeiro-Abril, 2005. p. 85-97.
- GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JR. O.A.; FERNANDES, N. F. VARGAS JR., E. A.; MARTINS, E. S. Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with an empirical model of debris flow. **Nat Hazards**, 2008.p. 197-209.
- GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO, O.A.; MENKE, A.B.; MARTINS, E.D.; de OLIVEIRA, S.N.; FERNANDES, N.F. **Identification of areas prone to shallow landslide in Parque Nacional da Serra dos Órgãos (Brazil) considering seasonal rainfall**. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. p. 4549-4552.

- GORSEVSKI, P. V.; GESSLER, P. E.; BOLL, J.; ELLIOT, W.J.; FOLTZ, R.B. Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. **Geomorphology**, v.80, 2006. p. 178-198.
- GREENWAY, D.R. **Vegetation and slope stability**. In ANDERSON, M.G.; RICHARDS, K.S. Slope Stability. John Wiley & Sons Ltd, 1987. p. 187-229.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. p. 170.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
- GUIMARÃES, R. F. **A modelagem matemática na avaliação de áreas de riscos a deslizamentos: o exemplo das bacias dos Rios Quitite e Papagaio (RJ)**. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, UFJF, Rio de Janeiro, 2000.
- GUIMARÃES, R. F. Movimentos de Massa. In : **Geomorfologia : conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos , 2008. p.159-184.
- GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; JÚNIOR, O. A. D. C. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v.2137, 2002. p.1-10.
- GUIMARÃES, R.F.; RAMOS, V.M.; REDIVO, A.L. GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F.; JUNIOR, O.A.D. Application of the SHALSTAB model for mapping susceptible landslide areas in mine zone (Quadrilátero Ferrifero in Southeast Brazil). IGARSS, 2003. p. 2444-2446.
- GUIMARÃES, R.F.; TRANCOSO, R.A.; FERNANDES, N.F.; VARGAS, E.A.; MARTINS, E.D. **Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with a two-dimensional flood routing model for simulating debris flow**. IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing IGARSS, 2007. p. 3035-3038.
- GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v.31, n.1-4, 1999. p. 181-216.

- HUANG, J.C.; KAO, S.J. Optimal estimator for assessing landslide model performance. **Hidrology and Earth System Sciences**, v.10, 2006. p.957-965.
- HUANG, J.C.; KAO, S.J.; HSU, M.L.; LIU, Y.A. Influence of specific contributing area algorithms on slope failure prediction in landslide modeling. **Natural Hazards and Earth System Sciences**. v.7, 2007. p. 781-792.
- HUTCHINSON, J. N. **General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology**. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides. Lausanne: A. A. Balkema, 1988. p.3-35.
- HUTCHINSON, J.N. Mass Movement. RW Fairbridge. Reinhold Book. New York,1968. P. 688-700.
- IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. p. 91.
- INFANTI JR., N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 2004. p.131-152.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Último acesso: Maio/2012.
- IPT. **Ocupação de Encostas**. São Paulo: IPT, v.1831. 1991. p. 216.
- LIN, B.S.; HSU, C.K.; LEUNG, W.Y; KAO, C.W.; CHENG, C.T.; LIAN, J.C. Prediction on landslides induced by heavy rainfalls and typhoons for Shih-Men watershed in Taiwan using SHALSTAB program. **Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation**, 2009. p.539-545.
- LISTO, F.L. **Análise da Susceptibilidade e do Grau de Risco a Escorregamentos Rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B. Analyse of shallow landslide risk and susceptibility in São Paulo city, Brazil. 8th International Conference (AIG) on Geomorphology, Paris, 2013.
- MEISINA, C.; SCARABELLI, S. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. **Geomorphology**, v. 87, 2007. p.207-223.

- MINDER, J.R.; ROE, G.H.; MONTGOMERY, D.R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility. **Water Resources Research**, v.45, 2009.
- MONTGOMERY, D. R. Road Surface Drainage, Channel Initiation, and Slope Stability. **Water Resources Research**, v.30, n.6, 1994. p. 1925-1932.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v.30, n.4, 1994. p. 1153-1171.
- MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. Hydrologic process in a low gradient source area. **Water Resources Research**, 1995, v.31. p. 1-10.
- MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. Source Areas, drainage density e channel initiation. **Water Resources Research**, 1989. p. 1907-1918.
- MONTGOMERY, D. R.; WRIGHT, R. H.; BOOTH, T. Debris flow hazard mitigation for colluvium-filled swales. **Bulletin of the Association of Engineering Geologists**, v.28, 1991. p. 303-323.
- MORGENSTERN, N. R.; SANGREY, D. A. Methods of Stability Analysis. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Ed.). **Landslides: Analysis and Controls**. Washington D.C.: NAS-NRC, 1978. p.155-171.
- O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. **Water Resources Research**, 1986. p.794-804.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Conferências das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável – RIO20. Disponível em: <http://www.onu.org.br/rio20/temas-cidades/>. Último acesso em: 03/09/2012.
- RABACO, L. M. L. **Avaliação de Modelos de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa Numa Faixa de Dutos**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- RAFAELLI, S. G.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M. A comparison of thematic mapping of erosional intensity to GIS-driven process models in an Andean drainage basin. **Jornal of Hydrology**, v.244, 2001. p. 33-42.

- RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F.; CARVALHO FILHO, O. A. Aplicação do Modelo SHALSTAB, em ambiente Arcview para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na região do Quadrilátero Ferrífero – MG. **Espaço e Geografia**, v.5, n.1, p.49-57, 2002.
- REDIVO, A. L.; RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; JÚNIOR, O. A. D. C.; GOMES, R.A. T. Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na BR-256 no município de Ouro Preto – MG. **Ciência e Natura – UFSM**, p.31-46, 2004.
- REID, S. C.; LANE, S. N.; MONTGOMERY, D. R.; BROOKES, C. J. Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments? **Geomorphology**, v.90, 2007. p.263-282.
- RINCO, L. **Alterações na Dinâmica Superficial da Microbacia de Drenagem do Ribeirão do Yung em Juiz de Fora – MG**. Monografia de Conclusão de Curso. Departamento de Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2003.
- SALCIARINI, D.; CONVERSINI, P. **A comparison between analytic approaches to model rainfall-induced development of shallow landslides in the central Apennine of Italy**. In: International Conference on Landslides and Climate Change, 2007. p. 185-193.
- SANTINI, M.; GRIMALDI, S.; NARDI, F.; PETROSELLI, A.; RULLI, M. C. Pre-processing algorithms and landslide modeling on remotely sensed DEMs. **Geomorphology**, v.113, 2009. p. 110-125.
- SANTOS, M. R. G. **Aplicação dos Métodos Fuzzy e Bayesiano para o estudo de Instabilidade de encostas no município de Teresópolis – RJ**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2000. p. 155.
- SASSA, K. Geotechnical Classification of Landslides. **Landslides News**, v.3, 1989. p.21-24.
- SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. 2 ed. New York: Oxford University Press, 1993. p.451.
- SHARPE, C. F. S. **Landslides and related phenomena: A study of mass-movements of soil and rock**. New York: Columbia University Press, 1938. p.137.

- SIDLE, R.C.; H.OCHIAI. **Landslides: Processes, Prediction and Land Use**. Washington, D.C., 1985.
- SILVA, .L.; ARAÚJO, J.; BRAGA, B.; FERNANDES, N. Topographic controls and mathematical modeling of landslides in Southern Brazil. 8th International Conference (AIG) on Geomorphology, Paris, 2013.
- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Nat Hazards**, 2010. p. 313-332.
- TAROLLI. P.; BORGA, M.; CHANG, K.; CHIANG, S. Modeling shallow landsliding susceptibility by incorporating heavy rainfall statistical properties. **Geomorphology**, v.133. p. 199-211.
- THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY DISASTERS – (EM-DAT/OFDA/CRED) – Universite Catholique de Louvain, Brussels, Belgium. Disponível em: <http://www.em-dat.net>. Último acesso em: 18/06/2012.
- TOBIN, G.A.; MONTZ, B.E. **Natural Hazards: explanation and integration**. The Guilford Press, 1997.
- van WESTEN, C.J.; van ASCH, T.W.J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation – Why is it still so difficult? **Bulletin of Engeneering geology and the environment**, 2006, v.65. p. 167-184.
- van WESTEN, C. J.; van DUREN, I.; KRUSE, H. M. G.; TERLIEN, M. T. J. **GISSIZ: training package for Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation**. ITC Publication, Enschede, The Netherlands. 1993.
- VARNES, D.J. Landslide types and processes. In: **Landslides and Engineering Practice: National Research Council**. Highway Research Board Special Report, 1958. p. 20-47.
- VARNES, D. J. Slope movements types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R.J. (ed.). **Landslides. Analysis and Control**. Washington: National Academy of Science, v. Transportation Research Board Special Report, 1978. p.11-33.

- VIEIRA, B.C. **Previsão de Escorregamentos Translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. p. 193.
- XAVIER-DA-SILVA, J.; CARVALHO-FILHO, L. M. **Sistema de Informação Geográfica: uma proposta metodológica.** IV Conferência Latino Americana sobre Sistemas de Informação Geográfica e II Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. São Paulo: EDUSP, 1993. p.609-628.
- ZAIDAN, R. T. Zoneamento de Susceptibilidade a Escorregamentos em Encostas Aplicado à Bacia de Drenagem Urbana do Córrego do Independência – Juiz de Fora/MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.10, n.2, 2009. p.57-76.
- ZAIDAN, R.T.; FERNANDES, N. Zoning and Analysis of landslide risk in the urban watershed of the Stream of Independencia in the city of Juiz de Fora (MG/Br). 8th International Conference (AIG) on Geomorphology, Paris, 2013.
- ZARUBA, Q.; MENCL, V. Landslides and their control. Amsterdam: Elsevier, 1976. p. 205.