

ANÁLISE ESPACIAL DAS VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS E MOVIMENTOS DE MASSA NA REGIÃO SERRANA FLUMINENSE

Spatial Analysis of Geomorphometric Variables and Mass Movements in Fluminense Mountainous Region

Ulisses dos Santos Gonçalves¹ & Cristiane Nunes Francisco²

¹Universidade Federal Fluminense – UFF

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biosistemas – PGEB

Rua Passo da Pátria, 156, bloco D sala 236, São Domingos, Niterói, RJ, CEP: 24.210-240, Brasil
uligon@gmail.com

²Universidade Federal Fluminense – UFF

Instituto de Geociências – Departamento de Análise Geoambiental

Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº, Campus da Praia Vermelha, Boa Viagem, Niterói, RJ, CEP: 24.210-346, Brasil
crisnf@vm.uff.br

Recebido em 17 de Novembro, 2015/ Aceito em 22 de Abril, 2016

Received on November 17, 2015/ Accepted on April 22, 2016

RESUMO

O objetivo do presente estudo é fazer a análise espacial da geomorfometria das encostas atingidas por movimentos de massa a fim auxiliar na pesquisa sobre papel da geomorfologia na ocorrência destes eventos. Foram utilizadas as cicatrizes dos movimentos de massa oriundos de um dos maiores desastres climáticos do Brasil, ocorrido região serrana do estado do Rio de Janeiro em janeiro de 2011. As cicatrizes foram sobrepostas aos mapas de declividade e curvatura horizontal a fim de caracterizar a geomorfometria das encostas através da quantificação da área de cicatrizes nas classes dos mapas temáticos. Os resultados demonstraram a presença de área maior de cicatrizes nas classes intermediárias de inclinação (20 a 45°), e o acréscimo da sua densidade com aumento da declividade, tornando-se inferior a 1 acima de 50°. Quanto à curvatura horizontal, os setores da encosta onde há convergência de fluxo foram os mais atingidos pelos movimentos de massa, com valores maiores de densidade das cicatrizes nos setores convergentes, seguidos pelos setores de curvatura planar e, por último, pelos setores divergentes. Como conclusão do trabalho destaca-se o papel das variáveis geomorfométricas na ocorrência dos movimentos de massa, pois os trechos das encostas com declive intermediário e convergentes foram os mais atingidos pelos movimentos de massa nos eventos de 2011.

Palavras chave: Deslizamentos, Corridas de Lama, Sobreposição de Mapas, Geoprocessamento.

ABSTRACT

The aim of present study is to do the spatial analysis of slope geomorphometry affected by mass movements to aid the research about the role of the geomorphology in occurrence of these events. It was used the scars of mass movements occurred during one of the major climatic disaster of Brazil that happened in the mountainous region of Rio de Janeiro state. The scars were overlaid on slope and horizontal curvature maps to describe the geomorphometry of slopes through

the quantification of scars area presents in the classes of thematic maps. The results showed the largest area of scars occurred in intermediate gradient classes (20 a 45°), and the addition of density with the increase of the slope, becoming less than 1 in slopes above 50°. In relation of horizontal curvature, the slope sectors with convergence flows were more affected by mass movements, and the density scars had highest values in the convergence sectors, followed by planar curvature and, at last, by divergence sectors. In conclusion, it highlights the role of geomorphometric variables in occurrence of mass movements, because the slopes with intermediate values of gradient and convergence curvature were most affected by mass movements during the events occurred at 2011.

Keywords: Landslides, Mudflows, Overlay of Maps, Geoprocessing.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011, a região serrana do estado do Rio de Janeiro foi atingida por elevados índices de chuvas, que afetaram de forma violenta os diversos municípios situados nessa região, entre eles Nova Friburgo. As chuvas provocaram o transbordamento de rios e a ocorrência de movimentos de massa, causando perda de vidas humanas e danos patrimoniais inestimáveis. Segundo Ministério Público do Rio de Janeiro, 34 mil pessoas ficaram desabrigadas e desalojadas, mais de 900 mortes foram registradas e cerca de 400 pessoas foram consideradas desaparecidas na área atingida pelas chuvas (PORTAL G1, 2011).

Estudos de Moura (2013), Dourado et al. (2012) e Canedo *et al.* (2011) demonstraram que a precipitação se comportou de forma anômala em janeiro de 2011, com índices muito acima da média nos dias que antecederam a tragédia, iniciando-se o encharcamento do solo que, posteriormente, combinado com as chuvas pré-frontais de 11 de janeiro, e a formação de uma cumulus nimbus na madrugada do dia 12, desencadearam a ocorrência de numerosos movimentos de massa provocados por chuvas fortíssimas localizadas nas cabeceiras dos vales. De acordo com a Canedo *et al.* (2011), os eventos pluviométricos ocorridos em janeiro de 2011 foram absolutamente extraordinários. Entre 0 h do dia 11 de janeiro e 7 h do dia 12 de janeiro, ou seja, em 32 horas de chuva, os índices atingiram valores entre 198 a 282 mm em quatro estações localizadas em Nova Friburgo, com intensidade fortíssima durante 4,5 horas na madrugada do dia 12 de janeiro, alcançando volumes superiores, na ordem de 222 a 495%, aos valores mensais registrados no mês de janeiro de 2010 nas respectivas estações.

Os trabalhos realizados DRM-RJ (2015),

Pinto e Freitas (2012) e Souza (2011), que analisaram o evento sob a perspectiva geológica e geomorfológica, constataram que, além da pluviosidade, as feições de relevo, como a forma das encostas e a declividade do terreno, influenciaram na ocorrência de corridas e escorregamentos. Dias e Lima (2012) realizaram um mapeamento com mais de 2,4 mil cicatrizes dos movimentos de massa na área afetada pelas chuvas de 2011 no município de Nova Friburgo que, sobreposto aos mapas do sistema viário e da cobertura do solo, concluíram que não é possível inferir que a ocupação antrópica tenha sido determinante na incidência dos movimentos de massa, no entanto apontam que a pluviosidade (de proporções catastróficas inéditas) e o relevo foram fatores que apresentaram correspondência direta com os movimentos de massa.

O registro das cicatrizes, logo após a ocorrência dos eventos, necessário para realização desses estudos, é atualmente possível através de sensores multiespectrais orbitais de alta resolução espacial, que permitem que o imageamento se efetue assim que as condições atmosféricas sejam favoráveis.

Modelos Digitais de Elevação (MDE), gerados a partir do avanço tecnológico dos sensores remotos, surgem também como alternativa à escassez de bases cartográficas no Brasil, fornecendo subsídios para a caracterização do relevo através da geração de mapas geomorfológicos, como declividade e forma das vertentes.

Assim, diante do avanço das geotecnologias na geração de dados topográficos e da disponibilidade de dados sobre as cicatrizes decorrentes de um dos maiores desastres climáticos do Brasil, bem como da importância de estudos que relacionam os fatores geomorfológicos à ocorrência de movimentos de massa, o presente estudo tem como objetivo realizar

análise espacial da geomorfometria das encostas atingidas por movimentos de massa, através da realização de sobreposição dos mapeamentos das cicatrizes, da curvatura e da declividade das vertentes, com intuito de auxiliar na análise do papel da geomorfologia na ocorrência de movimentos de massa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Entende-se por movimentos de massa o transporte de rochas, detritos e/ou volumes de solo pela ação gravitacional vertente abaixo. São processos naturais relativos à evolução das encostas e apenas se caracterizam como risco quando ocorrem próximo a áreas de ocupação ou atividades humanas (FERNANDES & AMARAL, 2000). Os movimentos de massa variam em função das características do ambiente – natureza do material movimentado, topografia do terreno, clima e cobertura vegetal, como também do tempo de duração do movimento, podendo ocorrer de modo muito lento ou abruptamente (DREW, 2005). Nos eventos de rápida duração estão a combinação de três fatores: a) predisponentes, como a litologia e morfologia, b) desencadeadores, como chuvas intensas, e c) aceleradores, como a atividades humanas que alteram a estabilidade natural da encosta (SANTINIA *et al.* 2009)

Tais eventos são característicos da paisagem brasileira, especificamente na porção oriental, por apresentar a conjunção de diversos fatores relacionados à movimentação de massa como: grande extensão de maciços montanhosos muito íngremes, elevados índices pluviométricos e marcante ocupação humana nas encostas (GUIMARÃES *et al.*, 2009, FERNANDES & AMARAL, 2000; MEIS & XAVIER-DASILVA, 1968).

De acordo com Guerra (2008), os movimentos de massa podem ser desencadeados pela combinação de diversos fatores, como o aumento da ação da gravidade, em virtude da maior declividade do terreno, ou ainda, por incremento na precipitação. Para Fernandes *et al.* (2001), os movimentos de massa são condicionados por um conjunto de relações complexas entre si, ligadas a fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos, antrópicos, entre outros. No mesmo sentido, Guidicini e Nieble (1984) afirmam que o tipo de rocha, a estrutura

do solo, a cobertura vegetal, a precipitação, além da ocupação antrópica, atuam na movimentação coletiva de massa, tornando complexa a análise desses eventos.

Em virtude da complexidade dos materiais, processos e condicionantes envolvidos em tais ocorrências, observam-se diversas propostas de classificações dos movimentos de massa (FERNANDES; AMARAL, 2000). Destacam-se no Brasil, as classificações que tipificam os movimentos em: quedas, subsidências escorregamentos e escoamentos (corridas e rastejos) (GUIMARÃES *et al.*, 2008)

Diversos trabalhos já relacionaram a topografia com a suscetibilidade a movimentos de massa, como em Guimarães *et al.* (2008), Yamagishi e Iwahashi, (2007), Ayalew *et al.*, (2004) Regmi *et al.*, (2003). A topografia atua tanto de forma direta, pela diminuição do fator de segurança com o aumento do ângulo de inclinação das encostas, quanto indiretamente pela formação das zonas de concentração de fluxos definidas pela inclinação das encostas (FERNANDES; AMARAL 2000). Desta forma, a declividade do terreno é uma variável básica na investigação dos movimentos de massa, devido à estreita associação com processos de transporte gravitacional (VALERIANO, 2008). No entanto, a análise isolada do papel desempenhado por essa variável é uma tarefa difícil, pois, como afirma Fernandes *et al.* (2001), é evidente a existência de relações entre a declividade e outros parâmetros, tais como espessura do solo, que também exercem influência na estabilidade das encostas.

Estudos geomorfológicos têm chamado a atenção para o papel desempenhado pelas porções côncavas do relevo na convergência dos fluxos de água, tanto em superfície quanto em subsuperfície, que contribui diretamente para a saturação dos solos, desencadeando os movimentos de massa (FERNANDES *et al.* 2001). De acordo com Ayalew *et al.* (2004), há um consenso de que as encostas côncavas apresentam alta probabilidade de ocorrência dos eventos, devido a concentração de água nas profundas camadas do solo, por outro lado, muitos pesquisadores concordam que as superfícies convexas necessitam de longo tempo para desenvolvê-los, pois a geometria da encosta faz com que a água drenada seja dispersada. No

entanto, neste estudo desenvolvido para o Japão, os autores afirmam que não foi identificada diferença significativa na densidade de cicatrizes entre os perfis côncavos e convexos.

Nesse mesmo sentido, Nery (2011) aponta a curvatura da encosta como um importante parâmetro topográfico no controle hidrológico das encostas, bem como Valeriano (2008), afirmando que essa variável está relacionada à intensidade dos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície proporcionados pela gravidade.

No entanto, até a década de 1990, estudos sobre a relação entre as variáveis geomorfológicas e os movimentos de massa, através da sobreposição de mapas, eram esporádicos, devido, principalmente, à escassez de bases cartográficas e de mapeamento dos movimentos de massa. Esse procedimento metodológico, denominado por Xavier-da-Silva e Carvalho Filho (1993) como assinatura ambiental, consiste no cruzamento das ocorrências territoriais do fenômeno estudado sobre diversos planos de informação, objetivando quantificar a ocorrência dos eventos em variáveis ambientais e, assim, possibilitar a identificação das características ambientais presentes na área alvo que possam ter influenciado na ocorrência do fenômeno estudado. Neste sentido, deve ser citado o trabalho de Francisco (1996) que, com uso do Sistema de Análise Geoambiental (SAGA/UFRJ), realizou estudo a partir do cruzamento de 67 cicatrizes, referentes aos eventos ocorridos entre 1966 e 1988 no Maciço da Tijuca, e da base de dados composta por dez mapas temáticos, entre eles declividade e orientação de vertentes.

Guimarães *et al.* (2008) afirmam que dados obtidos por sensores remotos apresentam grande utilidade na detecção, mapeamento e movimentos de massa, pois, a partir da interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélites, é possível identificar feições como superfície de ruptura, cicatrizes de escorregamento e leques de deposição. Neste sentido, o avanço tecnológico dos sensores remotos nas últimas décadas tornou-se um recurso fundamental para a obtenção de dados da superfície terrestre, diminuindo a necessidade de levantamentos de dados em campo e o tempo necessário para a coleta de

dados, bem como permitindo o levantamento em locais de difícil acesso.

Da mesma forma os dados altimétricos que, até o final do século XX, eram gerados essencialmente por levantamentos aerofotogramétricos e topográficos, atualmente são obtidos por sensores remotos, como o radar interferométrico e o perfilamento a laser. Os dados topográficos levantados por sensores digitais são disponibilizados em MDE, e possibilitam a geração automática de mapas geomorfométricos por sistemas georreferenciados, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). De acordo com Santinia *et al.* (2009), as aplicações de análise do terreno utilizando MDE permitem quantificar a morfologia das bacias hidrográficas e as propriedades morfológicas e hidrológicas, além de índices hidrogeomorfológicos indiretos, que são capazes de caracterizar os processos físicos que controlam a evolução das encostas. De acordo com Ayalew *et al.* (2004), devido ao avanço da tecnologia, os MDE são agora as ferramentas padrão para análise dos movimentos de massa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Como área de estudo, foi estabelecido o alto curso do Rio Grande (Figura 1), por apresentar elevado número de cicatrizes oriundas dos eventos pluviométricos ocorridos em 2011, correspondendo, assim, a bacia hidrográfica mais atingida pelas fortes chuvas no município de Nova Friburgo.

3.1 Área de estudo

A área em estudo pertence à Região Hidrográfica Dois Rios, situada na porção setentrional do município de Nova Friburgo, compreendendo o distrito-sede, os distritos de Conselheiro Paulino e Rio Grandina, e parte de Campo do Coelho e Amparo. Possui 34,5 mil ha, ou seja, 35% do território municipal, onde residem cerca de 16 mil habitantes, representando 9% do contingente populacional friburguense, de acordo com Censo Demográfico 2010 do IBGE.

Localizado na unidade geomorfológica Planalto Reverso da Região Serrana, inserido na unidade morfológica Escarpas das Serras do Couto e dos Órgãos, o alto curso do Rio Grande é caracterizado por relevo extremamente acidentado, composto predominantemente por

vertentes íngremes, côncavas e retilíneas, e topos bastante destacados na paisagem, tendo

como ponto culminante o Pico da Caledônia com altitude superior a 2.300 m (DANTAS, 2001).

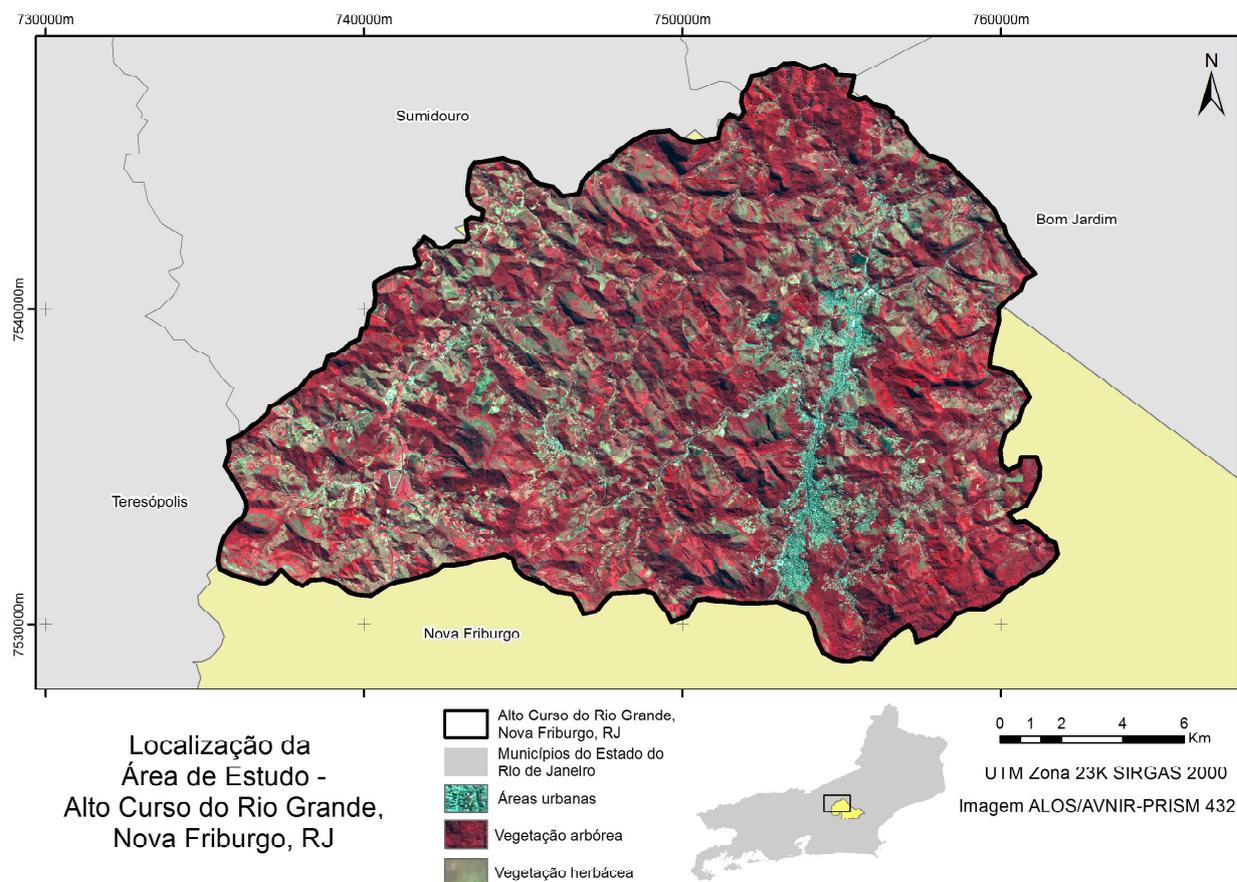


Fig. 1 - Localização da área de estudo, Alto Curso do Rio Grande, Nova Friburgo, RJ.

A orografia da região influencia nas condições climáticas, com predomínio de clima subtropical, com temperaturas médias que variam entre 13,8°C e 24,3°C (NIMER, 1989), e elevados índices pluviométricos que atingem total anual próximo a 2.500 mm nas áreas mais altas, diminuindo progressivamente para o norte até alcançar 1.300 mm (CANEDO *et al.* 2011).

A região pertence ao Bioma Mata Atlântica e tem como formação vegetal dominante a Floresta Ombrófila Densa Montana (VELOSO *et al.*, 1991). Os terrenos íngremes, elevados e, conseqüentemente, pouco acessíveis, facilitam a manutenção da cobertura florestal em cerca de 60% do município de Nova Friburgo (FRANCISCO & ALMEIDA, 2012), incluindo florestas secundárias em diferentes estágios de sucessão, sujeitas à exploração seletiva ou regeneradas após o abandono de áreas agrícolas e pastagens (BOHRER, 1998).

Nos alvéolos de relevo suave, relevantes

nesta unidade, estão situados os sítios urbanos e as atividades agrícolas na região. Devido ao gradiente elevado do relevo montanhoso dominante, associado à expansão urbana e das atividades econômicas, como o turismo e o hortifruticultura, a área de estudo apresenta um alto potencial de suscetibilidade a eventos de movimentos de massa e erosão (DANTAS, 2001).

3.2 Etapas do trabalho

O mapeamento das cicatrizes dos movimentos de massa foi gentilmente cedido pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Nova Friburgo (SMMA/NF), tendo sido elaborado a partir da interpretação visual das imagens GeoEye, com resolução espacial de 0,42 m, obtidas em 19 de janeiro de 2011.

Como base de dados topográficos, foi utilizado o MDE do banco de dados geomorfométricos TOPODATA, elaborado

a partir do processamento dos dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) através da interpolação dos dados altimétricos por krigagem, resultando em modelos com resolução espacial de 30 m (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010).

A área de estudo foi delimitada por vetorização manual, tendo como base a análise das curvas de nível, geradas por processamento do MDE do TOPODATA, conjuntamente com as imagens ALOS/AVNIR-2, fusionadas à banda pancromática ALOS/PRISM, com resolução espacial de 2,5 m, obtidas em agosto de 2009, e a rede de drenagem das cartas topográficas do mapeamento sistemático 1:50.000 do IBGE. A delimitação da área de estudo foi feita seguindo os divisores de água das sub-bacias do Rio Grande – Córrego d'Antas, Rio Caledônia e Rio Roncador, no entanto foi excluído o alto curso do Rio Caledônia, situado ao sul da área de estudo, por aí ocorrer número inexpressivo de cicatrizes.

A declividade foi gerada a partir do processamento do MDE TOPODATA na extensão ArcGIS 3D Analyst v. 10. Essa variável representa o ângulo de inclinação (zenital) da superfície do terreno em relação à horizontal cujos valores variam de 0° a 90°, ou de zero ao infinito, correspondendo, nesse intervalo, à tangente do ângulo de inclinação expresso em porcentagem. Seu cálculo é baseado nos desníveis altimétricos e na distância entre pixels vizinhos do MDE executado por um sistema georreferenciado (VALERIANO, 2008).

A classificação da declividade foi feita com base no método de intervalos iguais que resultou em 15 classes com intervalo de 5°. Optou-se por utilizar essa classificação, e não a tradicional definida por tipo de relevo, pois os intervalos de cada classe são díspares, afetando o cotejo da relação entre a faixa de declividade e os movimentos de massa.

Para a geração da curvatura horizontal também foi utilizado o MDE TOPODATA na extensão ArcGIS 3D Analyst v.10. Esta variável expressa a forma das vertentes observadas em projeção horizontal (em planta), correspondendo a variação da orientação de vertentes ao longo das curvas de nível. O seu cálculo é baseado na diferença do ângulo azimutal dividida pela distância horizontal, normalmente expresso em graus por metro, a partir da comparação entre a

orientação de vertentes na vizinhança do pixel medida por janelas móveis em um MDE por um sistema georreferenciado (VALERIANO, 2008).

A curvatura horizontal influencia na direção dos fluxos nas encostas, exercendo, assim, um papel importante na ocorrência dos movimentos de massa. Nas encostas com curvatura horizontal convergente, há tendência na concentração dos fluxos e presença de canais de escoamento superficial, podendo originar voçorocas e canais de primeira ordem (MOURA *et al.*, 1991), enquanto as divergentes correspondem a zonas de dispersão de água.

A classificação da curvatura horizontal foi feita com base no método de área equivalente, ou seja, os intervalos são estabelecidos de modo que cada classe apresente áreas equivalentes. Foram geradas cinco classes, cada uma apresentando cerca de 20% da área de estudo, nas quais os menores valores de curvatura correspondem às seções de encostas convergentes, os valores intermediários às seções planares, enquanto os maiores valores às seções divergentes.

Os mapas de declividade e curvatura foram gerados em formato raster com resolução espacial de 1 m, de modo que as cicatrizes com pequena área fossem desconsideradas na etapa seguinte de sobreposição dos mapas temáticos. Essa etapa visou estabelecer a relação espacial entre as variáveis geomorfométricas estudadas e as cicatrizes dos movimentos de massa através da mensuração da área de ocorrência das cicatrizes em cada classe temática. A sobreposição foi feita aplicando a operação zonal disponível na extensão ArcGIS Spatial Analyst v.10, que apresenta como resultado tabelas contendo a área de interseção de cada cicatriz nas classes temáticas. Para cada classe foi calculada a área (hectare e %) das cicatrizes aí presentes e a densidade da área de cicatriz por área da classe (densidade).

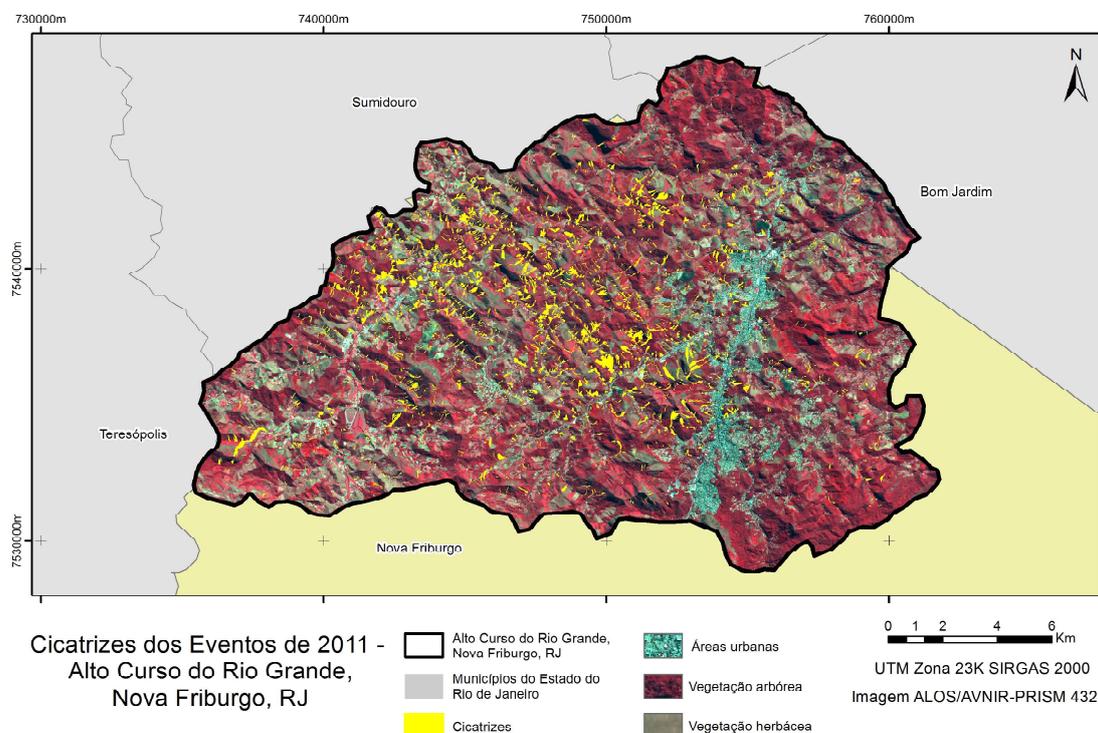
Por fim, para auxiliar na interpretação dos resultados, sabendo que a dinâmica dos fluxos hidrológicos se altera com o tipo de uso predominante no terreno, realizou-se a sobreposição entre o mapa de cobertura da terra e as variáveis geomorfométricas. Foi utilizado o mapa de cobertura da terra elaborado por Francisco e Almeida (2012), a partir da Análise de Imagens Baseada em Objetos Geográficos (GEOBIA - Geographic Object-Based Image

Analysis) de imagens ALOS/AVNIR-2 e ALOS/PRISM, obtidas em 2009, conjuntamente com dados de relevo do banco de dados TOPODATA.

4. RESULTADOS

O mapeamento de cicatrizes contém um total de 2.211 eventos, cada um representando

uma única ocorrência ou várias ocorrências que se uniram e formaram um evento complexo (Figura 2). Estão distribuídas espacialmente de modo desigual na área de estudo, concentrando-se no setor noroeste e central, e diminuindo a concentração no Sudeste.



A área das cicatrizes soma um total de 1.458 ha, correspondendo a 4% da área de estudo, com extensão variando de 0,002 ha a 24,5 ha, apresentando área média de 0,66 ha e desvio padrão de 1,42 ha. As ocorrências, que apresentam área compreendida entre mais e menos um desvio padrão, somam a 2.118, ou seja, 95% do total, com área média de 0,43 ha, enquanto as maiores cicatrizes, as 93 restantes, apresentam área média de 5,72 ha. Esses valores demonstram que predominaram ocorrências de menor extensão (Tabela 1).

4.1 Declividade das vertentes e cicatrizes

De acordo com o mapa de declividade (Figura 3), a classe com maior área corresponde ao intervalo 15°-20°, seguida pelas classes 10°-15° e 20°-25°, correspondendo ao relevo fortemente ondulado, e representando conjuntamente 63% da área de estudo. As classes correspondentes ao relevo ondulado e ao relevo montanhoso possuem áreas próximas, com cerca de 14% cada

classe. Enquanto o relevo plano e fortemente montanhoso também apresentam áreas próximas a 5% cada classe. Apenas 0,7% da área de estudo apresenta declividade superior 45°, correspondendo às Áreas de Preservação Permanente de acordo com o Código Florestal (Lei no. 12.651/2012), no entanto a maior declividade não ultrapassa 70°. A sobreposição entre as cicatrizes e a declividade indica que a maior parte dos movimentos de massa ocorreram em encostas com classes de declividade 15°- 20° e 20°-25°, juntas concentrando 43% da área das cicatrizes (Tabela 2). Considerando o tipo de relevo, verifica-se que a maior parte dos movimentos ocorreu em encostas fortemente onduladas, correspondendo a 59% da área das ocorrências, com a grande maioria localizada entre a declividade 10° e 30°, representando 75% da área das cicatrizes. Nas classes de relevo plano e fortemente montanhoso estão situadas, em cada classe, cerca de 4% da área das ocorrências, sendo que nenhum evento foi registrado acima de 65°.

Tabela 1: Área das cicatrizes dos movimentos de massa de 2011, Alto Curso do Rio Grande, Nova Friburgo, RJ

Cicatrizes	Área (ha)	Área (ha)	
		Menor 1 desvio padrão	Maior 1 desvio padrão
Total	1457,67	925,36	532,31
Menor	0,002	0,002	2,84
Maior	24,49	2,80	24,49
Média	0,66	0,44	5,72
Desvio padrão	1,42	0,53	3,87

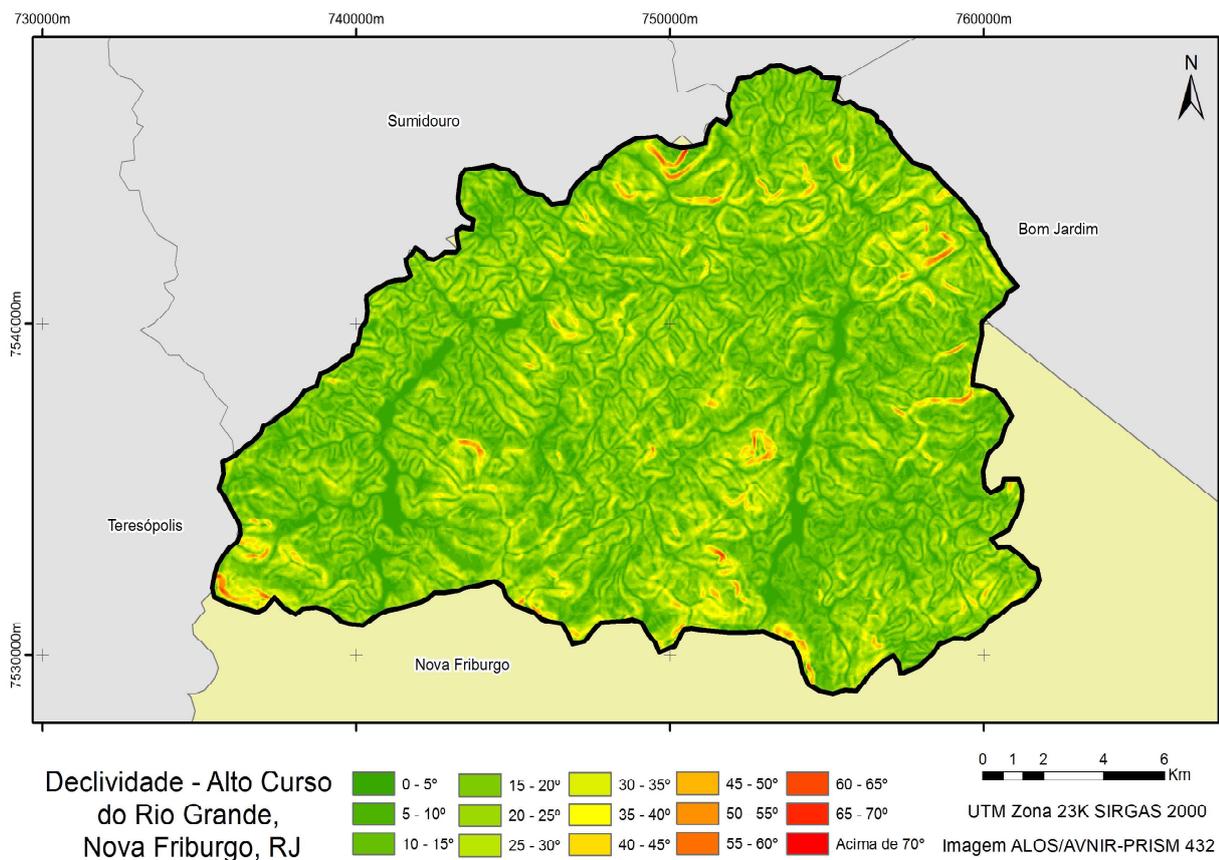


Fig. 3 – Mapa de declividade, Alto Curso do Rio Grande, Nova Friburgo, RJ.

Analisando a densidade de cicatrizes por classe de declividade, obtida pela razão entre a área de cicatrizes em cada classe de declividade e a área da respectiva classe, verifica-se que os valores mais altos de densidade se concentram no intervalo de 15° a 50°, onde o relevo apresenta-se de fortemente ondulado a fortemente montanhoso, com valores de densidade variando entre 0,9 a 1,9, ou seja, 71% da área das cicatrizes estão concentrados em 59% área de estudo (Tabela 2). No entanto, o pico de ocorrência está na faixa entre 20° e 45°, com

densidade variando entre 1,2 e 1,9, ou seja, em relevo fortemente ondulado a montanhoso, com 49% da área das cicatrizes concentradas em 35% área de estudo.

Verifica-se também que a densidade de cicatrizes aumenta com o aumento da declividade até 35°, a partir desse valor a densidade diminui. As cicatrizes localizadas nas classes de declividade inferior a 20° e superior a 45° apresentam densidades inferiores a 1,0, ou seja, as cicatrizes tanto possuem menor ocorrência em baixa declividade,

correspondendo a relevo plano, quanto em alta declividade, correspondendo a relevo fortemente montanhoso. A presença de cicatrizes em classes de menor declividade pode corresponder aos depósitos do material movimentado ou aos topos das elevações. A

menor presença das ocorrências em declives elevados pode estar relacionada à área inexpressiva dessas classes, representando menos de 1% da área de estudo, em geral correspondendo a afloramentos rochosos e a terrenos com solos pouco espessos.

Tabela 2: Declividade e cicatrizes dos movimentos de massa de 2011, Alto Curso do Rio Grande, Nova Friburgo, RJ

Tipo de relevo	Declividade		Cicatrizes		Densidade de cicatrizes ⁽¹⁾
	Classes	Área (%)	Área (%)	Área (%)	
Plano	0° a 5°	6,4	3,6	3,6	0,02
Ondulado	5° a 10°	13,5	9,7	9,7	0,03
Fortemente ondulado	10° a 15°	20,6	15,9	58,8	0,03
	15° a 20°	23,3	21,2		0,04
	20° a 25°	18,7	21,7		0,05
Montanhoso	25° a 30°	10,1	15,9	23,6	0,07
	30° a 35°	4,1	7,6		0,08
Fortemente montanhoso	35° a 40°	1,8	2,5	4,3	0,06
	40° a 45°	0,9	1,3		0,07
	45° a 50°	0,4	0,4		0,04
	50° a 55°	0,2	0,1		0,02
	55° a 60°	0,1	0,0		0,02
	60° a 65°	0,0	0,0		0,01
	65° a 70°	0,0	0,0		0,00

(1) Hectares de cicatrizes por 1 hectare da classe temática.

Os resultados aqui obtidos são similares aos alcançados em outros trabalhos desenvolvidos sobre o tema. Francisco (1996), com base no estudo de 67 cicatrizes de eventos ocorridos em 1966 e 1988 no Maciço da Tijuca, identificou que 50% das ocorrências concentravam-se em encostas com declividade entre 25° e 45°. Coelho Netto *et al.* (2011), em trabalho realizado na região serrana fluminense, apontaram a relevância da declividade ao identificar que 55% dos deslizamentos na região ocorreram em topos de morro e porções mais elevadas das encostas. Avelar *et al.* (2011), analisando 3.562 cicatrizes de movimentos de massa, mais uma vez corrobora a importância das classes intermediárias de declividade, ao verificar que a maior parte dos movimentos de massa ocorre em inclinações superiores a 21°. REGMI *et al.* (2003), ao analisar 735 cicatrizes no Colorado, EUA, observou que as cicatrizes predominavam entre 15° e 40°, enquanto a classe dominante na

área de estudo estava entre 10° e 20°. Nesse mesmo sentido, Fernandes *et al.* (2001), ao testar modelos matemáticos no Maciço da Tijuca, constatou que maior ocorrência de movimentos de massa era observado com aumento do gradiente de declividade da encosta, com valores extremos entre 37° e 55°.

Por fim, na sobreposição das cicatrizes, declividade e cobertura da terra, verifica-se que a ocorrência das cicatrizes também prevalece nas classes de declividade intermediária. A classe vegetação arbórea, predominantemente constituída por fragmentos florestais, apresenta 22° declividade média nas cicatrizes, e representa 47% da área das cicatrizes e 38% da área de estudo. A vegetação herbácea, constituída por lavouras, pousios e pastos, apresenta declividade média de 18° nas cicatrizes, e está presente em 42% da sua área e 47% da área de estudo. Os afloramentos rochosos, com declividade média 35° nas cicatrizes, representam 4% da sua

área e 3% da área de estudo. Enquanto, a área urbana apresenta declividade média de 16° nas cicatrizes, e representa apenas 4% da sua área e 7% da área de estudo.

4.2 Forma das vertentes e cicatrizes

Como foi utilizado o método de área equivalente para estabelecer os intervalos das classes do mapa de curvatura, cada classe apresenta 20% da área de estudo, ou seja, cerca de 6,7 mil hectares (Figura 4).

Analisando o resultado da sobreposição entre as cicatrizes dos movimentos de massa e a forma das vertentes, verifica-se a maior ocorrência de cicatrizes nas seções de convergência de fluxo, com 58% da área das cicatrizes localizadas

em 40% da área de estudo, enquanto que, nas classes referentes às seções divergentes, a área corresponde a 23% das ocorrências (Tabela 3). A sobreposição entre as cicatrizes, curvatura e cobertura da terra demonstra que as cicatrizes predominam nas seções convergentes e planares em todas as classes temáticas.

Esses valores demonstram que os trechos das encostas convergentes foram os mais atingidos pelos movimentos de massa, com densidade de área de cicatriz por área das classes convergentes na ordem de 0,07 a 0,05, enquanto para os trechos divergentes esse valor está entre 0,03 e 0,02. Verifica-se também que valores de densidade diminuem continuamente das classes convergentes para as divergentes.

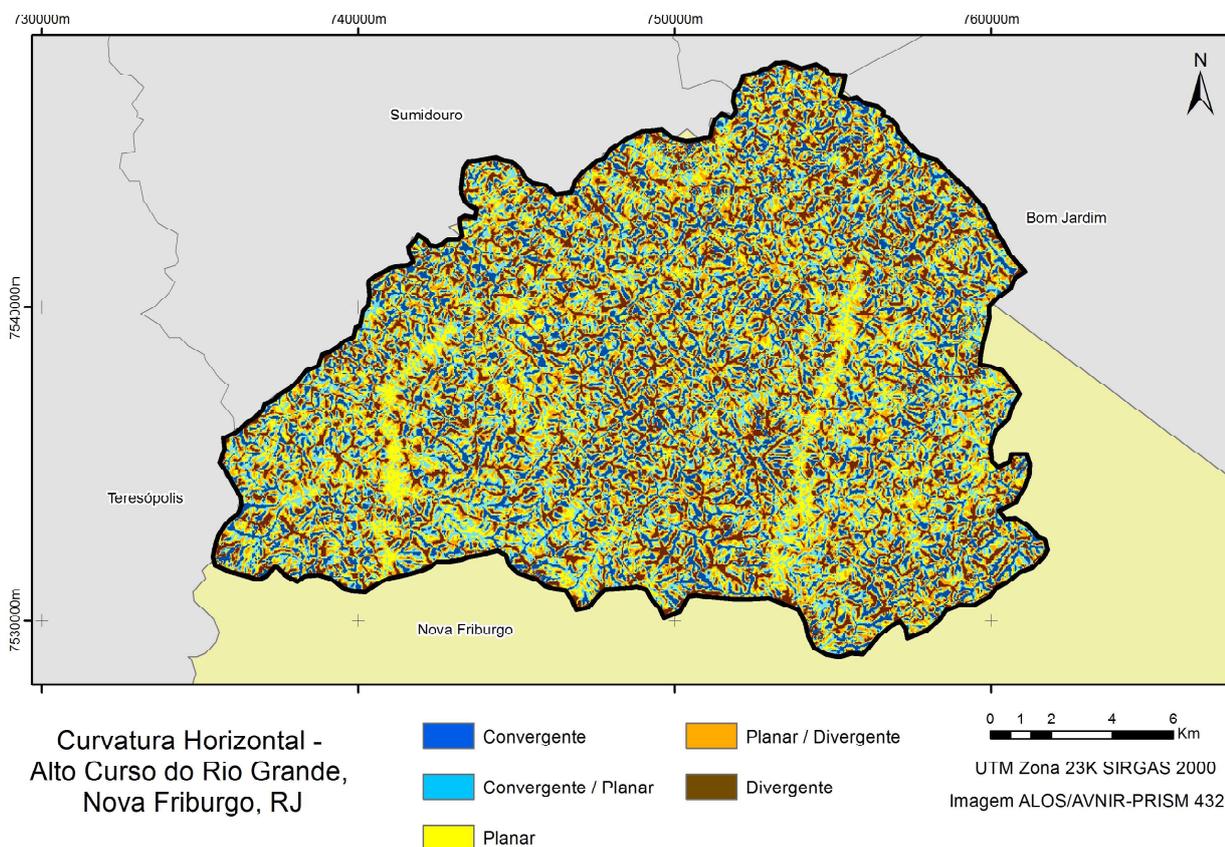


Fig. 4 – Mapa da curvatura horizontal, Alto Curso do Rio Grande, Nova Friburgo, RJ.

Os resultados obtidos neste trabalho são similares aos constatados por Fernandes *et al.* (2001) em estudo sobre condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas do Maciço da Tijuca (RJ). O autor afirma que a forma da encosta, como inicialmente esperado, exerceu grande influência no controle da distribuição espacial dos deslizamentos, embora

as porções convexas sejam as mais frequentes nas bacias estudadas, o potencial de deslizamento das porções côncavas do relevo foi cerca de três vezes maior do que ao associado às feições convexas e retilíneas. De acordo com Ayalew e Yamagishi (2004), em estudos realizados na bacia do Nilo Azul, Etiópia, o tipo de movimento de massa geralmente está relacionado com a curvatura

horizontal: corridas de lama e deslizamentos rotacionais são comuns em encostas côncavas, os translacionais ocorrem principalmente nas planares, enquanto os eventos nas convexas são muito raros, no entanto atingem grande profundidade e extensão, quando ocorrem.

Tabela 3: Curvatura horizontal e cicatrizes dos movimentos de massa de 2011, Alto Curso do Rio Grande, Nova Friburgo, RJ

Curvatura das encostas (horizontal)	Área de cicatrizes (%)	Densidade de cicatrizes ⁽¹⁾
Tende a convergente	34,8	0,07
Convergente / planar	22,7	0,05
Planar	18,3	0,04
Planar / divergente	15,1	0,03
Divergente	9,2	0,02

(1) Hectares de cicatrizes por 1 hectare da classe temática.

5. CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, constata-se que as variáveis geomorfométricas mostraram estar relacionadas à ocorrência dos movimentos de massa. A declividade se mostrou como forte atuante na ocorrência de movimentos de massa, com a maior incidência das cicatrizes nas classes intermediárias de inclinação em todas as classes de cobertura da terra presentes na área de estudo, incluindo as áreas urbanas. Verificou-se acréscimo da densidade de cicatrizes com aumento da declividade, alcançando valor máximo na classe entre 30° e 35°. Todavia, o aumento da densidade é interrompido nas classes acima de 50°, quando então passam a apresentar valores de densidade similares àqueles observados nas classes de declividade menor.

Por sua vez, os resultados da sobreposição entre curvatura horizontal e cicatrizes confirmaram que os setores onde há convergência de fluxo foram os mais atingidos pelos movimentos de massa, em todas as classes de cobertura da terra, incluindo as áreas urbanas. Os valores de densidade das cicatrizes nos setores convergentes

são expressivos, e são seguidos pelos setores de curvatura convergente a planar.

O uso do MDE TOPODATA mostrou-se satisfatório na execução das análises espaciais, dando origem a resultados consistentes, que puderam ser comparados a trabalhos com temas semelhantes. Deste modo, pode-se afirmar que a maior concentração de movimentos de massa, nos eventos ocorridos em janeiro de 2011 em Nova Friburgo, ocorreu em encostas que conjugam declividades intermediárias e curvaturas convergentes.

Entende-se que os eventos extraordinários de pluviosidade, que atingiram a área de estudo na ocasião, foram desencadeadores da tragédia. Mas, é importante salientar que a caracterização fisiográfica da área de estudo, que historicamente registra movimentos de massa, e a combinação entre as variáveis geomorfométricas estudadas nesse trabalho promoveram eventos de corridas de lama e deslizamentos de elevada magnitude na região. No entanto, não ficou clara a influência da ação antrópica, especificamente, da área urbana na ocorrência dos eventos, pois, além da ocorrência das cicatrizes ser reduzida nessa classe, não foi verificada acentuada modificação no valor das variáveis geomorfométricas na área urbana, apesar de ter sido aí registrado decréscimo da declividade. Por outro lado, verificou-se que a maior ocorrência das cicatrizes se deu nos fragmentos florestais onde a declividade é mais elevada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVELAR, A.S; COELHO NETTO, A.L.; LACERDA, W.A.; BECKER, L.B.; MENDONÇA, M.B. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: Second World Landslide Forum, 2, 2011, **Proceedings...** Rome. 2011. p. 265-270
- AYALEW, L; YAMAGISHI, H. Slope movements in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. **Geomorphology**, v. 57, n. 1-2, 2004. p. 5-116.
- AYALEW, L; YAMAGISHI, H., UGAWA, N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. **Landslides**, v. 1. 2004. p. 73-81.

- BOHRER, C.B.A. **Ecology and biogeography of an Atlantic montane forest in southeastern Brazil**. Tese (PhD in Geography) - University of Edinburgh, Edinburgh. 1998. 234p.
- CANEDO, P.; EHRLICH, M; LACERDA, W. A. **Chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro. Sugestões para ações de engenharia e planejamento**. Disponível em: http://www.coppe.ufrj.br/pdf_revista/relatoriochuvas.pdf. Acesso em 30 de setembro 2015.
- COELHO NETTO, A.L; SATO, A.M.; AVELAR, A.S.; VIANNA, L.G.G.; ARAÚJO, I.S.; FERREIRA, D.L.C.; LIMA, P.H.; SILVA, A.P.A.; SILVA, R.P. January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. In: Second World Landslide Forum, 2, 2011, **Proceedings...** Rome. 2011. p.377-384.
- DANTAS, M.E. Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. In: CPRM-Serviço Geológico do Brasil. **Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2001. 35p.
- DIAS, L.F.; LIMA, P.H.F. Mapeamento da espacialidade dos deslizamentos no município de Nova Friburgo, RJ. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 9, 2012, **Anais...** Rio de Janeiro. 2012. 5p.
- DOURADO, F.; THIAGO, C; SILVA, M.F. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. **Anuário do Instituto de Geociências -UFRJ**, v. 35, n. 2, p. 43-54. 2012.
- DREW, D. **Processos interativos homem-meio ambiente**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil. 2005. 224p.
- DRM-RJ. Departamento de Recursos Minerais. **Megadesastre da Serra Jan 2011**. Disponível em: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/13-regio-serrana?download=48%3Amegadesastre-da-serra-jan-2011-pdf>. Acesso em 15 de setembro 2015.
- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicas dos Deslizamentos nas Encostas - Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, 2001. p. 51-71.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.T.; CUNHA, S. B. (Org.) **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2000. p. 123-194.
- FRANCISCO, C.N. Mapeamento das áreas de risco de deslizamentos e desmoronamentos do Parque Nacional da Tijuca (RJ) e entorno através de sistemas geográficos de informação. In: Semana Estadual de Geoprocessamento, 1, 1996, **Anais...** Rio de Janeiro. 1996. p. 197-230.
- FRANCISCO, C.N.; ALMEIDA, C.M. Classificação de cobertura da terra de Nova Friburgo-RJ utilizando duas abordagens: mineração de dados e rede heurística. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 2, 2012. p. 349-363.
- GUERRA, A.J.T. Encostas e a questão ambiental. In: CUNHA, S.B e GUERRA, A.J.T. (orgs.). **A questão ambiental - diversas abordagens**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil. 2008. p.191-218.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.N. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Editora da USP. 1984. 216p.
- GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T.G (org). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos. 2008. p. 159-184.
- MEIS, M.R.M.; Xavier-da-Silva, J. Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 30, n. 1, 1968. p. 55-73.
- MOURA, C. **Catástrofe climática ocorrida na Região Serrana do Rio de Janeiro em 12/01/2011**. Disponível em: <http://www7.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/120111.pdf> Acesso em: 15 de maio 2014.
- MOURA, J.R.S.; PEIXOTO, M.N.O.; SILVA, T.M. Geometria do relevo e estratigrafia do

- quaternário como base à tipologia de cabeceiras de drenagem em anfiteatro - Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 21, n.3, 1991. p.255-265.
- NERY, T.D. **Avaliação da susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP)**. Dissertação. (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 156p.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. São Paulo: IBGE. 1989. 421p.
- PORTAL G1. **Região Serrana do RJ ainda tem 345 desaparecidos após chuvas, diz MP**. 23 mar. 2011. Disponível em: <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/chuvas-no-rj/noticia/2011/03/regiao-serrana-do-rj-ainda-tem-345-desaparecidos-apos-chuvas-diz-mp.html>. Acesso em 28 set. 2011.
- PINTO, R. W. P.; FREITAS, M. M. Considerações a respeito dos movimentos de massa ocorridos em janeiro de 2011 na Bacia do Córrego D'antas, Nova Friburgo – RJ. **GeoPUC**. Rio de Janeiro, ano 5, n. 9, 2012. p. 79-96.
- REGMI, N.R.; GIARDINO, J. R.; VITEK, J. D. Characteristics of landslides in western Colorado, USA. **Landslides**. Published on line: 05 June 2003.
- SANTINIA, M.; GRIMALDIB, S.; NARDIC, F.; PETROSELLIB, A.; RULLID, M.A. Pre-processing algorithms and landslide modelling on remotely sensed DEMs. **Geomorphology**. v. 113, n. 1–2, 2009. p. 110–125
- SOUZA, J.M. Asevedo. L.A.; Bertolino, A.V.A.F.; Baptista, E.C.F. Diagnóstico dos movimentos de massa na bacia do Rio São Pedro no Município de Nova Friburgo e sua ação nos distintos usos do solo, associado ao evento ocorrido em janeiro de 2011 como instrumento para a gestão e ordenamento territorial. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 12, 2011. **Anais...** Nova Friburgo, RJ. 2011.
- VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **TOPODATA: Processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos: INPE. 2010. 79p.
- VALERIANO, M.M. **TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE. 2008. 75p.
- VELOSO, H.P.; Rangel filho, A.L.R.; Lima, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro. IBGE. 1991. 124p.
- XAVIER-DA-SILVA, J.; CARVALHO-FILHO, L. M. Sistema de Informação Geográfica: uma proposta metodológica. In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, 2, 1993. **Anais...** São Paulo: EDUSP. 1993. p. 609-629.
- YAMAGISHI, H.; IWAHASHI, J. Comparison between the two triggered landslides in Mid-Niigata, Japan by July 13 heavy rainfall and October 23 intensive earthquakes in 2004. **Landslides**. v. 4. 2007 p. 389–397.