

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA EM
ENCOSTAS NATURAIS A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE TERRENO DE ALTA
RESOLUÇÃO**

Elton Barbosa Gomes

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

IEE - USP

Co-Orientador: Geol. MSc. Guilherme Pereira Bento Garcia

IGc - USP

Monografia do Trabalho de Formatura

(TF-18/10)

São Paulo, outubro de 2018

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA EM
ENCOSTAS NATURAIS A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE TERRENO DE ALTA
RESOLUÇÃO**

Elton Barbosa Gomes

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho
IEE - USP

Co-Orientador: Geol. MSc. Guilherme Pereira Bento Garcia
IGc - USP

Monografia do Trabalho de Formatura
(TF-18/10)

São Paulo, outubro de 2018

Agradecimentos

Este projeto só foi possível pelos meus pais e amigos que sempre me apoiaram. Minha mãe e meu pai, Iraides e Antonio, junto com minha irmã Eliana sempre estavam me ajudando e incentivando, além de bancarem toda a minha estadia fora de casa. Ao meu irmão Emerson que bancou boa parte do meu cursinho e que possibilitou que está graduação fosse possível. A minha namorada Camila que sempre esteve ao meu lado nos mais difíceis momentos durante a minha graduação, apoiando e me incentivando. Agradecimentos especiais a toda minha família.

Agradeço ao meu orientador Carlos Grohmann e ao meu co-orientador Guilherme Garcia por toda a ajuda na elaboração deste trabalho. Sempre solícitos e dispostos a esclarecer minhas dúvidas. A Camila Duelis Viana que nos acompanhou durante o trabalho de campo e também me ajudou em alguns questionamentos.

Agradeço a FAPESP por financiar este trabalho através do projeto 2016/06628-0, e também a todas as pessoas do SPAMLab que estavam sempre dispostas a ajudar.

SUMÁRIO

RESUMO	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	4
2. METAS E OBJETIVOS	5
2.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	6
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO	6
3.2. PEDOLOGIA.....	8
3.3. CLIMA E VEGETAÇÃO.....	8
3.4. MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	9
<i>Escorregamentos</i>	9
<i>Quedas de blocos</i>	10
<i>Subsidências</i>	10
<i>Escoamentos</i>	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
5. RESULTADOS	18
MAPA HIPSOMÉTRICO	18
MAPA DE DECLIVIDADE	18
MAPA DE CURVATURAS.....	20
MAPA DE ASPECTO.....	22
MAPA DE RUGOSIDADE.....	23
CARTA DE SUSCETIBILIDADE	24
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	26
7. CONCLUSÕES.....	27
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
9. ANEXOS	32

RESUMO

Encostas de morros, principalmente com ausência de vegetação, sofrem diversos processos erosivos que podem comprometer sua estabilidade. A ocorrência de movimentos gravitacionais de massa nesses taludes geralmente é causada por fenômenos naturais como chuvas e terremotos, e quando próximo a rodovias ou regiões habitadas podem causar enormes prejuízos econômicos, perdas ambientais e mortes. Um dado importante sobre qualquer área é a probabilidade de ocorrência desses movimentos de massa. Estudos mostram que dados como o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) são capazes de fornecer informações suficientes para uma escala regional. A utilização do LiDAR (*Light detection and Ranging*) permite obter dados com precisão milimétrica a centimétrica, melhorando o grau de precisão para uma escala local. Este trabalho tem o objetivo de apresentar dados morfológicos e ao final uma carta de suscetibilidade à movimentos de massa, baseado em um Modelo Digital de Terreno gerado por LiDAR terrestre. Foram gerados mapas de declividade, curvaturas e rugosidade e atribuídos “pesos” para esses mapas. A partir de uma análise estatística bivariada baseada no valor informativo, foi gerada uma carta de suscetibilidade para o local em que ocorreu movimento de massa. Os resultados mostraram que embora haja locais com altas declividades próximas ao escorregamento, esses locais possuem baixa suscetibilidade, e que o local do escorregamento possuía uma alta suscetibilidade antes de ocorrer, o que foi possível determinar através da reconstituição da superfície original do modelo de terreno.

ABSTRACT

Hillslopes, mainly with absence of vegetation, undergo several erosive processes that can compromise their stability. The occurrence of mass gravitational movements on these slopes is usually caused by natural phenomena such as rains and earthquakes, and when near to highways or inhabited regions can cause huge economic and environmental losses, and deaths. Studies show that data such as SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) are able to provide sufficient information for a regional scale. Use of LiDAR (Light detection and Ranging) allows data survey to be obtained with millimeter-to-centimeter precision, improving the accuracy for a local scale. This work presents morphological data and a landslide-susceptibility map, based on a terrestrial LiDAR Digital Terrain Model. Slope, curvature and roughness were weighted to compute and generate susceptibility map for a landslide area. Identification of other slides prone areas were also achieved. In conclusion, high slope areas near the slide usually shows low susceptibility values, and original surface reconstruction demonstrates that landslide occurrence is associated with major susceptibility.

1. INTRODUÇÃO

Encostas de morros, principalmente com ausência de vegetação, sofrem diversos processos erosivos que podem comprometer sua estabilidade. A ocorrência de movimentos gravitacionais de massa nesses taludes geralmente é causada por fenômenos naturais como chuvas e terremotos, e quando próximo a rodovias ou regiões habitadas podem causar enormes prejuízos econômicos, perdas ambientais e mortes (Guerra *et al.* 2007).

Um dos maiores limitantes na previsão e mapeamento dos deslizamentos é a falta de compreensão dos processos como erosão, precipitação e fraturamento das rochas (Glenn *et al.* 2006).

O estudo de estabilidade de taludes e movimentos de massa é fundamental para um planejamento quando se deseja realizar algum tipo de intervenção, seja para prevenção em locais que estejam em risco ou para a tomada de decisão de locais para a instalação de uma futura obra.

Nos últimos anos diversas técnicas estão sendo desenvolvidas para aumentar as informações obtidas através de sensores remotos que utilizam parâmetros geomorfológicos para identificar processos e produtos. Tecnologias que podem ser aerotransportadas ou terrestres como o LiDAR (*Light detection and Ranging*) para obtenção de dados topográficos em alta resolução e permitem identificar escorregamentos de terra, processos de canalização de vertentes, morfologia de rios, áreas tectônicas ativas etc (Tarolli 2014).

O LiDAR possui algumas vantagens quando comparado com as técnicas tradicionais de sensoriamento remoto, como conseguir filtrar a vegetação ou objetos que estão na superfície e produzir Modelos Digitais de Terreno (MDTs) (Tarolli 2014).

Segundo Rowlands *et al.* (2003) o escaneamento a laser aplicado à deslizamentos oferece muitas vantagens em relação ao método de fotografias aéreas, como a elaboração de um modelo topográfico tridimensional; sendo um método mais preciso e com pouca interferência humana na aquisição dos dados. O processamento de dados rápido e com varreduras repetidas exalta mudanças quantitativas na topografia que podem ser indicativos de atividades de escorregamentos.

2. METAS E OBJETIVOS

O título e objetivos do projeto foram alterados devido as mudanças ocorridas durante a etapa de campo e a falta de recursos para realizar um estudo mais aprofundado e classificar os riscos da área estudada.

Os principais objetivos desse projeto são mostrar uma forma rápida e precisa de adquirir dados de terreno para análise de superfície, apresentar uma carta de suscetibilidade para o local analisado e gerar mapas temáticos (hipsometria, declividade, aspecto, curvaturas em planta e perfil), para caracterizar os escorregamentos, assim como identificar através de características semelhantes, locais dentro da área de estudo que são suscetíveis a novos escorregamentos, utilizando para este fim dados topográficos de alta resolução obtidos por LiDAR. A figura 1 mostra o LiDAR gerando a nuvem de pontos e a figura 2 o local do escorregamento.



Figura 1: Imagem do LiDAR (Light Detecting and Ranging) gerando a nuvem de pontos.



Figura 2: Imagem do escorregamento.

2.1. Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Cunha-SP e possui uma área de 15196,3 m². O acesso até a área é realizado de São Paulo pela Rodovia Presidente Dutra até a cidade de Guaratinguetá, utiliza-se a saída para a Rodovia Paulo Virgínio (SP-171), seguindo até a cidade de Cunha (Figura 3). A escolha da encosta para ser estudada nesse projeto foi efetuada durante a primeira etapa de campo.

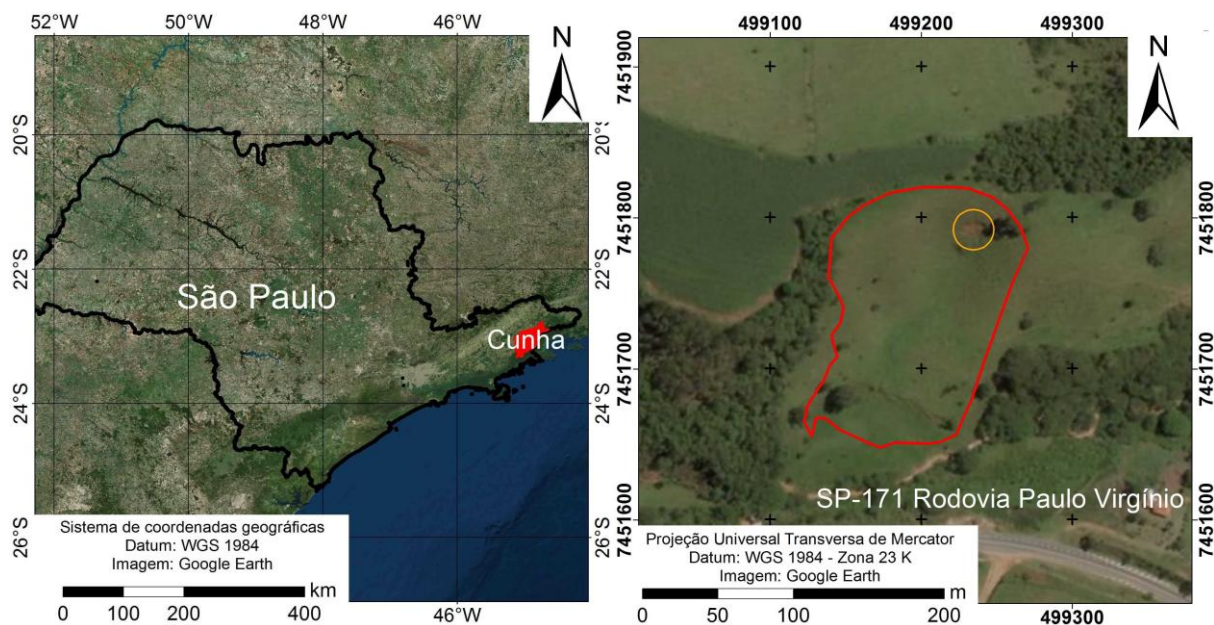


Figura 3: Localização da área de estudo (Fonte: Google Earth Pro. Satélite: Landsat, acessado em 20/07/2018).

O local escolhido foi um escorregamento no km 39,5 da Rodovia Paulo Virgínio (SP-171), composto principalmente por um pasto (Figura 3). Esse local se mostrou ideal, pois havia pouca vegetação que poderia atrapalhar na coleta de dados e de fácil acesso através de uma das fazendas.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Contexto Geomorfológico e Geológico

A área de estudo está inserida no conjunto de escarpas festonadas da Serra do Mar com aproximadamente 100 km de extensão que se estende do Rio de Janeiro ao Norte de Santa Catarina. Próximo ao município de Cunha, a Serra do Mar se localiza na borda do planalto com altitudes que variam entre 800 a 1200 metros (Almeida & Carneiro 1998).

A direção geral da Serra do Mar acompanha a orientação ENE das estruturas do Escudo Atlântico. A complexa história registrada entre o Pré-Cambriano e o Eopaleozóico que originou diversas associações migmatíticas e metamórficas, assim como inúmeros

complexos ígneos, explica a ampla variedade de tipos litológicos do embasamento exposto (Almeida & Carneiro 1998).

Localmente na região de estudo ocorrem as zonas de cisalhamento Caucaia-Rio-Jaguari a norte e a zona de cisalhamento Cubatão na porção sul, ambos de direção N70°E e cortado transversalmente pela zona de cisalhamento Taxaquara-Guararema com direção N80°E (Silva 2017).

A área de estudo está situada na Província Planalto Atlântico (Almeida 1964), apresentando segundo a classificação do IPT (1981) relevo de morros e relevo montanhoso.

O Planalto Paraitinga (Almeida 1964) constitui a região de drenagem da bacia do rio Paraíba e apresenta-se como um planalto cristalino de estrutura complexa. Dentro desta zona estão presentes três domínios: Mar de Morros, Morros Paralelos e Serras Alongadas. O Domínio de Mar de Morros é caracterizado por formas suavizadas de topos arredondados e vertentes com perfis convexos a retilíneos sem herança estrutural acentuada e drenagem de alta densidade. O Domínio de Morros Paralelos, na porção central da área, é caracterizado por formas de topos arredondados e vertentes de perfis retilíneos a convexos. A drenagem é de alta densidade com padrão em treliça a localmente subdendrítica, e declividades médias a altas (superiores a 15%). O terceiro domínio, Serras Alongadas, ocorre entre os domínios de morros. O relevo é do tipo montanhoso com predomínio de declividades médias a altas e amplitudes locais acima de 300 metros, sendo caracterizado por formas de topos angulosos e vertentes ravinadas com perfis retilíneos e algumas vezes abruptos (Viana et al., 2012).

Segundo Perrota *et al.* (2005) o local de estudo está inserido dentro do Complexo Rio Capivari – Núcleo Cunha (Figura 4A). Esse complexo ocorre entre as cidades de São José dos Campos e Paraibuna, representa o embasamento do Complexo Embu, o qual ocorre intercalado em forma de estreitas faixas concordantes com a estruturação (Fernandes 1991).

O Complexo Rio Capivari apresenta uma infraestrutura alongada e encravada em zonas de cisalhamento (Heilbron *et al.* 2004), sendo caracterizado por migmatitos com mesossoma de biotita-hornblenda gnaisses de composição quartzo diorítica-tonalítica, com duas gerações de neossomas, sendo o mais antigo trondhjemítico ou granodiorítico, cinza, e o mais jovem granítico, róseo. Anfibolitos e, mais raramente, rochas calcissilicáticas ocorrem em meio a estas rochas. Ortognaisses de aspecto homogêneo, localmente mais migmatíticos, e de composição granítica a tonalítica são abundantes e se associam aos migmatitos (Fernandes 1991).

O Complexo Rio Capivari – Núcleo Cunha apresenta 19 km comprimento e 2 km de largura, com predomínio de hornblenda-biotita gnaisses tonalíticos, inequigranulares médios

a finos com raríssimos feldspatos potássicos. A maior abundância de leucossomas portadores de hornblenda, em bandas com até 2 cm de espessura, cinzas claros ou rosados, leucocráticos a hololeucocráticos, conferem-lhe em alguns locais, aspecto de migmatito. Boudins centimétricos a decimétricos, anfíbolíticos e boudins mais escassos centimétricos de rochas calciossilicáticas são englobadas pelas rochas descritas (Fernandes 1991).

3.2. Pedologia

A pedologia do local (Figura 4B) com base no mapa da Embrapa (1999) é composta por Latossolos Vermelhos-Amarelos, que são profundos, possuem cores vermelha e amarela, com boa drenagem e geralmente baixa fertilidade natural. São constituídos por material mineral não hidromórficos e são solos menos resistentes ao intemperismo devido a ausência de minerais primários e secundários, assim tem um estágio avançado de intemperização e são muito evoluídos. O latossolo Vermelho-Amarelo está associado ao Complexo Embu e ao Complexo Rio Capivari (IBGE 2007).

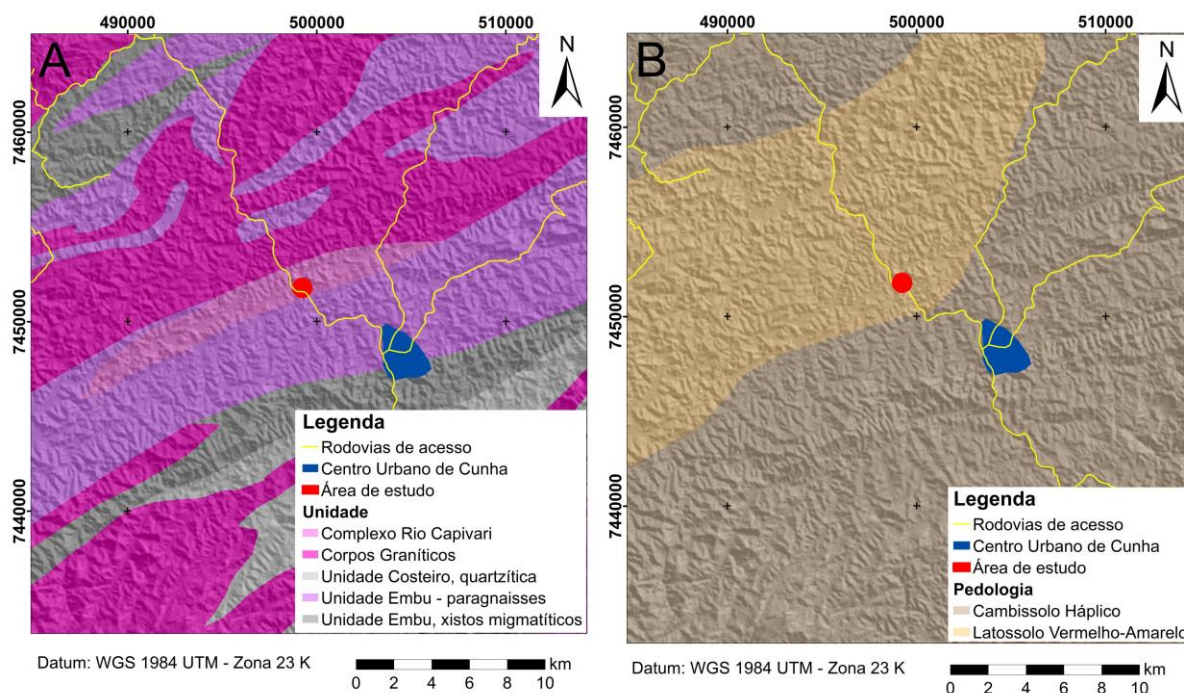


Figura 4: Mapas Geológico e pedológico. Em A, Mapa geológico com destaque em vermelho para o local estudado, modificado de Perrota et al. (2005), escala 1:750.000. Em B, Mapa pedológico com destaque em vermelho para a área de estudo, modificado de Embrapa (1999), escala 1:500.000.

Utilizado o MDE do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 1 arco de segundo. Os mapas são sobrepostos ao relevo sombreado com o azimute a 45° e inclinação a 20° para mostrar feições de relevo e padrões que possam auxiliar na caracterização da topografia.

3.3. Clima e Vegetação

Segundo Da Silva et al. (2005), a cidade de Cunha é classificada como o clima do tipo Cfb pela classificação de Koppen & Geiger (1936), caracterizado como um clima temperado úmido, com período úmido de outubro a março (estação chuvosa) e o período

seco de abril a setembro. A temperatura média anual é de 16,5 °C, com média de 10 °C no inverno e 22 °C no verão. A precipitação média anual é de 2276 mm (Ranzini 2002), com forte efeito da neblina, o que provoca altos índices pluviométricos na região (Anido 2002).

Segundo Da Silva et al. (2005), a cobertura da área é uma vegetação natural secundária, sucessora da vegetação primária Mata Atlântica, o que foi um resultado da exploração madeireira ocorrida no século passado (Da Silva et al., 2005).

O município de Cunha é predominantemente rural onde o uso e ocupação do solo por atividades agropecuárias são bastante expressivos por todo o território do município (Secretaria de Agricultura e Abastecimento, CATI/IEA, Projeto LUPA, 2008).

3.4. Movimentos gravitacionais de massa

Segundo Summerfield (1991), os movimentos de massa são caracterizados como movimentos descendentes do material da encosta sob influência diretamente da força gravitacional e sem o auxílio de movimentos de água, gelo ou ventos.

Os diferentes tipos de movimentos de massa dependem de condições locais, como estrutura geológica, tipo de materiais, declividade, orientação e forma de vertente, área de contribuição, intensidade e distribuição das precipitações (Guimarães et al. 2008).

Segundo Guidicini e Nieble (1984) e IPT (1991), as classificações dos movimentos de massa são: escorregamentos (transacionais e rotacionais), quedas de blocos, subsidências e escoamentos (rastejos e corridas).

Escorregamentos

Os escorregamentos caracterizam-se como processos que ocorrem de forma rápida, com um plano de ruptura definido, o qual separa o material escorregado do não movimentado. São divididos em dois tipos: rotacionais e translacionais (Figura 5) (Guimarães et al. 2008).

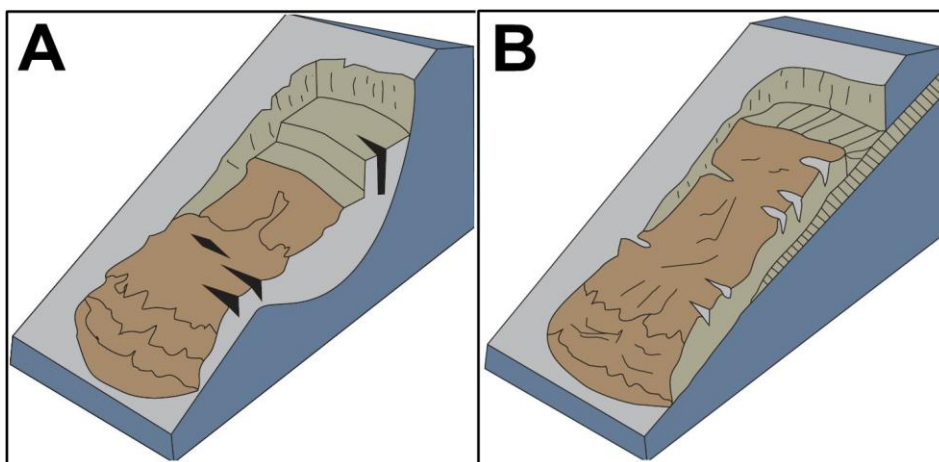


Figura 5: Tipos de escorregamentos. Em A, escorregamento do tipo Rotacional. Em B, escorregamento do tipo Translacional. (USGS 2004).

Os escorregamentos rotacionais são caracterizados por possuírem uma superfície de ruptura curva e côncava que desloca normalmente uma grande quantidade de material de forma rotacional (Guidicini & Nieble 1984; IPT 1991). Esse tipo de escorregamento está vinculado a regiões com formações de pacotes de solo bem desenvolvidos. Seu início, muitas vezes, vincula-se ao desgaste natural da base da encosta, devido ao sistema fluvial, ou então, ao desenvolvimento de condições artificiais, como, cortes de encostas para a construção de estradas (Guimarães *et al.* 2008).

Os escorregamentos translacionais caracterizam-se por apresentarem um plano de ruptura abrupto, bem definido, planar, e por serem um movimento de curta duração (Guidicini & Nieble 1984; IPT 1991). Esses movimentos ocorrem durante chuvas intensas, quando é elevada a poropressão em uma superfície de descontinuidade. A poropressão positiva da água no plano de ruptura altera a estabilidade da encosta, reduzindo a tensão cisalhante do solo e a tensão normal. A ruptura ou a instabilidade da encosta depende do equilíbrio entre as forças estabilizadoras e desestabilizadoras (Guimarães *et al.* 2008).

Quedas de blocos

As quedas de blocos podem ser divididas em quedas de rocha ou de solo, são movimentos rápidos em queda livre pela ação da gravidade e típicos de áreas muito íngremes (Guidicini & Nieble 1984). Nos locais onde esse tipo de movimentos ocorre, normalmente existem fraturas nos paredões rochosos ou um desgaste na base da encosta, o que provoca a queda superior do bloco. Além disso, descontinuidades e/ou alívios de tensão poderão ocasionar quedas (Guimarães *et al.* 2008).

Subsidências

As subsidências são movimentos em que o deslocamento da massa normalmente é vertical, com uma componente horizontal nula ou praticamente nula (Guidicini & Nieble 1984). O fenômeno pode ser de origem natural (epirogenia e falhamentos) ou antrópica, pela retirada de material subterrâneo como: água, petróleo, gás e minério (Guimarães *et al.* 2008).

Escoamentos

Os escoamentos são movimentos contínuos e não apresentam necessariamente uma superfície definida. Podem ser divididos de acordo com suas velocidades, em lentos (rastejo) e rápidos (corridas de massa) (Guimarães *et al.* 2008).

Os rastejos são movimentos lentos e contínuos, que ocorrem nas vertentes sem limites definidos. Podem envolver grande quantidade de material, cuja movimentação normalmente é provocada pela ação da gravidade. Pode ser deflagrada por eventos de chuva de longa duração e altos índices pluviométricos acumulados, que acarreta elevação

progressiva do nível d'água subterrâneo e tendem a instabilizar os terrenos. Desenvolve-se segundo superfícies de rupturas irregulares e pode ser acelerado por intervenções humanas. Pode ocorrer de modo isolado ou associado a escorregamentos (Guimarães *et al.* 2008).

As corridas de massa são caracterizadas por movimentos rápidos, nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos (Guidicini & Nieble 1984; IPT 1991). Esses movimentos mobilizam um expressivo volume de material em um curto período de tempo, com grande velocidade e capacidade de transporte, o qual alcança grandes distâncias (Gramani & Augusto Filho 2004).

Os principais métodos de previsão de movimentos de massa podem ser divididos em quatro grupos: análise da distribuição dos movimentos de massa no campo; análise baseada em mapeamentos geomorfológicos e/ou geotécnicos; aplicação com modelos de bases estatísticas e aplicação de modelos matemáticos (Montgomery & Dietrich, 1994; Fernandes *et al.* 2001).

Neste trabalho será utilizada a análise baseada em parâmetros geomorfológicos, nos quais os mapas temáticos serão gerados a partir dos dados obtidos em campo por LiDAR. Nesses mapas são obtidas ponderações, sendo atribuídos “pesos”, levando em consideração a relevância da característica do mapa analisado para o cálculo da suscetibilidade do terreno a partir do método de Yin & Yan (1988) que utiliza a análise estatística bivariada aplicada.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado permite uma interpretação precisa das características morfométricas e morfológicas da área, utilizando dados obtidos com o LiDAR. Para isso, a metodologia adotada foi constituída por revisão bibliográfica, usos de material cartográfico e *softwares* para processamento de dados SIG que foram coletados em campo, confecção de mapas temáticos (hipsometria, declividade, curvatura, rugosidade) e como produto final a elaboração da carta de suscetibilidade.

As atividades de campo foram realizadas entre os dias 06 a 08 de maio e foi dividido em duas partes. A primeira parte, realizada no dia 06 de maio, foi programada para identificação da área de estudo, e consistiu basicamente em percorrer a Rodovia Paulo Virgínio (SP-171) e algumas estradas vicinais a fim de efetuar o reconhecimento de encostas que sofreram movimentos gravitacionais de massa, e fossem acessíveis para a coleta de dados através do equipamento de escaneamento a laser. Buscou-se também escolher uma encosta com vegetação esparsa ou mesmo ausência de vegetação, pois a mesma poderia interferir no processo de escaneamento prejudicando a qualidade dos dados.

O local escolhido foi um escorregamento no km 39,5 da Rodovia Paulo Virgínio (SP-171), composto principalmente por um pasto e de fácil acesso através de uma das fazendas.

Na segunda parte da atividade de campo no dia 07/05, foi realizada a coleta de 11 visadas para geração de uma nuvem de pontos do talude, para isso foi utilizado o equipamento LiDAR da marca FARO, modelo Focus^s 150, um equipamento que permite varreduras precisas até 150 metros de distância.

Segundo Jones (2010), o LiDAR acoplado com um sistema de posicionamento GPS (*Ground Positioning System*) permite uma digitalização precisa do modelo de terreno tridimensional, podendo realizar varias varreduras independente do período escolhido e compara-las, avaliando diferenças na morfologia, tanto quantitativa como qualitativa.

A coleta de dados ocorrerá seguindo a metodologia proposta por Buckley *et al.* (2008), utilizando vários pontos de visada para realizar a varredura, a fim de ter uma sobreposição de imagens e preencher porções sombreadas. A figura 6 mostra o posicionamento do LiDAR em dois pontos distintos.

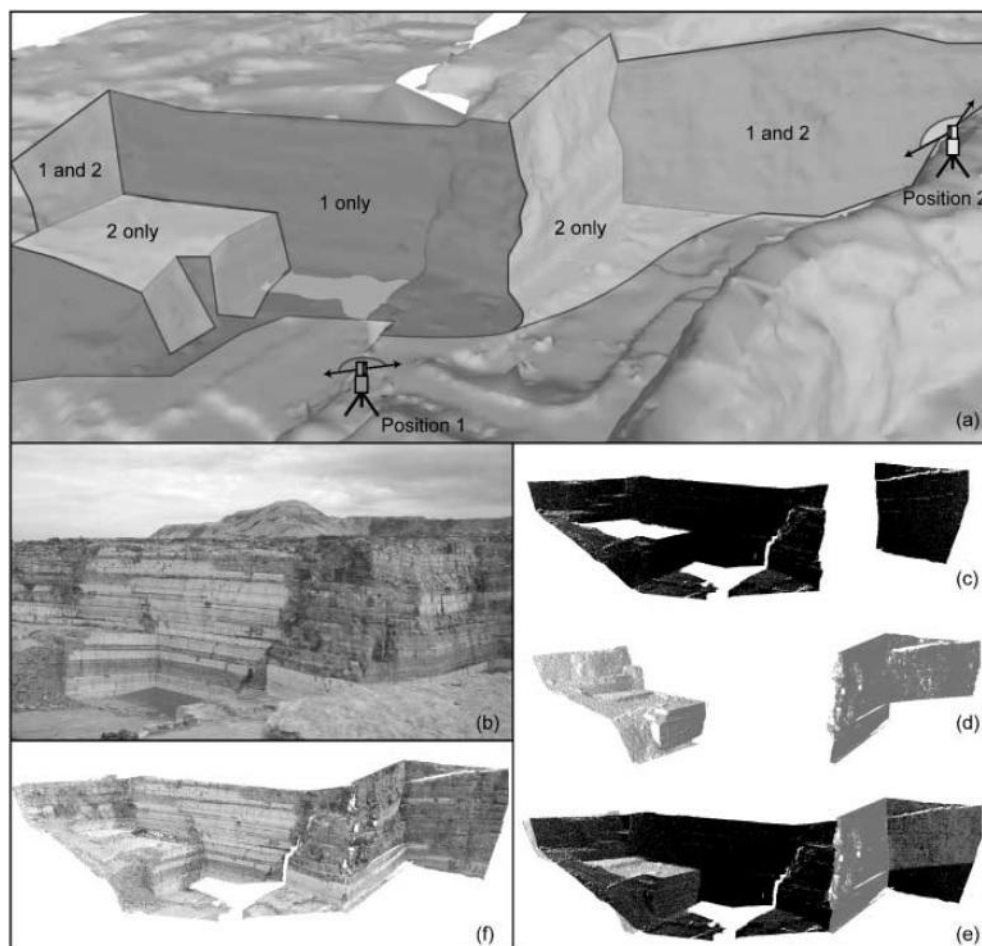


Figura 6: Sobreposição entre varreduras para preencher sombras. Exemplo mostra os carbonatos do Cretáceo Inferior expostos na pedreira de Apricena na Itália, no local foram necessárias várias varreduras para capturar as diversas faces. (a) Ilustração esquemática de sobreposição de duas varreduras. (b) Imagem do afloramento. Foram necessárias duas varreduras (c) e (d) para cobrir as faces mostradas em (a). (e) Nuvens de pontos mesclados, (f) nuvem de ponto colorido. Extraído de Buckley *et al.* (2008).

A aquisição de dados contou com a ajuda de um técnico contratado da empresa Tomasini, juntamente com o Orientador e Co-Orientador. Após a coleta de dados, o pós-processamento da nuvem de pontos foi efetuado pela própria empresa Tomasini, e consistiu basicamente no georreferenciamento, filtragem e geração de uma malha. Dessa forma, o arquivo final que foi utilizado nesse projeto era uma única nuvem de pontos formada pela intersecção das 11 nuvens obtidas em campo.

Análise geomorfológica

A análise geomorfológica se inicia com o processamento de dados para a interpretação de dados geomorfométricos a partir da nuvem de pontos gerada pelo LiDAR. O software *CloudCompare* foi utilizado para a aplicação de filtros e retirada de pontos não representativos do relevo, como árvores e moitas ou até mesmo erros gerados pela nuvem, conhecidos como *outliers*. Utilizando o filtro *Cloth Simulation Filter* (CSF) (Zhang *et al.* 2016), e tendo como parâmetro de entrada a resolução espacial de 10 centímetros, foram retirados os *outliers* que distavam 50 centímetros ou mais da superfície da nuvem, restantes

apenas pequenos arbustos, cupins e demais elementos menores. Em seguida, os dados foram processados no software GRASS GIS. O primeiro *raster* gerado a partir da nuvem de pontos foi para mostrar sua densidade de pontos com resolução espacial de 1 metro, ou seja, os valores mostrados no mapa representam a quantidade de pontos coletados pelo LiDAR por metro quadrado (Figura 7).

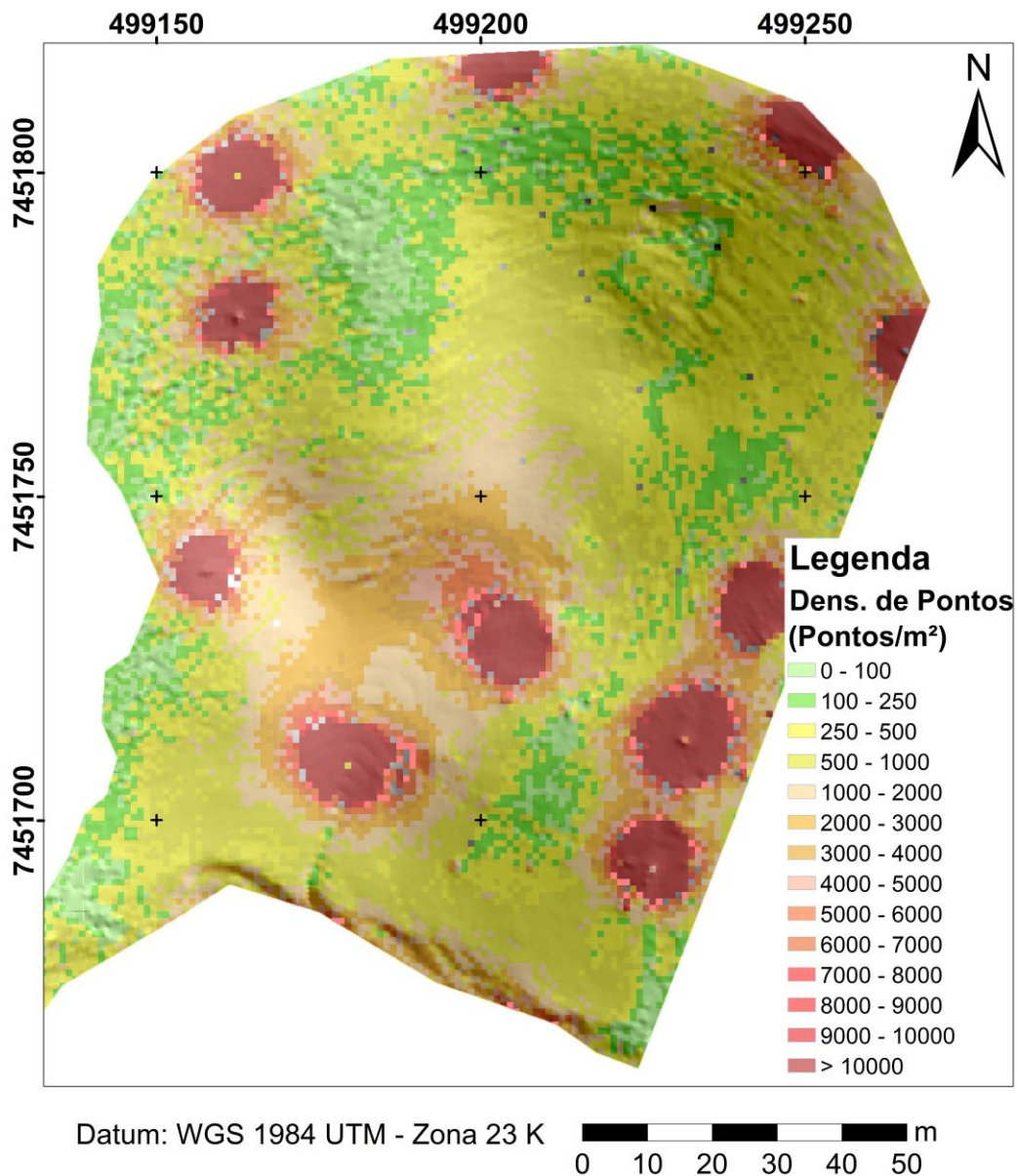


Figura 7: Mapa de densidades de pontos gerados pelo LiDAR.

O mapa de densidade de pontos mostra que a maior quantidade de pontos se concentra perto dos locais onde o sensor LiDAR foi posicionado para efetuar as visadas do escorregamento. Como o ângulo entre os feixes emitidos pelo sensor é constante, quanto maior for a distância de alcance, maior será a distância entre os pontos e menor a densidade (Buckley *et al.* 2008).

A resolução da nuvem de pontos é dada pela distância entre cada ponto, em média essa distância foi de 10 centímetros para os locais mais distantes do sensor, assim todos os processos seguintes serão realizados nessa resolução espacial.

A densidade dos pontos é maior próxima ao sensor, fazendo com que a resolução seja maior nesse local. Para homogeneizar os dados os pontos com menor valor de elevação dentro da resolução de 10 centímetros serão usados para atribuir o valor do pixel correspondente e gerar o MDE. Como após esse processo existiram lacunas no modelo, devido a ausência de pontos com essa resolução em locais mais afastados das visadas, as lacunas foram preenchidas pelo método de interpolação das médias dos vizinhos mais próximos (Mainar Ruiz & Perez Cortes 2006).

Com o MDE com resolução espacial de 10 centímetros gerado a partir da nuvem de pontos foi possível criar um arquivo vetorial das curvas de nível com intervalos de 50 centímetros entre as elevações.

O relevo original da encosta, anterior ao escorregamento, foi reconstituído manualmente a partir do arquivo vetorial das curvas de nível e na sequência interpolado para gerar um novo MDE, que representa a reconstituição da encosta (Figura 8).

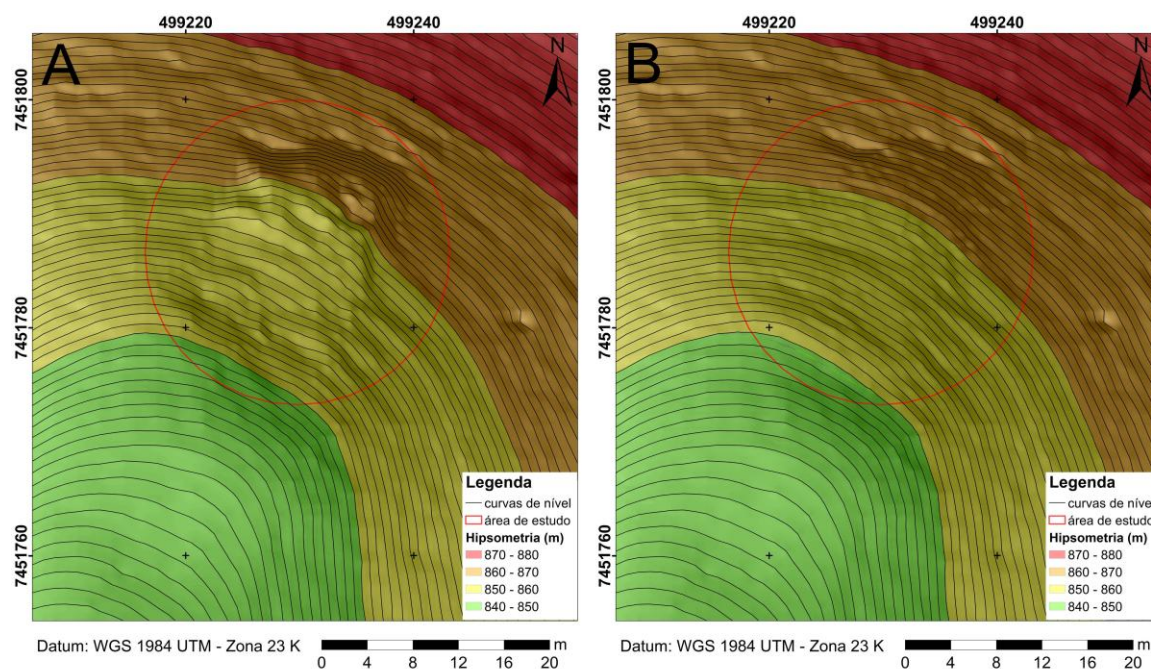


Figura 8: Mapa hipsométrico com curva de nível, com detalhe para o escorregamento. Em A as curvas de nível foram geradas a partir do MDE original. Em B as curvas de nível foram reconstruídas manualmente a partir das curvas de nível de A.

Com o MDE gerado pelos dados coletados em campo e o MDE reconstituído foi possível calcular o volume do material deslocado realizando uma operação aritmética entre os *rasters*. Assim puderam ser comparados os volumes de material que se depositaram na base do escorregamento com o material removido.

Além desses processos foram gerados mapas de declividade, curvatura em planta, curvatura em perfil, aspecto e rugosidade que serão utilizados para a análise morfométrica e geomorfológica da encosta.

Os procedimentos adotados para a elaboração da caracterização da suscetibilidade são baseados em Fell *et al.* (2008) e Julião *et al.* (2009). As suscetibilidades são analisadas seguindo Bitar *et al.* (2014), no qual é elaborado um mapa de áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa. Compartimentando o terreno em zonas através dos comportamentos homogêneos desses processos. Assim serão considerados como fatores fundamentais a elevação, a declividade do terreno, a curvatura das encostas e a rugosidade. As zonas foram classificadas denotando os distintos graus de incidência espacial, denominados classes de suscetibilidade (alta, mediana, baixa, muito baixa e insignificante) e indicam a propensão relativa dos terrenos ao fenômeno abordado.

Os procedimentos para a elaboração do mapeamento da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa estão fundamentados no paradigma de que os registros do passado são um guia para a análise do futuro, áreas com características geomorfológicas e geológicas semelhantes às de lugares afetados por escorregamentos são propensas a novas ocorrências (Fell *et al.* 2008).

A definição classes dos graus de suscetibilidade serão delimitados utilizando a análise estatística bivariada aplicada que utiliza o valor informativo (Yin e Yan, 1988). A metodologia se baseia na densidade de escorregamentos em cada uma das classes morfológicas para cada parâmetro, gerando um valor informativo (I_i) para cada classe (Equação 4) após se define a suscetibilidade(ij) (Equação 5) (Dias *et al* 2018).

Equação 4

$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N}$$

Onde:

S_i : número de pixels com escorregamentos rasos na variável X_i , sendo X_i uma variável para cada classe;

N_i : número de pixels com a variável X_i ;

S : número total de pixels com escorregamentos na área de estudo total;

N : número total de pixels na área total de estudo.

Equação 5

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} * I_i$$

Onde:

n : número de variáveis;

X_{ij} : igual a 1 ou 0, dependendo se a variável X_i está ou não presente no pixel j .

Utilizando a equação 4 e o *GRASS GIS*, foi calculada a quantidade de pixels existentes em cada classe de cada parâmetro, da mesma forma calculada a quantidade de pixels existentes que continham o escorregamento e a quantidade de pixels do escorregamento. Assim foi obtido o valor informativo (I_i), juntamente com o valor da suscetibilidade (j), utilizando a equação 5.

5. RESULTADOS

Com a reconstrução manual das curvas de nível e a partir de métodos de interpolação, foi efetuada a restauração da superfície anterior ao escorregamento, sendo possível comparar as duas superfícies, a observada em campo e a restaurada a fim de calcular o volume do material e possivelmente sua massa movida através do escorregamento. Para o material que foi deslocado, o volume foi de 71,69 m³, enquanto que para o que se depositou na base do escorregamento o volume foi de 77,74 m³, uma diferença de 6,05 m³, que pode indicar que houve um acúmulo de material de outra proveniência ou ainda, e mais provável, que o material sofreu uma expansão.

Segundo o mapa e caracterização de solos da Embrapa (1999), na área de estudo o solo é composto pelo Latossolo Vermelho-Amarelo, e é conhecido que a densidade do solo varia de acordo com as suas características (Torres & Saraiva, 1999). Na área de estudo o solo é definido como argilo-arenoso, sendo que sua densidade pode variar de 1,0 a 1,4 g/cm³, considerando uma média desse valor e a partir dos volumes calculados pela álgebra dos MDE, é possível inferir que a massa deslocada é de aproximadamente 86 toneladas. O escorregamento possui uma dimensão de aproximadamente 14,5 metros de comprimento por 10 metros de largura, totalizando uma área calculada de 140,7 m², com volume de 71,69 m³ e possui quase 2 metros de escarpa de talude.

A análise da geomorfologia consistiu na elaboração de mapas temáticos a partir da nuvem de pontos, os mapas foram sobrepostos ao relevo sombreado com o azimuth a 45° e inclinação a 20° para mostrar feições de relevo e padrões que possam auxiliar na caracterização da topografia.

Mapa hipsométrico

A hipsometria é o modelo digital de elevação (MDE) que representa a elevação do relevo em metros, com cotas altimétricas hierarquizadas e classificadas, permitindo a identificação da amplitude altimétrica do terreno. Com essa divisão se observa que a porção norte possui as maiores altitudes enquanto que a porção centro-sul até a porção sul, as menores, dando a forma de uma “ferradura”.

Mapa de declividade

Mapas de declividade representam as inclinações do terreno, fornecidas em graus ou percentuais. A declividade é a primeira derivada do MDE, no qual foi calculado utilizando o *software ArcGIS®*, as Equações 1 e 2 apresentam etapas preliminares e a Equação 3 destaca a etapa final para a obtenção da declividade em graus. A Tabela 1 ilustra os significados de cada variável utilizada nas fórmulas. A Figura 9 destaca a estrutura das variáveis que fazem menção das células vizinhas do pixel central de um *raster*, no qual cada

letra representa 1 pixel. Todas as fórmulas foram obtidas por meio do sítio do *ArcGis* (ESRI, 2018) e baseado no trabalho de Burrough e McDonell (1998).

a	b	c
d	e pixel central	f
g	h	i

Figura 9: Estrutura das células para calcular o valor da declividade, em relação ao pixel central. (ESRI 2018)

Elementos da fórmula	Significado
$\left[\frac{dz}{dx}\right]$	Taxa da variação da superfície em relação ao eixo horizontal.
$\left[\frac{dz}{dy}\right]$	Taxa da variação da superfície em relação ao eixo vertical.
$x_{resolução}$	Resolução espacial do raster no eixo horizontal.
$y_{resolução}$	Resolução espacial do raster no eixo vertical.
$ATAN$	Arco tangente.
D_{graus}	Declividade em graus.
a, b, c, d, f, g, h, i	Valores das células vizinhas ao pixel central (e), conforme mostrado na Figura 8.

Tabela 1: Variáveis e constantes das Equações 1, 2 e 3

Equação 1

$$\left[\frac{dz}{dx}\right] = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8 * x_{resolução}}$$

Equação 2

$$\left[\frac{dz}{dy}\right] = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8 * y_{resolução}}$$

Equação 3

$$D_{graus} = \left(ATAN \sqrt{\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2} \right) * \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

O local apresenta uma grande variação das inclinações do terreno, que permite estabelecer uma compartimentação da área, no qual as porções norte e oeste apresentam inclinações geralmente superiores a 35°, e as porções sul e centro possuem as menores

inclinações não ultrapassando 10°. Vale ressaltar que a porção nordeste, no qual ocorreu o escorregamento, possui as maiores inclinações da área de estudo, normalmente superiores a 45°.

Mapa de curvaturas

Os mapas de curvatura estão relacionados à superfície do relevo e possibilitam identificar se as superfícies possuem formas côncavas ou convexas em relação a uma superfície horizontal ou vertical (Figura 10). Para isso foram criados um mapa de curvatura em planta e um mapa de curvatura em perfil. A curvatura é calculada pela segunda derivada do MDE, no qual foi calculado utilizando o *software ArcGIS®*.

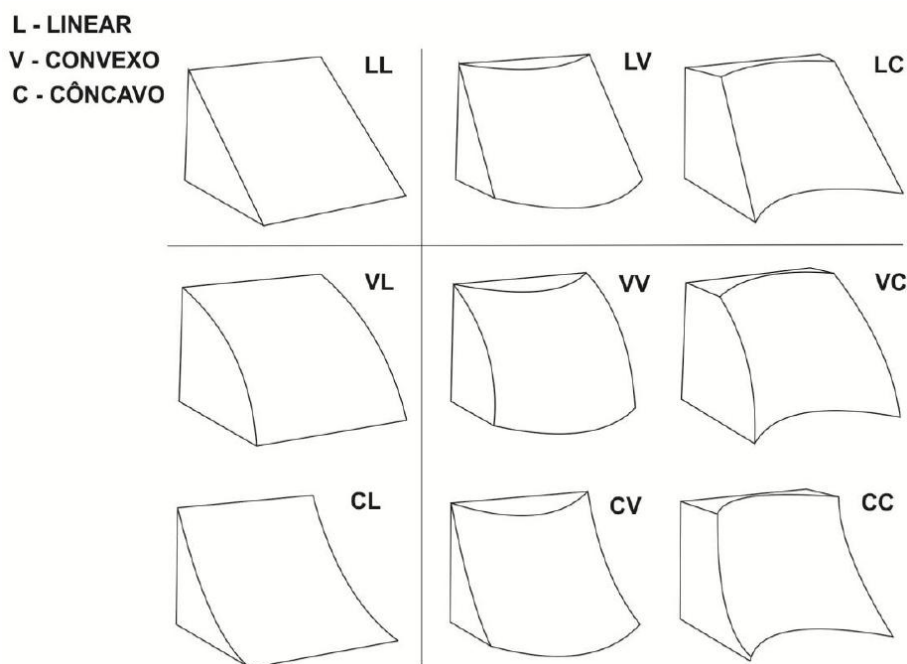


Figura 10: Tipos e formas das geometrias das encostas (Chorley 1975).

Observado em planta as formas convexas se referem a superfícies de espalhamento e por isso dispersam o material em ocasionais instabilizações dos taludes, por sua vez as formas côncavas são superfícies favoráveis a concentração e por isso essas superfícies sempre recebem o material proveniente de erosões e escorregamentos (Chorley 1975). Na comparação entre o mapa de curvatura em planta (Figura 11C) e o mapa hispométrico (Figura 11A), pode se notar que as formas convexas se localizam nas partes mais altas do terreno, enquanto que as formas côncavas se localizam nas áreas mais baixas. As formas convexas, principalmente no local do escorregamento como na porção leste, se posicionam alinhadas, o que pode indicar a movimentação de massa que ocorre até chegar aos locais de deposição. Na porção centro noroeste esse alinhamento das formas convexas existe, porém se encontra mais disperso.

Quando se observa o mapa de curvatura em perfil, as formas côncavas e convexas são vistas em seção. As superfícies convexas são superfícies de espalhamento e, portanto são potenciais dispersivos de massa em eventuais instabilizações de encostas. Nas superfícies côncavas a estabilidade é menor, porém o fluxo desacelera progressivamente e se acumula no sopé do talude (Chorley 1975). Aparentemente as formas côncavas progridem até se tornarem formas convexas e mais estáveis. No mapa de curvatura em perfil (Figura 11D) pode se notar que as formas convexas se concentram nas partes mais baixas do terreno e também mais estáveis. A figura 11B mostra o mapa de declividade com detalhe para os altos valores para a área do escorregamento.

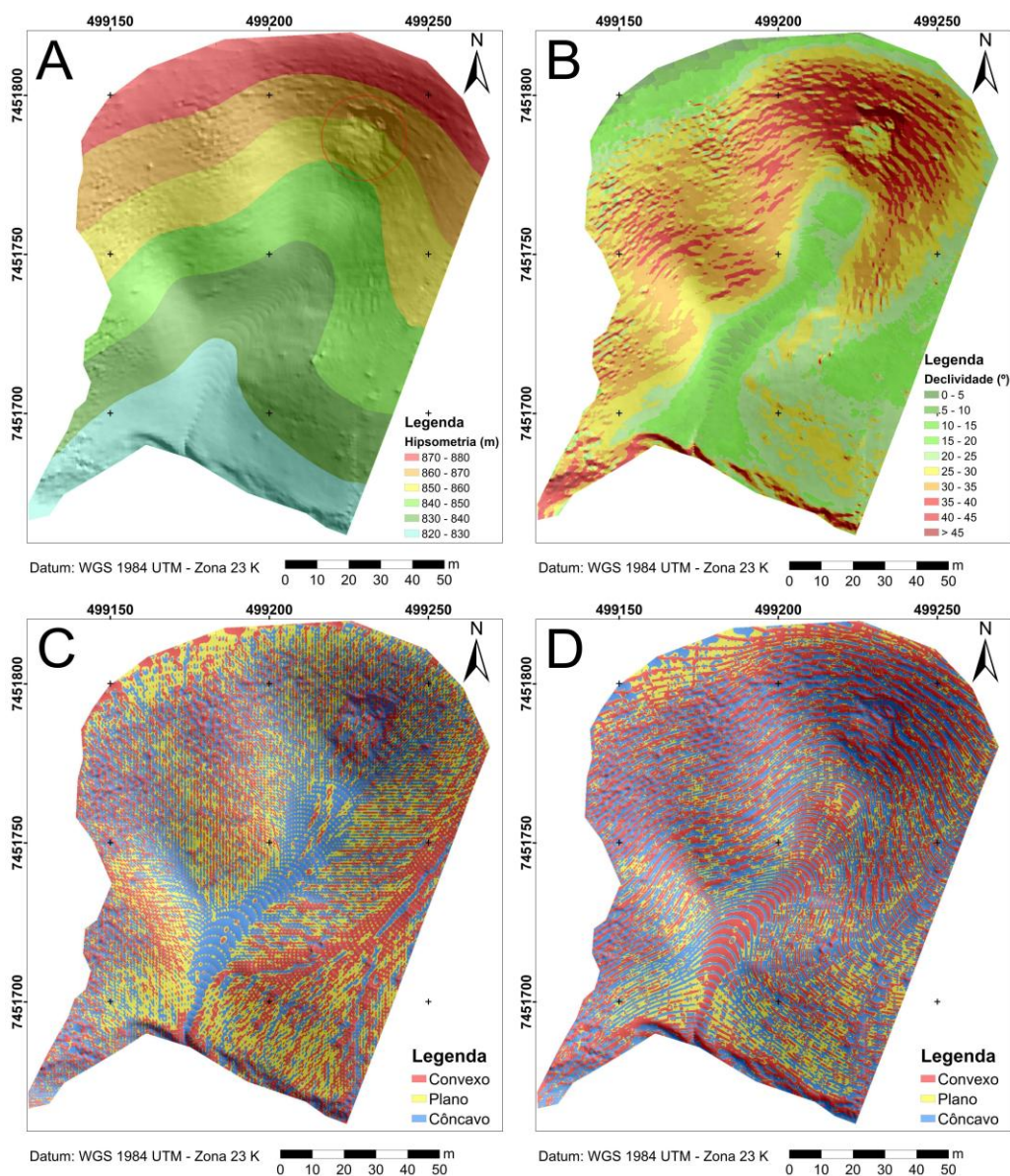


Figura 11: Mapas temáticos. Em A, mapa hipsométrico com cores representando os valores da altitude em metros. Em destaque na porção nordeste o escorregamento.

Em B, mapa de declividade com cores representando a declividade em graus.

Em C, mapa de Curvatura em planta. Áreas em vermelho são referentes a formas convexas, enquanto que as azuis são formas côncavas.

Em D, mapa de curvatura em perfil. Áreas em vermelho são referentes a formas convexas, enquanto que as azuis são formas côncavas.

Os mapas temáticos encontram-se em anexo no arquivo pdf em visualização maximizada.

Mapa de Aspecto

O mapa de aspecto representa as orientações do terreno. A área estudada está orientada principalmente para as porções sul a noroeste; no local onde ocorreu o escorregamento, o talude está voltado para sudoeste/oeste (Figura 12). Essas orientações não representam um atributo para o cálculo do valor da suscetibilidade, uma vez que esses dados foram testados, e o resultado não condiz com o observado em campo.

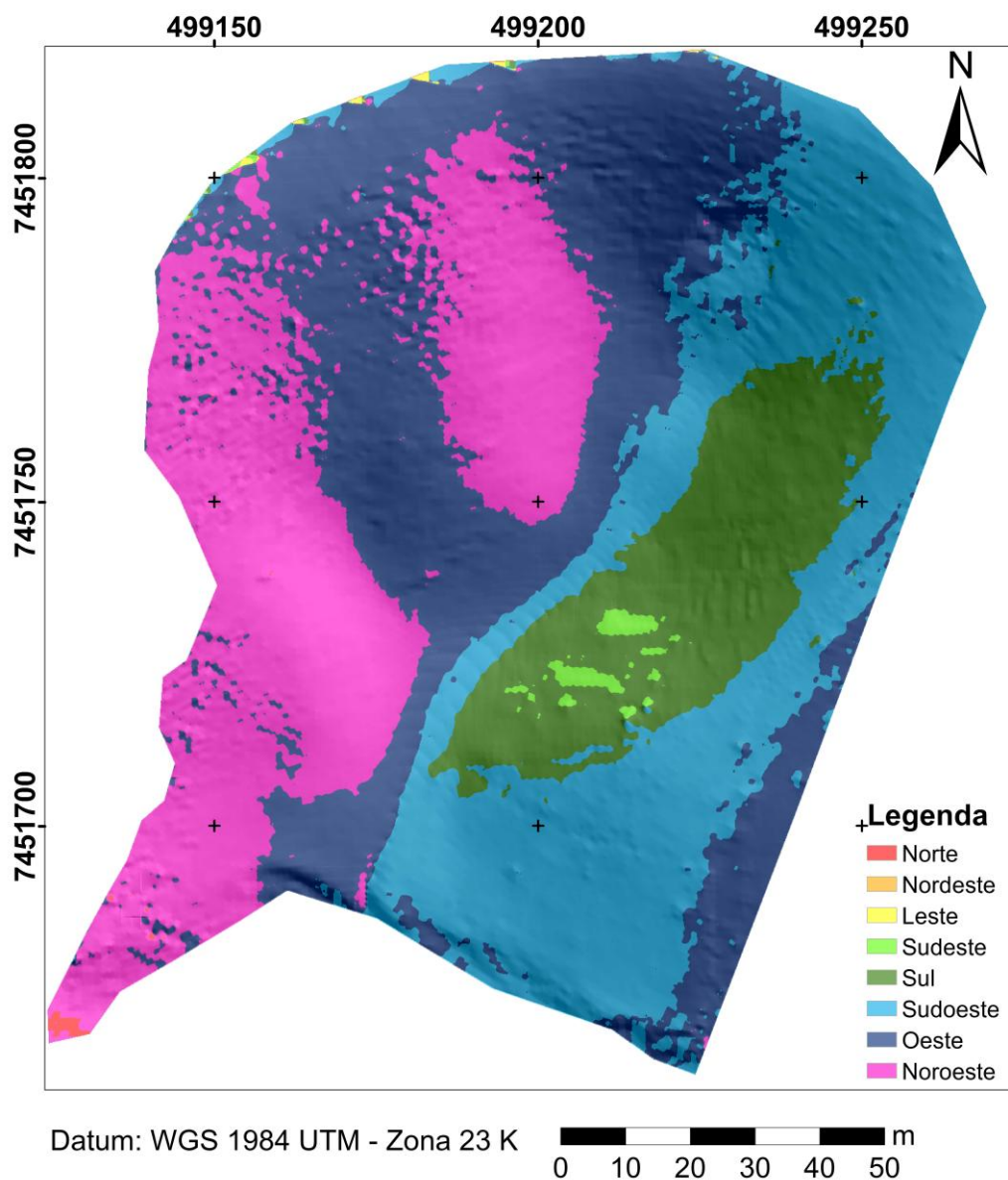


Figura 12: Mapa de aspecto.

Mapa de Rugosidade

O mapa de rugosidade está relacionado com a heterogeneidade do terreno, também chamado de *Terrain Ruggedness Index* (TRI). O TRI é um índice que permite a medição objetiva da heterogeneidade do terreno, definida como a diferença média da elevação entre o pixel central e os oito pixels circundantes (Cardoso 2014).

Para este trabalho foi utilizado a ferramenta do TRI, disponibilizado pela *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL) e disponível no software *QGIS* para a utilização, como parâmetros de entrada estão o *raster* de elevação. Essa ferramenta gera uma varredura de banda única com valores calculados a partir da elevação.

O mapa apresentado possui valores variando de 0 a 0.16 (Figura 13). Estes valores foram classificados em 5 classes de intervalos de 0.02 até o valor de 0.08, sendo a última classe no intervalo de 0.08 a 0.16. Essas classes foram classificadas como sendo índices de valores muito baixos a índices de valores muito altos. Quanto menor o valor do TRI, menor é a rugosidade e mais regular é o terreno (Riley *et al.* 1999).

O local apresenta o maior TRI na parte superior do escorregamento e ao seu redor, evidenciando que no local antes do ocorrer o escorregamento, provavelmente já existia um valor maior de TRI se comparado com o restante da área analisada.

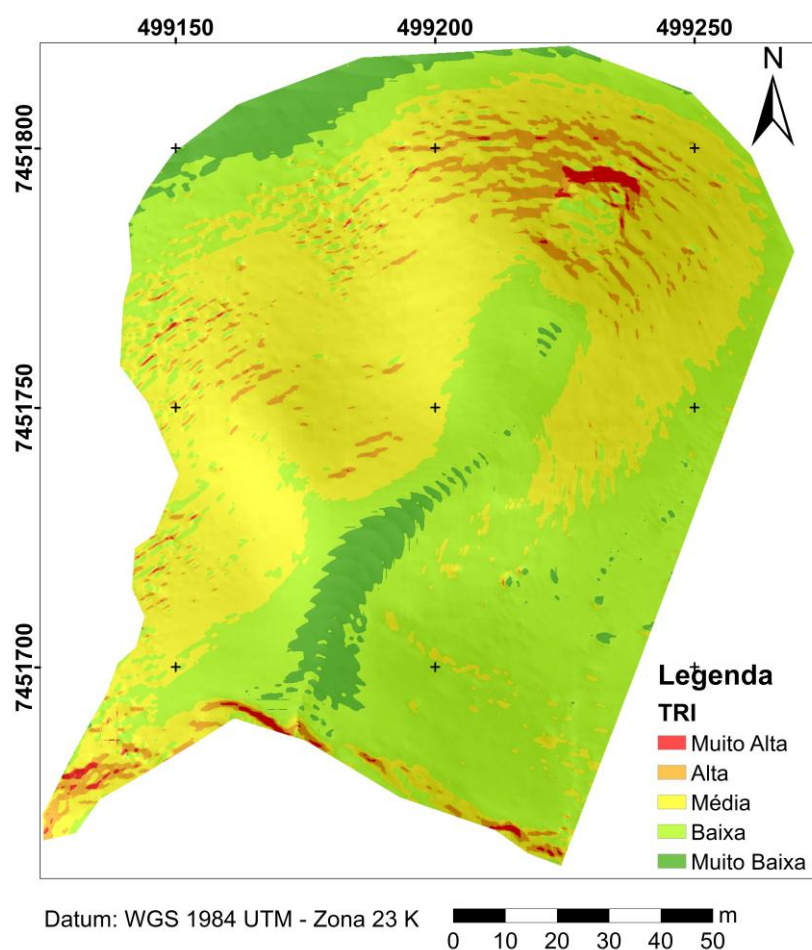


Figura 13: Mapa do índice de heterogeneidade do terreno.

Carta de Suscetibilidade

Partindo da aplicação estatística dos mapas morfológicos (Figura 11 e Figura 13), se observa que a declividade e rugosidade são os parâmetros com valores mais altos, mostrando favorável a ocorrência de escorregamentos, assim a Tabela 2 mostra o valor informativo (*I_i*) para cada classe dentro de cada parâmetro estudado, assim como o valor da suscetibilidade (*ij*).

Parâmetro	Classes	Pixels Totais	Si	Valor Informativo	Valor da Suscetibilidade
Elevação (m)	820 - 830	233370	0		0,005
	830,1 - 840	315236	0		
	840,1 - 850	302169	976	-0,800	
	850,1 - 860	241514	23705	0,683	
	860,1 - 870	232355	6272	0,122	
	870,1 - 880	194985	0		
Declividade (°)	0 - 5	8837	0		-1,688
	5,1 - 10	29017	0		
	10,1 - 15	79814	5	-2,512	
	15,1 - 20	190222	570	-0,832	
	20,1 - 25	291444	1512	-0,594	
	25,1 - 30	336773	6196	-0,044	
	30,1 - 35	387977	8501	0,032	
	35,1 - 40	149475	6940	0,358	
	40,1 - 45	31783	3391	0,719	
	45,1 - 65	12293	3838	1,185	
Aspecto	norte	1812	0		-3,360
	nordeste	45	0		
	leste	882	0		
	sudeste	7897	0		
	sul	184961	106	-1,551	
	sudoeste	428787	18483	0,326	
	oeste	476708	12315	0,103	
	noroeste	416479	49	-2,238	
	Plano / retilíneo	2058	0		
Curvatura Perfil	Côncava	598011	15225	0,097	-0,290
	Plano	322358	2480	-0,423	
	Convexa	599260	13248	0,036	
Curvatura Plana	Côncava	529961	14654	0,133	-0,127
	Plano	506308	4893	-0,324	
	Convexa	483360	11406	0,064	
TRI	0 - 0.02	106686	0		1,501
	0.02 - 0.04	655000	4240	-0,500	
	0.04 - 0.06	672804	16608	0,082	
	0.06 - 0.08	68944	6809	0,684	
	0.08 - 0.16	9373	3296	1,235	

Tabela 2: Parâmetros morfológicos e número de pixels de suas respectivas classes.

Os valores informativos de cada classe morfológica variam entre negativos e positivos. A classe com maior valor está no parâmetro TRI, com valores dentro do intervalo 0.08 a 0.16. Outro parâmetro com valor informativo alto é a declividade que está dentro do intervalo de 45,1° a 65°. Ambas as classes pertence ao escorregamento, mostrando a importância do valor das mesmas para o cálculo da suscetibilidade.

Os valores da suscetibilidade para cada parâmetro foi multiplicada pelo seu respectivo raster, ao final os produtos foram somados para gerar a carta de suscetibilidade. Como o método só permite criar valores de suscetibilidade para locais onde ocorreram escorregamentos, não foi possível realizar o mesmo método para o relevo original da encosta, anterior ao escorregamento. Assim para comparar, foi utilizado o valor da suscetibilidade apresentado para calcular a suscetibilidade do modelo anterior ao escorregamento.

O parâmetro aspecto não foi utilizado para gerar a carta de suscetibilidade, pois ele apresentava divergências, como caracterizando um local plano e com baixa rugosidade em valores com alta suscetibilidade.

As cartas de suscetibilidade para ambos os modelos são apresentadas lado a lado para comparação (Figura 14).

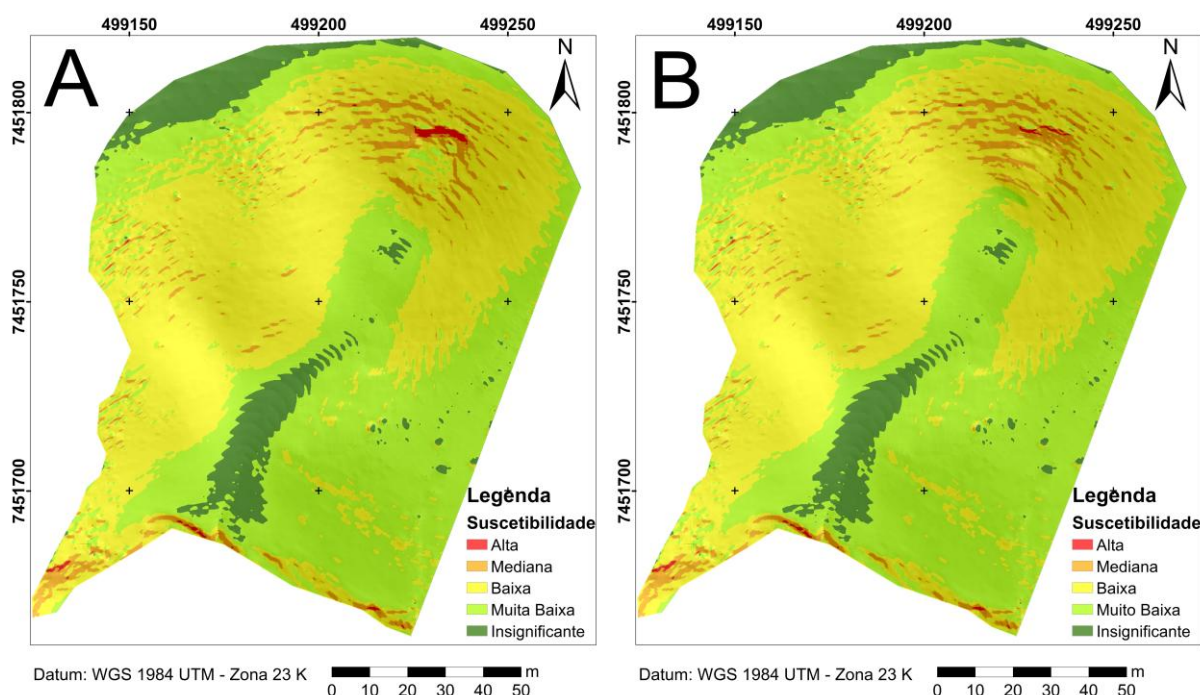


Figura 14: Carta de suscetibilidade. Em A carta de suscetibilidade do modelo estudado. Em B carta de suscetibilidade do modelo anterior ao escorregamento.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A aquisição de dados do LiDAR não é homogênea, visto que há uma concentração de pontos nas proximidades do sensor devido a própria técnica de escaneamento, porém isso não se demonstrou um problema para gerar o modelo digital de elevação com resolução de 10 centímetros. Em áreas de 100 cm² ainda existiam pelo menos um ponto que permitiu a geração do MDE. Os mapas temáticos mostraram que o escorregamento apresenta altos índices de rugosidade assim como elevada declividade, o que coincide com o relevo de morros de mapas geomorfológicos do IPT. O Valor informativo calculado a partir dos mapas temáticos e aritmética entre *raster*, se obteve a carta de suscetibilidade que evidenciou que o local do escorregamento pelo modelo reconstituído a partir das curvas de nível também possuía uma alta suscetibilidade. A porção com valores altos de declividade na porção oeste apresentou baixa suscetibilidade, dessa forma a não ser que existam fenômenos ou desastres muito grandes, a probabilidade de ocorrer escorregamentos nesse local é baixa.

Os parâmetros morfométricos utilizados, como a curvatura das encostas, evidenciam que o local do escorregamento possuem uma maior proporção de formas convexas, alta declividade e alta rugosidade, o que classificaria o local com alta suscetibilidade.

O mapa de aspecto apresentado não foi utilizado para gerar a carta de suscetibilidade, uma vez que a associação desse parâmetro com os demais gerava uma carta com valores diferentes aos que se observava em campo, provavelmente a área estudada é muito pequena para utilizar um parâmetro que seria interessante em uma escala regional.

Analisando os mapas apresentados, se nota que o local em que ocorreu o escorregamento se encontra na zona de maior declividade e ainda, pelo mapa de curvatura em planta, se percebe que o local do escorregamento continha a maior densidade de alinhamentos de formas convexas, provavelmente tais fatores morfométricos juntamente com a precipitação e pouca vegetação foram responsáveis pela ocorrência desse escorregamento. Ainda com base nesses dados, a porção noroeste possui uma alta declividade e também uma grande densidade de alinhamentos de formas convexas, ou seja, está quase que nas mesmas condições do local que ocorreu o escorregamento, portanto, propício à nova movimentação de massa.

O valor de alta suscetibilidade apresentado para o local do escorregamento, também possuía alto índice de rugosidade e declividade, a tabela 2 mostra os valores informativos, nos quais os maiores “pesos” são do índice de rugosidade e declividade respectivamente, desconsiderando o parâmetro do aspecto.

Com base nas análises do escorregamento, pode ser verificado que na base não houve movimentação e ainda que a escarpa do talude é plana, pode-se deduzir que o escorregamento seja do tipo translacional.

7. CONCLUSÕES

O método utilizado apresenta dificuldades quanto ao processamento dos dados para áreas muito grandes, quanto maior o local analisado, maior será a quantidade de visadas necessárias para caracterizar o objeto em estudo, pois se o objeto estiver muito longe a resolução espacial irá diminuir. A dificuldade de posicionar o LiDAR nas proximidades do escorregamento, devido as altas declividades ao redor, impossibilitou a obtenção de maiores densidades de pontos e gerou uma baixa resolução no local de interesse.

Em locais com presença de vegetação, a resolução seria menos detalhada, e portanto, seriam perdidos muitos pontos após a filtragem. Para compensar isso deve ser realizar mais visadas, o que em um local com vegetação mais abundante pode ser inviável.

A proposta de utilizar o LiDAR para obtenção de dados se mostrou eficaz dentro da escala do projeto, porém em áreas maiores seria necessário um número maior de visadas, além de que o local escolhido deve ter pouca vegetação, restringindo a utilização do LiDAR em locais abertos e pequenos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M. 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Bol. IGC, 41: 167-263.
- Almeida, F.F.M. & Carneiro, C.D.R. 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências, 28, 135–150.
- Anido, N.M.R. 2002. Caracterização Hidrológica de uma microbacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental. Dissertação de mestrado apresentada a escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós da Universidade de São Paulo.
- Bitar, O. Y. (Coord) *et al.* 2014. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações - 1:25.000. Nota técnica explicativa. CPRM, IPT. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16588/NT-Carta_Suscetibilidade.pdf?sequence=1>. Acesso em: 27 set. 2018.
- Buckley, S. J.; Howell, J. A.; Enge, H. D; Kurz, T. H. 2008. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. Journal of the Geological Society, 165, 625–638.
- Burrough, P. A.; Mcdonell, R. A. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, 190 pp.
- Cardoso, J. M. M. A. 2014 Análise morfométrica das redes de polígonos em Permafrost - Adventdalen, Svalbard. Dissertação de mestrado apresentado ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, da Universidade de Lisboa.
- Chorley, R. J. (1975). Modelos em Geomorfologia. In CHORLEY, R. J., HAGGET, P. Modelos físicos e de informação em Geografia. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: EDUSP, 60p.
- Da Silva, A. M.; Ranzini, M.; Guandique, M. E. G.; Arcova, F.C.S.; De Cicco, V. 2005. Estudo integrado do processo erosivo numa microbacia experimental localizada no Município de Cunha - SP. Geociências, 24, 43–53.
- Dias, H.; Bateira, C.; Pissato, E.; Martins, T.; Vieira, B. (2018). Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos com Base na Aplicação de Estatística Bivariada: Resultados Preliminares. Revista Do Departamento De Geografia, (spe), 34-42. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.144537>
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 1999. Mapa pedológico do estado de São Paulo, escala 1:500.000.
- ESRI. 2018. How Slope works. ArcGIS Resource Center, Desktop 10. Disponível em: <http://help.arcgis.com/EN/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Slope_works/009z>

000000vz000000/>. Acesso em 05 ago. 2018.

- FELL, R. et al. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, v. 102, p. 83-111.
- Fernandes, A. J. 1991. O Complexo Embu no leste do estado de São Paulo: Contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. Dissertação de mestrado apresentado ao Instituto de Geociências, da Universidade de São Paulo.
- Fernandes, N. F.; Guimarães, R. F.; Gomes, R. A. T.; Vieira, B. C.; Montgomery, D. R.; Greenberg, H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: teoria, evidências de campo e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Revista brasileira de geomorfologia*, V. 2, n.1, p. 51-71.
- Glenn, N.F.; Streutker, D.R.; Chadwick, D.J.; Thackray, G.D.; Dorsch, S.J. 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73, 131–148.
- Gramani, M.; Augusto Filho, O. 2004. Analysis of the triggering of debris flow potentiality and the run-out reach estimative: an application essay in the Serra do Mar Mountain Range. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES. Rio de Janeiro. Proceedings London: Balkema, 2004. v. 2, p. 1477-1483.
- Guerra, A. J. T; Gonçalves, L. F. H., Lopes, P. B. M. 2007. Evolução Histórico-Geográfica da Ocupação Desordenada e Movimentos de Massa no Município de Petrópolis, nas Últimas Décadas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Ano 8, 35–43.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. 1984. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher.
- Guimarães, R. F.; Carvalho Júnior, O. A.; Gomes, R. A. T.; Fernandes, N. F. 2008. Movimentos de massa, cap. 6 in *Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais*. Oficina de Textos. Org. Teresa G. Florenzano. 318p.
- Heilbron M.; Pedrosa-Soares A. C.; Campos Neto M. C.; Silva L. C.; Janasi V. A. 2004. Província Mantiqueira. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. Dal Ré Carneiro, B.B. Brito Neves (eds.) *Geologia do Continente Sulamericano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca. São Paulo, p.: 203-234.
- IBGE. 2007. Manual Técnico de Pedologia IBGE. Segunda edição.
- IPT – INSITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, mapa geomorfológico, escala 1:1.000.000.
- IPT – INSITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 1991. Ocupação de encostas. São Paulo. Publicação IPT n. 1831.

- Jones, L. 2010. Monitoring landslides in hazardous terrain using terrestrial LiDAR: an example from Montserrat. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 39, 371–373.
- JULIÃO, R. P. (Coord.) et al. 2009. Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal. Lisboa: Autoridade Nacional de Protecção Civil; Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano; Instituto Geográfico Português. Disponível em: <http://www.prociv.pt/bk/Documents/guia_metodologico_SIG.pdf>. Acesso em: 27 set. 2018.
- Köppen, W. G.; Geiger, R. M. 1936. *Das geographische System der Klimate in Fünf Bänden*. Berlin.
- Mainar-Ruiz, G. & Perez-Cortes, J. 2006. Approximate Nearest Neighbor Search using a Single Space-filling Curve and Multiple Representations of the Data Points. 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06), 502–505, <https://doi.org/10.1109/ICPR.2006.275>.
- Montgomery, D. R. & Dietrich, W. E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, p. 1153-1171.
- Perrota, M. M.; Salvador, E. D.; Lopes, R. C.; D'Agostino, L. Z.; Peruffo, N.; Gomes, S. D.; Sachs, L. L. B.; Meira, V. T., Garcia, M. G. M.; Lacerda Filho, J. V. 2005. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. Programa Geologia do Brasil - PGB, CPRM, São Paulo.
- Ranzini, M. 2002. Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da serra do mar, SP, com o modelo topmodel — simulação do comportamento hidrológico em função do corte raso. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.
- Riley, s.; Degloria, s.; Elliot, r. 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *intermountain Journal of sciences*.
- Rowlands, K. A.; Jones, L. D.; Whitworth, M. 2003. Landslide Laser Scanning: a new look at an old problem. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 155–157.
- Secretaria de Agricultura e Abastecimento, CATI/IEA, Projeto LUPA, 2008. Disponível em <http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/dadosmunicipais/pdf/t151.pdf>.
- Silva, B. Y. B. 2017. Evolução tectônica da porção central do Terreno Embu ao norte da zona de cisalhamento Taxaquara-Guararema. Dissertação de mestrado apresentado ao Instituto de Geociências, da Universidade de São Paulo.

- Summerfield M. A. 1991. Global Geomorphology. Pearson Education Limited, Harlow, 537 p.
- Tarolli, P. 2014. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295–312.
- Torres, E. & Saraiva, O.F. 1999. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistema agrícolas com soja. Londrina, Embrapa-CNP Soja. 58p. (Circular Técnica, 23).
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2004. Landslides Types and Processes. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>. Acessado em Julho de 2018.
- Viana, C.D.; Roldan, L.F.; Grohmann, C.H. 2012. Descrição e Avaliação dos Condicionantes Geológicos, Geomorfológicos e Estruturais das Instabilidades Geotécnicas Observadas em Trecho da SP-171, Município de Cunha - SP.
- YIN, K. L. & YAN, T. Z. 1988. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In: Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, 2, Balkema, Rotterdam: Bonnard C (ed.), p.1269-1272.
- Zhang W; Qi J.; Wan P.; Wang H.; Xie D.; Wang X.; Yan G. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*. 2016; 8(6):501.

9. ANEXOS

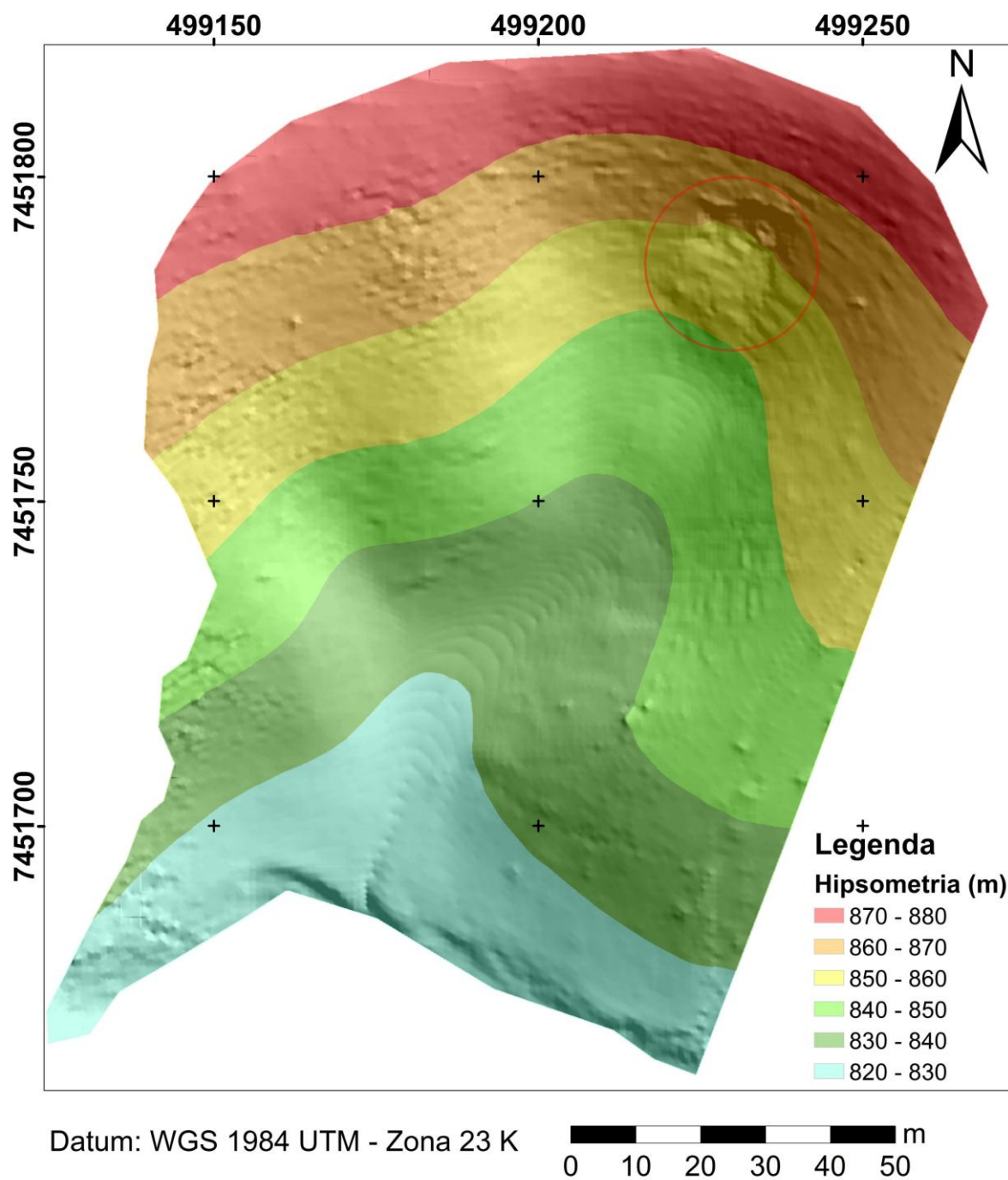


Figura 15: Mapa hipsométrico com cores representando os valores da altitude em metros. Em destaque na porção nordeste o escorregamento.

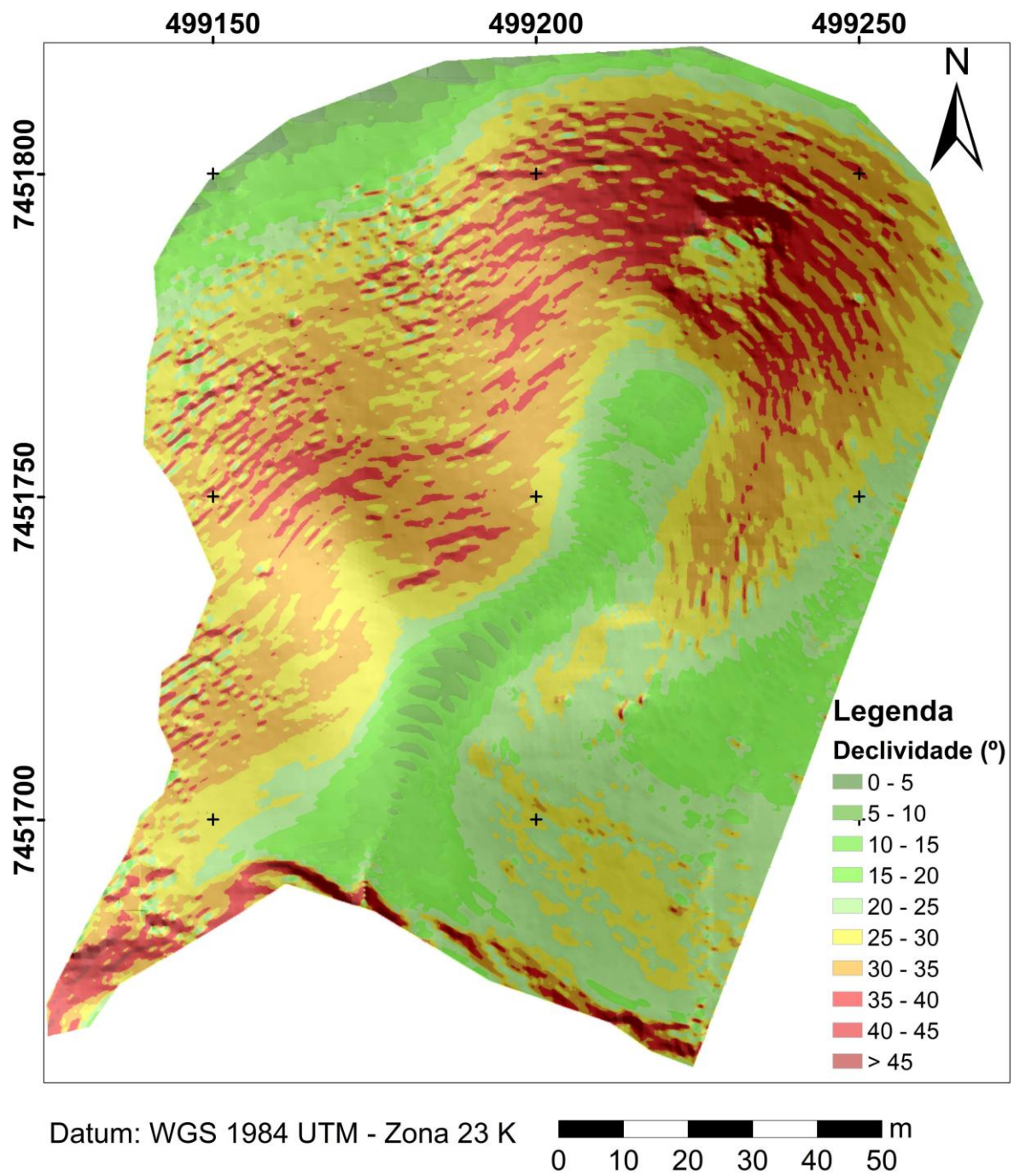


Figura 16: Mapa de declividade com cores representando a declividade em graus.

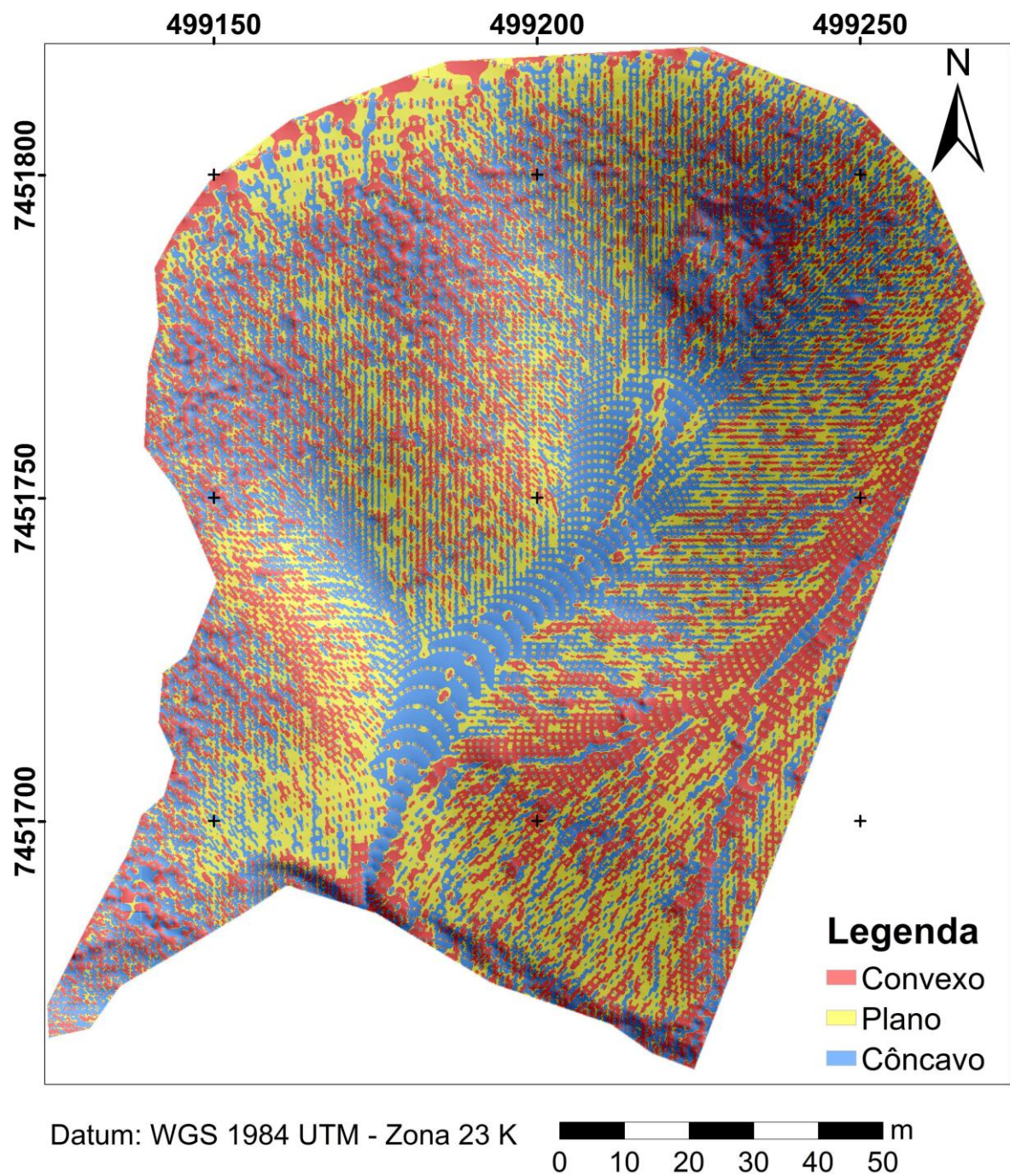
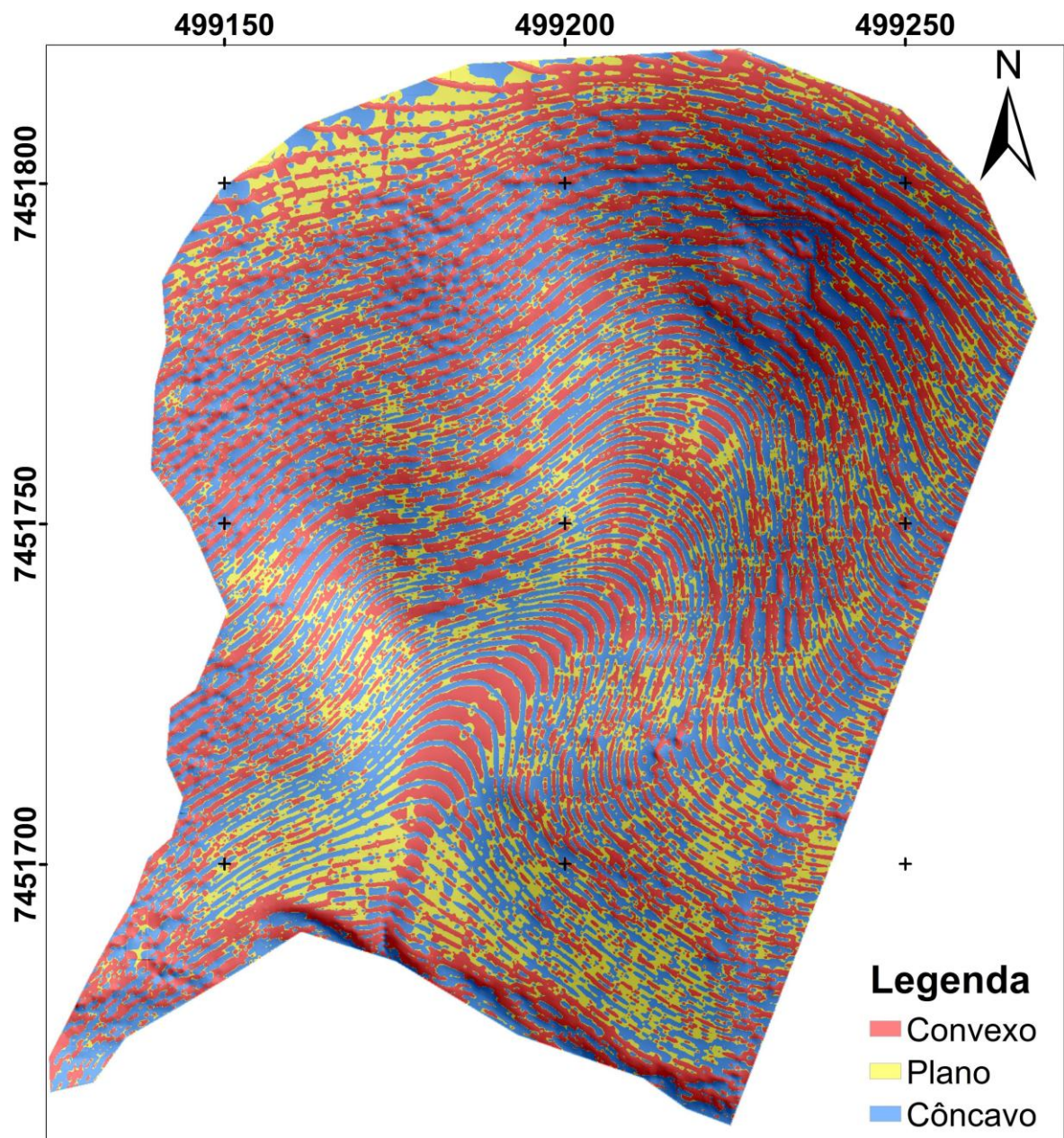


Figura 17: Mapa de Curvatura em planta. Áreas em vermelho são referentes a formas convexas, enquanto que as azuis são formas côncavas.



Datum: WGS 1984 UTM - Zona 23 K

0 10 20 30 40 50 m

Figura 18: Mapa de curvatura em perfil. Áreas em vermelho são referentes a formas convexas, enquanto que as azuis são formas côncavas.