

Suscetibilidade Morfológica e Geológica aos Escorregamentos no Planalto de Paraitinga-Paraibuna (SP)

Morphological and Geological Susceptibility to Landslides in the Paraitinga-Paraibuna Plateau (SP)

Maria Rita Pelegrin de Oliveira ¹, Bianca Carvalho Vieira ², Jurandyr Luciano Sanches Ross ³

Recebido (Received): 17/01/2018

Aceito (Accepted): 04/09/2018

¹ Universidade de São Paulo, maria.rita.oliveira@usp.br

² Universidade de São Paulo, biancav@usp.br

⁴ Universidade de São Paulo, juraross@usp.br

Resumo: O Planalto de Paraitinga – Paraibuna é uma morfoescultura cujo modelado é composto por morros altos, alongados, com topos convexos e encostas de alta declividade. Estas formas de relevo estão condicionadas às macroestruturas geológicas de dobras, falhas transcorrentes e à uma litologia composta por rochas de médio grau metamórfico e rochas ígneas intrusivas sintectônicas. A conjugação destas características morfológicas e litoestruturais podem agir como fatores condicionantes dos escorregamentos - processos recorrentes na região. Assim, objetivo deste trabalho foi avaliar a suscetibilidade aos escorregamentos considerando aspectos geológicos e morfológicos do relevo, analisando a relação entre o inventário de cicatrizes, o ângulo de encosta e a litologia. Para avaliar a suscetibilidade aos escorregamentos, aplicouse o método do índice de potencial de escorregamento (PE). Este índice é definido como a razão entre o número de cicatrizes de cada classe pela área de cada classe, com resultados expressos em porcentagem (%). Os resultados parciais mostraram que a classe litológica do metatexito nebulítico foi a mais suscetível à ruptura, com valor de potencial de escorregamento de 222%; e a classe de ângulo de encosta de 30°-58° foi a mais suscetível aos escorregamentos, apresentando um valor de potencial de escorregamento de 250%. Notou-se também que os escorregamentos se concentraram ao longo de eixos de dobra e de falhas transcorrentes, indicando um possível controle estrutural.

Palavras Chave: Cicatriz de Escorregamento; Índice de Potencial de Escorregamento, Litoestrutura, Ângulo de Encosta

Abstract: The Paraitinga - Paraibuna Plateau is composed by high and elongated hills, with convex tops and steep slopes. This relief is conditioned by the geological structures, such as folds and strike-slip faults; the lithology is composed by medium grade metamorphic rocks and intrusive sintectonic igneous rocks. These morphological and lithostructural features can behave as conditioning factors of landslides- recurring processes on the Paraitinga – Paraibuna Plateau. Thus, the aim of this work was to evaluate the susceptibility to landslides considering geological and morphological aspects of the relief. To evaluate the susceptibility to landslides, the Landslide Potential Index (LP) method was applied. This index is defined by the ratio of the number of scars of each class by the area of each class, the results expressed in percentage (%). The partial results showed that the lithological class of the nebulitic metatexite was the most prone to failure, with a landslide potential value of 222%; and the slope angle class of 30 ° -58 ° was the less stable, with a landslide potential value of 250%. It was also observed that the landslides were concentrated along fold axes and strike-slip faults, indicating a possible structural control.

Keywords: Landslide Scar; Landslide Potential Index; Lithostructure; Slope Angle.

1. Introdução

Os escorregamentos, assim como os processos de intemperismo e erosão, são fenômenos naturais exógenos e contínuos, que modelam a paisagem da superfície terrestre. Os escorregamentos são definidos pelo movimento coletivo de massa com arraste de grandes volumes de partículas, caracterizados pelo transporte de material encosta abaixo sob a influência da força da gravidade, sem a assistência da água em movimento, gelo ou ar (CROZIER, 1986, GUPTA, 2011; SUMMERFIELD, 2013). Para que os escorregamentos ocorram, é necessária a conjunção de fatores condicionantes e deflagradores. Os fatores condicionantes são o conjunto de condições geológicas, geomorfológicas e ambientais em que o escorregamento pode ocorrer. Trata-se de um conjunto das características e condições naturais do ambiente, sem a interferência antrópica. Já os fatores deflagradores são as precipitações;

erosões físicas e químicas; ação de fontes e mananciais; oscilação do lençol freático; ação antrópica e de animais (GUIDICINI e NIEBLE, 1984; GERRARD, 1994; AUGUSTO FILHO e VIRGILLI, 2015).

O papel da geologia como um fator condicionante pode incluir seis características: natureza petrográfica, grau de alteração, estruturas tectônicas (falhas e dobras), atitude de foliação (direção e mergulho), formas estratigráficas e grau de diaclasamento (GERRARD, 1994; AUGUSTO FILHO e VIRGILLI, 2015). Stead e Wolter (2015) ressaltam que as estruturas das rochas podem ser paralelas, oblíquas ou opostas à geometria das encostas, podendo agir como elementos potencializadores ou atenuadores dos escorregamentos. Frascá e Sartori (2015) apontam que litologias com bandamento ou xistosidade podem ser propícias à ruptura de encostas, caso estas rochas estejam alteradas e apresentando planos de foliação ricos em filossilicatos (como biotita e muscovita).

Em relação aos condicionantes topográficos, destaca-se aqui o **ângulo de encosta** que atua como um controlador de energia potencial dos materiais e da taxa de percolação da água de superfície; o **aspecto** que pode influenciar na distribuição da energia solar e da precipitação nas encostas; a **amplitude altimétrica** que pode agir como um fator controlador da percolação da água das chuvas na superfície; e a **curvatura** que pode ter uma (RUHE, 1975; GAO, 1993) atuação direta nos fluxos de água em superfície e em subsuperfície; no transporte e na deposição de materiais (FERNANDES *et al.*, 2001; BIERMAN e MONTGOMERY, 2014). Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a suscetibilidade aos escorregamentos considerando aspectos litológicos, macroestruturais e o ângulo de encosta.

2. Área de Estudo

Na passagem do ano de 2009 para 2010, os municípios de São Luís do Paraitinga e Lagoinha, localizados no setor leste do estado de São Paulo (**Figura 1**) sofreram severos danos em decorrência de escorregamentos em encostas, rompimento de taludes de corte e aterro, abatimento de terreno, solapamentos e inundações (**Figura 2**). Cerca de 400 famílias ficaram desabrigadas; as estruturas urbanas, moradias, patrimônio histórico e arquitetônico foram destruídos, somando um valor de cerca de R\$ 141 milhões de reais em prejuízos (GOMES e GRAMANI, 2010).

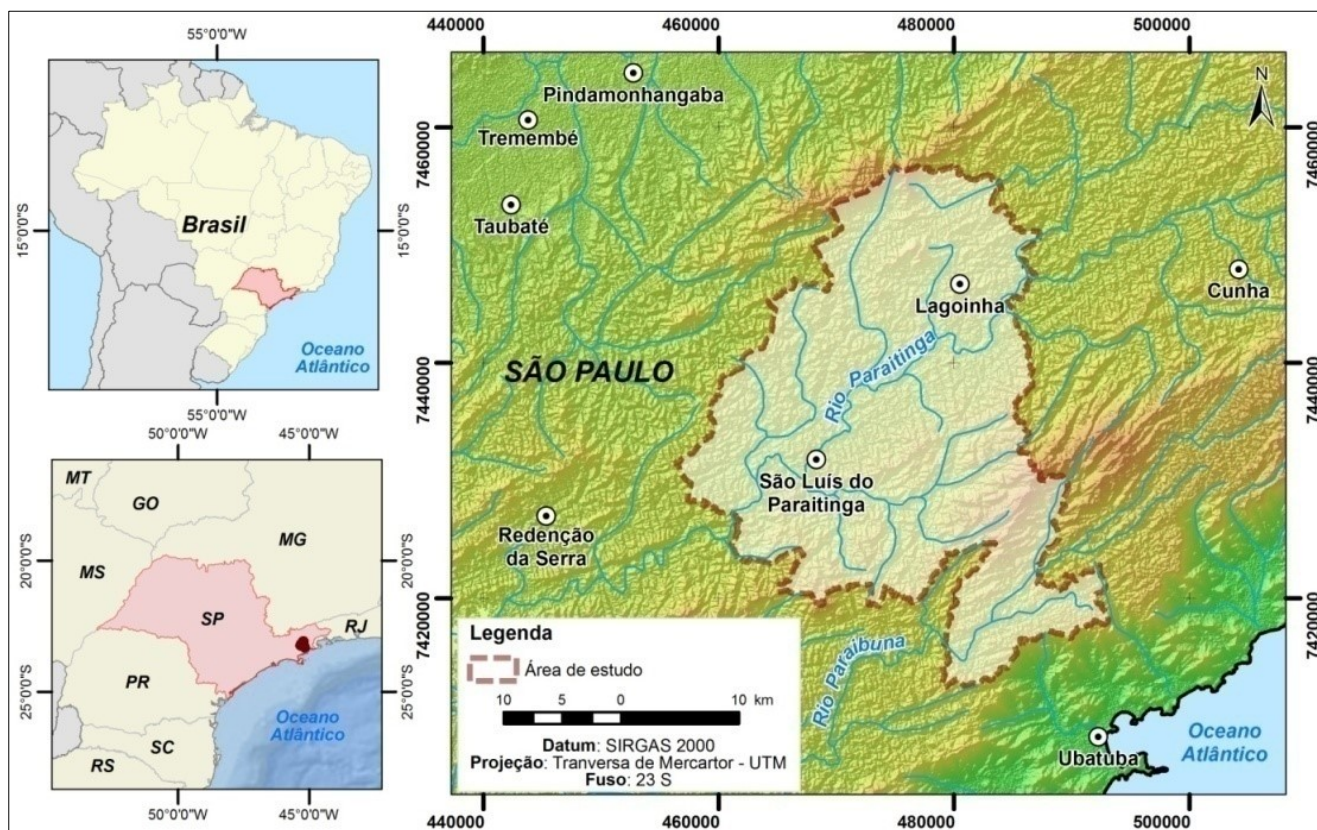


Figura1: Localização da área de estudo.

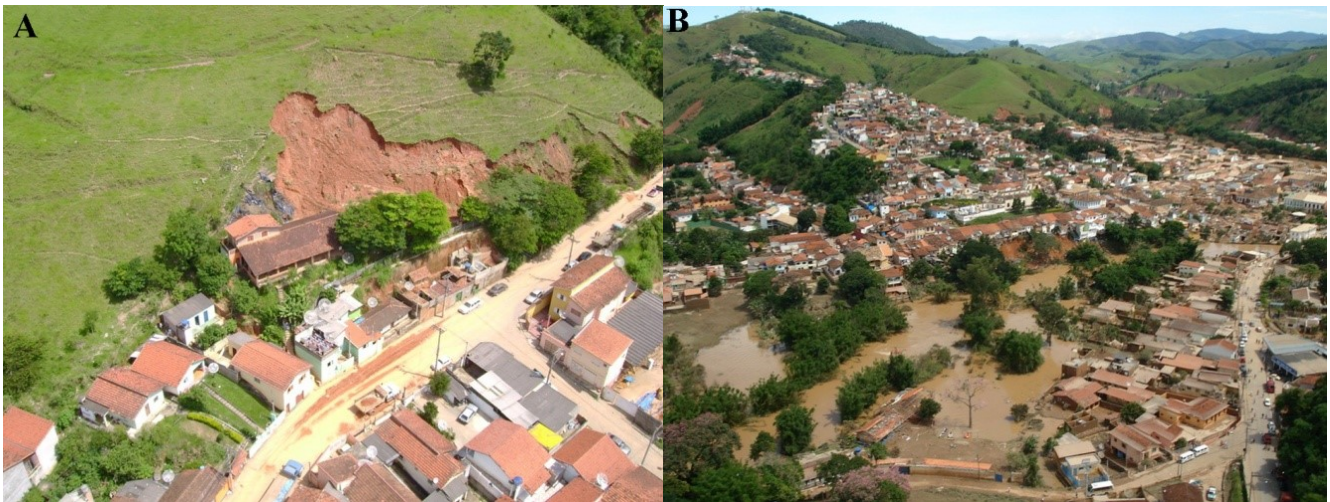


Figura 2: (A) residências atingidas por escorregamentos translacionais rasos; (B) Inundação e escorregamentos rasos em São Luís do Paraitinga em 2010. **Fonte:** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2010).

O Planalto de Paraitinga – Paraibuna está inserido no contexto geológico regional do Orógeno Ribeira, sendo composto por gnaisses, migmatitos, rochas metamórficas de baixo a médio grau, de idade arqueana a neoproterozóica e suítes de rochas granitóides intrusivas de idade neoproterozóica. Apresenta uma densa trama de zonas de cisalhamento dúcteis de orientação ENE a E – W; e são caracterizadas por serem destrais, subverticais e profundas (RICCOMINI *et al.*, 2004).

Pode-se dividir o Planalto de Paraitinga - Paraibuna em três compartimentos, sendo o primeiro a Serra de Quebra-Cangalha, um alto dissecado com altitudes entre 800 e 1000 m, composto por granitoides sintectônicos e migmatitos estromatíticos homogêneos. Seus terrenos estão delimitados localmente pelas zonas de cisalhamento transcorrentes destrais de Santa Rita e Canas, ambas ramificações da zona de cisalhamento Taxaquara. O segundo compartimento, Gráben Paraitinga – Paraibuna, é caracterizado por ser uma área rebaixada localizada entre as falhas transcorrentes de Santa Rita e Taxaquara. Seu modelado de relevo é constituído pela planície do Rio Paraitinga, colinas baixas, morros paralelos e pequenas serras, com altitudes variando entre 400 e 700 m e baixos ângulos de encosta. Por último a Serra de Paraitinga, que apresenta um modelado de morros dissecados, vales fechados, encostas de alta declividade, serras alinhadas na direção ENE e altitudes entre 1000 e 1500 m. Os rios apresentam regime torrencial e as planícies aluviais são estreitas e pouco desenvolvidas. Sua litologia é composta por micaxisto, migmatito homogêneo estromatítico e por um corpo granitoide sintectônico (HASUI *et al.* 1978; CPRM, 2006; GONTIJO-PASCUTTI *et al.* 2014;)

A morfoescultura Planalto apresenta morros altos e alongados com topos convexos ou com topos aguçados, uma altimetria entre 700 e 1200m (**Figura 3A**), com solos do tipo cambissolo, argissolo e neossolo oriundos de migmatitos e granitos (ROSS e MOROZ, 1997). Além disso, apresenta formas de dissecação de média a alta, com vales entalhados (grau de entalhamento de 20m a 80m) e dimensões interfluviais entre 750 e 250m. Estes elementos aliados às chuvas intensas de primavera e verão geram como resultado áreas propensas aos movimentos de massa (**Figura 3B e Figura 3C**).

A litologia está dividida em depósitos quaternários, rochas granitóides e rochas do Grupo Açungui, as duas últimas de idade neoproterozóica. Os depósitos quaternários (Q) são constituídos por materiais de granulometria entre cascalho, areia, silte e argila e estão dispostos sob a forma de aluviões, terraços, colúvios e tálus e as rochas granitóides (PC γ) são corpos de caráter intrusivo sintectônico (com foliação); sua mineralogia essencial é composta por quartzo e feldspato; a mineralogia acessória é composta por biotita, muscovita, apatita, zircão, titanita e alanita (HASUI *et al.* 1978). Os micaxistos e quartzo-micaxistos (PC x) apresentam xistosidade bem desenvolvida e são, em sua maioria, compostos pelos minerais essenciais muscovita e/ou biotita e quartzo. Já os Migmatitos homogêneos estromatíticos (PCDe) apresentam bandas escuras (melanossomas) e são compostas por gnaisses ou xistos com teores variáveis de biotita orientada. O neossoma é de composição granítica, pegmatítica e, por vezes, aplítica; apresentando quartzo, microclínio e biotita em sua composição mineralógica. A estrutura do migmatito

homogêneo estromatítico apresenta bandamento, xistosidade e foliação bem definidos e paralelos (HASUI *et al.* 1978).

Os metatexitos nebulíticos (PCDg), do ponto de vista petrográfico, são gnaisses de composição granítica e granodiorítica; apresentam quartzo, microclínio e plagioclásio como minerais essenciais. A mineralogia acessória pode apresentar biotita, muscovita, apatita, zircão, titanita e alanita. A xistosidade é paralela e regular, apresentando fenoblastos de feldspato ou pequenas camadas de granito (HASUI *et al.* 1978).

Na Faixa de transição (PCMa) há rochas de estrutura brechóide, onde os fragmentos do paleossoma estão envoltos pelo neossoma. Este corpo rochoso apresenta-se paralelo ao corpo granitóide localizado ao sul do Rio Paraitinga (HASUI *et al.* 1978); caracterizando uma faixa de transição entre o corpo intrusivo granitóide e o migmatito homogêneo estromatítico. O metatexito nebulítico e faixa de transição estão originalmente classificadas por Hasui *et al.* (1978) como *migmatitos homogêneos embrechíticos, nebulíticos e anatexíticos* (PCDg) e *migmatitos agmatíticos* (PCMa). Atualmente, segundo a nova classificação de rochas migmatíticas proposta por Sawyer e Brown (2008), os termos “embrechítico”, “anatexítico” e “agmatítico” estão em desuso. De acordo do Sawyer (2008), rochas que correspondem à descrição dos migmatitos agmatíticos podem ser encontradas em torno de corpos intrusivos; assim como ocorre na área de estudo deste trabalho. Ressalta-se que a descrição estrutural e petrológica de ambas litologias elaboradas por Hasui *et al.* (1978) foram mantidas.



Figura 3: (A) Contexto geomorfológico do Planalto de Paraitinga - Paraibuna; (B) e (C) Cicatrizes de escorregamento translacional raso. Fonte (B) e (C): Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2010).

3. Materiais e Métodos

3.1 Mapas Geológico e de Ângulo de Encosta e Perfil Geológico - Topográfico

O mapa geológico foi confeccionado por meio do georreferenciamento e da vetorização da folha SF-23-Y-D-III do mapeamento *Geologia da Região Administrativa Três (Vale do Paraíba) do Estado de São Paulo*, produzido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A – IPT no ano de 1977, na escala de 1:100.000.

O perfil geológico – topográfico foi elaborado por meio das informações litológicas e estruturais da carta geológica (IPT, 1977) e as informações das altitudes extraídas do mosaico de imagens de radar *ALOS PALSAR*

Global Radar Imagery (2006 a 2011) com pixel de 12,5m de resolução. A confecção do perfil geológico – topográfico foi elaborada em três etapas cartográficas: criação de uma linha de corte de sentido N – S; elaboração de um perfil de elevação a partir de dados de altitude contidos no Modelo Digital de Terreno (MDT); subdivisão do perfil de elevação conforme as dimensões de largura das litologias da carta geológica (IPT, 1977). Com isso, foi confeccionado o perfil geológico – topográfico com escala horizontal 1:1.000.000 e escala vertical de 1:12.500.

Por fim, também utilizando o mesmo MDT, foi elaborado o mapa de ângulo de encosta, sendo as classes obtidas por meio do método de “Quebras Naturais” (RAMOS *et al.*, 2016) que consiste em agrupamentos naturais referentes ao universo de dados, resultando em 8 classes (0° - 6°; 6° - 10°; 10° - 14°; 14° - 18°; 18° - 22°; 22° - 26°; 26° - 30° e 30° - 58°).

3.2 Inventário de Cicatrizes

A construção do inventário de cicatrizes de escorregamentos foi dividida em duas etapas. A primeira consistiu no georreferenciamento e vetorização das cicatrizes escorregamentos do inventário oficial “*Carta de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações*” do município de São Luís do Paraitinga, na escala de 1:50.000 (CPRM e IPT, 2014).

A segunda etapa consistiu na elaboração do inventário de cicatrizes de escorregamentos para o município de Lagoinha. Como este município não possuía um inventário de cicatrizes oficial, foram utilizadas inicialmente as imagens de satélite do *Google Earth* e as ortofotos de resolução de 1m² dos anos de 2010 e 2011 produzidas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A (EMPLASA). A fotointerpretação foi realizada em escala de detalhe (1:5.000), com auxílio do relevo sombreado (produzido por meio do MDT) posto sob as ortofotos e imagens de satélite. As cicatrizes foram mapeadas seguindo os seguintes critérios: posição na encosta, variação altimétrica entre o material rompido e o limite de material carregado, forma do plano de ruptura e presença de depósitos justapostos aos planos de ruptura.

O inventário de cicatrizes preliminar foi validado por meio de trabalho de campo. Devido às grandes dimensões da área de estudo (873,1 km²), optou-se por uma validação amostral das cicatrizes de escorregamentos. Com o trabalho de campo foi possível observar e distinguir feições pertencentes aos escorregamentos (**Figura 4A**) e às erosões (**Figura 4B**). Estas observações realizadas em campo auxiliaram na correção do inventário de cicatrizes elaborado em gabinete; permitindo confirmar ou incluir pontos de cicatrizes de escorregamento e excluir pontos de cicatrizes de erosão.

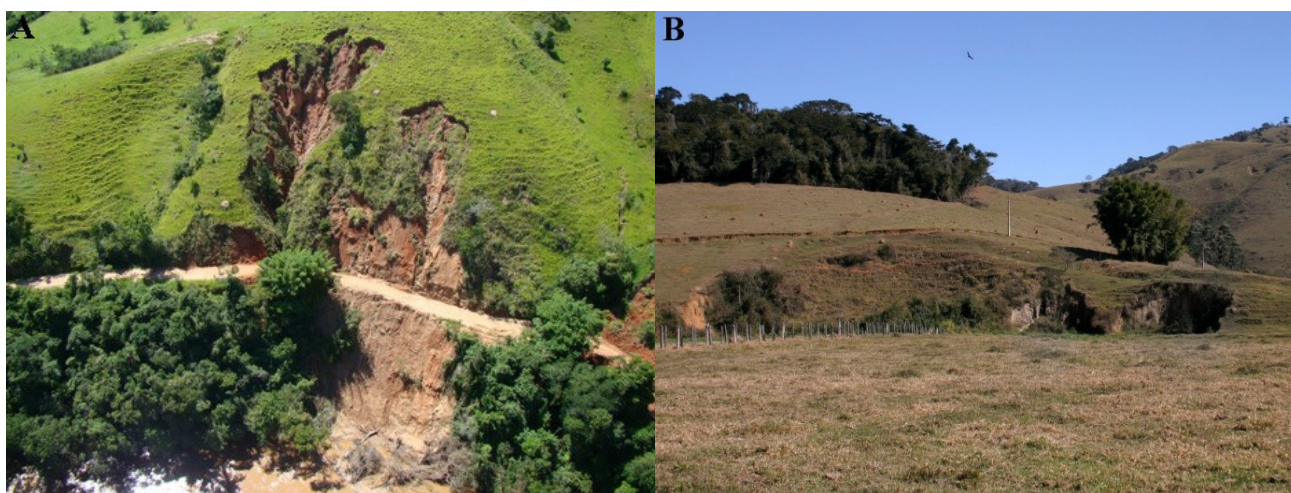


Figura 4: (A) feições de escorregamento; (B) feições de erosão (voçorocas).

Fonte: (A) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2010)

Com base nos trabalhos de Crozier (1986) e Gramani e Tominaga (2016), foi criada uma ficha de campo a fim de coletar informações sobre as condições de ocorrência dos escorregamentos (**Figura 5**). Focou-se na caracterização das condições de uso e ocupação do solo onde os escorregamentos ocorreram, assim como as características acerca de sua tipologia; tipo de encosta; morfometria dos planos de ruptura e dos depósitos; tipo de material mobilizado e depositado.

3.3 Cálculo do índice de potencial de escorregamento (PE)

O cálculo do índice de potencial de escorregamento (PE) foi elaborado por meio da relação entre o inventário de cicatrizes, mapa do parâmetro morfológico ângulo e o mapa geológico. Este método permitiu quantificar e avaliar a distribuição do número de cicatrizes de cada classe litológica e de ângulo de encosta. De acordo com GAO (1993), a definição do índice de potencial de escorregamento (PE) consiste na razão entre o número de cicatrizes de cada classe pela área de cada classe, expresso em porcentagem (%)

| FICHA DE CAMPO- CARACTERÍSTICAS DE PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|--------------------------|----------|
| NOME | | | DATA | |
| 1. DADOS DE LOCALIZAÇÃO | | | | |
| Nº do ponto | X (m) | Y (m) | Z (m) | |
| 2. CARACTERÍSTICAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: VEGETAÇÃO E INFLUÊNCIA ANTRÓPICA | | | | |
| Solo exposto | Pastagem | Mata | Silvicultura | |
| Capoeira | Capoeirão | Veg. rasteira | Veg. arbustiva | |
| Plantio (tipo) | Drenagem natural | Drenagem natural | Drenagem urbana | |
| Água servida | Surgência | Conc. de água em superfície | Vazamentos/tubos | |
| Corte | Aterro | Fossas | | |
| 3. TIPO DE ENCOSTA | | | | |
| Natural | | Corte/aterro | Parede rochosa | |
| 4. CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS | | | | |
| Tipologia do movimento de massa | | Localização em encosta (terços) | | |
| Translacional | | Superior | Médio | Inferior |
| Rotacional | | Superior | Médio | Inferior |
| Cunha | | Superior | Médio | Inferior |
| Queda de blocos | | Superior | Médio | Inferior |
| Fluxos | | Superior | Médio | Inferior |
| Rastejo | | Superior | Médio | Inferior |
| Erosão/movimento de massa | | Superior | Médio | Inferior |
| Outros | | Superior | Médio | Inferior |
| 5. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DO PLANO DE RUPTURA | | | | |
| Solo | Rocha alterada | Saprolito | Matações e blocos | Colúvio |
| 6. TIPO DE MATERIAL MOBILIZADO | | | | |
| Solo | | Rocha | Antrópico (lixo/entulho) | |
| 7. PARÂMETROS MORFOLÓGICOS DE CICATRIZES E DEPÓSITOS | | | | |
| Plano de ruptura | | Massa deslocada | | |
| Comprimento | | Comprimento | | |
| Largura | | Largura | | |
| Altura | | Altura | | |
| Profundidade | | Profundidade | | |
| 8. DATA ("POSSÍVEL") DO ESCORREGAMENTO | | | | |
| Data | | | Fonte | |
| 9. REGISTRO FOTOGRÁFICO | | | | |
| Número de fotos | | | Ângulo de visada | |

Figura 5: Ficha de campo para coleta de dados dos processos de movimento de massa. Compilação dos trabalhos de Crozier (1986); Gramani e Tominaga (2016).

4. Resultados e discussões

4.1. Mapa do inventário de cicatrizes

Como resultado, chegou-se ao mapa do inventário de cicatrizes (**Figura 6**), em que foram identificadas cicatrizes de escorregamentos obtidas por meio da vetorização do inventário oficial do município de São Luís do Paraitinga (CPRM, 2014) e aquelas obtidas por meio da interpretação das ortofotos, imagens de satélite e trabalho de campo. Para uma área de 873,1 km², há 567 cicatrizes de escorregamentos, sendo 131 no município de Lagoinha e 436 localizadas no município de São Luís do Paraitinga. Outro resultado do trabalho de campo e da aplicação da ficha de campo foi a classificação dos escorregamentos segundo sua tipologia. Durante o trabalho de campo foram levantados 22 pontos em uma extensão de 160 km; porém 12 pontos foram referentes somente à observação dos escorregamentos.

Destes 12 pontos observados, 1 foi classificado como escorregamento rotacional – onde a linha amarela representa o plano de ruptura e as linhas vermelhas os depósitos (**Figura 7A**), 1 escorregamento complexo (**Figura 7B**), 9 foram classificados como escorregamentos translacionais rasos (**Figura 7C**) e 1 como queda de blocos (**Figura 7D**). Desta maneira, 75% dos escorregamentos amostrados no trabalho de campo são do tipo translacional raso, e os demais 25% dos escorregamentos amostrados apresentam as demais tipologias.

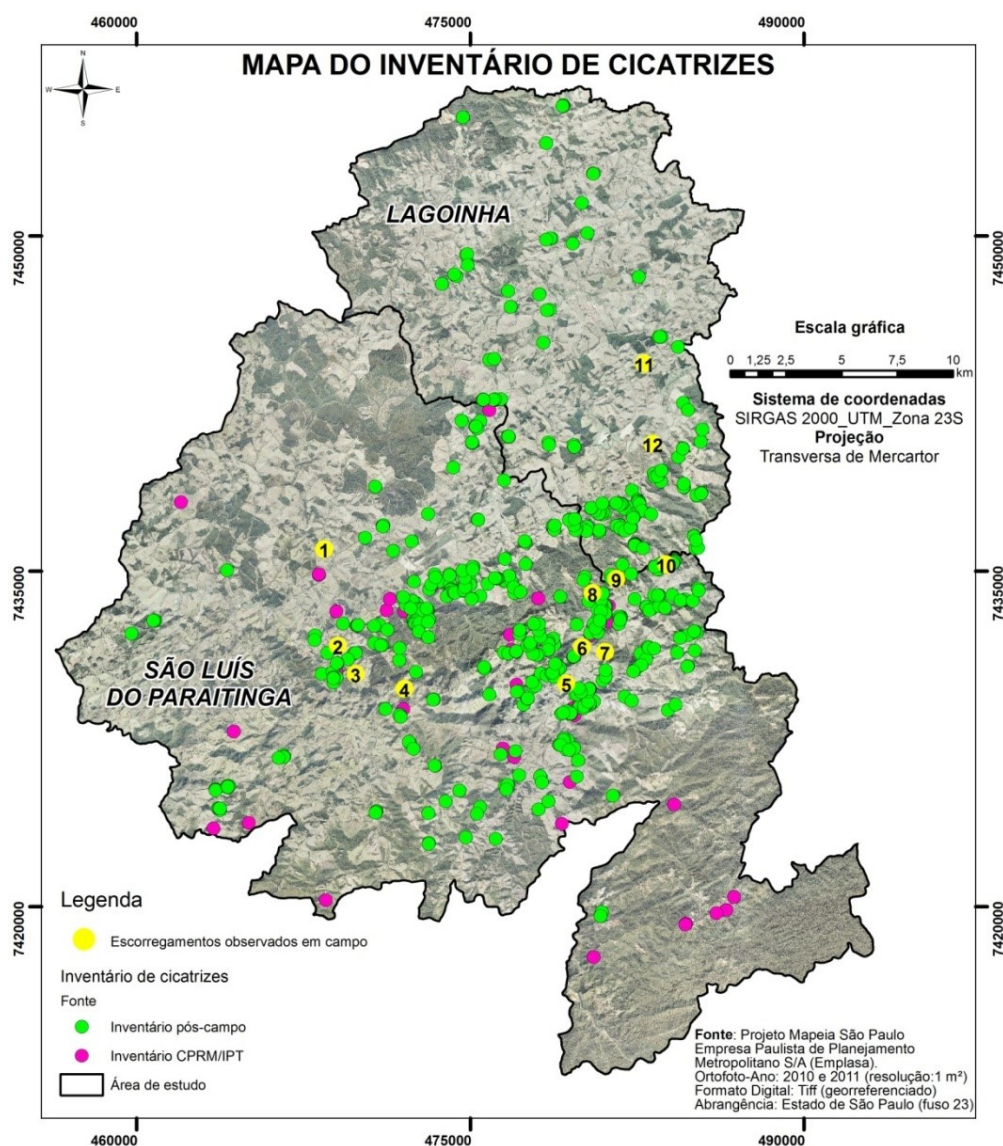


Figura 6: Mapa do inventário de cicatrizes de escorregamento dos municípios de Lagoinha e São Luís do Paraitinga.

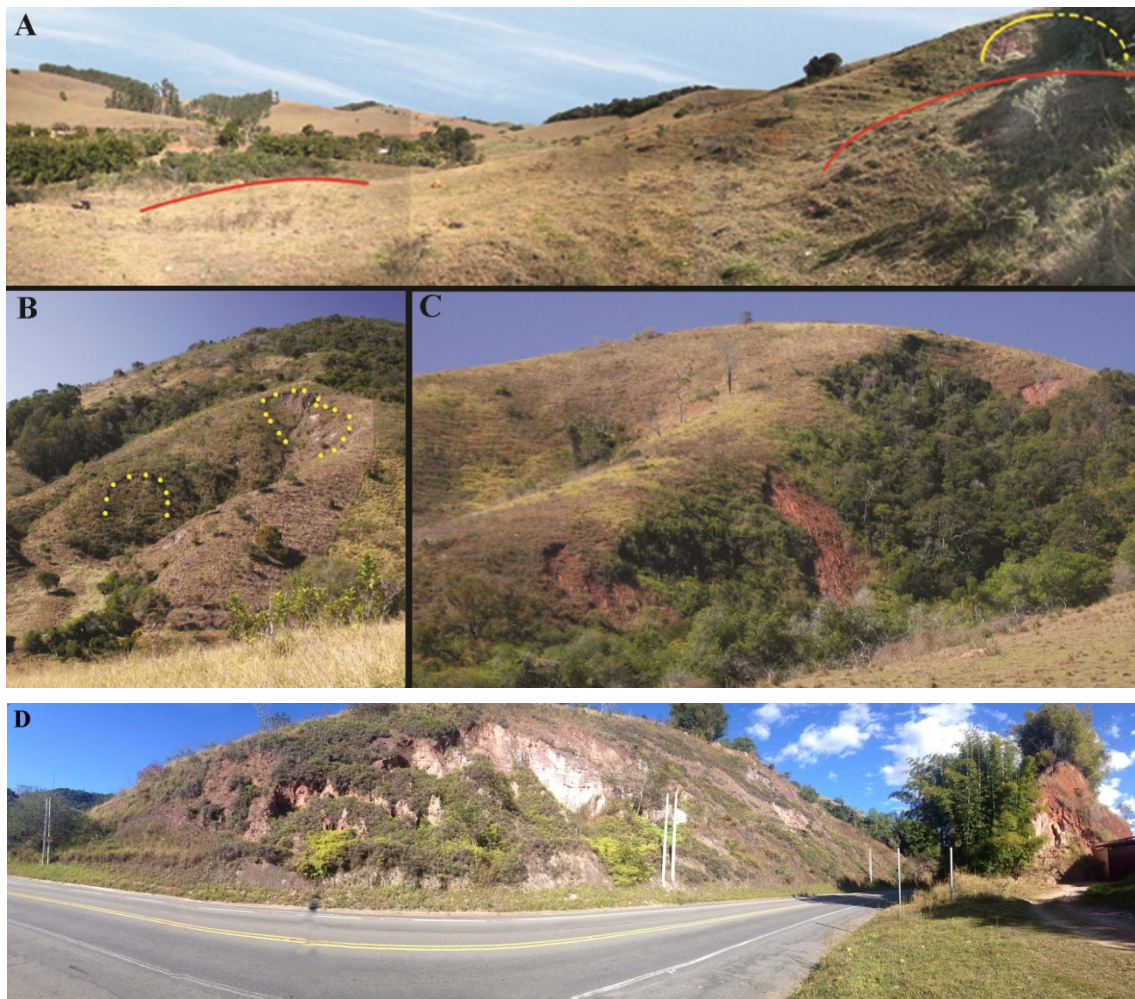


Figura 7: (A) escorregamento rotacional – ponto 1; (B) escorregamentos complexos – ponto 5; (C) escorregamentos translacionais rasos – ponto 12; (D) queda de blocos na Rodovia Oswaldo Cruz – ponto 3.

4.2. Suscetibilidade a Escorregamentos – Litologia

Como resultado da distribuição das cicatrizes de escorregamentos observou-se que a classe dos migmatitos homogêneos estromatíticos ocupa uma área de 376,7 km², seguida pela classe das rochas granitóides 373,9 km². Por ocupar cerca de 50% da área, a classe das rochas granitóides apresentou o maior número de cicatrizes de escorregamento, com 270 ocorrências. De acordo com os resultados do índice de potencial de escorregamento (PE), este apontou o metatexito nebulítico como a classe mais suscetível aos escorregamentos, apresentando um valor de PE igual a 222,0% (**Tabela 1**).

Além destas relações entre o número de cicatrizes e cada classe litológica, observa-se que as cicatrizes apresentaram um alinhamento na direção SW – NE sobre rochas metamórficas, com destaque para o metatexito nebulítico e o migmatito homogêneo estromatítico (**Figura 8**). Porém, em relação às rochas de origem ígnea, o padrão de distribuição mostrou-se aleatório. Percebe-se ainda que os escorregamentos estão mais concentrados sobre a falha transcorrente Taxaquara, sobre os eixos de antiforma e ao longo das linhas de contato de transição litológica, com destaque para o contato entre o metatexito nebulítico e o migmatito homogêneo estromatítico. Dadas estas observações, pode-se perceber que os escorregamentos apresentaram um possível controle litoestrutural.

Pachauri e Pant (1992) apontaram para a localização dos escorregamentos e sua relação com a distância de falhas, dos planos de descontinuidades compostos por filossilicatos e o grau de diaclasamento das rochas presentes na bacia do rio Aglar, nos Himalaias indianos. Segundo os autores, a bacia do rio Aglar apresenta um controle estrutural imposto pela direção do eixo do sinclinal e das linhas de contato litológico entre xistos e quartzitos. Observaram que houve uma maior frequência de escorregamentos em áreas próximas às falhas oriundas de regime compressivo. Além disso, os autores apontaram que áreas com maior densidade de lineamentos apresentaram rochas mais fraturadas, e, conseqüentemente, uma maior suscetibilidade aos escorregamentos. Do ponto de vista

litológico, Pachauri e Pant (1992), apontaram que filitos e xistos com planos de filossilicatos (camadas incompetentes da rocha) apresentaram uma maior propensão aos escorregamentos.

Tabela 1: Distribuição das cicatrizes de escorregamentos X litologia e índice de potencial de escorregamento (PE).

| Litologia | Área total (km ²) | Número de cicatrizes | PE (%) |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|
| Depósitos sedimentares | 18,3 | 4 | 21,9 |
| Micaxisto e quartzo micaxisto | 27,5 | 25 | 90,9 |
| Faixa de transição | 14,0 | 12 | 85,7 |
| Metatexito nebulítico | 62,6 | 139 | 222,0 |
| Migmatito homogêneo estromatítico | 376,7 | 117 | 31,1 |
| Rocha granitóide (sintectônica) | 373,9 | 270 | 72,2 |
| TOTAL | 873,1 | 567 | 523,8 |

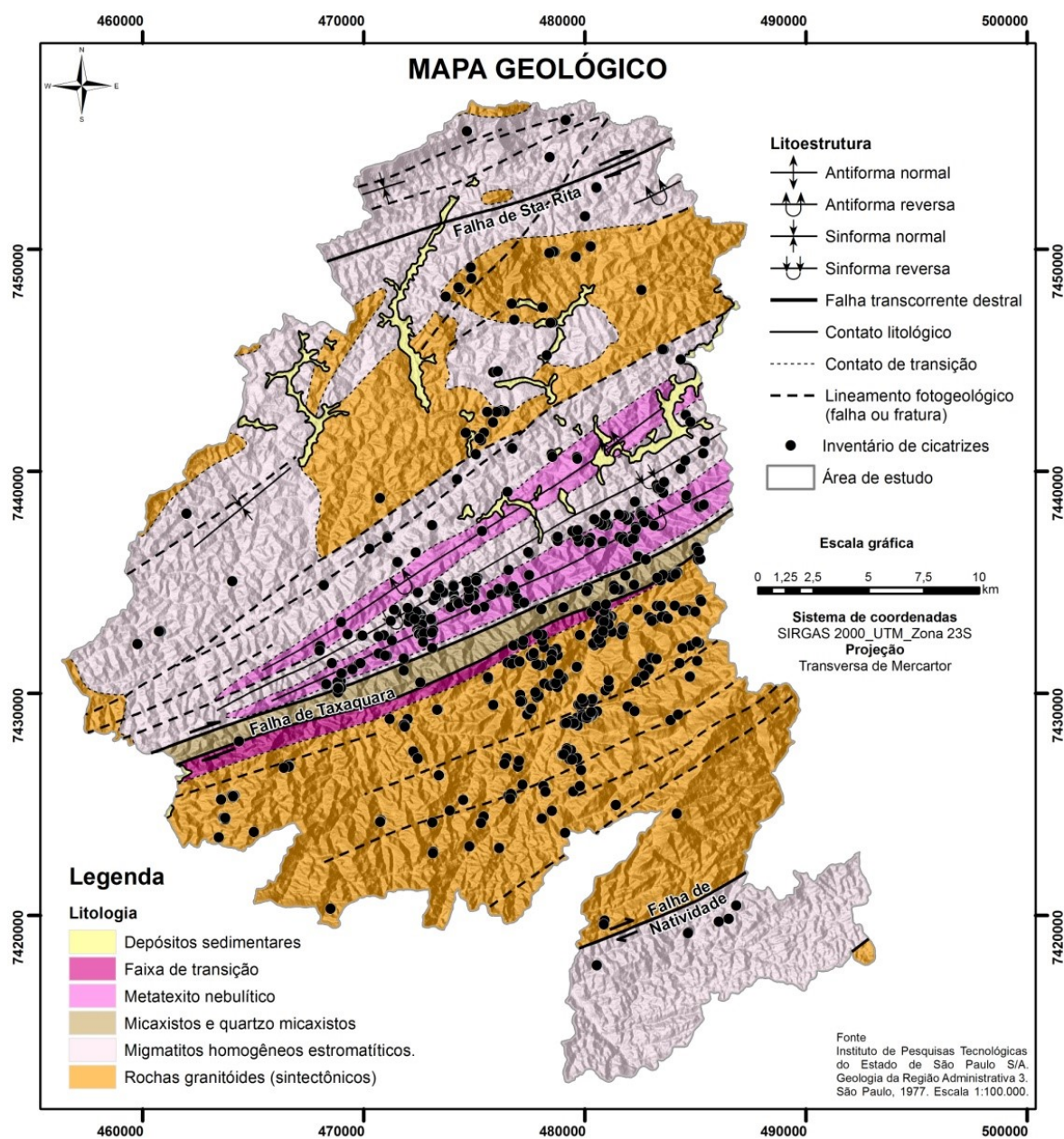


Figura 8: Distribuição espacial das cicatrizes de escorregamento X litoestrutura.

Em um trabalho desenvolvido nos Himalaias, Gerrard (1994) sugeriu que certos tipos de rochas são mais propensos à ruptura do que outras. O autor verificou que os filitos eram mais suscetíveis aos escorregamentos do ponto de vista do grau de intemperismo, sendo seguidos pelos xistos, arenitos mal cimentados, gnaisses, granitos e quartzitos. Para o autor, o grau de fraturamento do filito estaria associado aos esforços compressivos, que, por consequência, tornaram esta rocha mais friável e exposta ao ataque do intemperismo. Esse resultado pode-se relacionar com os obtidos neste trabalho, pois notou-se que as litologias mais suscetíveis aos escorregamentos estão em áreas de cisalhamento transcorrente e em áreas dobradas (regime compressivo).

Schramm *et al.* (1998) observaram que os planos de descontinuidade atuaram na dinâmica dos escorregamentos em uma região dos Himalaias, no Nepal. Os autores notaram que as propriedades mecânicas entre os gnaisses, migmatitos e granitos variavam de maneira sutil. Apontaram que, apesar dos granitos serem mais resistentes os esforços dinâmicos, os migmatitos e gnaisses ricos em biotita também eram suscetíveis aos processos de intemperismo e escorregamentos. Além destas características, os autores concluíram que havia uma significativa relação entre o controle estrutural do ambiente orogênico e os escorregamentos. Do ponto de vista do controle estrutural orogênico, os trabalhos de Pachauri e Pant (1992) e de Schramm *et al.* (1998), concordam com os resultados obtidos neste trabalho para o Planalto de Paraitinga – Paraibuna. Em relação à litologia, pode-se traçar uma relação entre as rochas metamórficas com camadas ricas em filossilicatos e os escorregamentos. Porém, para este trabalho, ainda não há dados estruturais que corroborem com a relação entre a geometria dos planos de descontinuidades e a geometria das encostas e os escorregamentos.

4.3. Suscetibilidade a Escorregamentos – Ângulo da Encosta

Como resultado da distribuição dos escorregamentos em relação ao ângulo de encosta, observou-se que a classe com maior número de escorregamentos foi a de 22° - 26°, com 156 ocorrências. Em relação à área, a classe com maior dimensão foi a de 14° - 18°, com 173,1 km². Porém, a classe de 30° - 58° foi a mais suscetível aos escorregamentos, apresentando um valor de potencial de escorregamento de 250% (Tabela 2).

Tabela 2: Distribuição das cicatrizes de escorregamentos, do ângulo de encosta e do potencial de escorregamento (PE).

| Ângulo | Área total (km ²) | Número de Cicatrizes | PE (%) |
|-----------|-------------------------------|----------------------|--------|
| 0° - 6° | 96,4 | 5 | 5,19 |
| 6° - 10° | 130,5 | 8 | 6,13 |
| 10° - 14° | 170,0 | 41 | 24,12 |
| 14° - 18° | 173,1 | 83 | 47,95 |
| 18° - 22° | 142,5 | 136 | 95,44 |
| 22° - 26° | 92,5 | 156 | 168,65 |
| 26° - 30° | 45,3 | 81 | 178,81 |
| 30° - 58° | 22,8 | 57 | 250,0 |
| TOTAL | 873,1 | 567 | 776,28 |

Comparando os resultados do potencial de escorregamento obtidos neste trabalho, estes concordam com Fernandes *et al.* (2001). Os autores chegaram à classe de 37°- 55,5° como a classe mais suscetível aos movimentos de massa para as bacias dos rios Quitite e Papagaio, no Maciço da Tijuca (RJ). Nery e Vieira (2015) obtiveram a classe de 30° - 50° como mais propensa aos escorregamentos para a bacia do Ultrafértil, na escarpa da Serra do Mar (SP). Na Serra do Mar, município de Antonina (PR), Martins *et al.* (2017) chegaram às classes de 30°- 40° e 20°- 40° como as mais suscetíveis aos escorregamentos para as bacias dos rios Bom Brinquedo e Laranjeiras respectivamente.

Chen *et al.* (2011) observaram que aproximadamente metade do número total de cicatrizes de escorregamento estavam localizadas em encostas com ângulo entre 30°-50° para duas bacias tributárias do rio *Peinan*, no sudeste de Taiwan. Para a bacia do rio *Xiaojiang*, sudoeste da China, Lan *et al.* (2004) observaram que as classes de ângulo de encosta com a maior probabilidade de ocorrência de escorregamentos estavam entre os intervalos de 30°- 40° e 40°- 50°. Apesar dos cinco trabalhos citados estarem localizados em regiões geográficas distintas, todos apontaram para valores de ângulo de encosta entre 30°-50° como o intervalo mais suscetível aos escorregamentos, valores estes que concordam com o intervalo de 30° - 58° obtido para este trabalho.

4.4 Compartimentação do Relevo e Distribuição dos Escorregamentos

O perfil geológico – topográfico foi resultado das observações realizadas em campo acerca das formas de relevo, processos de erosão e de movimento de massa nos compartimentos Gráben Paraitinga – Paraibuna e Serra de Paraitinga. Este perfil buscou representar a morfometria do relevo e suas respectivas estruturas e litologias dos compartimentos Serra de Quebra-Cangalha, Gráben Paraitinga - Paraibuna e Serra de Paraitinga. O perfil apresenta uma linha de corte de 40 km de extensão, orientação NNW - SSE, com início nas coordenadas 473858E; 7455819N e término nas coordenadas 489935E; 7416534N (**Figura 9**).

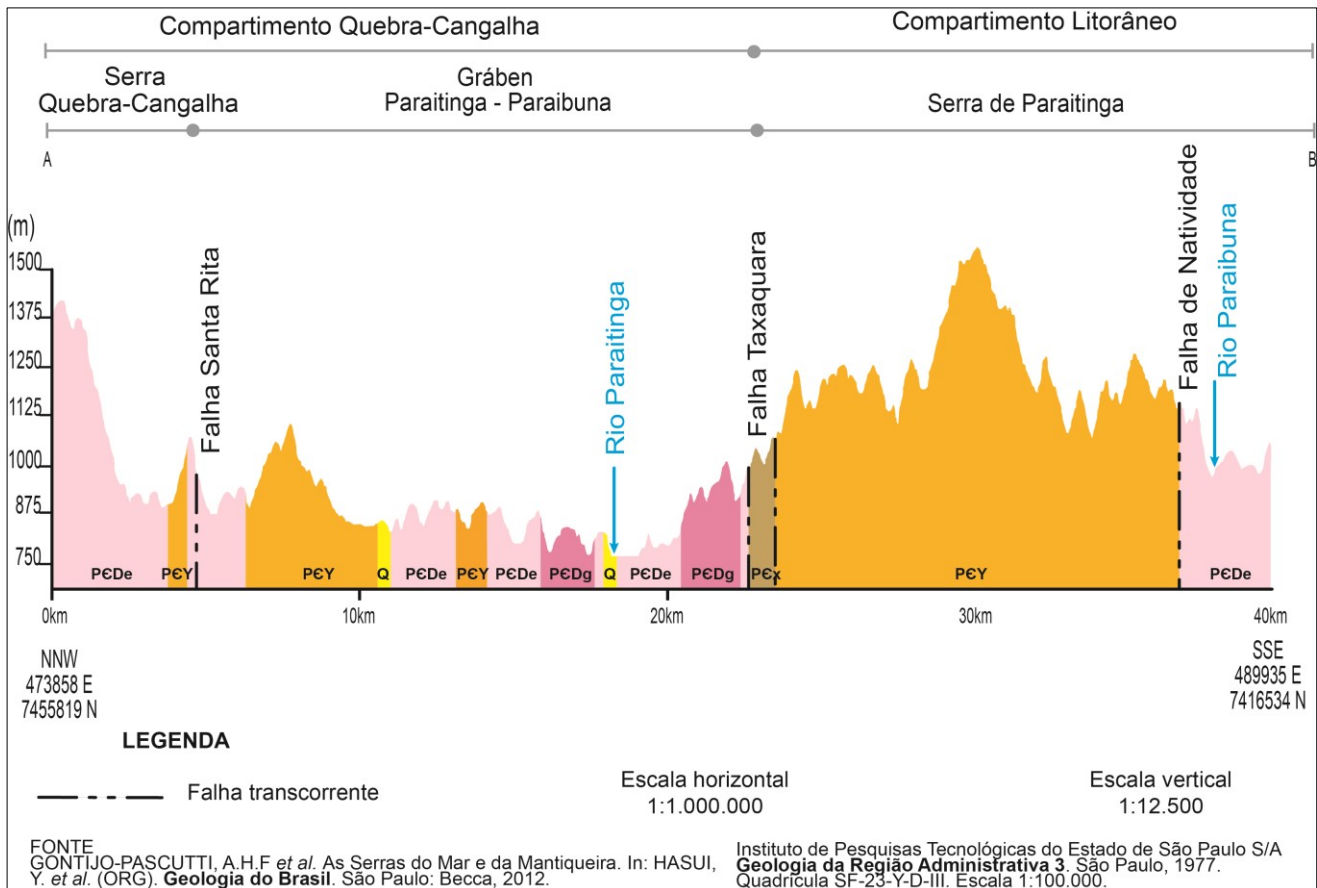


Figura 9: Perfil geológico – topográfico do Planalto de Paraitinga-Paraibuna.

O compartimento Gráben Paraitinga - Paraibuna, delimitado pelas falhas transcorrentes de Santa Rita e Taxaquara, apresenta as altimetrias e ângulos de encosta mais modestos da área de estudo - com valores entre 750m – 1000m de altitude e ângulo de encosta entre 0° e 22° (**Figura 10A**). Observou-se em campo que o número de cicatrizes de erosão supera o número de cicatrizes de escorregamentos. Notou-se nesta área cicatrizes de erosão laminar, ravinas, voçorocas vinculadas aos terracetes de pisoteio (**Figura 10B**).

O compartimento Serra de Paraitinga, delimitado pelas falhas transcorrentes de Natividade e Taxaquara, apresenta um modelado de relevo mais dissecado, com vales fechados e maiores altimetrias e ângulo de encosta – com valores entre 1000m e 1500m de altitude e encostas com até 58 graus de inclinação (**Figura 11A**). Notou-se em campo que este compartimento apresentou um maior número de ocorrências de cicatrizes de movimento de massa, com destaque para os escorregamentos translacionais rasos. No município de São Luís do Paraitinga, pode-se destacar a bacia do Rio do Chapéu como a área mais afetada pelos movimentos de massa registrada em campo, assim como o reverso da Serra de Paraitinga no município de Lagoinha (**Figura 11B**).

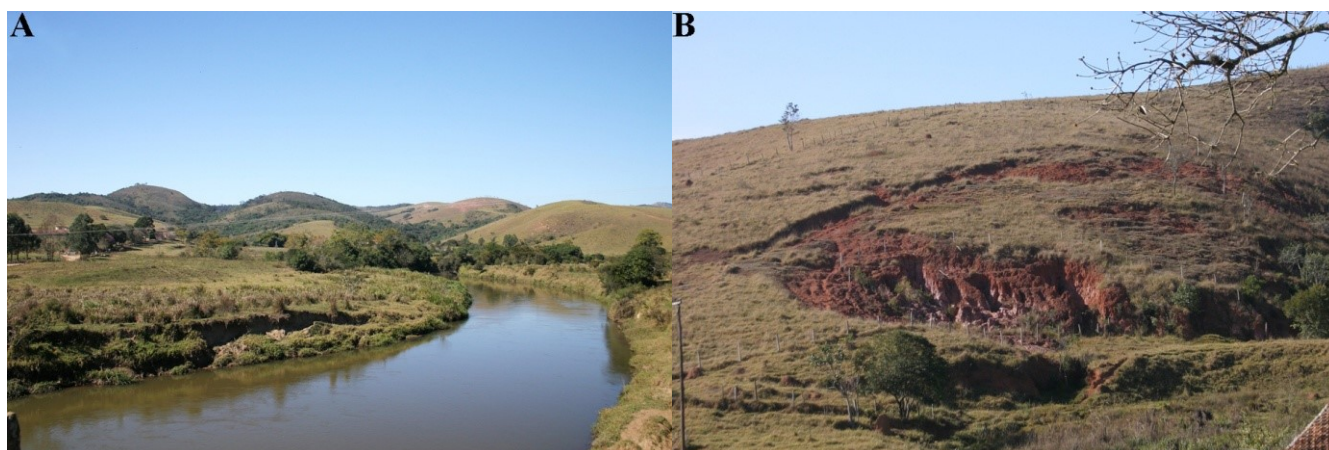


Figura 10: (A) Rio Paraitinga e as formas de relevo do Gráben Paraitinga – Paraibuna; (B) Terracetes de pisoteio e ravinamento em encosta do compartimento Gráben Paraitinga – Paraibuna.

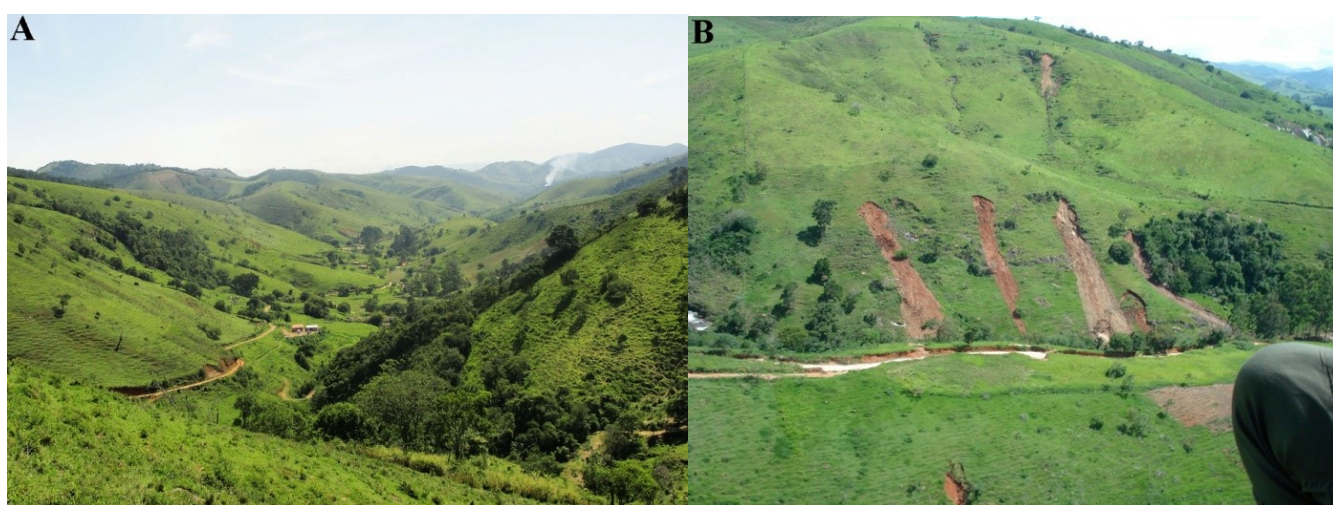


Figura 11: (A) Formas de relevo do compartimento Serra de Paraitinga (Bacia do Rio do Chapéu); (B) Cicatrizes de escorregamentos translacionais rasos observadas no compartimento Serra de Paraitinga (Cabeceira do Rio do Chapéu). Fonte (B): Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2010).

5. Considerações finais

A análise do índice de potencial de escorregamento demonstrou por meio dos dados do inventário de cicatrizes, litologia e ângulo de encosta, que as áreas mais suscetíveis a escorregamentos no Planalto Paraitinga – Paraibuna são aquelas representadas pela classe litológica do metatexito nebulítico e pela classe de ângulo da encostade 30° - 58° .

Em relação à litologia, o índice de potencial de escorregamento pode funcionar como um guia para o desenvolvimento de outras análises litológicas e sua relação com os processos de movimento de massa, tais como análise da geometria das rochas, tomando medidas da atitude da foliação, xistosidade e/ou bandamento em relação à geometria de encostas.

REFERÊNCIAS

ALOS PALSAR RTC HIGH RESOLUTION. Disponível em <http://www.asf.alaska.edu/>. Acessado em março de 2018. DOI 10.5067/Z97HFCNKR6VA

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILLI, J. C. **Estabilidade de Taludes**. In OLIVEIRA, A. M. S e BRITO, S. N. A (Eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 243 – 269, 2015.

BIERMAN, P. R.; MONTGOMERY, D. R. **Hillslope**. In: Key Concepts in Geomorphology. W. H. Freeman and Company Publishers. New York, p.145 – 178, 2014.

- CHEN, H.; LIN, G-W; LU, M-H; SHIH, T-Y; HORNG, M-J; WU, S-J; CHUANG, B. **Effects of topography, lithology, rainfall and earthquake on landslide and sediment discharge in mountain catchments of southeastern Taiwan.** *Geomorphology* 133(2011), p.132–142. DOI 10.1016/j.geomorph.2010.12.031
- CROZIER, M. J. **Classification of slope movement.** In: *Landslides: causes, consequences & environment.* Routledge London & New York, 1986, p. 3 – 31.
- EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A - EMPLASA. **Projeto Mapeia São Paulo – Ortofotos.** Ano: 2010 e 2011 (resolução:1 m²) Formato Digital: Tiff (georreferenciado) Abrangência: Estado de São Paulo (fuso 23).
- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. **Condiçantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Volume 2, Nº 1, p.51-71, 2001.
- FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. **Minerais e Rochas.** In: In OLIVEIRA, A. M. S e BRITO, S. N. A (Eds). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 15 – 38, 2015.
- GAO, J. **Identification of Topographic Settings Conductive to Landsliding From DEM in Nelson County, Virginia, USA.** *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 18, p. 579 – 591, 1993.
- GERRARD, J. **The landslide hazard in the Himalayas: geologic control and human action.** *Geomorphology* 10, p. 221–230, 1994
- GOMES, L. A.; GRAMANI, M. F. **Relato de Vistoria Técnica – São Luís do Paraitinga.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo, 2010.
- GONTIJO-PASCUTTI, A. H. F.; HASUI, Y.; SANTOS, M.; JÚNIOR, A. V. S.; SOUZA, I. A. **As Serras do Mar e da Mantiqueira.** In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. (ORG). **Geologia do Brasil.** São Paulo: Becca, 2012.
- GRAMANI, M. F. e TOMINAGA, L. K. **Identificação e Mapeamento de Áreas de Risco de Desastres Naturais.** In: SÃO PAULO: COORDENADORIA ESTADUAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL DE SÃO PAULO. **Redução de Risco de Desastres: Uma Construção de Resiliência Local.** São Paulo, 2016.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** São Paulo: Editora Blucher, 2ª edição, 206p, 1984.
- GUPTA, A. **Tropical Geomorphology.** Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.
- HASUI, Y; PONÇANO, W. L; BISTRISHI, C. A; STEIN, D. P; GALVÃO, C. A. C. E; GIMENEZ, A. F; ALMEIDA, M. A; PIRES NETO, A. G; MELO, M. S; SANTOS, M. C. S. R. **Geologia da Região Administrativa 3 (Vale do Paraíba) e Parte da Região Administrativa 2 (Litoral) do Estado de São Paulo.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A – IPT. (Monografias IPT, 1), 1978.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S/A - IPT. **Geologia da Região Administrativa 3.** São Paulo, 1977. Quadrícula SF-23-Y-D-III. Escala 1:100.000.
- LAN, H. X.; ZHOU, C. H.; WANG, L. J.; ZHANG, H. Y.; LI, R. H. 2004. **Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China.** *Engineering Geology* 76: 109–128.
- MARTINS, T. D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; CORREA, A. C. B.; BATEIRA, C.V.M. . **Análise dos parâmetros morfológicos e os escorregamentos rasos na Serra do Mar, Paraná.** *Caminhos da Geografia (UFU. Online)*, v. 18, p. 223-239, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.14393/RCG186310>
- NERY, T. D. e VIEIRA, B. C. **Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model.** *Bulletin of Engineering Geology and the Environment (Print) JCR*, v. 2, p. 01-15, 2014. DOI 10.1007/s10064-014-0622-8.
- PACHAURI, A. K.; PANT, M. 1992. **Landslide hazard mapping based on geological attributes.** *Engineering Geology* 32, p. 81–100.
- RAMOS, A. P. M; JUNIOR, J. M; DECANINI, M. M. S.; PUGLIESI, E. A.; OLIVEIRA, R. F.; FILHO, A. C. P. **Avaliação Qualitativa e Quantitativa de métodos de classificação de dados para o mapeamento coroplético.** *Revista Brasileira de Cartografia* (2016), nº 68/3, p. 609 – 629. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. ISSN: 1808 – 0936.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. **Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil**. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 383-405.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Departamento de Geografia (FFLCH – USP). Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada - IPT/FAPESP, 1997. Escala 1:500.000.

RUHE, R. V. **Geomorphology: geomorphic processes and surficial geology**. Boston: Houghton Mifflin, 1975.

SAWYER, E. W. **Atlas of Migmatites**. The Canadian Mineralogist, Special Publication 9, NRC Research Press, Ottawa, Ontário. 371p, 2008.

SAWYER, E. W.; BROWN, M. **Working with Migmatites**. Mineral Association of Canada, Short Course 38, pp158, 2008.

SCHRAMM, J. M; WEIDINGER, J. T; IBETSBERGER, H. J. **Petrologic and structural controls on geomorphology of prehistoric Tsergo Ri slope failure, Langtang Himal, Nepal**. *Geomorphology* 26 (1998), p. 107–121.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, escala de 1:750.000. Programa Geologia do Brasil – PGB, CPRM, São Paulo, ano de 2006.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT S/A. **Carta de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações - Município de São Luís do Paraitinga/SP**. Escala 1:50.000, 2014.

STEAD, D.; WOLTER, A. **A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology**. *Journal of Structural Geology* 74 (2015), p.1 – 23. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.002>

SUMMERFIELD, M. J. **Global Geomorphology**. New York: Routledge, 2013.