

# Mapeamento da suscetibilidade das vertentes naturais ante a ocorrência de escorregamentos translacionais em um trecho da BR-376, através da análise do fator de segurança, PR

*Mapping of susceptibility of natural slopes before the occurrence of translational landslides in a stretch of the BR-376/PR, through the safety factor analysis.*

YULIMAR SUGEY MILLÁN COY<sup>1</sup>, ANDRÉS MIGUEL GONZALEZ ACEVEDO<sup>1</sup>, ALBERTO PIO FIORI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná – UFPR, Paraná – [yulimarmillan@gmail.com](mailto:yulimarmillan@gmail.com), [fiori@ufpr.br](mailto:fiori@ufpr.br), [andresmgonzaleza@gmail.com](mailto:andresmgonzaleza@gmail.com)

## Resumo

Uma grande variedade de métodos vem sendo propostos para compreender e avaliar a suscetibilidade das vertentes ante a ocorrência de escorregamentos translacionais, entre eles, os métodos determinísticos baseados em modelos matemáticos são muito utilizados. O modelo matemático empregado nesta pesquisa teve seu foco na aplicação dos métodos determinísticos com base na teoria do equilíbrio limite para o cálculo do Fator de Segurança (FS) e espacialização dos resultados empregando técnicas de geoprocessamento. O uso destas técnicas é de grande importância na identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos, já que permitem a integração de uma grande variedade de informações da paisagem, tais como a topografia, declividade, parâmetros físicos e mecânicos dos solos, entre outros, auxiliando na elaboração de mapas de suscetibilidade áreas de interesse. A área de pesquisa está localizada em uma porção do Primeiro Planalto Paranaense, ao longo da rodovia federal BR-376 entre o quilômetro 658+820 m e o quilômetro 660+690 m, onde são observadas uma grande quantidade de movimentações e cicatrizes de escorregamentos nas vertentes naturais. Várias dessas movimentações ocorreram após eventos pluviométricos muito fortes que atingiram a região no mês de março do 2011, com precipitações acumuladas mensal maior a 700 mm, os quais ocasionaram prejuízos e a interrupção do tráfego no trecho da BR-376. A validação do modelo empregado foi feita através do cruzamento do inventário de escorregamentos realizado com os mapas de Fator de Segurança (FS), obtendo-se uma boa correspondência na localização das áreas com maior suscetibilidade ante a ocorrência de escorregamentos translacionais.

Palavras-chave: Teoria de equilíbrio limite, modelos matemáticos, geoprocessamento.

## Abstract

*A wide variety of methods have been proposed to understand and evaluate the susceptibility of the slopes at the occurrence of translational landslides, including the deterministic methods based on mathematical models are widely used. The mathematical model used in this study was its focus on the application of deterministic methods based on the equilibrium limit theory to calculate the Factor of Safety (FS) and spatial distribution of results using geoprocessing techniques. The use of these techniques is of great importance in identifying areas susceptible to slip, since they allow the integration of a large variety of information of landscape, such as topography, slope, physical and mechanical parameters of the soil, among others, aiding in the drafting of susceptibility maps in places of interest. The research area is located in a portion of the First Plateau Paranaense, along the federal highway BR-376 between kilometer 658 + 820 m and kilometer 660 + 690 m, where they observed a lot of drives and scars of landslides on the slopes natural. Several of these movements occurred after strong rainfall events that hit the region in March of 2011, accumulated monthly rainfall greater than 700 mm, which caused damages and stopping traffic on the stretch of the BR-376. The validation of the model used was made by crossing inventory slip performed with Factor of Safety maps (FS), yielding a good match the location of areas with increased susceptibility against the occurrence of slip translational.*

Keywords: equilibrium limit theory, mathematical models, geoprocessing.

## 1. Introdução

Os movimentos de massa são alguns dos eventos naturais mais importantes que afetam à população Brasileira, a grande maioria deles associados a instabilidade das vertentes. De acordo com Bispo *et al.* (2011), esses eventos são desencadeados pela interação entre diferentes fatores endógenos, que envolvem características geológicas, pedológicas e geomorfológicas, além de fatores exógenos, como variáveis climáticas, fatores antrópicos, entre outros.

O estudo sobre a instabilidade de encostas por movimentos de massa pode ser feito através de diferentes abordagens, como por exemplo, uso de mapas de inventários, atributos estatísticos, métodos empíricos e métodos determinísticos. Entre esses, os métodos determinísticos são bastante empregados por aplicarem equações matemáticas sem englobar dados subjetivos (Safaei *et al.* 2011).

Fiori & Carmignani (2009) tratam de forma detalhada os diversos métodos determinísticos para o estudo da estabilidade, visando à determinação de um índice ou uma grandeza que permita quantificar o grau de estabilidade das vertentes naturais aos processos morfodinâmicos, como é o fator de segurança. A análise destes métodos, baseados na teoria de equilíbrio limite consideram que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços resistentes. A fim de comparar a estabilidade em condições diferentes de equilíbrio, é definido o Fator de Segurança (FS).

Dada a importância dos estudos sobre a suscetibilidade a escorregamentos nas vertentes naturais, foi aplicada neste trabalho uma metodologia baseada em métodos determinísticos, empregando uma modelização matemática e sua espacialização com emprego de técnicas de geoprocessamento, fornecendo uma documentação cartográfica muito útil, como é a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de declividade, mapa de perfil de curvatura, o inventário de escorregamentos e os mapas de fator de segurança, para auxiliar na identificação das vertentes com maior suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos translacionais, de modo de tornar mais rápido e preciso a localização e diagnóstico das áreas susceptíveis.

A área selecionada é um trecho da BR-376 cujas vertentes estão situadas numa porção do Primeiro Planalto Paranaense. Nesta área são observadas uma grande quantidade de cicatrizes de escorregamentos nas vertentes naturais, com uma dinâmica fortemente influenciada pela ação de precipitações e a declividade das vertentes. Tendo-se em conta que quando rodovias são implantadas nestes ambientes sujeitos a fenômenos de instabilização torna-se importante realizar estudos que avaliem as condições de segurança ante a presença destes fenômenos, de modo tal a minimizar a ocorrência de escorregamentos que podem colocar em risco tanto vidas humanas, como bens materiais.

## 2. Descrição da área de estudo

A área de pesquisa está localizada no município de Tijucas do sul ao leste do Estado do Paraná em um trecho da rodovia BR-376 entre os quilômetros 658+820m e 660+690m, entre as coordenadas UTM: E 699800/701400 e S 7138600/7139800 (Figura 1).

A região em estudo esta inserida na unidade morfoescultural do Primeiro Planalto Paranaense, cuja subunidade morfoescultural é denominada Planalto de Curitiba. As formas predominantes no relevo são topos alongados e aplanados, vertentes convexas e vales em “V” aberto, com uma direção preferencias da morfologia variando entre N-S e NW-SE, com declividades predominantes entre 9 e 20°. O relevo apresenta uma gradiente de 130 metros com altitudes variando entre os 767 (mínima) e 897 (máxima) m.s.n.m.

O Planalto de Curitiba na área de estudo encontra-se modelado principalmente em rochas do Complexo Atuba, composto principalmente por um conjunto Gnáissico-Migmatítico formados no Paleoproterozóico (2000 ± 200 Ma), remigmatizados no Neoproterozóico (600 ± 20 Ma). No domínio Curitiba predomina rochas gnáissicas bandeadas, migmatíticas, da fácies do anfibólito, representadas principalmente por biotita-anfibólito-gnaisses contendo leucossomas de composição tonalito-granodioritas além das graníticas, que compõem o denominado Complexo Atuba. O padrão estrutural observado é indicativo de uma tectônica controlada em grande parte por cisalhamento, com importante componente lateral, e transporte relativo em direção a sul-sudeste (Siga Jr *et al.* 1994). Uma forte foliação milonítica orientada NE-SW constitui o principal padrão estrutural, marcado pelo achatamento e estiramentos dos minerais. Esta foliação é caracterizada por seu aspecto anastomosado e concentração máxima em N66°E/ 64°NW (MINEROPAR, 2004). Também é identificado um sistema associado a diques básicos de direção NW do período Mesozoico – Cretáceo, de aproximadamente 135 Ma. Os dados geocronológicos indicam que esta foliação milonítica foi desenvolvida durante o Neoproterozóico, possuindo caráter heterogêneo, não coaxial em regime dúctil e em condições físico-química da fácies xisto verde (zona da biotita), até o limite inferior da fácies anfibólito. Os principais tipos de solos que ocorrem na área são os coluvionares e residuais, produtos da decomposição do migmatitos.

O clima da região segundo a classificação de Köppen é oceânico temperado (Cfb), caracterizado por apresentar verão mais úmido e fresco que o inverno, com chuvas abundantes e bem distribuídas ao longo de todo o ano. As médias de temperatura no mês mais quente são inferiores a 22 °C, com pelo menos quatro meses (inverno) com médias inferior a de 14°C e como mínima 8° C. A pluviosidade no Primeiro Planalto Paranaense varia bastante de acordo com a altitude da estação de monitoramento.

A Figura 2 apresenta a acumulação anual registrada nas estações pluviométricas de Vossoroca, Garuva e a Transpetro. Pode ser observado que os eventos de máxima pluviosidade ocorreram no mês de novembro do ano 2008 e no mês de março do ano 2011, quando as precipitações ultrapassaram os 1000 e os 690 mm, respectivamente. Estes eventos pluviométricos intensos estiveram relacionados a uma série de escorregamentos translacionais e rotacionais ocorridos ao longo da BR-376.

O tipo de vegetação na região, segundo o Mapeamento da Floresta Atlântica do Paraná (SEMA, 2002), é composto por Floresta Ombrófila Densa Montana (floresta atlântica do meio das encostas). Este tipo de floresta

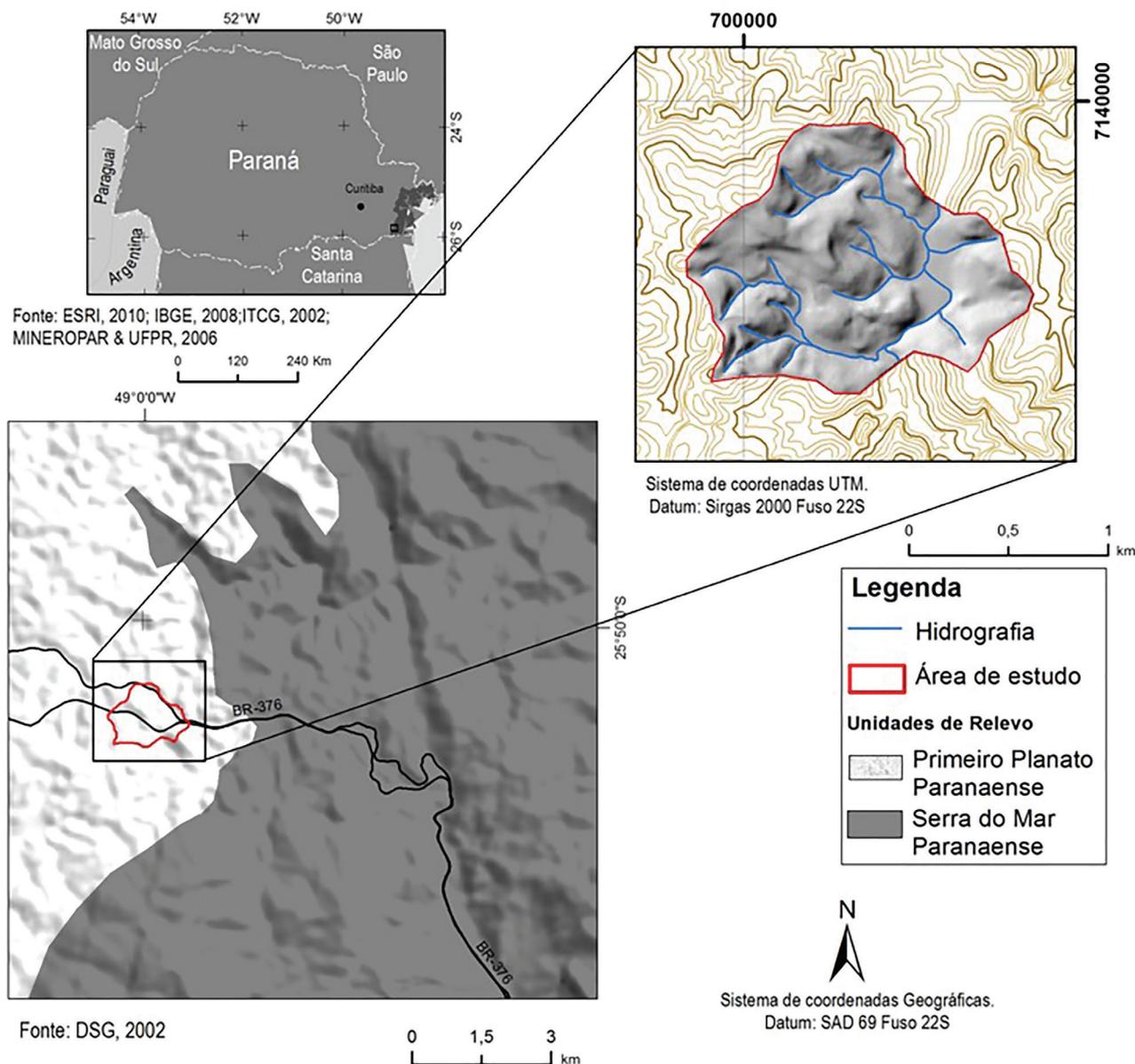


Figura 1 – Localização da área de estudo

ocorre nas partes mais altas das encostas, em geral entre 700 e 1000 metros de altitudes, sobre o relevo convexo, comumente de boa drenagem e profundidade, geralmente sobre solos cambissolos, sujeitos a deslizamentos frequente o que da origem nesses locais a solos mais rasos. A altitude das árvores no local pode alcançar até 25 metros, apresentando-se frequentemente nas áreas mais baixas, no pé do tapete herbáceo (Figura 3).

### 3. Materiais e métodos

O fluxograma da Figura 4 descreve os procedimentos e os materiais empregados na geração da base de dados, que contribuíram tanto na caracterização fisiográfica da área, como na compreensão dos tópicos relacionados às análises de estabilidade de vertentes para a geração dos mapas de Fator de Segurança (FS) da área. Todos esses dados obtidos das folhas topográficas, fotografias áreas, ortofotomapas e imagens de satélite foram tratados e ar-

mazenados em uma base de dados com auxílio do *software* ArcGis versão 10.1.

#### 3.1. O Fator de Segurança (FS) na estabilidade das vertentes

O método de análise por “equilíbrio limite” baseia-se em diagnosticar o quão próximo do ponto de ruptura uma vertente se encontra. As condições de estabilidade são dadas por um fator de segurança (FS), que representa a razão das forças favoráveis ao movimento pelas resistentes ao movimento. Enquanto as primeiras não ultrapassem as segundas, o solo não se moverá.

Segundo Fiori & Carmignani (2009), desde o ponto de vista teórico, uma vertente se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. O estudo de sua estabilidade deve levar em

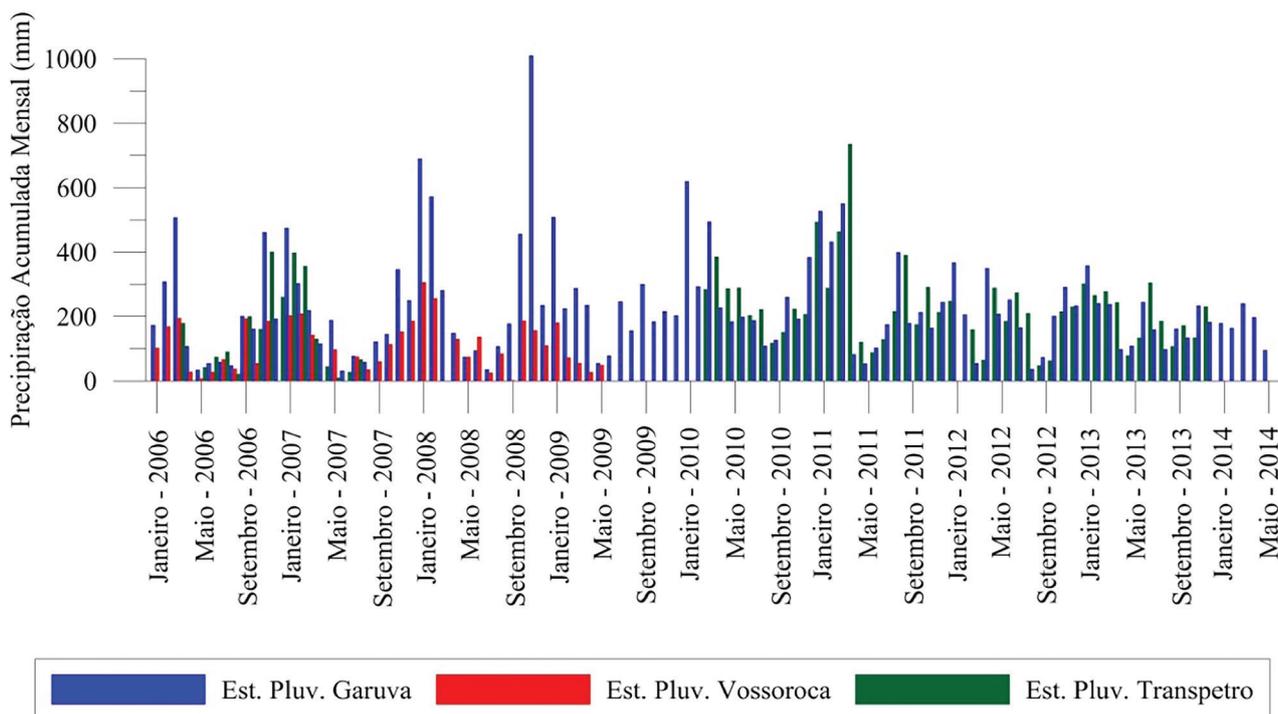


Figura 2 – Distribuição mensal média das chuvas em estações na BR-376, PR (2006-2014).



Figura 3 – Aspecto da Floresta no km 659 + 100.

conta o equilíbrio entre essas três variáveis, uma vez que as duas primeiras se somam, e tendem deslocar a massa de solo encosta abaixo (atuando como forças sollicitantes), enquanto o último atua como freio a essa movimentação (atuando como força resistente).

A análise do equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura ou ao movimento são balanceadas pelas forças resistentes. Como exemplo, considere-se um bloco apoiado sobre um plano inclinado de

ângulo atrito “ $i$ ”(Figura 5).

Onde o bloco é sollicitado por seu próprio peso  $P$ , e a componente tangencial ( $P \cdot \text{sen } i$ ) tende a causar movimento. A componente normal, atuante perpendicularmente à base do bloco ou à superfície de escorregamento é igual a ( $P \cdot \text{cos } i$ ).

A força ângulo de atrito interno, no contacto bloco/superfície de apoio.

A fim de comparar a estabilidade de taludes em con-

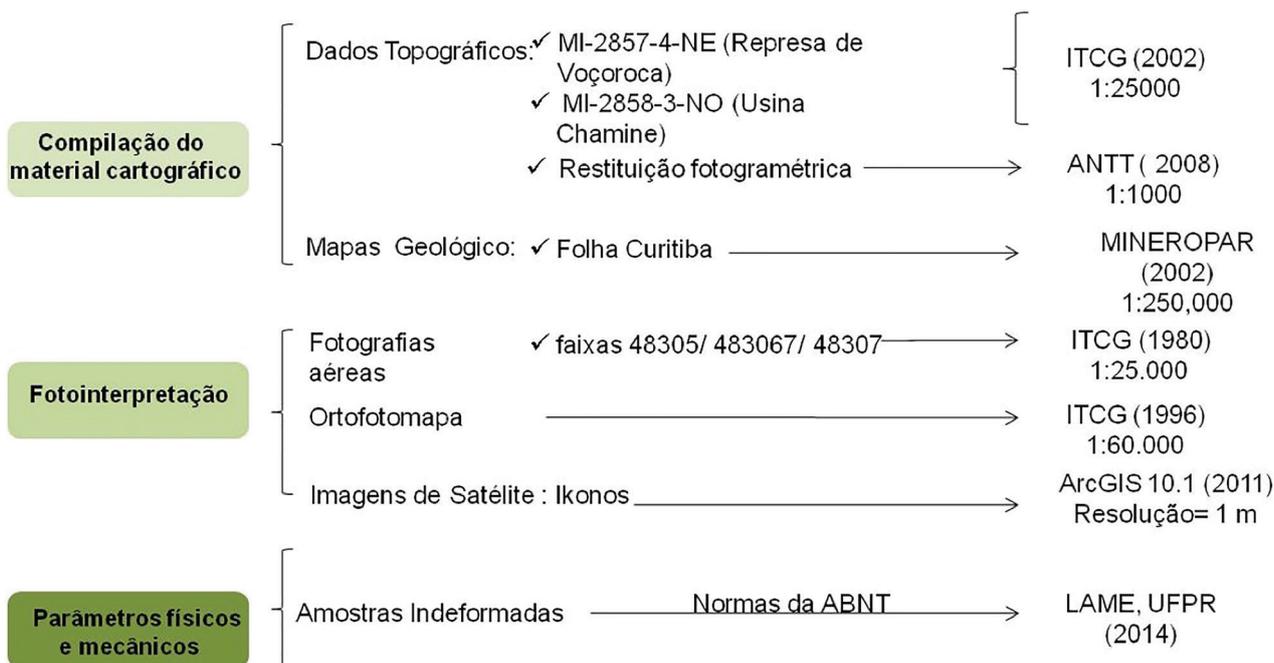


Figura 4 – Materiais utilizados na realização do trabalho.

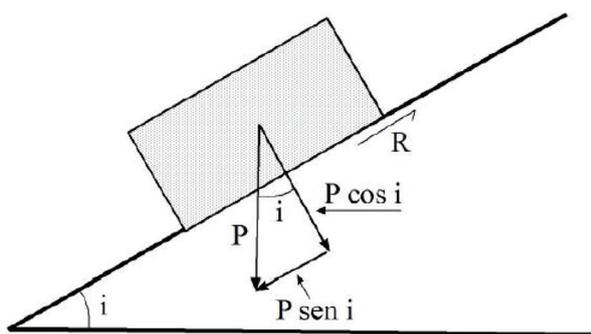


Figura 5 – Decomposição da força (P) em sua componente tangencial e normal, e a força de resistência (R). FONTE: Fiori & Carmignani (2009).

dições diferentes de equilíbrio limite define-se um fator de segurança (FS), como a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e a resultante das forças solicitantes ou favoráveis ao movimento. O fator de segurança (FS) é dado pela Equação 1:

$$Fs = (\text{forças resistentes}) / (\text{forças solicitantes}) \quad (\text{Equação 1})$$

Ao substituir os respectivos valores na Equação 2, o fator de segurança bem dado por:

$$Fs = (P * \cos i * \tan\phi) / P * \sin i = \tan\phi / \tan i \quad (\text{Equação 2})$$

No caso de uma vertente infinita com a presença de cobertura vegetal, com o nível freático a uma profundidade  $h_1$  da superfície e uma distância  $h_2$  da base da camada de solo, devem-se levar em conta na análise da estabilidade outras forças exercidas pela vegetação, como são: a força do vento que atua sobre a copa das árvores ( $F_{ve}$ ), a força exercida pelo peso das árvores no solo ( $\sigma_a$ ), como o observado na Figura 5.

O Peso das árvores ( $P_a$ ) pode ser dividido a partir do número de árvores por unidade da área da vertente, sendo  $1/\cos i$  a área da seção da vertente (Figura 6), o peso das árvores será dado pela Equação 3.

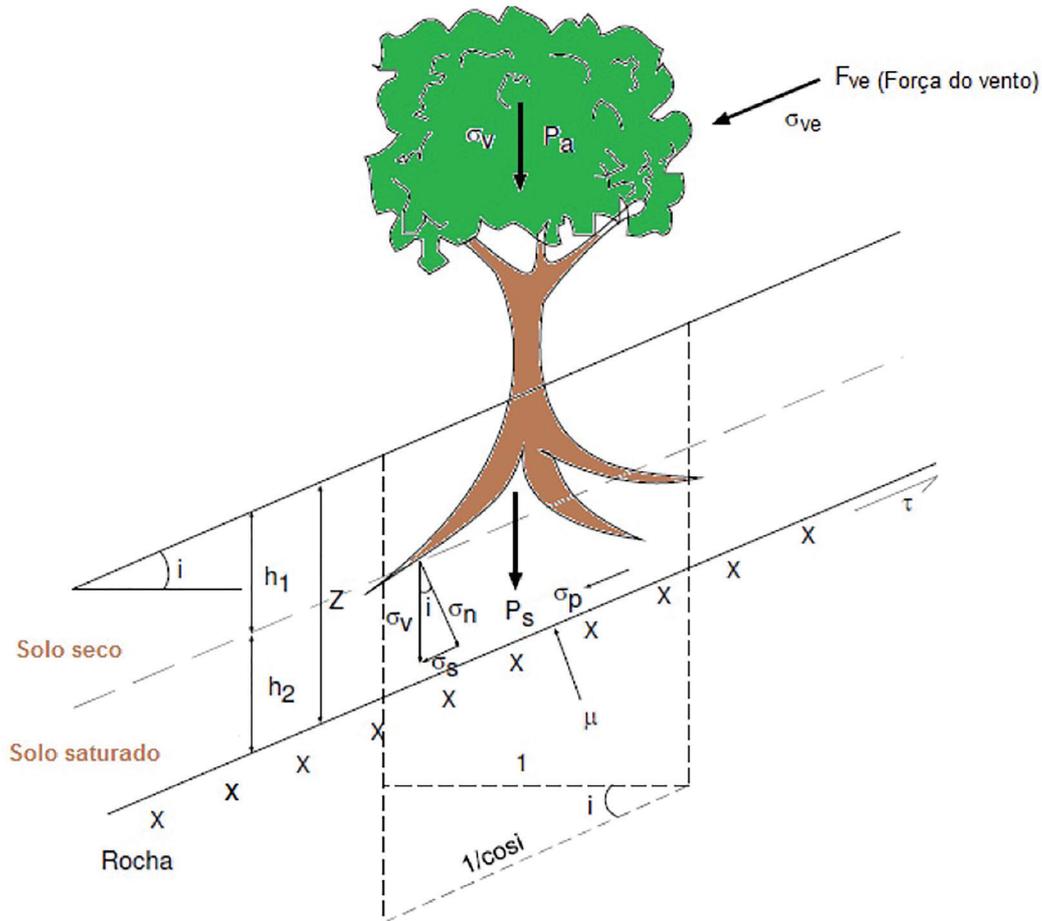
$$P_a = \sigma_a / \cos i \quad (\text{Equação 3})$$

Segundo Fiori & Carmignani (2009), a pressão ( $\sigma_a$ ) exercida sobre a vertente pelo peso das árvores é obtida dividindo o peso das árvores ( $P_a$ ) pela área de abrangência das raízes. Na Serra do Mar, Wolle & Pedrosa (1981) determinaram o valor da pressão ( $\sigma_a$ ) em torno de 3,0 kPa.

A Força do vento ( $F_{ve}$ ) é considerada quando se tem a presença da vegetação em uma vertente, e é determinada a partir da razão entre a pressão exercida pelo vento ( $\sigma_{ve}$ ), nas copas das árvores, com a área da vertente ( $1/\cos i$ ), tendo-se a Equação 4:

$$F_{ve} = \sigma_{ve} / \cos i \quad (\text{Equação 4})$$

Esta força é relevante apenas quando a velocidade dos ventos de uma localidade excede a 40 km/h, conforme estimado por Styczen e Morgan (1995). A partir de medições de velocidades de ventos feitos na estação climatológica de Morretes, Fendrich & Ferreira (1995) estipularam uma média de 50,4 km/h. Com base nesses dados, Nunes (2002) determinou ( $\sigma_{ve}$ ) igual a 1 kPa no município de Morretes.



**Figura 6** – Principais fatores da vegetação que influenciam na análise da estabilidade de vertentes e decomposição das forças atuantes. FONTE: Fiori e Carmignani (2009).

Os resultados de  $(\sigma_a)$  3,0 kPa obtidos por Wolle e Pedrosa (1981) e de  $(\sigma_{ve})$  1 kPa obtidos por Nunes (2002), foram tomados como base para os cálculos relacionados com a vegetação deste trabalho.

Uma vez determinados todos os parâmetros de resistência dos solos, das características das vertentes e acrescidas as forças quando a cobertura vegetal está presente, o cálculo do Fator de Segurança (FS) é fornecido pela seguinte Equação 5:

$$FS = \frac{Cs + [(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h}\gamma_a)h \cos i + \sigma_a \cos i] \tan \phi}{(h\gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde: FS = Fator de segurança; Cs = Coesão do solo (kPa);  $\gamma_{nat}$  = Peso específico natural do solo (kN/m<sup>3</sup>);  $h_w$  = Altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente (m);  $\gamma_a$  = Peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>); h = Altura da zona de solo não saturado, perpendicular à vertente (m); i = Inclinação da vertente (graus);  $\sigma_a$  = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);  $\phi$  = Ângulo de atrito interno do solo (graus);  $\sigma_{ve}$  = Pressão exercida pelo vento na cobertura vegetal (kPa).

### 3.2. Elaboração da base de dados utilizando técnicas de geoprocessamento

Na geração de bancos de dados foi utilizado o software ArcInfo (ESRI, 2012) do ArcGis 10.1, o qual armazena os dados em uma estrutura de dados topológicos, obtidos nos mapas temáticos (declividade, curvatura e orientação de vertentes). As informações obtidas no processamento foram combinadas com os parâmetros geotécnicos dos solos, obtidos a partir da análise de ensaios de laboratório de quatro amostras indeformadas coletadas em diversos pontos da área de interesse, como ângulo de atrito e coesão, e inseridos no modelo matemático adotado, através da equação do fator de segurança (Equação 5).

Com isso foram gerados mapas de índice de segurança com graus variáveis de saturação do solo (cenário com solo seco e com 30 % de saturação), utilizando a base topográfica 1:25.000 para a área toda e a restituição fotogramétrica 1:1.000 na faixa de domínio (200 m de cada lado da rodovia), onde é criado um novo nível de informação. A validação dos mapas foi realizada a partir da comparação dos mapas de fatores de segurança resultantes e o resultado do inventário de escorregamentos, assim como visitas ao local.

O fluxograma da Figura 7 apresenta a metodologia empregada no trabalho para a espacialização da equação

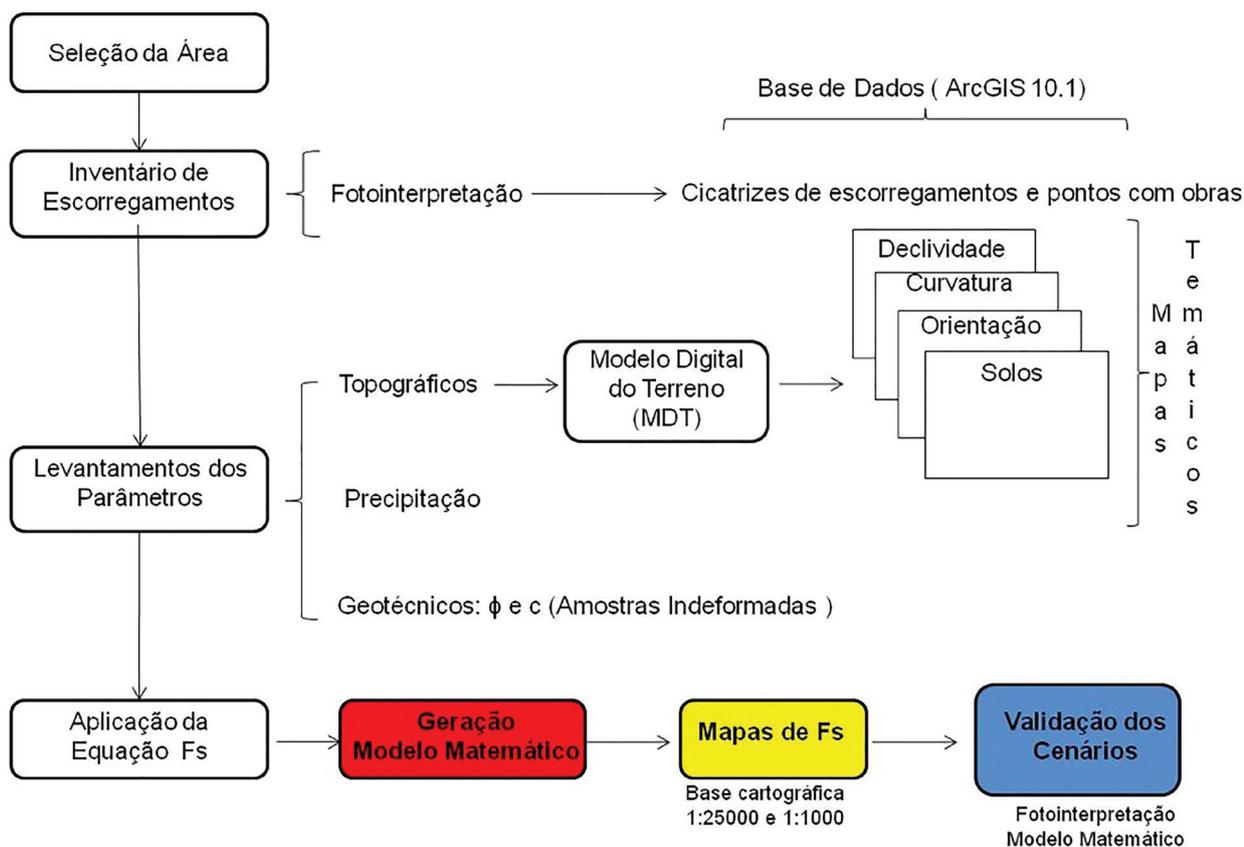


Figura 7 – Metodologia empregada para gerar a base de dados digital em SIG.

do Fator de Segurança (FS) com o emprego do Sistema de Informações Geográficas (SIG), tendo por base um Modelo Digital do Terreno (MDT).

A utilização de banco de dados digitais em ambiente SIG é outro grande aliado na aplicação de método determinístico (modelos matemáticos), pois permite lidar com uma gama de informações muito grande e processá-las a fim de gerar mapas de fatores de segurança que auxiliem na visualização e interpretação de áreas com maiores ou menores graus de estabilidade, além de atualizar e complementar as informações já existentes.

Algumas aplicações das técnicas de SIG para especialização das equações de fator de segurança foram empregadas por Fiori (1995a), Fiori (1995b), Girardi (1999), Nunes (2002), Fiori e Nunes (2003), Amaral (2003), Borchardt (2005), Kozciak (2005), Tabalipa (2008), Teixeira (2012) e Vaz (2014).

### 3.2.1. Elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE), mapas temáticos e mapa de FS

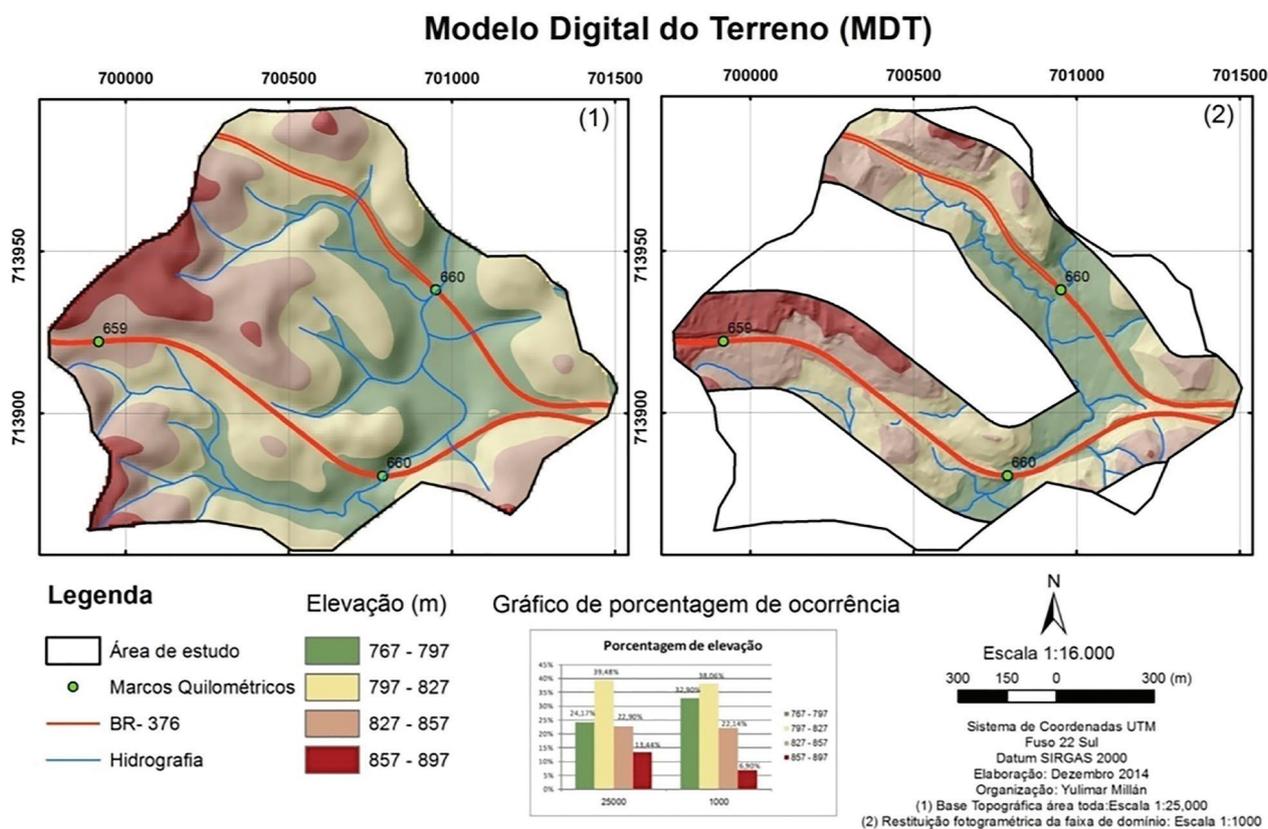
Para a criação do MDT, foi utilizada a ferramenta “Topo to Raster”, (desenvolvido por Hutchinson, 1989) do software ESRI ArcGis 10, o qual interpola valores de elevação, impondo restrições que garantam uma estrutura de drenagem conectada e a representação correta dos topos e fluxos de entrada de dados de altimetria. Para a área toda, os dados de entrada foram obtidos pela digitalização das bases topográficas a escala 1:25.000, tais como curvas de nível com equidistância a cada 10

metros, pontos cotados e a rede hidrografia. A resolução do pixel adotado no MDE foi de 10 metros, baseado na equidistância das curvas de nível. Para melhor detalhe, também foram utilizados os dados da faixa de domínio (800 m<sup>2</sup>- 200 metros para cada lado da rodovia) de um trecho da BR-376 entre os quilômetros 658+820m e 660+690m. Os dados de entrada foram obtidos pela restituição fotogramétrica a escala 1:1.000 com equidistância das curvas de nível a cada 1 metro, utilizando a mesma lógica da base topográfica, e adotando o valor de resolução do pixel de um 1 metro.

O resultado do MDT utilizando a base topográfica 1:25.000 na área toda pode ser observado na Figura 8, gerado a partir de la criação do MDT. Esta base topográfica pode-ser utilizada em estudos locais preliminares para o mapeamento da análise de estabilidade, pelo menos no que respeita na área aqui estudada.

O MDT da Figura 8 foi reclassificado em quatro classes de altitude (767-797 m, 797-827 m, 827-857 m e 857-897 m), onde é possível observar que as menores altitudes estão localizadas ao centro da região de estudo, entre 767-797 metros e as altitudes entre 797-827 metros são as mais representativas (aproximadamente 39 % da área).

O gráfico de barras inserido nos mapas corresponde à porcentagem de ocorrência de cada classe (maior quantidade de pixels), mostram que a pesar de existir uma tendência entre as duas escalas trabalhadas, a escala 1:25.000 tende a generalizar mais o valores dos parâmetros, em comparação com a escala 1:1.000 que mostra



**Figura 8** – Modelo Digital do Terreno (MDT) de um trecho da BR-376 entre os quilômetros 658+820m e 660+690m, à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 e à direita base topográfica a escala 1:1.000 da faixa de domínio (800 m<sup>2</sup>).

valores mas detalhados no que diz respeito ao percentual de ocorrência de cada parâmetro, resultando numa moderada diferença nos valores de ocorrência.

A declividade é um dos principais fatores na avaliação da suscetibilidade, e descreve a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, podendo ser especificada em graus ou porcentagem. O mapa da declividade foi elaborado utilizando a ferramenta “Slope”, e reclassificado em seis classes de declividade em porcentagem, seguindo a proposta de EMBRAPA (2006) (Figura 9). Na Tabela 1 é apresentada a classificação do relevo de acordo com a declividade das vertentes, expressas em percentuais e ângulos.

Classes de declividade (%)	(°)	Classificação do relevo
0 - 3	0 - 1,35	Plano
3 - 8	1,35 - 3,60	Suave ndulado
8 - 20	3,60 - 9,00	Ondulado
20 - 45	9,00 - 20,25	Forte ondulado
45 - 75	20,25 - 33,75	Montanhoso
> 75	> 33,75	Escarpado

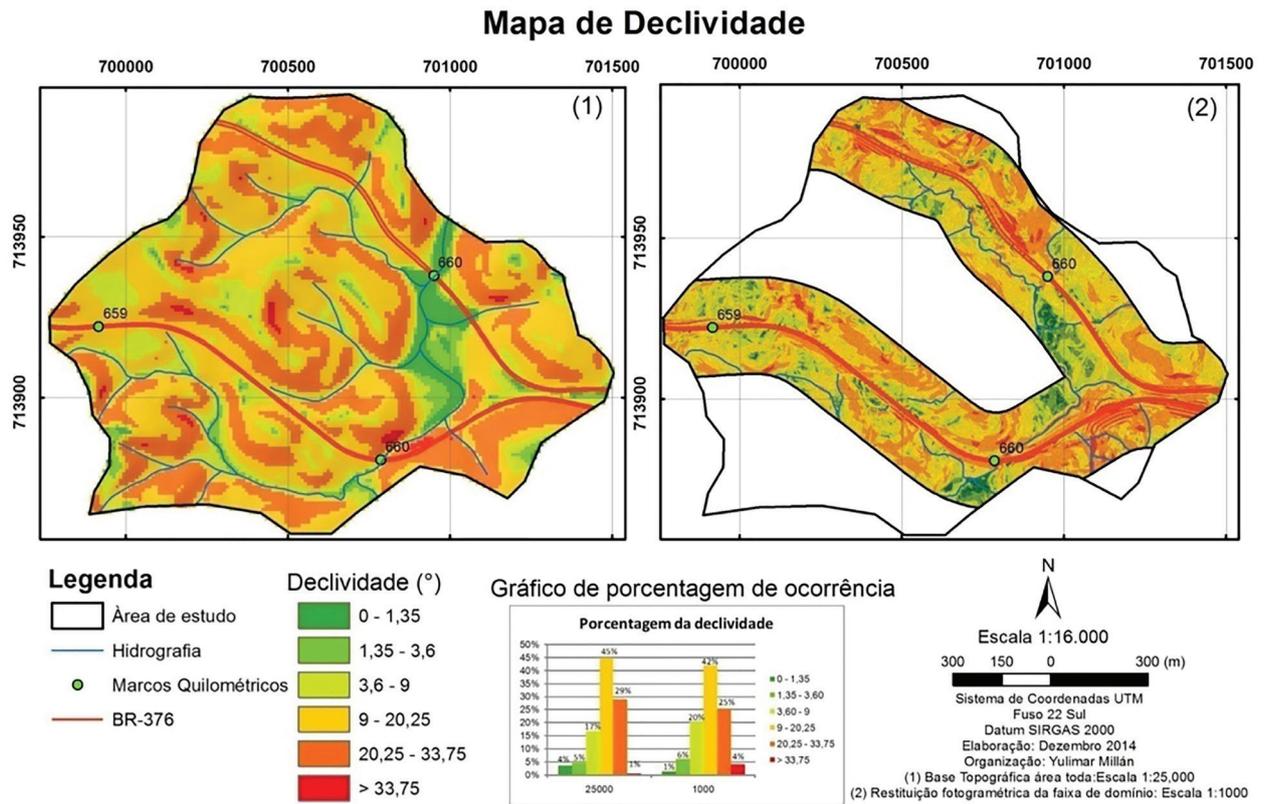
**Tabela 1** – Classificação do relevo de acordo com a declividade, adotando intervalos em graus segundo os intervalos da EMBRAPA para classificação de solos. FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2006).

Ao analisar o mapa de declividade na Figura 8, pode-se observar que os intervalos com maior ocorrência na área de estudo foram as classe de 9 - 20,25° e de 20,25 - 33,75° de declividade, alcançando 42 e 25 % de ocorrência respectivamente, onde o relevo é classificado como forte ondulado e montanhoso. As declividades acima de 33,75° ocorrem em apenas um 4% da área, mais especificamente ao sudeste da região, onde o relevo é classificado como escarpado. Estas observações podem ser vistas no gráfico inserido no mapa de declividade, que mostra os valores predominantes para cada classe de declive em ambas as bases topográficas (escala 1:25.000 e 1:1.000).

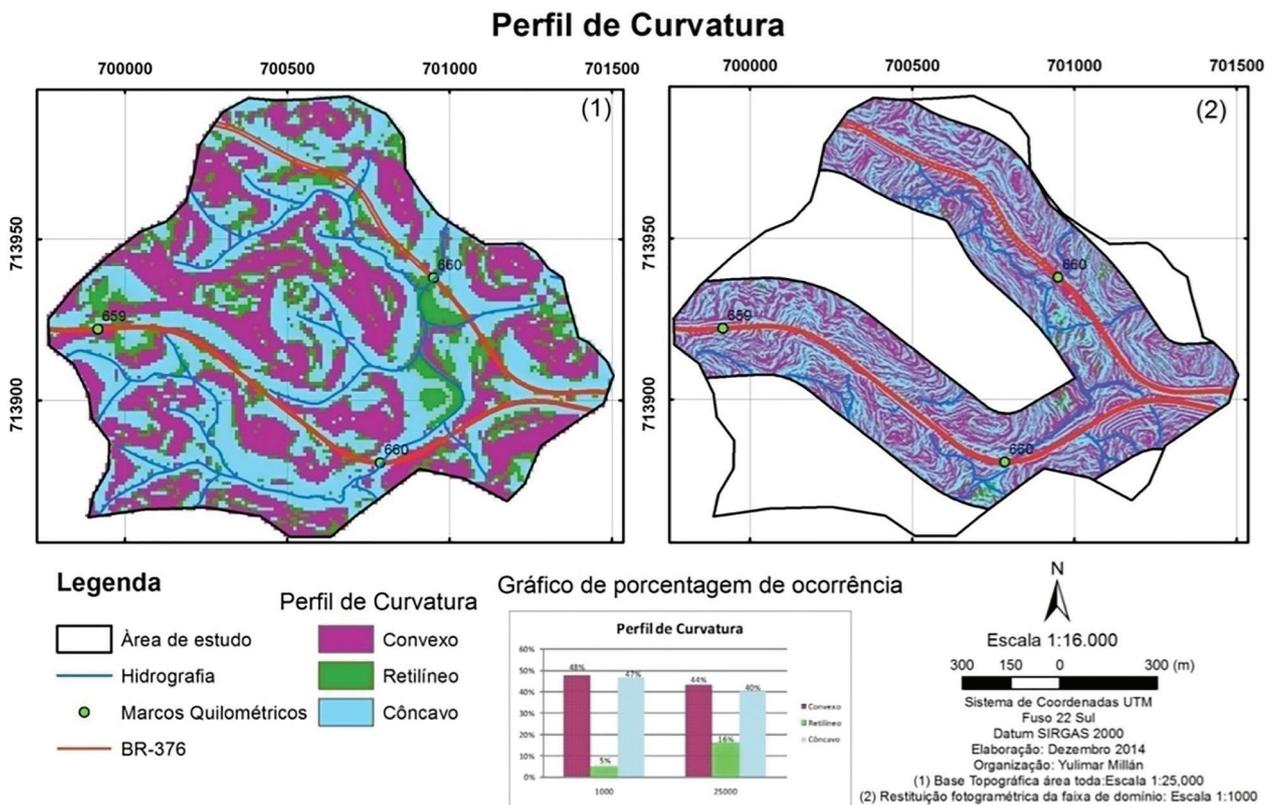
Outro atributo topográfico importante é a curvatura da vertentes, já que permite caracterizar a concentração das mudanças na velocidade do fluxo de água e os processos relacionados ao transporte de sedimentos. O mapa de curvatura das vertentes (Figura 10) é gerado a partir da ferramenta “Curvature”, e baseado em Zevenbergen & Thorne (1987), onde é calculado o perfil de curvatura das vertentes em cada célula do grid.

Cada curva de relevo positiva indica que a superfície do terreno esta tendendo à convexidade e o fluxo desloca-se de forma divergente; uma curva negativa indica que a superfície está tendendo à concavidade e o fluxo desloca-se de forma convergente, originando a concentração da umidade pela entrada da água; um valor de zero indica que a superfície é retilínea.

Segundo Augusto Filho *et al.* (1988), as encostas retilíneas são associadas á menor profundidade do solo,



**Figura 9** – Mapa de Declividade de um trecho da BR-376 entre os quilômetros 658+820m e 660+690m, à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 da área toda (2 km<sup>2</sup>) e à direita base topográfica a escala 1:1000 da faixa de domínio (800 m<sup>2</sup>).



**Figura 10** – Mapa de Perfil de Curvatura das vertentes na área de estudo, à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 da área toda (2 km<sup>2</sup>) e à direita base topográfica a escala 1:1.000 da faixa de domínio (800 m<sup>2</sup>).

enquanto as encostas côncavas são associadas a solos de espessura mediana. As encostas convexas são ligadas a solos de maior espessura, ou mais profundos. Baseado nesta citação e nas observações de campo foi atribuído uma espessura do solo de 3 metros em áreas que apresentam vertentes convexas, 1 metro em vertentes côncavas e 0,5 metros em vertentes retilíneas.

Analisando os valores do mapa de perfil de curvatura, verifica-se que 48% da área apresentam-se com forma convexa, 47 % forma côncava e 5% da área é retilínea.

Uma vez consideradas as variáveis atuantes no processo de estabilidade de vertentes e dos solos, e baseados nos modelos matemáticos referente à equação 5, podem-se simular vários cenários que resultam em diferentes mapas de fator de segurança, variando o porcentage de saturação, em primeiro lugar considerando o solo seco e logo em seguida com a saturação do solo em 30%.

Quanto aos parâmetros que contemplam a influência da vegetação e o vento, foram adotados valores fixos para toda a região, com base nos valores médios abordados em estudos preliminares. Para a Serra do Mar os valores de  $\sigma$  são da ordem de 5,0 kPa (Wolle & Pedrosa, 1981) e de  $\sigma_{ve}$  são da ordem de 1,0 kPa (Fendrich & Ferreira, 1995).

Para os cálculos do FS a ferramenta utilizada foi o “Raster Calculator” presente no software ArcGis 10.1 (ESRI, 2012), com está ferramenta foi possível o cálculo de equações aplicadas a grids espacializadas, gerando mapas onde cada pixel representa o resultado de uma equação.

A equação do Fator de Segurança (Equação 5) tradu-

zida para a linguagem aceita na ferramenta é apresentada abaixo:

$$FS = \left( \frac{C + \gamma_{sat} \cdot \cos(\alpha) \cdot \left( \frac{\pi}{180} \right) + \sigma \cdot \cos(\alpha) \cdot \left( \frac{\pi}{180} \right) \cdot \tan\left(\frac{\phi}{180}\right)}{\gamma_{sat} \cdot \sin(\alpha) \cdot \left( \frac{\pi}{180} \right) + \sigma \cdot \sin(\alpha) \cdot \left( \frac{\pi}{180} \right) + Fve} \right)$$

O modelo matemático resultou em valores de FS discretizadas em quatro classes, onde:

O valor  $FS < 1$  representa muito alta suscetibilidade a escorregamentos;

O valor de  $FS = 1, - 1,5$  representa alta suscetibilidade a escorregamentos;

O valor de  $FS = 1,5 - 2$  representa moderada suscetibilidade a escorregamentos;

O valor de  $FS > 2$  representa baixa suscetibilidade a escorregamentos.

As áreas que apresentaram índices de segurança inferiores a 1,5 representam locais de alta suscetibilidade a escorregamentos, ou seja, são áreas de maior instabilidade da região. Este valor é considerado como margem de segurança mínima para rodovias pela DNER (Departamento de Estradas e Rodagem) no que se refere a cortes de taludes em estradas (Kozciak, 2005).

Para o cálculo do fator de segurança (FS) o valor da coesão escolhido foi de 8 kPa e  $32^\circ$  de ângulo de atrito, resultados estes obtidos dos análises laboratoriais das amostras indeformadas. Os mapas obtidos pelas simulações feitas através da Equação 5 são apresentados nas Figuras 11 e 12.

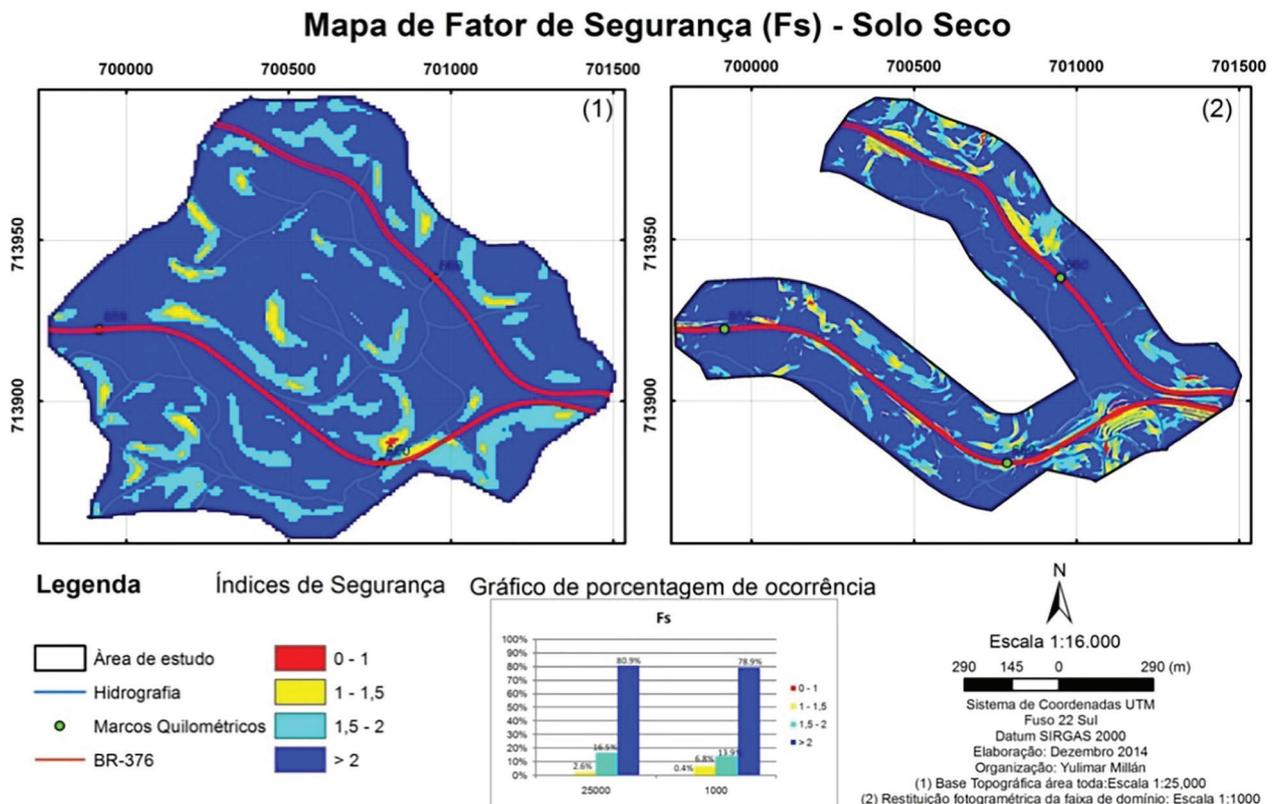
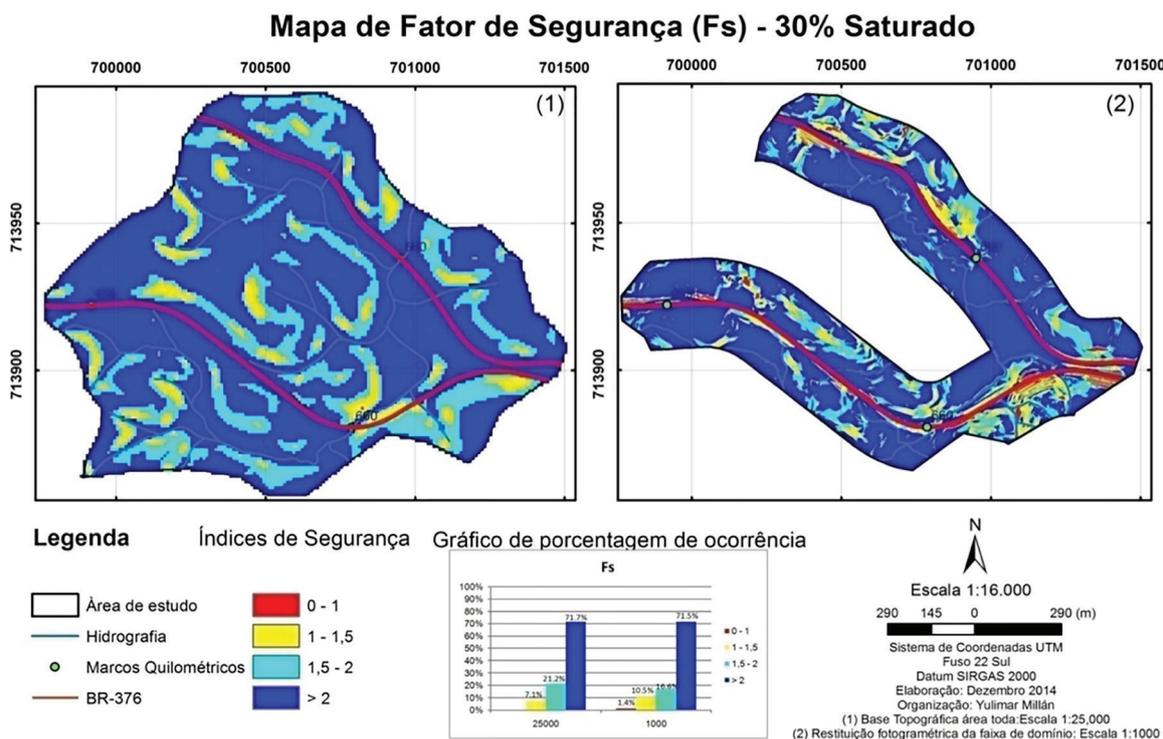


Figura 11 – Mapa de Fator de Segurança – Solo Seco baseado nos valores obtidos nas amostras indeformadas ( $C=8$  kPa e  $\phi=32^\circ$ )



**Figura 12** – Mapa de Fator de Segurança – 30% de Saturação, baseado nos valores obtidos das amostras indeformadas ( $C=8\text{kPa}$  e  $\Phi=32^\circ$ ), à esquerda base topográfica a escala 1:25.000 e à direita base topográfica a escala 1:1.000 da faixa de domínio (800 m<sup>2</sup>)

## 2. Análise dos resultados

Nas simulações feitas com o fator de segurança observa-se claramente o aumento das áreas de alta suscetibilidade a escorregamentos na medida em que se aumenta a porcentagem de saturação do solo após eventos de chuvas, o que leva a uma gradual diminuição da resistência do mesmo.

No que diz respeito à declividade das vertentes observa-se que áreas com índice de segurança superiores a 1,5 coincidem com declividades inferiores de 20,25 graus, onde o perigo de ocorrência de movimentos de massa é praticamente nulo. Por outro lado, as áreas instáveis coincidem com declividades acima de 20,25° (Figura 13).

Na Figura 14 é possível observar que a maioria dos escorregamentos translacionais e cicatrizes ocorreram nas áreas com índices de segurança inferiores a 1,5 ( $FS < 1,5$ ), ou seja, em áreas classificadas como de alta suscetibilidade até muita alta suscetibilidade ante escorregamentos, representadas no mapa de Fator de Segurança.

As fotos inseridas no mapa da Figura 14 correspondem aos locais onde foram executados obras de retaludamento (fotos R1 e R3), enquanto na foto R2 pode-se observar a cortina atirantada construída para a proteção da vertente. Na foto C1 se observam evidências de movimentações recentes através da cicatriz fotografada.

## 3. Conclusões

O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitiu a geração de um banco de dados georeferenciados, com os quais foi possível caracterizar as condicionantes atuantes na deflagração dos escorregamentos, como a declividade das vertentes e a espessura do solo,

possibilitando a elaboração do modelo matemático para o cálculo do fator de segurança.

A construção de um Modelo Digital do Terreno baseados em dados confiáveis permitiu a construção de mapas temáticos (declividade, formas e orientação das vertentes e solos) consistentes com as características topográficas da região em estudo, obtendo-se uma boa correspondência na localização das áreas onde se verificou a ocorrência de escorregamentos translacionais.

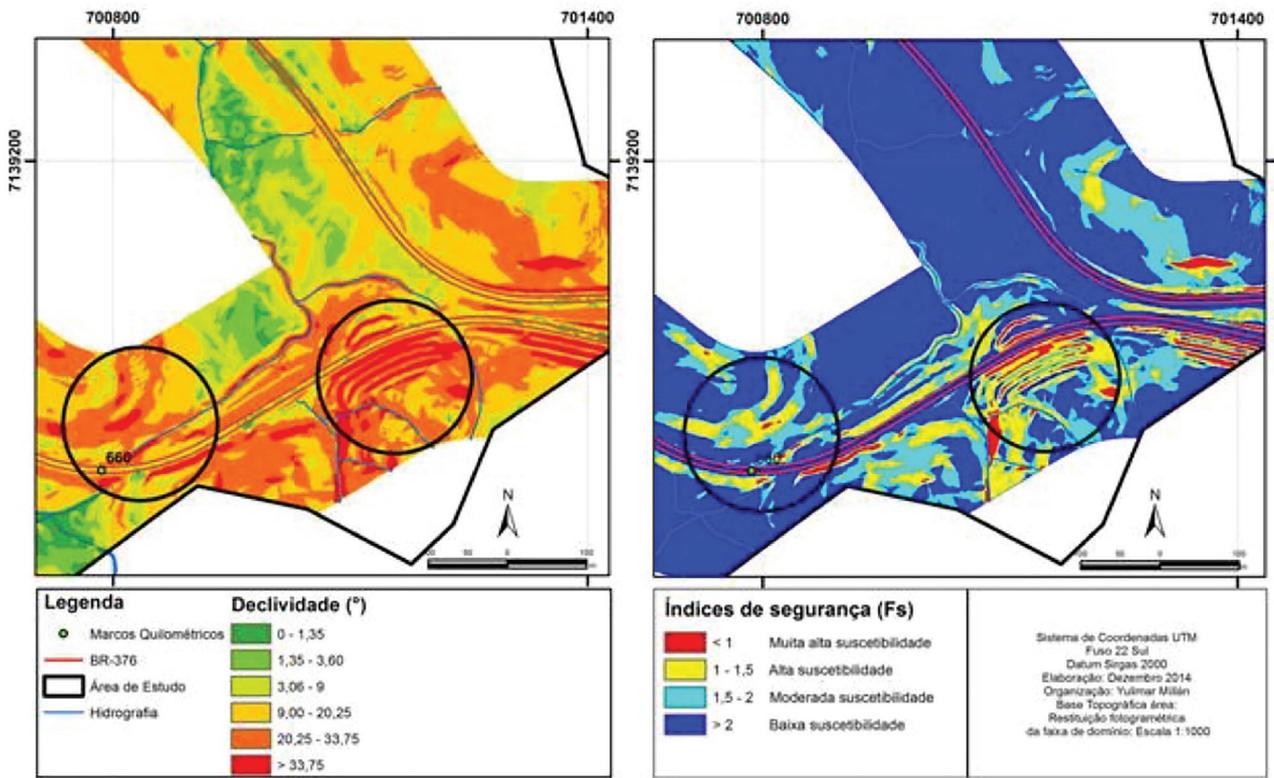
Os fatores topográficos, especialmente a declividade e a curvatura das vertentes são de grande importância no estudo do comportamento hidrológico do terreno, pois determinam o padrão de distribuição e concentração de água no solo.

Os mapas de Fator de Segurança (FS) obtidos permitem uma visualização das vertentes com maior suscetibilidade ante a ocorrência de escorregamentos translacionais, mostrando que as áreas instáveis aumentam à medida que aumenta a saturação do solo

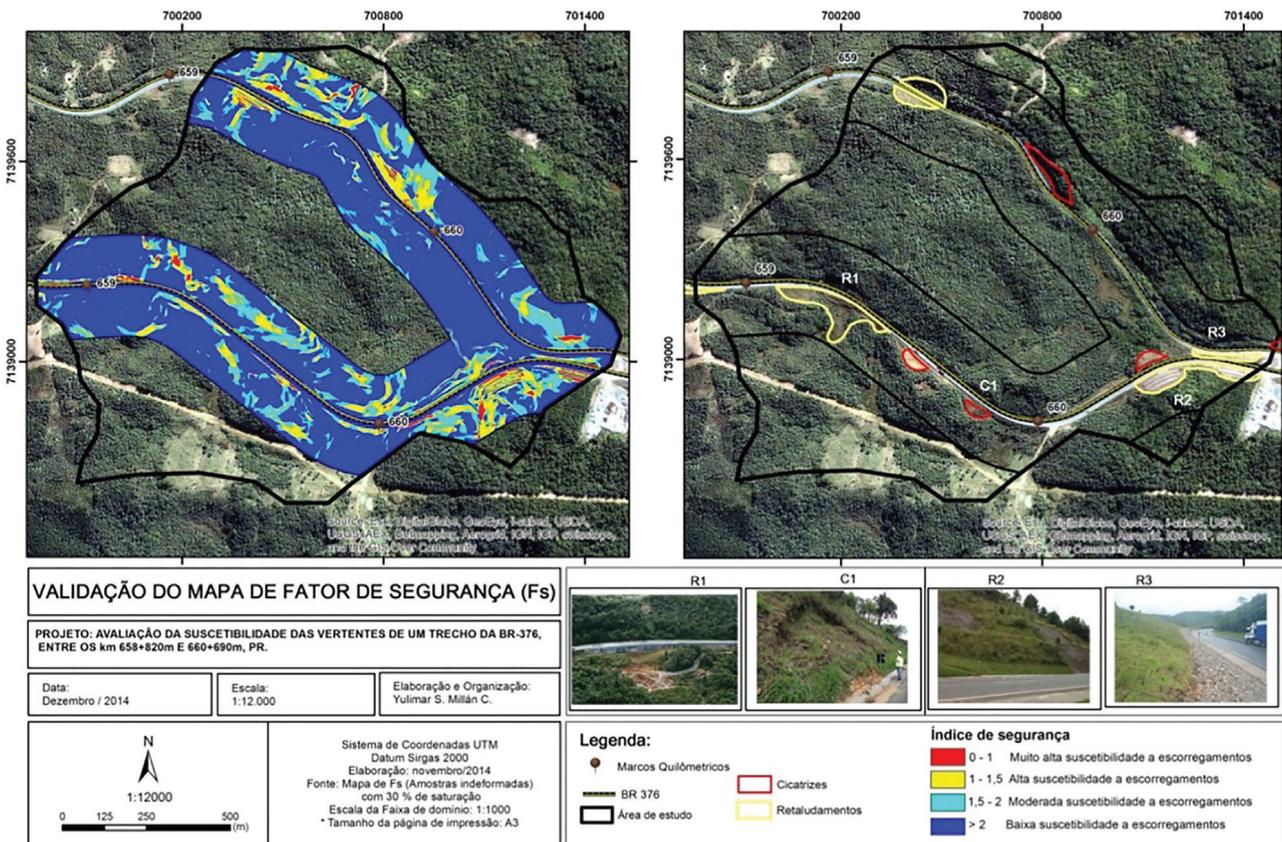
Os gráficos de barras inseridos em todos os mapas, mostraram que a pesar de existir uma tendência entre as duas escalas trabalhadas, a escala 1:25.000 tende a generalizar mais os valores dos parâmetros estudados, em comparação com escala 1:1.000 que mostra valores mais detalhados no que diz respeito ao percentual de ocorrência de cada parâmetro.

Pode-se concluir que a metodologia empregada na criação do modelo matemático para o cálculo de FS apoiado no uso de SIG, mostrou-se satisfatória na identificação das áreas mais suscetíveis à ocorrência de escorregamentos translacionais, mostrando uma excelente correspondência com os eventos já ocorridos no local de estudo.

**Relação da Declividade com o Fator de Segurança**



**Figura 13** – Relação da declividade com o mapa de fator de segurança (amostras indeformadas-30% saturação) na porção sudeste da área em estudo, faixa de domínio a escala 1:1.000.



**Figura 14** – Validação do Mapa do Fator de Segurança (FS) – 30% de saturação (dados das amostras indeformadas) com o mapa de inventários de escorregamentos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, à CAPES e ao apoio dos Recursos para Desenvolvimento

Tecnológico - RDT, da Concessionária Autopista Litoral Sul, sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT.

## Referências bibliográficas

- ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. 2012. Relatório Técnico do Projeto de Estabilização de Taludes, trechos 659+270, 659+300, 660+570 e 660+400, Curitiba. (Relatório inédito)
- AMARAL, C. 2003. Grau de estabilidade das vertentes da Serra do Purunã nas proximidades do falso túnel, Curitiba. Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. 1998 Estabilidade de Taludes. In: Oliveira, A.M.S. e Brito.; S.N.A. (eds) Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo: 243-269.
- BISPO, P. C.; ALMEIDA, C. M.; VALERIANO, M. M.; MEDEIROS, J. S.; CREPANI, E. 2011. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião com o uso de métodos de inferência espacial. UNESP. Geociências, v 30, n,3 , p. 467- 478.
- BORCHARDT, N. 2005. Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade de encostas do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2006. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 2nd Ed. Brasília, DF. 286 p.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. 1996. Movimentos de massa, uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T; Cunha, S. B. (Ed) Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, Cap. 3, p. 123-194.
- FIORI, A.P (1995)a. Estudo da estabilidade de vertentes da área de Guaraqueçaba, Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, v. 43, p. 25-40.
- FIORI, A. P (1995)b. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. Boletim Paranaense de Geociências, v. 43, p. 7-24.
- FIORI, A. P.; NUNES, F. G (2003). Áreas de risco e dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar – PR. Boletim Paranaense de Geociências, v. 53, p. 45-58.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. 2009. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicação na estabilidade de taludes. 2ª edição. Editora da UFPR, Oficina de Textos, 602p.
- FENDRICH, R.; FERREIRA, M. A. 1995. Rosa de frequência dos ventos no Estado do Paraná. Revista acadêmica da PUC/PR, 11, p.49-57.
- GIRARDI, G. 1999. Análise preliminar da estabilidade de encostas e taludes de Almirante Tamandaré e Colombo. Curitiba. Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- HUTCHINSON, J. N. 1988. General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology: Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10–15 July 1988. v1, p 3–35.
- KOZCIAK, S. 2005. Análise da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi- Serra do Mar - Paraná. Curitiba. Tese de Doutorado. Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 140p.
- MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S/A. 2004. A Mineração na região Metropolitana de Curitiba, convênio DNPM, Capítulo 2. p. 19-87.
- NUNES, F. G. 2002. Levantamento de áreas de riscos a partir da dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar no Paraná. Curitiba. Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- SAFAEI, M.; OMAR, H.; HUAT, B. K.; YOUSOF, Z. B. M.; GHIASI, V. 2011. Deterministic rainfall induced landslide approaches, advantage and limitation. EJGE, v16, p. 1619-1650.
- SEMA - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. 2002. Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná. Curitiba, Secretária do Estado do Meio Ambiente e dos recursos hídricos de Paraná, p. 40.
- SIGA Jr, O.; BASEI, M.A.; NETO, J. M.; MACHIAVELLI, A.; HARARA, O. M (1995). O complexo Atuba: um cinturão Paleoproterozóico intensamente retrabalhado no Neoproterozóico. Bol. IG – USP, Sér. Cient., 26:69-98.
- STYCZEN, M. E.; MORGAN, R. P. C. 1995. Engineering properties of vegetation. Edited by Morgan, R. P. C. Erickson, R. J. London: E & FN SPON, 274p. Cap. 2, p. 2 -58.
- TEIXEIRA, M. A. 2012. Avaliação da suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais. Utilização de modelos matemáticos de base física na bacia de Tibo, Arcos de Valdevez, Portugal. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território. Universidade do Porto.
- VAZ, A. P. M. S. 2014. Estudo de áreas suscetíveis a escorregamentos em sub-bacia do Rio São João, BR 376 entre os km 665 e 668. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. 109p.
- WOLLE, C. M.; PEDROSA, J. A. B. 1981. Horizontes de transição condicionam mecanismo de instabilização de encosta na Serra do Mar. In: Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, 3, Itapema, SC.v.2, p. 121-135.
- ZEVENBERGEN, L.W.; THORNE, C.R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surf. Proc. Land. 12(1), 47–56