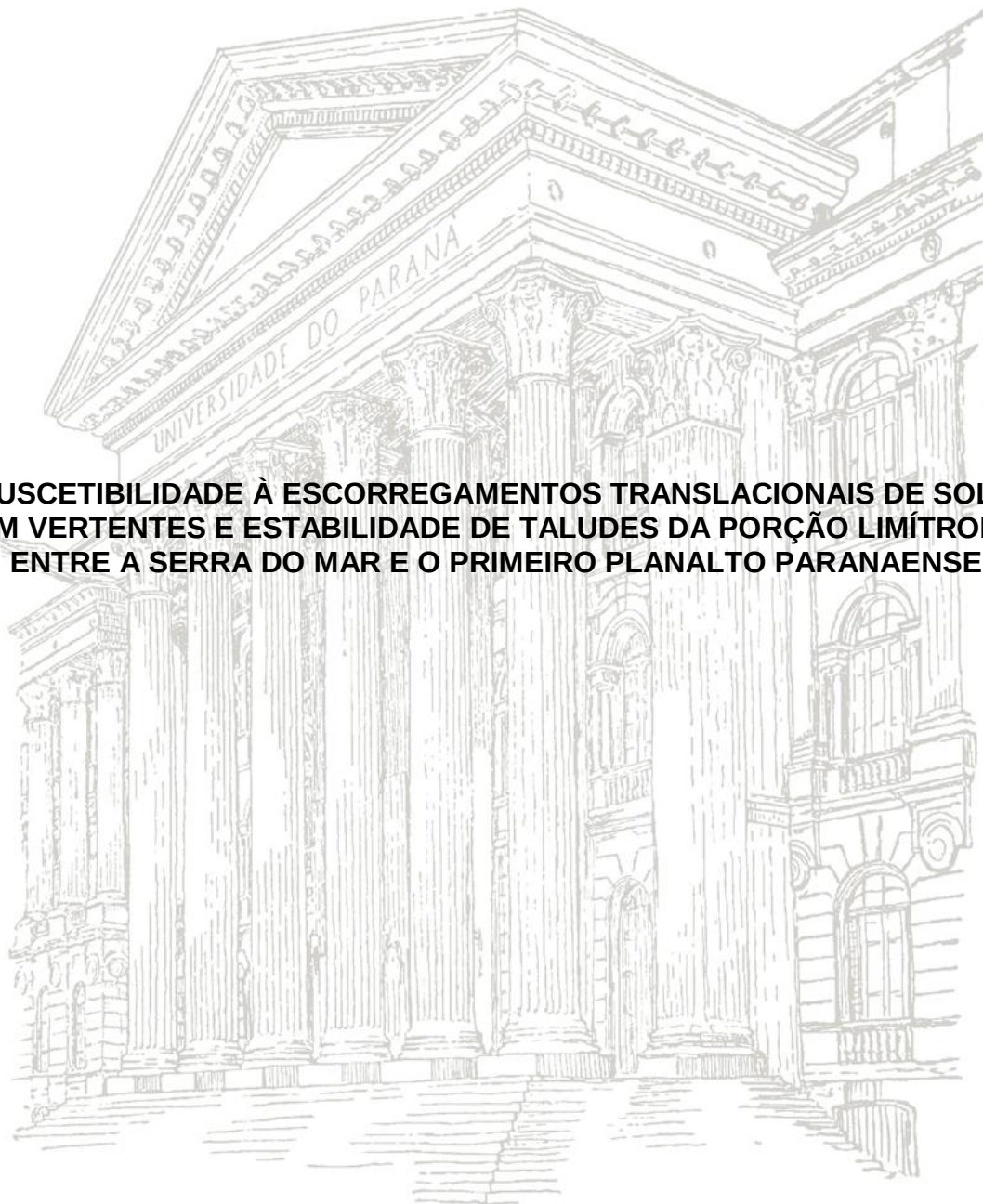


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PRISCILA D'ARÓZ

**SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO
EM VERTENTES E ESTABILIDADE DE TALUDES DA PORÇÃO LÍMITROFE
ENTRE A SERRA DO MAR E O PRIMEIRO PLANALTO PARANAENSE**



CURITIBA

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PRISCILA D'AROS

**Suscetibilidade à Escorregamentos Translacionais de Solo em Vertentes
e Estabilidade de Taludes da Porção Limítrofe entre a Serra do Mar e o
Primeiro Planalto Paranaense**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Geólogo no curso de
Geologia, Setor de Ciências da Terra da
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori
Coorientador: Prof. Dr. Claudinei Taborda da
Silveira

Curitiba

2015

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmãos e amigos pelo amor incondicional, por compartilharem comigo as horas de alegria e angústia, pelo apoio ao longo dessa jornada e por perdoarem minhas inúmeras ausências.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a meus pais José D. Borges D'Aroz e Marlene Schussler D'Aroz, por guiarem meus passos, pelo apoio a cada conquista e amparo a cada queda. Agradeço pelo aprendizado, pelos valores a mim passados e pelo incentivo, conforto, segurança e amor incondicional.

Agradeço aos meus irmãos pelas horas de risadas, por perdoarem minhas faltas em tantos eventos especiais, pela paciência em serem bons ouvintes ainda que não soubessem o que eram os tais taludes, gabiões e migmatitos oftálmicos, por serem meu porto seguro... sempre.

Um agradecimento especial aos meus orientadores Profº Dr. Alberto Pio Fiori e Profº Dr. Claudinei Taborda da Silveira, por me darem a honra de aprender com vocês a cada dia, pelas palavras de carinho e incentivo e por me ensinarem pacientemente a desvendar os mistérios tão complexos do comportamento da natureza e suas consequências.

Agradeço aos meus amigos, aos que me acompanham a muitos anos e principalmente aos que conheci pelas salas de aula e laboratórios do Centro Politécnico UFPR. Um agradecimento especial à Família LAGEO e a todos os que por lá passaram e deixaram saudades, pelas incríveis horas de companheirismo, pela ajuda sempre bem vinda, por dividirem comigo as alegrias e tristezas de ser uma aspirante “geologista”, por me esperarem de braços abertos a cada retorno de campo e ouvirem repetidamente as muitas histórias trazidas dessas viagens.

Agradeço a Autopista Litoral Sul pela oportunidade de desenvolver esse projeto em parceria com a UFPR e pela disponibilização dos dados utilizados nesse trabalho, e aos Laboratórios LAMI/CESEC e LACTEC pelas muitas análises de solo e rocha das amostras coletadas.

Por fim, agradeço ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná e todos os membros do corpo docente do curso de Geologia, que foram meus mestres e compartilharam comigo conquista.

Muito obrigada!

EPÍGRAFE

- *Você começará a se aproximar do paraíso no momento em que
alcançar a velocidade perfeita.*
*E isso não é voar a um milhão e quinhentos mil quilômetros por
hora, nem voar a velocidade da luz.*
Porque nenhum número é um limite e a perfeição não tem limites.
A velocidade perfeita, é estar ali.
- *Para voar à velocidade do pensamento, para onde quer que seja,
você deve começar por saber que já chegou...*

A História de Fernão Capelo Gaivota
Jonathan Seagull

RESUMO

A instabilidade das encostas nas áreas serranas do Brasil vem sendo estudada há décadas com intuito de minimizar os acidentes de proporções significativas que afetam anualmente essas regiões. Os escorregamentos translacionais em encostas relacionam-se ao produto de fatores como: características geomorfológicas, hidrológicas e geológicas, tipos de vegetação, processos geodinâmicos, uso e ocupação do solo, frequência e intensidade de precipitações. Na porção limítrofe entre o Primeiro Planalto e a Serra do Mar paranaense, diversos mecanismos de movimento de massa são observados, sendo os escorregamentos planares translacionais os mais comuns, principalmente quando associados a eventos pluviométricos extremos. O trecho da BR-376 situado entre as cidades de Curitiba e Garuva possui um histórico de eventos de instabilidade, deflagrados por precipitações pluviométricas intensas ou mesmo por intervenções de engenharia relacionadas à implantação das pistas da rodovia em questão e das áreas de ocupação adjacentes a estas. A demanda de estudos criteriosos e multidisciplinares para o gerenciamento de riscos geológico-geotécnicos desta região, está diretamente relacionada a sua suscetibilidade a escorregamentos. Este trabalho tem por objetivo dar subsídio a ações que aumentem a segurança em regiões serranas, mediante a construção de uma abordagem que integre informações geológicas, geográficas, geotécnicas e pluviométricas, analisando criticamente os fatores relacionados a mapeamento de riscos de suscetibilidade a escorregamentos translacionais em vertentes naturais. A pesquisa envolveu a análise da estabilidade de taludes baseada na teoria do equilíbrio limite. Foram utilizados métodos determinísticos para o cálculo do fator de segurança em diferentes perfis de encostas, através de propriedades físicas e mecânicas dos solos (definidas por ensaios laboratoriais), declividade, escoamento hídrico e tipos de cobertura vegetal. Este resultou no desenvolvimento de operações em Sistemas de Informações Geográficas – SIG que possibilitaram a representação da superfície terrestre por meio de modelos digitais de terreno (MDT), com mapas de declividade e índice de estabilidade e fator de segurança. Os mapas gerados apresentaram cenários distintos de saturação hídrica do solo e propensão a escorregamentos através de 5 classes de suscetibilidade, sendo estas: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta suscetibilidade. Estes mapas foram validados mediante cicatrizes de movimentos de massa recentes e pretéritos delimitadas em fotografias aéreas e imagens de satélite. O cruzamento das informações do MDT e do mapa de fator de segurança com as evidências coletadas em campo, permitiu analisar criticamente o produto do trabalho de modelagem digital, bem como identificar critérios para seu aperfeiçoamento futuro.

Palavras-chave: Escorregamentos. Vertentes Naturais. Fator de Segurança.

ABSTRACT

The instability of slopes in mountainous areas of Brazil has been studied for decades with the main goal to minimize the accidents with big proportions that affect annually these regions. The translational landslides in slopes are the product of factors, such as: geomorphological, hydrological and geological features, vegetation types, geodynamic processes, use and occupations of soil, frequency and intensity of precipitation. The adjacent portion between the Primeiro Planalto and the Serra do Mar at Parana-Brazil, several mechanisms of land movements are analyzed, which the planar translational slip is the most common, especially when associated to extreme rainfall events. The stretch of the highway BR-376, located between the cities of Curitiba and Garuva, has a history of instability events, that are triggered by heavy rainfall or even engineering interventions related to the implementation of highway lanes and the adjacent occupied areas. The demand for careful and multidisciplinary studies to managing geological and geotechnical risks of this region is directly related to their susceptibility to landslides in natural slopes. This work aims to give subsidy to actions aimed at increasing security in mountainous regions, by building an approach that integrates geological, geographical, geotechnical and rainfall data, and critically analyzing the factors related to risk mapping of susceptibility to translational landslides. The research involved the analysis of slope stability, based on the limit equilibrium theory. Deterministic methods were used to calculate the security factor at different slopes profiles through physical and mechanical properties of soils (defined by laboratory tests), declivity, water flow and vegetation types. This resulted in the development of operations in Geographic Information Systems – GIS, which enabled the representation of the earth's surface by digital terrain models (DTM) with declivity, stability and safety index maps. The maps presented different scenarios of soil water saturation and propensity to slip through 5 susceptibility classes, which are: very low, low, moderate, high and susceptibility very high. Scars of recent and ancient mass movements, delimited on aerial photographs and satellite images, validated these maps. The intersection of DTM information and the security factor map with the evidence collected in the field work allowed review the product of digital modeling work and identify criteria for its future improvement.

Keywords: Landslides, Natural Slope, Safety Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo	20
Figura 2. Mapa de classificação climática de Köppen	28
Figura 3. Distribuição mensal média das chuvas registradas entre os anos de 2006 e 2014.....	29
Figura 4. Perfil esquemático dos principais tipos de vegetação que ocupam a Planície Litorânea, a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense.	31
Figura 5. Esquema evolutivo da Serra de Mar.	33
Figura 6. Morfologia da Serra do Mar.....	34
Figura 7. Imagem representativa do mapa geológico em escala 1:250.000	36
Figura 8. Mosaico de fotografias aéreas 1:25.000.....	37
Figura 9. Malha de drenagem fotointerpretada disposta sobre o imagem BING	37
Figura 10. Validação do mapa geológico 1:60.000.....	38
Figura 11. Validação do mapa geológico 1:60.000	39
Figura 12. Mapa geológico 1:60.000	40
Figura 13. Solos coluvionares encontrados ao longo da área de estudo.....	44
Figura 14. Diagrama de localização do solo coluvial/talus, num perfil de vertente ...	45
Figura 15. Solos residuais do Complexo Gnaissico - Migmatítico	46
Figura 16. Influência da vegetação - água da chuva - solo	50
Figura 17. Curvatura das vertentes	53
Figura 18. Tipos de movimentos de deslizamentos	57
Figura 19. Decomposição da força (P) em sua componente tangencial e normal, e a força de resistência (R).	58
Figura 20. Fluxo da água em uma vertente natural	60
Figura 21. Fatores atuantes na estabilidade das vertentes considerados no FS	60
Figura 22. Coleta de amostras em solo residual de migmatito	66
Figura 23. Coleta e armazenamento de amostras de solo indeformado	67
Figura 24. Modelo digital de terreno, classificado segundo a elevação	71
Figura 25. Perfil de curvatura das vertentes.....	72
Figura 26. Curvatura das vertentes, sobreposto ao relevo sombreado	73
Figura 27. Curvatura de vertentes, relação com intrusões ígneas	74
Figura 28. Mapas de declividade da área de estudo em grau e percentual	76

Figura 29. Serra do Mar Paranaense, recorrência de movimentos de massa	77
Figura 30. Imagem de satélite de 29/08/2013. Retaludamentos km 667	77
Figura 31. Fotografias sequenciais do km 667	78
Figura 32. Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais em vertentes com solo de origem migmatítica (Migmatito estromático)	82
Figura 33. Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais em vertentes com solo de origem granítica (Morro Redondo)	83
Figura 34. Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais em vertentes com solo de origem migmatítica (Migmatito oftálmico)	84
Figura 35. Relação entre os mapas de suscetibilidade a escorregamentos.	85
Figura 36. Relação entre os contatos litológicos no cenário de 30% de saturação hídrica	86
Figura 37. Imagem representativa de um migmatito estromático	87
Figura 38. Imagem representativa de um migmatito oftálmico	87
Figura 39. Mapa de declividade em graus. Ponto com retaludamento	88
Figura 40. Encosta com muito alta suscetibilidade à escorregamentos.....	90
Figura 41. Encosta com alta suscetibilidade à escorregamentos, área tratada	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Localização dos Pluviógrafos.....	30
TABELA 2: Grupamento Textural	43
TABELA 3: Influência da Presença de Vegetação nas Vertentes	50
TABELA 4: Características do perfil de encostas relacionadas à ocorrência de Movimentos de Massa Gravitacionais	52
TABELA 5: Representação das classes do FS, considerando a presença de vegetação nas vertentes	64
TABELA 6: Classificação do relevo de acordo com a declividade.....	75
TABELA 7: Parâmetros físicos utilizados para a aplicação do método do Fator de Segurança	79

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1.....	59
EQUAÇÃO 2.....	60
EQUAÇÃO 3.....	61
EQUAÇÃO 4.....	62
EQUAÇÃO 5.....	70
EQUAÇÃO 6.....	80

LISTA DE APÊNDICES

APENDICE 1 Mapa de Localização da Área de Estudo	99
APENDICE 2 Mapa Geológico 1:60.000 da Porção Limítrofe entre a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense	100
APENDICE 3 Modelo Digital do Terreno	101
APENDICE 4 Mapa de Declividade da área de Estudo	102
APENDICE 5 Mapas de Curvatura de vertentes	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI - *Environmental Systems Research Institute*
FS - Fator de Segurança
IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná
kPa – kilopascal
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAGEO - Laboratório de Pesquisas Aplicadas e Geomorfologia e Geotecnologias
LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas
MDT – Modelo Digital do Terreno
MINEROPAR – Minerais do Paraná - Serviço Geológico do Paraná
NUGEO - Núcleo de Geoprocessamento
NBR – Norma Brasileira
SAD-69 - *South American Datum*
SBCS – Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SEMA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SPT – Standart Penetration Test
SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB – Transportation Research Board
USGS – *U.S. Geological Survey*
UTM - Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

F_s = Fator de segurança;

F_{ve} = Força do vento;

C_s = Coesão do solo (kPa);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m³);

γ_{sat} = Peso específico do solo saturado (kN/m³);

h_w = Altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente (m);

h = Altura da zona de solo não saturado, perpendicular à vertente (m);

γ_a = Peso específico da água (kN/m³);

i = Inclinação da vertente (graus);

σ_a = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

ϕ = Ângulo de atrito interno do solo (graus);

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento na cobertura vegetal (kPa);

P_a = Peso das árvores;

T = Força de ancoramento das raízes;

Cfa = Clima subtropical ou clima temperado;

Cfb = Clima temperado;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO	18
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
2 JUSTIFICATIVA	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	23
3.2 ETAPAS DE CAMPO	23
3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS	24
3.3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	24
3.3.2 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	25
3.4 CONFECÇÃO DE MAPAS	25
4 APOIO TÉCNICO	26
5 DADOS DISPONÍVEIS DA ÁREA	27
6 FISIOGRAFIA DA ÁREA	28
6.1 CLIMA	28
6.2 VEGETAÇÃO	30
7 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	31
7.1 MAPA GEOLÓGICO EM ESCALA 1:60.000	35
7.2 LITOTIPOS	40
8 SOLOS	41
8.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	42
8.2 TIPOS DE SOLO	43
8.2.1 SOLO COLUVIONAR	44
8.2.2 SOLO RESIDUAL	45
8.3 SOLOS PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO	46
8.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS	47
8.5 INFLUÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL	48
9 VERTENTES E TALUDES	51
9.1 TIPOS DE VERTENTES	52
9.2 ESTABILIDADE DE ENCOSTAS E TALUDES	54
10 MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS	55
11 FATOR DE SEGURANÇA	58
11.1 FORÇAS EM VERTENTES DE EXTENSÃO ILIMITADA,	59

11.1.1 VERTENTE COM VEGETAÇÃO	60
12 AMOSTRAGEM	65
12.1 RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO (SPT)	65
13 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
13.1 PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS PRELIMINARES	68
13.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO - MDE	68
13.1.2 CURVATURA DE VERTENTES	71
13.1.3 DECLIVIDADE	74
13.2 MAPAS DE FATOR DE SEGURANÇA	78
13.2.1 CONFECÇÃO DOS MAPAS DE FS	80
13.2.2 VALIDAÇÃO DOS MAPAS	89
14 CONCLUSÃO	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICES	99

1 INTRODUÇÃO

Uma das características marcantes da atividade econômica e da distribuição demográfica brasileira se refere à presença de grandes cidades na faixa litorânea (Santos, 2008) e por consequência nas proximidades da Serra do Mar. Interligando esses importantes centros, existe uma grande rede de modais de transporte que demandam de atenção imediata face aos desafios geológicos presentes devido à grande influência da precipitação pluviométrica na dinâmica de movimentação do terreno.

Apesar de diversos estudos relacionados à segurança de encostas em áreas serranas terem sido desenvolvidos nas últimas décadas, acidentes de proporções significativas vêm ocorrendo, a exemplo do evento ocorrido em Morretes - Paranaguá no litoral paranaense em março de 2011, e, constituem um desafio à operação do modal rodoviária em diferentes regiões do país.

A identificação e mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais são procedimentos importantes no gerenciamento e planejamento de medidas para proteção de infraestruturas (Korup, 2005). Os escorregamentos são um dos principais processos erosivos em encostas e, portanto, tem um importante papel na produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica (Burton e Bathurst, 1998). Segundo Bispo *et al.* (2011), esses eventos são desencadeados pela interação entre diferentes fatores endógenos e exógenos, envolvendo características geológicas, pedológicas, geomorfológicas e variáveis climáticas. Além dos fatores citados, os autores também relacionam tais eventos de instabilidade de encostas à ação antrópica, como uso inadequado do solo e retirada de cobertura vegetal entre outros.

Quando esses fatores interagem, comumente ocorrem desprendimentos e transporte de solo e/ou material rochoso vertente abaixo, devido à fragilidade da vertente condicionada pela gravidade, e agravada pela ação de outros agentes, como a água ou vento (Chorley *et al.* 1984; Fernandes e Amaral, 1996; Sestini, 1999). A infiltração da água da chuva no solo, causa o aumento da saturação hídrica e da poro-pressão. O acúmulo de água no perfil, reduz a

resistência do solo devido a diminuição e/ou perda da coesão, tornando a vertente suscetível a movimentos de massa.

Movimentos de massa são processos naturais que ocorrem em diferentes escalas e condições de relevo. Tais processos constituem a dinâmica natural de formação do modelado terrestre, porém quando associados a fatores antrópicos são intensificados, resultando em acidentes com possibilidade de perdas humanas e estruturais. De acordo com Zuquette *et al.* (1995), a ocorrência de movimentos de massa altera a vulnerabilidade de uma área, logo, fenômenos de origem natural ou intensificados pela ação antrópica, acarretam danos aos componentes dos meios biofísico e social.

Para dimensionar o grau de estabilidade que uma dada vertente oferece diante de um cenário conhecido de saturação hídrica, alguns métodos determinísticos são utilizados, o índice ou grandeza numérica denominado Fator de Segurança (FS) é o método proposto por Fiori e Carmignani (2009). A obtenção do FS é baseada na teoria do equilíbrio limite que expõe a razão entre as forças resistentes ao movimento e as forças mobilizantes. O FS foi o modelo determinístico (quantitativo) aplicado para a elaboração dos mapas apresentados neste trabalho.

Abdallah *et al.* (2001) e Sakellariou & Ferentinou (2001) utilizam uma abordagem fundamentada em Sistemas de Informações Geográficas – SIG, que permite criar mapas com índices qualitativos de segurança baseados na sobreposição de cartas temáticas, dividindo-se uma dada região em zonas com diferentes hierarquias de instabilidade.

Os produtos cartográficos deste estudo foram gerados a partir do emprego do modelo quantitativo proposto por Fiori e Carmignani (2009), e reclassificados de forma qualitativa, segundo a proposta de Abdallah *et al.* (2001) e Sakellariou & Ferentinou (2001).

1.1 OBJETIVO

Movimentos de massa em vertentes são condicionados por fatores naturais e antrópicos. Dentre os fatores naturais, destacam-se os climáticos, pedogenéticos, geológicos e a influência da vegetação. Já entre os fatores antrópicos, os mais relevantes para este estudo são os cortes realizados nos taludes para a construção das pistas de rodagem, que margeiam a rodovia BR-376 no município de Guaratuba - PR.

O objetivo principal deste trabalho consiste em gerar mapas temáticos de suscetibilidade a escorregamentos translacionais, que representem as condições mais plausíveis de estabilidade das encostas inclusas na área de estudo, nas mais variadas condições reais e hipotéticas de saturação hídrica do solo, através do emprego da metodologia proposta por Fiori e Carmignani (2009) - Fator de Segurança.

Os dados utilizados para confecção dos mapas, foram obtidos através de coleta de dados de campo, revisões bibliográficas e análises laboratoriais. Os mapas apresentados consideraram, além dos condicionantes do relevo, as características relevantes dos litotipos encontrados na área.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Gerar mapas temáticos na escala 1:10.000 para o polígono (área total) que compreende a área de estudo detalhado, visando apresentar suas características topográficas como: hipsometria, curvatura de vertentes e declividade, considerando a influência das vertentes nos escorregamentos translacionais.
- Caracterização geotécnica dos solos que compreendem o trecho estudado para definição dos parâmetros físicos necessários à aplicação da metodologia do Fator de Segurança.

- Fotointerpretação geológica da área de estudo, para refinamento do mapa geológico em escala 1:60.000, do mapa geológico do Paraná disponibilizado pela MINEROPAR na escala 1:250.000, e publicado em 2005.
- Gerar mapas temáticos na escala 1:10.000 de declividade e hipsometria detalhados (resolução de 1 metro), para as adjacências das pistas norte e sul da Rodovia Prestes Maia (BR-376) num raio de 200m de abrangência tendo a pista como ponto central, no trecho compreendido entre os quilômetros 661+350 à 668+200, localizado na Serra do Mar Paranaense.
- Apresentar as condições de estabilidade dos taludes adjacentes a BR-376, através de mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solo na escala 1:10.000, considerando os parâmetros físicos dos solos e balizados pelos litotipos da área.
- Avaliar a existência de uma relação direta entre os elementos geológicos e o grau de estabilidade dos taludes da área de estudo.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para esse trabalho encontra-se no sudeste do estado do Paraná, a cerca de 60 km da cidade de Curitiba, na porção sudoeste do município de Guaratuba - PR. É constituída por um polígono (área total) de 2,96 km², inserido num retângulo de 13,34 km², que contém o trecho da BR-376 entre os quilômetros 661+350 e 668+200 e suas adjacências (Figura 01). A escolha da área a ser estudada considerou as características geomorfológicas, geológicas e climáticas da Serra do Mar e a recorrência de eventos de escorregamentos translacionais dos taludes inseridos neste trecho.

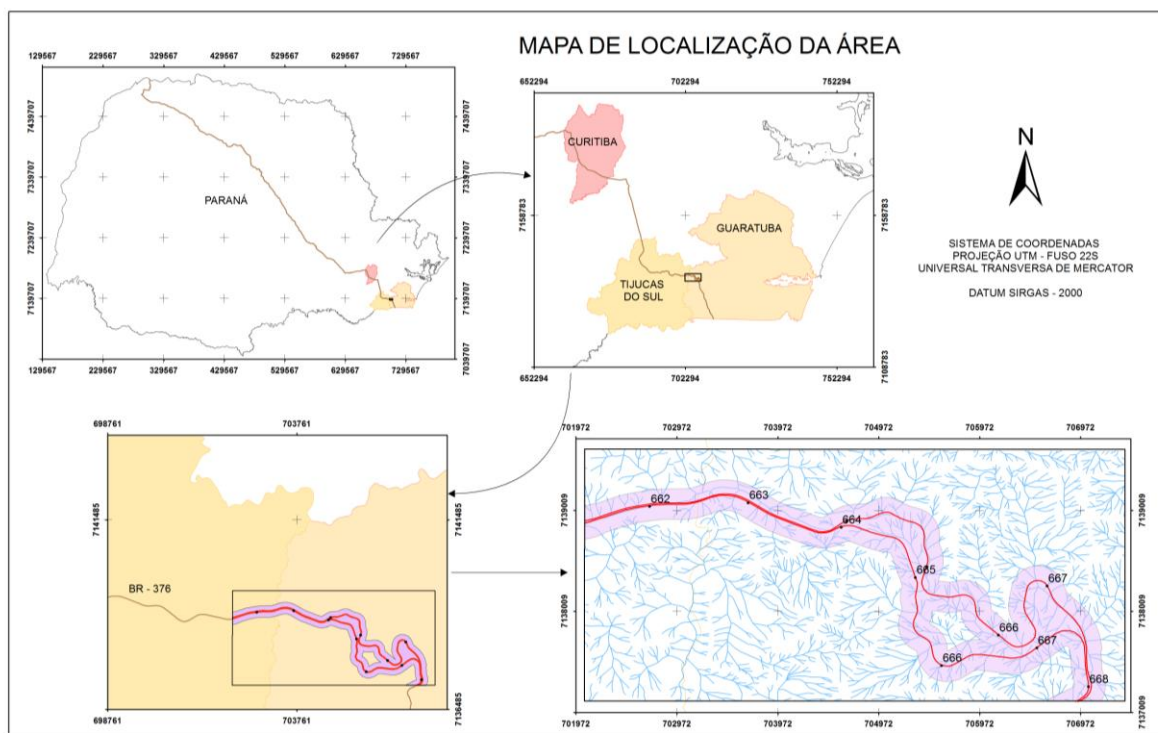


Figura 01: Mapa de localização da área de estudo.

2 JUSTIFICATIVA

Os movimentos de massa são recorrentes no mundo todo e frequentemente ocasionam perdas humanas e prejuízos econômicos. O desenvolvimento urbano e as mudanças contínuas no uso dos solos, além da retirada da cobertura vegetal de encostas para uso agrícola ou habitacional são agravantes desses eventos mobilizantes de solo e rocha.

Como medida preventiva, é essencial conhecer o comportamento de cada paisagem diante dos diferentes cenários de saturação dos solos e, portanto, qualificar cada vertente quanto à suscetibilidade a movimentos de massa naturais ou propiciados pela intervenção antrópica.

As áreas que apresentarem maior suscetibilidade a movimentos de massa devem ser destacadas, devido a necessidade de um estudo detalhado da geomorfologia e feições estruturais presentes. Esse detalhamento se deve ao quadro de instabilidade significativa, que estas áreas apresentam na ocorrência de um evento pluviométrico extremo.

Atualmente, um dos grandes problemas vivenciados pela população brasileira é a instabilidade de encostas. Períodos de chuvas concentradas, comuns no verão, tornam as encostas mais suscetíveis a escorregamentos translacionais devido ao aumento do excesso de poro-pressão que reduz a resistência do solo ao cisalhamento.

Nas encostas localizadas entre o Primeiro Planalto e a Serra do Mar Paranaense, diversas evidências de movimentações do terreno são observadas com uma dinâmica fortemente influenciada pela ação de precipitações intensas, e pela proximidade com as vertentes escarpadas da Serra do Mar.

A implantação de rodovias em ambientes sujeitos a fenômenos de instabilidade de solo e rocha, requer a realização de estudos geotécnicos detalhados que avaliem as condições de segurança da área. Tais estudos são essenciais para a determinação das obras de contenção e estabilização das encostas adjacentes as pistas, visando minimizar a ocorrência de movimentos de massa que possam colocar em risco vidas e causar danos materiais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, o ponto de partida foi uma sucinta revisão e compilação dos estudos geológico – geotécnicos anteriormente realizados em escala regional, assim como consultas à bibliografia específica de aspectos geomorfológicos e geotécnicos atuantes nos diversos tipos de movimentos de massa, além de fatores físicos, antrópicos e climáticos considerados na estabilidade de vertentes.

A utilização de material cartográfico pré-existente possibilitou a caracterização inicial da área, para isso foram analisados mapas topográficos, fotografias aéreas e imagens de satélite. O resultado foi um banco de dados em formato digital com mapas bases e uma densa malha de informações relevantes, entre eles o produto da interação de alguns dados da base, como: mapa hipsométrico, mapa de declividade da área, curvatura das vertentes e relevo sombreado. Esses mapas preliminares foram utilizados como base para coleta de dados de interesse nas etapas de campo, e auxiliaram na caracterização fisiográfica da área.

Os dados da base topográfica foram elaborados a partir da união de 4 cartas da Folha Curitiba SG-22-X-D, são elas: MI-2857-4-SE (Postinho), MI-2857-4-NE (Represa de Voçoroca), MI-2858-3-SO (Pedra Branca do Araraquara), e MI-2858-3-NO (Usina Chaminé). As cartas utilizadas estão em escala 1: 25.000, com curvas de nível espaçadas a cada 10 metros, no sistema de coordenadas UTM - fuso 22 Sul, com *datum* horizontal SAD-69, executadas pelo Ministério da Defesa - Exército Brasileiro no ano de 2002.

Para melhor detalhe, também foi utilizada a base 1:1.000, resultado da restituição fotogramétrica elaborada em 2008 pela empresa Engefoto, e disponibilizada pela Autopista Litoral Sul. Esta base abrange uma faixa de domínio de 200 metros para cada lado a partir da rodovia.

A interpretação das fotografias aéreas e análises das imagens de satélite tiveram como objetivo a distinção de padrões de drenagem, estruturas geológicas e a identificação de locais com evidências de movimentos de massa (cicatrizes). Foram analisados 6 jogos de fotografias aéreas pancromáticas da cobertura aerofotogramétrica, na escala 1:25.000 disponibilizadas pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG-PR) datadas de 25/09/1980 e apresentadas em 3 faixas (55259, 55260, 55261 e 55262; 54979, 54980, 54981 e 54982; 55270, 55271, 55272 e 55273); um mosaico ortorretificado na escala 1:60.000, disponibilizado pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) de 1996; e imagens via satélite IKONOS com resolução de 1m, datada de 08/03/2011 disponíveis no *software* ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012).

Para a caracterização geológica da área foi utilizado o Mapa Geológico do Paraná - Folha Curitiba SG-22-X-D na escala 1:250.000, publicado em 2005 pela Minerais do Paraná (MINEROPAR). A porção onde se encontra inserida a área de estudo teve os contatos entre as unidades litológicas aprimorados para a escala 1:60.000 através de fotointerpretação, e validação dos dados em campanhas de campo. A geologia estrutural foi refinada na escala 1:25.000, com validação parcial em campo (somente nos pontos significativos para esse estudo), a isto se deve a designação de estruturas inferidas ou fotointerpretadas no mapa geológico final.

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A etapa de levantamento de dados bibliográficos teve como objetivo, obter dados referentes a projetos já realizados na área de estudo, tais como: levantamentos planialtimétricos, bases cartográficas, fotografias aéreas de diversos períodos (ITCG, 1980 e SEMA, 1996), pluviometria, investigações geotécnicas, resultados de ensaios laboratoriais, projetos e obras realizadas de contenção e relatórios com histórico de escorregamentos. Foram utilizados estudos geológico-geotécnicos e geomorfológicos que contemplaram as litologias e características de relevo e pluviosidade da Serra do Mar.

3.2 ETAPAS DE CAMPO

A ocorrência de diferentes tipos de solo na região e a necessidade de maior compreensão do comportamento geológico-geotécnico de cada um deles, refletem a importância de um estudo experimental dos materiais predominantes.

As etapas de trabalho de campo consistiram em 10 campanhas de 1 dia cada. Os primeiros trabalhos foram direcionados para o reconhecimento da área, análise de aspectos fisiográficos e coleta de imagens, foram ainda identificadas e catalogadas diversas cicatrizes de escorregamentos recentes e antigos.

As etapas seguintes tiveram a finalidade de coleta de amostras de solo deformado e indeformado nas adjacências da área de estudo, para os ensaios laboratoriais e validar informações geradas. Em alguns pontos foram realizados ensaios de permeabilidade *in situ*.

Além dos solos, foram amostrados os litotipos presentes na área de estudo e, registrados dados característicos de cada talude. A coleta de dados em campo seguiu um padrão adotado para dois tipos de taludes, naturais e antropizados. Os dados coletados foram: comprimento, inclinação, tipo de cobertura vegetal (quando existente), presença de obras de contenção, tipo de solo (coluvionar ou residual), entre outros.

As amostras de solo foram retiradas de pontos que apresentavam viabilidade de coleta, segundo a normatização ABNT (1986). A profundidade de cada amostra foi determinada pelas características do solo amostrado.

As amostras de rocha, sã ou alteradas, foram coletadas com intuito de determinar os litotipos vinculados à pedogênese através de análise petrográfica macroscópica.

A última campanha de campo foi realizada com intuito de validar as informações geradas e apresentadas nos mapas temáticos produzidos em SIG.

3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS

A avaliação de índices de segurança utiliza parâmetros de resistência e cenários de poro-pressão para cada talude ou encosta. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME – UFPR e Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. As amostras coletadas foram submetidas a ensaios de caracterização e cisalhamento direto com medidas de resistência de pico e residual. Através dessas análises foram determinadas as propriedades mecânicas dos solos como coesão e ângulo de atrito, dados de inserção utilizados nas equações propostas por Fiori e Carmignani (2009), para a definição do índice de segurança das encostas.

3.3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

As propriedades físicas dos solos foram analisadas por meio dos seguintes ensaios de caracterização: análise granulométrica (pipeta e densímetro), limites de consistência, peso específico natural (γ_{nat}) e teor de umidade (h). Estes ensaios obedeceram às orientações descritas nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tais como:

- ABNT-NBR 6508 (1984). Peso Específico dos sólidos.
- ABNT-NBR 7181 (1984). Análise granulométrica.

- ABNT-NBR 6459 (1984). Limite de liquidez (LL)
- ABNT-NBR 7180 (1984). Limite de plasticidade (LP)
- ABNT-NBR 6457 (1986). Teor de umidade (h)

3.3.2 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

A resistência ao cisalhamento de um solo é a máxima pressão de cisalhamento que este solo pode suportar sem que haja ruptura. Se vistas em escala microscópica, todas as superfícies de contato são rugosas e se tocam somente em poucos pontos. Sendo que, as áreas de contato e as pressões normais de contato são mais elevadas, e atingem valores iguais aos das tensões de escoamento plástico do material (Silva Vaz (2014) citando Pinto (1983)).

Para realização deste ensaio foram coletadas amostras indeformadas de solo, os resultados obtidos foram os parâmetros de resistência dos solos, como ângulo de atrito e coesão. A coleta das amostras obedeceu às recomendações da norma ABNT-NBR 9604/1986 (Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas).

Seguindo as recomendações da norma, a dimensão dos blocos extraídos para a execução dos ensaios foi de 30x30x30 cm. Destes blocos, foram talhados e ensaiados três corpos de prova com dimensões 10x10x2 cm, aos quais foram aplicadas tensões normais de 30 kPa, 60 kPa e 90 kPa na prensa Geocomp, à velocidade de cisalhamento de 0,7 mm/min, em condições de umidade natural e saturada. Estes corpos de prova foram submetidos previamente ao adensamento.

3.4 CONFECÇÃO DE MAPAS

Nessa etapa deu-se o desenvolvimento de operações de Sistemas de Informações Geográficas – SIG, que possibilitaram a representação da superfície terrestre através de Modelos Digitais do Terreno (MDT). Esse modelo permite a análise topográfica de uma zona de interesse, assim como o cálculo automatizado de uma série de variáveis relacionadas (Vidal-Torrado *et al.*,

2005). Para tal, foi utilizada a ferramenta “*Topo to Raster*” do software ArcGIS 10.1, que 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.

A utilização de MDT's na análise do relevo permite o cálculo de variáveis associadas à topografia, obtidas com rapidez e precisão (Grohmann *et al.*, 2008). Dentre essas variáveis, a declividade é uma das mais importantes, empregada em modelos provisionais de deslizamentos.

A análise da estabilidade de encostas foi baseada na teoria de equilíbrio limite, proposta por Fiori e Carmignani (2009). Os autores tratam de forma detalhada diversos métodos determinísticos para o cálculo do fator de segurança, em diferentes perfis de encostas. As equações propostas por eles, descrevem o fator de segurança em função de propriedades físicas e mecânicas dos solos, declividade, escoamento hídrico, tipos de cobertura vegetal, o peso das árvores e a ação dos ventos, entre outros.

Os mapas resultantes simulam os mais distintos cenários de saturação hídrica do solo, sendo três cenários considerados hipotéticos, isto é, improváveis nas condições ambientais da área de estudo (0% 75% e 100% saturado), e três cenários considerados plausíveis (10%, 30% e 50% saturado), sendo o primeiro o mais comum.

4 APOIO TÉCNICO

O presente trabalho de conclusão de curso encontra-se vinculado de maneira indireta ao Projeto Riscos Geológico-Geotécnicos em Taludes Rodoviários: Desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento integrado de informações para a BR-376, trecho do Serra do Mar (PR-SC), desenvolvido entre os laboratórios LAME, LAGEO e NUGEO, ambos vinculados aos departamentos de Engenharia Civil, Geografia e Geologia da Universidade Federal do Paraná respectivamente, em parceria com a

Concessionária Autopista Litoral Sul, responsável pela segurança e manutenção da BR-376 no Estado do Paraná.

Os trabalhos de campo foram financiados pela Autopista Litoral Sul, pois os dados levantados para a realização deste trabalho encontram-se inseridos no conjunto de dados necessários para a realização do projeto em questão. Todos os dados aqui apresentados foram publicados em duas dissertações de mestrado devidamente referenciadas (Silva Vaz (2014) e Milllan Coy (2015)), também vinculadas ao projeto acima citado, sendo portanto dados de domínio público.

Os equipamentos necessários para a realização dos ensaios laboratoriais e para a confecção dos mapas foram disponibilizados pelos laboratórios: Laboratório de Materiais e Estruturas UFPR – LAME, Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias – LAGEO e Núcleo de Geoprocessamento – NUGEO.

5 DADOS DISPONÍVEIS DA ÁREA

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) forneceu diversos relatórios de sondagens realizados entre os anos 2011 e 2012, nos pontos onde ocorreram escorregamentos translacionais. 16 pontos de sondagens a percussão encontram-se entre os quilômetros 658 e 661, que permitiram a obtenção de valores preliminares da resistência dos solos, como ângulo de atrito e coesão para a porção da área de estudo onde verifica-se a ocorrência de migmatitos estromáticos com paleossoma de biotita-hornblenda-gnaiss; outros 37 pontos de sondagem ocorreram entre os quilômetros 665 e 668 e forneceram os mesmos dados preliminares para a porção da área onde se verifica a ocorrência de migmatitos ofitálicos com paleossoma de biotita-gnaiss.

No cálculo dos parâmetros de resistência, ângulo de atrito interno e coesão (ϕ e C_s) das sondagens, foram apenas consideradas as informações dos primeiros 3 metros perfurados, porque os valores obtidos pelos SPT foram utilizados para comparação com os valores de ângulo de atrito e coesão obtidos

no ensaio de cisalhamento direito das amostras indeformadas que coletadas a uma profundidade máxima de 2,3 metros.

6 FISIOGRAFIA DA ÁREA

6.1 CLIMA

O clima da área de estudo foi definido segundo a classificação climática e Köppen, que tem como base a vegetação, temperatura e pluviosidade e é definido por letras que designam grandes grupos e subgrupos climáticos (Figura 02).



Figura 02: Mapa de classificação climática de Köppen. Fonte: IAPAR, 2015.

O tipo de clima verificado na área de estudo de acordo com o mapa de classificação climática do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2015), é denominado *Cfa*, porém dada a proximidade com o primeiro planalto paranaense que registra o tipo *Cfb*, seguem as duas definições:

Cfa - Clima subtropical ou clima temperado, onde os meses mais frios registram temperaturas inferiores a 18°C, e verão quentes onde a média de temperatura ultrapassa os 22°C. Chuvas uniformemente distribuídas, com tendência de concentração no verão e sem estação seca definida. A precipitação anual varia entre 1100 e 2000 mm, com possível ocorrência de geadas severas e frequentes durante o inverno em um período médio de ocorrência de dez a vinte e cinco dias anualmente.

Cfb - Clima temperado, onde os meses mais frios registram temperaturas inferiores a 18°C, e verão frescos onde a média de temperatura fica abaixo dos 22°C, não apresenta estação seca definida. A pluviosidade anual varia bastante de acordo com a altitude da estação de monitoramento, os registros de 2006 a 2014 indicam que a precipitação acumulada variou entre 1090 mm na estação Voçoroca, 2100 mm na estação Transpetro e 2600 mm na estação Garuva.

Os eventos de máxima pluviosidade ocorreram no mês de março nos anos 2008 e 2011, quando as precipitações ultrapassaram os 700mm (Figura 03). Estes eventos pluviométricos extremos estão relacionados a uma série de escorregamentos translacionais e rotacionais ocorridos ao longo da BR-376.

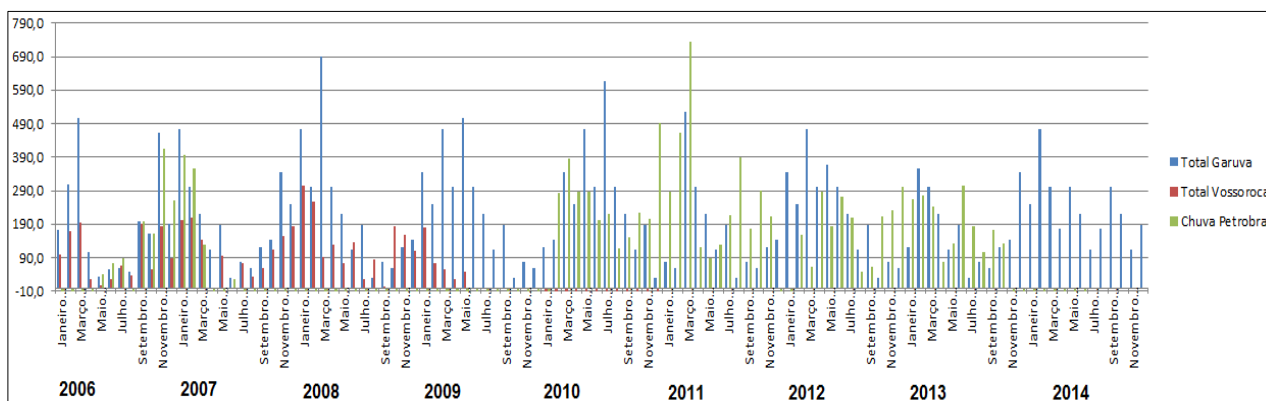


Figura 03. Distribuição mensal média das chuvas em estações na BR-376, entre os anos de 2006 e 2014 (Millan Coy, 2015).

No ano de 2014 a Concessionária Autopista Litoral Sul instalou quatro pluviógrafos no trecho sul da BR-376. Pluviógrafos, são instrumentos de monitoramento da pluviosidade que armazenam e enviam dados via rádio.

Esses instrumentos foram instalados em pontos de fácil acesso, conforme a Tabela 1.

TABELA 1: Localização dos pluviógrafos.

INSTRUMENTO	COORDENADAS		COTA	Km	PISTA/LADO	INÍCIO DA OPERAÇÃO
P1	701387 E	7139099 S	800	660+570m	Sul / LD	12/03/2014
P2	707073 E	7137405 S	544	667+900m	Norte / LD	12/03/2014
P3	706862 E	7196189 S	469	669+300m	Sul / LD	27/02/2014
P4	709353 E	7129240 S	190	676	Sul / LE	28/02/2014

6.2 VEGETAÇÃO

A vegetação predominante na área segundo o Mapeamento da Floresta Atlântica do Paraná (SEMA, 2002), é do tipo Floresta Ombrófila Densa Montana (floresta atlântica do meio das encostas). Este tipo de floresta ocorre nas partes mais altas das encostas, em geral entre as cotas 700 e 1000 metros, sobre o relevo convexo, com boa drenagem e profundidade de solo. Geralmente associadas a solos do tipo cambissolo (solo raso com horizonte b incipiente - EMBRAPA, 2013), e a altura das árvores alcança até 25 metros, ocorrem também nas áreas mais baixas próximo ao pé do tapete herbáceo (Figura 04).

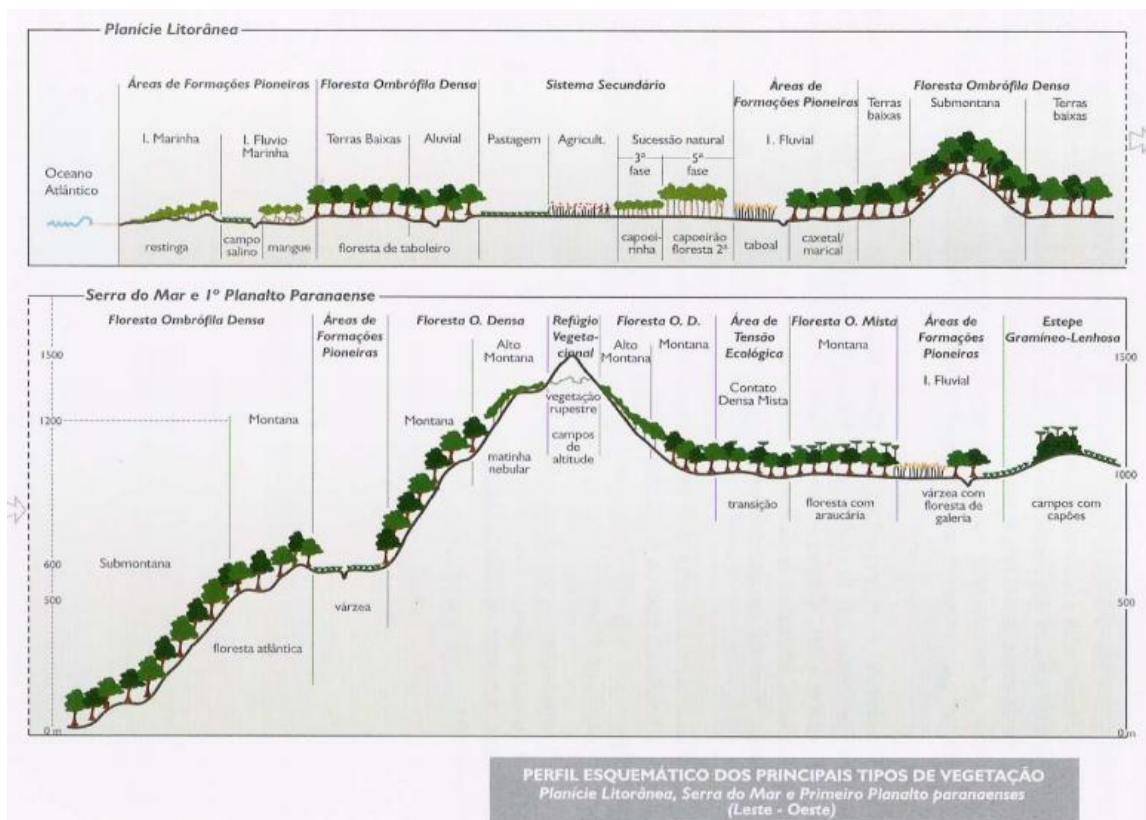


Figura 04: Perfil esquemático dos principais tipos de vegetação que ocupa a Planície Litorânea, a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense (SEMA, 2002).

7 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A área de estudo encontra-se inserida por completo na unidade morfoescutural da Serra do Mar Paranaense, porém, como os dados utilizados para a confecção dos mapas foram coletados em partes de amostras localizadas no Primeiro Planalto, ou Planalto de Curitiba, as definições de geologia e geomorfologia foram caracterizadas pelos aspectos regionais, englobando portanto, as duas unidades morfoesculturais acima citadas.

- SERRA DO MAR PARANAENSE

A Serra do Mar é o sistema de montanhas de maior destaque orográfico da borda atlântica do Continente Sul-Americano. Segundo Almeida e Carneiro (1998), sua gênese remota provavelmente do Paleoceno, sendo as principais rochas graníticas formadas a cerca de 600 milhões de anos no evento conhecido como Orogenia Neoproterozoica Brasileiro Pan - Africano (Bigarella J. J., *et al* 2003).

A Serra do Mar é o conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1000 km de extensão, largura de 5 a 10 km e desnível médio de 1000 metros, sendo seu ponto mais elevado localizado no Paraná a 1.969m, o Pico Paraná. Essa cadeia de montanhas de direção preferencial leste - nordeste (E-NE) se estende do Rio de Janeiro ao norte de Santa Catarina e separa o planalto brasileiro da baixada litorânea (Figura 05).

O surgimento da Serra do Mar se deu na consolidação do embasamento da plataforma Sul-Americana e a abertura do Atlântico Sul, a 135 milhões de anos. Durante a separação continental, ocorreu um amplo soerguimento de toda a borda leste da região sudeste do Brasil. O movimento divergente das placas continentais sul-americana e africana culminou no surgimento de *grabens* e *horsts* condicionados a falhas. A Serra do Mar corresponde a uma das áreas elevadas pelo soerguimento do bloco ocidental e rebaixamento do bloco oriental da Falha de Santos.

A morfologia da Serra do mar paranaense está condicionada a diversos fatores, entre os quais estão as muitas variações climáticas desde sua constituição, o padrão de falhamento do relevo e a diferença de resistência das rochas constituintes (Figura 06).

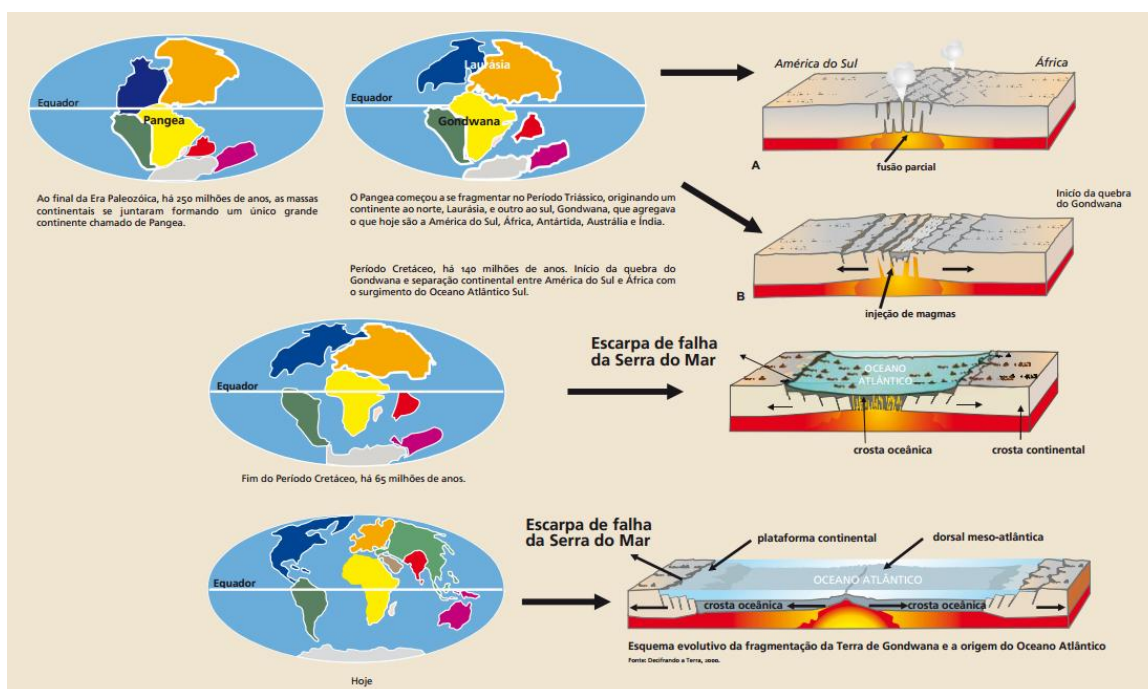


Figura 05: Esquema evolutivo da Serra de Mar, destacando as etapas de evolução da escarpa segundo a tectônica de placas. Fonte: MINEROPAR (http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/Paineis_geologicos/SerradoMar2_portugues.pdf - acesso em 10/11/2015), adaptado do Decifrando a Terra (2000).

A Serra do Mar Paranaense apresenta classes de declividade predominantes entre 12 e 30%, e altitudes variando entre 20 a 1969 metros sobre o nível do mar. Sendo as formas de relevo predominantes os topos alongados e em cristas com vertentes retilíneas, porém com vales em “V” encaixado. Apresenta direção geral da morfologia variando entre NE-SW, N-S e NW-SE. É modelada pelos litotipos da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Gnáissico-Migmatítico ou Complexo Atuba.



Figura 06: Morfologia da Serra do Mar, em destaque o Pico Paraná, ponto de maior altitude do sudeste brasileiro. Fonte: Hilton Benke (<http://www.altamontanha.com.br/> - acesso em 10/11/2015).

As subunidades morfoesculturais Rampas de Pré-Serra (constituídas pelos colúvios) e Serras isoladas, articulam-se entre a Serra do Mar e a Planície Litorânea, apresentam alta taxa de dissecação, com classes de declividade predominando entre 6 e 30%, e gradiente de elevação de 400 metros (entre 200 e 600 metros acima do nível do mar).

- **PRIMEIRO PLANALTO PARANAENSE**

O Primeiro Planalto ou planalto de Curitiba encontra-se modelado principalmente em rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico, o relevo apresenta gradiente de 130 metros (entre 767 e 897 metros acima do nível do mar), constituindo um relevo suavemente ondulado com planícies compostas por sedimentos colúvio-aluvionares recentes ao longo dos principais cursos de drenagem, a exemplo do rio São João, localizado ao norte da região.

As formas predominantes no relevo são topos alongados e aplanados, vertentes convexas e vales em “V” aberto, com uma direção preferencial da morfologia variando entre N-S e NW-SE, e declividade predominante entre 9 e 20°.

7.1 MAPA GEOLÓGICO EM ESCALA 1:60.000

O mapa geológico consiste na visualização em planta de características estruturais, litológicas e geomorfológicas de determinada área mapeada. Para a elaboração de um mapa geológico, as mais diversas técnicas analíticas são necessárias. Dentre elas, destacam-se a interpretação de fotografias aéreas, coleta de amostras de solo e rocha, e dados cartográficos e descritivos nos mais distintos pontos da área mapeada.

O mapa geológico utilizado como base para este trabalho foi o Mapa Geológico do Paraná (MINEROPAR, 2005) na escala 1:250.000, que abrange a folha Curitiba SG.22.X.D (Figura 07). Este mapa foi aprimorado, tendo seus limites redefinidos na escala 1:60.000, através de sucessivas técnicas analíticas, campanhas de campo e tratamento de dados em SIG.

Inicialmente, a área que compreende a BR-376 e sua faixa de domínio, foram projetadas sobre o mapa geológico base. Posteriormente, foi traçado um perímetro contendo todos os litotipos cortados pela rodovia. A escolha das fotografias aéreas a serem interpretadas, foi baseado neste perímetro. As imagens foram selecionadas de forma que abrangesse a área de estudo e uma porção marginal a zona de interesse, para que todas os litotipos que influenciam na segurança da rodovia fossem contemplados.

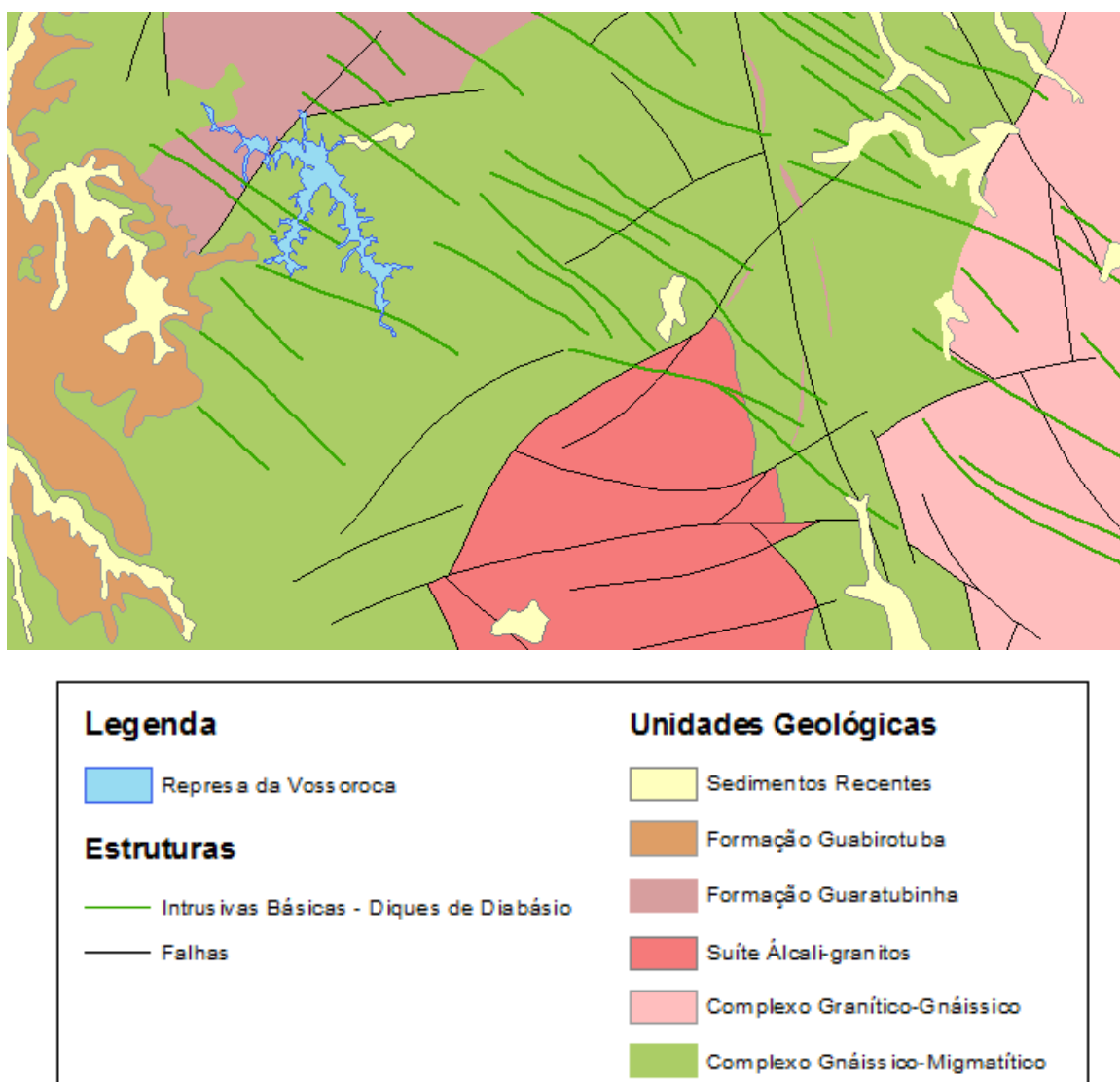


Figura 07: Imagem representativa do Mapa geológico em escala 1:250.000. Escala gráfica ou de visualização 1:150.000. Fonte: Adaptado de Mineropar (2005).

Seguindo o método proposto por Soares e Fiori (1976) de interpretação de fotos aéreas, doze fotografias aéreas em escala 1:25.000 (ITCG, 1980), foram analisadas, figura 08. As informações cabíveis a este estudo foram traçadas sobre os conjuntos de duas ou três fotos sobrepostas parcialmente, de tal forma que se obteve detalhe de contatos litológicos, zonas homólogas, estruturas geológicas e redes de drenagem.

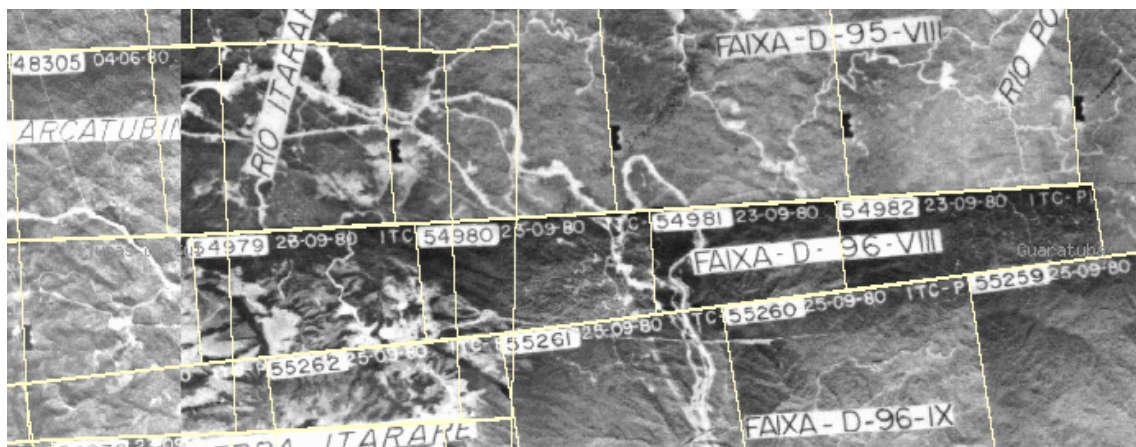


Figura 08: Mosaico de fotografias aéreas 1:25.000. Fonte: ITCG (Instituto de Terras Cartografia e Geociências).

Concluída a fase de interpretação estereoscópica, as imagens foram importadas para o *software* ArcGIS e georreferenciadas através das imagens da aéreas ortorretificadas em escala 1:60.000 de 1996 disponibilizadas pela SEMA (Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná).

Para cada foto analisada foram criados quatro arquivos no formato *shapefile* referentes à malha de drenagem, contatos litológicos, estruturas geológicas e litotipo (Figura 09).



Figura 09: Malha de drenagem fotointerpretada disposta sobre a imagem com representação do relevo (BING), disponível no *software* ArcGIS 10. Escala gráfica 1:10.000.

Quando agrupados sobre a imagem ortorretificada em escala 1:60.000, os vetores formaram uma rede de dados que foi constantemente ajustada e alimentada até o resultado final. O ajuste e junção das malhas vetoriais culminou em um único arquivo *shapefile* para cada aspecto fotointerpretado.

Os dados coletados em campo correspondentes a área de estudo ou zona de domínio, somados às amostras tratadas em laboratório, corroboraram com a interpretação fotogeológica validando portanto os ajustes propostos ao mapa base (Figuras 10 e 11).

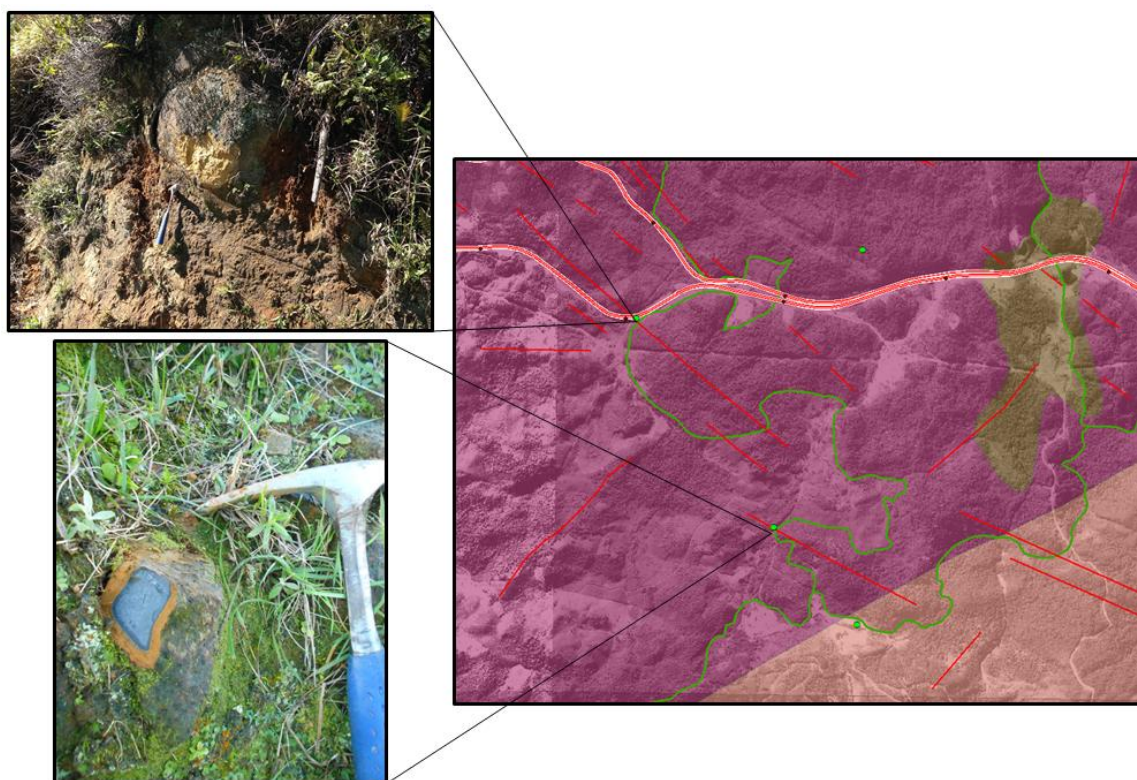


Figura 10: À direita mapa geológico em escala 1:250.000, Mineropar (2005), sobreposto pelos contatos litológicos e estruturas fotointerpretadas em escala 1:60.000. Destaque para dois pontos de campo onde foram encontradas diques de diabásio de direção NW-SE, validando a fotointerpretação.

A análise em maior escala das litologias presentes na área naturalmente deslocou os limites dos contatos do mapa original, porém, não foram realizadas campanhas de campo para validação dos contatos fotointerpretados nas áreas além da zona de interesse desse trabalho.

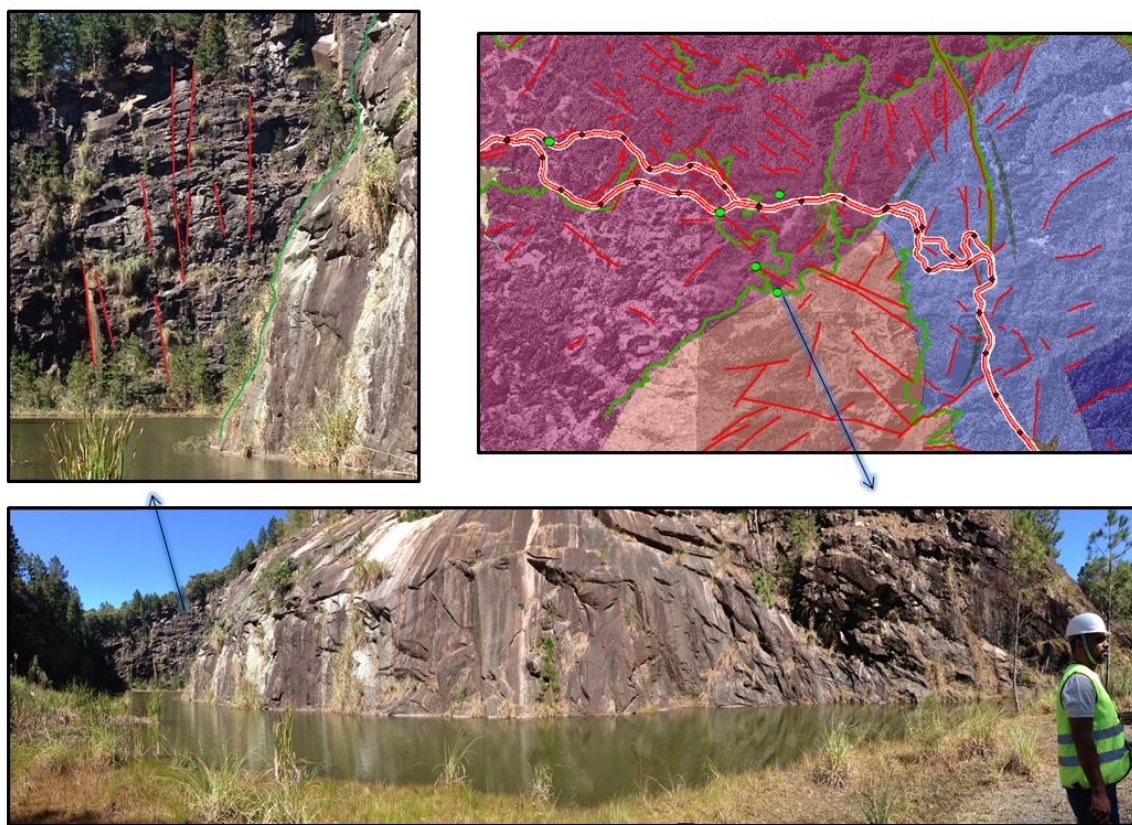


Figura 11: À direita, mapa geológico em escala 1:250.000, Mineropar (2005), sobreposto pelos contatos litológicos e estruturas fotointerpretadas. Detalhe: pedreira localizada no contato entre o Granito Morro Redondo e o Migmatito Estromático.

As readequações do mapa geológico segundo a interpretação de dados gerados se deu de forma evolutiva. Portanto, o mapa final é o produto da compilação dos dados de campo e laboratoriais, tratados e adequados para a escala 1:60.000, e apresentados na escala de visualização no corpo deste trabalho 1:10.000 (Figura 12).

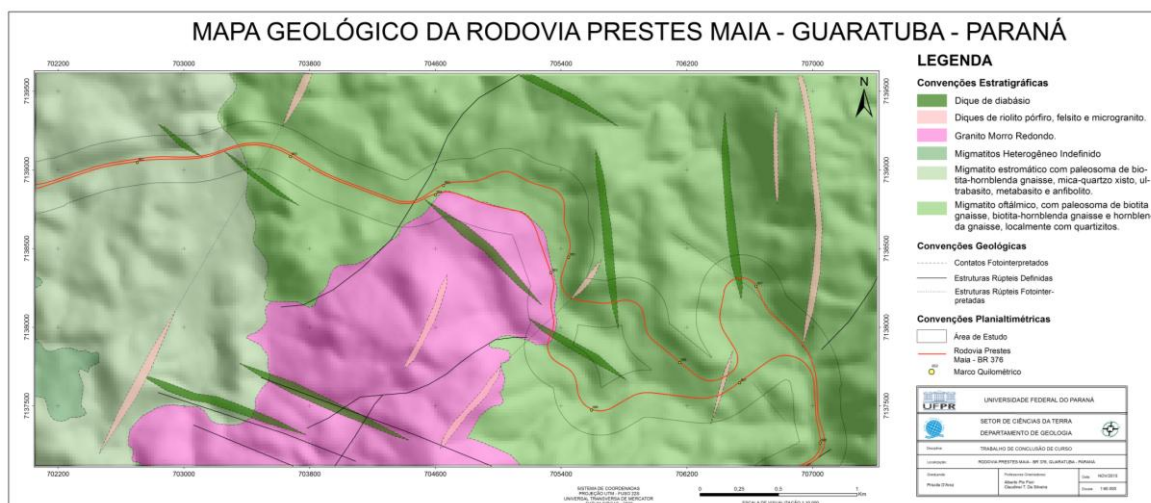


Figura 12: Mapa Geológico da área de estudo. Escala 1:60.000. Fonte: adaptado de MINEROPAR (2005).

7.2 LITOTIPOS

As informações utilizadas para análise e descrição da geologia na área de estudo foram obtidas das Cartas Geológicas 1:50.000 do Programa Pró-Atlântica e de seu respectivo relatório, organizados e confeccionado pela MINEROPAR no ano de 2002, em convênio com a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná (SEMA) através do PRÓ-ATLÂNTICA, cuja área do projeto engloba a Planície Litorânea a Serra do Mar e parte do Primeiro Planalto.

Os litotipos descritos na geologia regional são rochas de datadas do Arqueano/Paleoproterozoico, representadas pelos Complexos Granítico-Gnáissico e Gnáissico-Migmatítico, seguidas por rochas datadas do Neoproterozóico/Paleozoico, representados pela Suíte Álcali-Granitos, Paleozoico Inferior referente as rochas da Formação Guaratubinha, as Intrusivas Básicas de idade Juro-Cretácea relacionadas aos derrames da Formação Serra Geral, e as mais recentes, do Cenozoico.

A planície litorânea é composta por sedimentos de granulação fina a grossa, e configura um relevo plano. Já a Serra do Mar é constituída por rochas de origens ígnea e metamórfica que correspondem ao Escudo Cristalino Paranaense, parcialmente cobertas por sedimentos marinhos e costeiros. As

rochas de origem ígnea e metamórfica, configuram ao relevo um aspecto acentuadamente declivoso.

Dos conjuntos litológicos identificados nas adjacências da área de estudo, 7 encontram-se na faixa de domínio da BR-376, portanto, influenciam nos condicionantes empregados pelo fator de segurança das pistas, são eles:

I. Complexo Gnáissico-Migmatítico: Migmatito estromático com paleossoma de biotita-hornblenda gnaiss, mica-quartzo xisto, ultrabásito, metabásito e anfibolito.

II. Complexo Gnáissico-Migmatítico: Migmatito oftálmico com paleossoma de biotita gnaiss, biotita-hornblenda gnaiss e hornblenda gnaiss, localmente com quartzitos.

III. Complexo Gnáissico-Migmatítico: Migmatito heterogêneo indefinido (não foram coletadas amostras em campo).

IV. Formação Guaratubinha: Diques de riolito pórfiro, felsito e microgranito.

V. Intrusivas Básicas associadas a Formação Serra Geral: Diques básicos em geral, incluindo diabásios, basaltos, gabros e dioritos pórfiros.

VI. Suíte Alkali-Granitos: Granito Morro Redondo, alcali-feldspato granito do tipo A.

8 SOLOS

A definição de solo depende diretamente do objetivo do trabalho. Para os engenheiros civis, solo é um material que pode ser facilmente removido, escavado ou modelado, que possibilite a moldagem que receberá a estrutura a ser construída. Para os engenheiros agrônomos, solo é a base fornecedora de nutrientes e água para as mais variadas culturas vegetais; os agrônomos utilizam uma classificação específica, que segrega os solos em mais de 800 tipos. Para o geógrafo, solo é o produto final do intemperismo das rochas e fator determinante na modelagem do relevo, além do poderio econômico que é

amplamente explorado na geografia humana. Já para o geólogo, solo é interpretado como a capa de alteração sobrejacente às rochas. Quando *in situ*, e com características reliquias da rocha, é dito residual; e quando transportado recebe a designação de solo coluvionar, eólico, aluvionar, etc. Na mineração, pode ser fonte primária de minério ou apenas material de rejeito a ser escavado.

8.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Dadas as distintas definições de solo e as características consideradas ao uso destes, foram criadas diversas classificações, algumas são similares e outras consideravelmente distintas.

Existem ao menos três classificações de solos, uma definida pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) como Sistema Brasileiro de Classificação de Solos bastante utilizada na pedologia e ciências agrônomicas; já as classificações geotécnicas mais utilizadas são: a definida por Casagrande em 1948 como Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS); e a classificação *Transportation Research Board* (TRB), que tem sido aplicada no reconhecimento de solos para a construção de pavimentos rodoviários em todo o mundo. A TRB é a classificação utilizada por órgãos como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER).

Este trabalho contempla a classificação de solos da EMBRAPA publicada em 2013, trata-se da terceira edição do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SBCS). Diferentemente dos outros dois sistemas de classificação acima citados, o sistema da EMBRAPA é taxonômico e divide os diferentes tipos de solo em Ordem, Subordem, Grandes Grupos, Subgrupos, Famílias e Séries, além disso, as divisões possuem classes segregadas em níveis até o 6º nível categórico.

Neste sistema, a definição do solo é obtida a partir da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do perfil que o representa. Aspectos ambientais do local do perfil, tais como clima, vegetação, relevo,

material de origem, condições hídricas, características externas ao solo e relações solo-paisagem, também são utilizadas (EMBRAPA, 2013).

Algumas destas características não influenciam diretamente na estabilidade de taludes, para esta finalidade a característica mais importante é a granulometria. Como o SBCS também agrupa os solos em grupamentos texturais de acordo com a granulometria, optou-se por esse sistema em detrimento dos demais, (tabela 2).

TABELA 2: Grupamento textural. Adaptado de EMBRAPA, 2013.

TEXTURA	CARACTERÍSTICA
ARENOSA	Compreende as classes texturais areia e areia franca (45% areia).
MÉDIA	Compreende classes texturais ou parte delas, tenda na composição granulométrica menos de 35% de argila e mais de 15% de areia, excluídas as classes texturais de areia e areia franca.
ARGILOSA	Compreende classes texturais ou parte delas, tenda na composição granulométrica de 35 a 60% de argila.
MUITO ARGILOSA	Compreende classe textural com mais de 60% de argila.
SILTOSA	Compreende parte de classes texturais que tenham menos de 35% de argila e menos de 15% de areia.

8.2 TIPOS DE SOLOS

O presente estudo se baseia na concepção de solo atribuída aos geólogos, visto que o conceito atende às necessidades geológico-geotécnicas atribuídas aos parâmetros considerados no emprego do modelo matemático do Fator de Segurança.

8.2.1 SOLO COLUVIONAR

Para Mitchel & Soga (2005), colúvio é solo formado em um ponto da vertente e posteriormente transportado pela gravidade em conjunto com a água. Solos coluvionares frequentemente apresentam abundância de fragmentos da rocha de origem e uma matriz heterogênea de argila a areia. São comumente encontrados nas vertentes independente do declive, e podem se acumular em depressões topográficas ou vales.

Caputo (1988), citado por Silva Vaz (2014), define os solos coluvionares como assim classificados por terem sido transportados pela ação da gravidade (Figura 13).

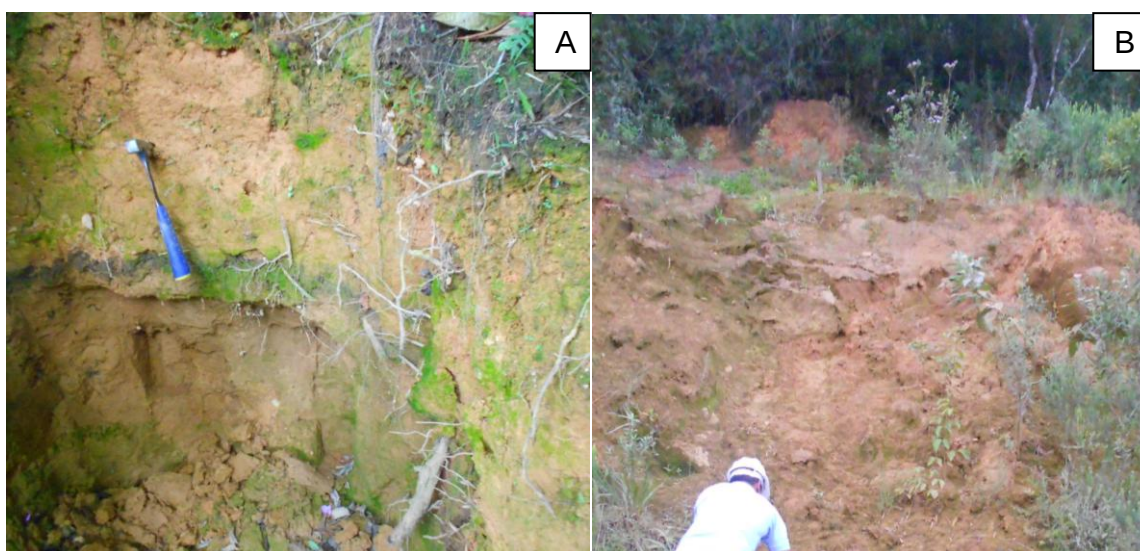


Figura 13: Solos coluvionares encontrados ao longo da área de estudo. A) Dois eventos de transporte evidenciados, é possível distinguir o solo mais antigo do mais recente pela presença de uma camada orgânica localizada a cerca de 50 cm do topo do perfil, denominada solo enterrado. B) Tálus transportado por gravidade, com presença de blocos de diabásio.

Solo coluvionar ou tálus é muito comum ao pé de vertentes naturais de granito e gnaiss (Ortigão, 2007), caso típico dos morros do Rio de Janeiro e de toda a serra do Mar (Figura 14). Para o referido autor, a presença de tálus pode ser facilmente identificada pelo tipo de vegetação. Algumas plantas se adaptam

a esses solos devido à baixa compactação (solos fofos) e à elevada umidade que se dá pela presença significativa de poros, além de blocos soltos e pela deposição no pé das vertentes, um bom exemplo são as bananeiras, muito comuns nestes terrenos. O autor alerta que estes depósitos são os locais onde ocorrem grande parte dos acidentes durante chuvas intensas que saturam o solo, elevam o nível freático e desencadeiam movimentos de massa.

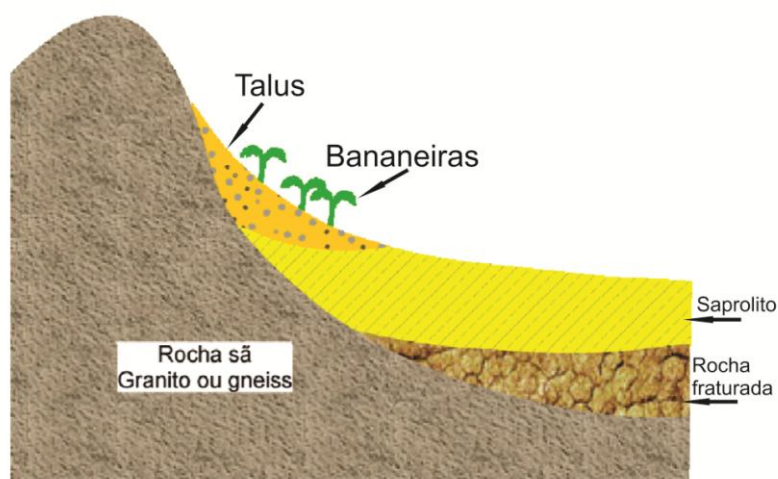


Figura 14: Diagrama de localização do solo coluvionar ou talus, num perfil de vertente. Fonte: Ortigão, 2007.

8.2.2 SOLO RESIDUAL

Os solos ditos residuais são aqueles formados sobre a rocha por ação dos agentes intempéricos e que permanecem *in situ*, ou seja, não sofreram nenhum transporte. Solos residuais preservam características da rochas original, um bom exemplo verificado na área de estudo são os solos residuais de gnaiss que apresentam bandamento de cores, característica preservada do bandamento composicional do gnaiss (Figura 15). Caputo (1988), descreve que em solos residuais é possível observar uma transição gradual do solo até a rocha sã, sendo conhecido também como solo autóctone.

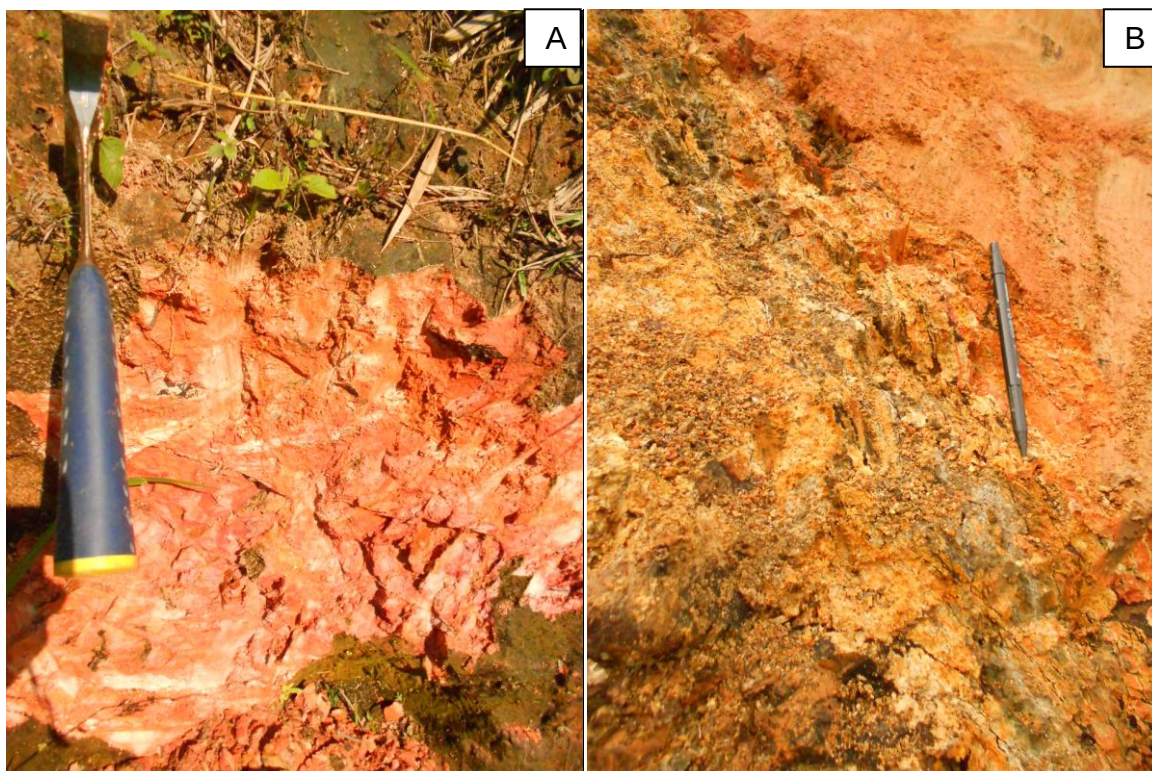


Figura 15: Solos residuais desenvolvidos sobre as rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico encontrados ao longo da área de estudo evidenciando bandamento reliquiar.

Para Pinto (1983), a ocorrência de solo residual está condicionada a velocidade de decomposição da rocha que deve ser maior do que a velocidade de remoção do material formado. Acrescenta ainda que, como a velocidade do intemperismo depende de alguns fatores como chuvas, temperatura e vegetação, estes solos são mais abundantes em locais de clima tropical como é o caso do Brasil.

8.3 SOLOS PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO

Nas adjacências da área de estudo, de acordo com o mapa simplificado de solos do Paraná publicado pela SBCS em 2012, ocorrem Cambissolos + Neossolos Litólicos. Os Cambissolos são solos geralmente pouco espessos,

com horizonte B incipiente, de fertilidade bastante variável. Quando férteis os solos encontram-se em relevo mais acidentado. Os de baixa fertilidade situam-se em relevo suavemente ondulado, preferencialmente localizados no terço superior da vertente.

Na área, os cambissolos estão associados ao intemperismo e pedogênese dos migmatitos e gnaisses (solo residual), variando sua coloração entre vermelha e amarela. Geralmente apresentam quartzo e pseudomorfos de feldspato potássico centimétricos, em meio a uma matriz silto-argilosa.

Os neossolos litólicos são solos rasos pouco desenvolvidos, não hidromórficos e de textura normalmente arenosa, apresentando alta erodibilidade principalmente em declives mais acentuados ($> 20, 25^\circ$). Abrangem diversos ambientes associados desde áreas de relevos muito movimentados até as áreas planas. Quanto ao material de origem, varia desde granitos, migmatitos e gnaisses até materiais provenientes de transporte, sedimentos colúvio-aluvionares e depósitos de tálus.

8.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS

O comportamento físico do solo é relativo, dependerá da resistência oferecida por cada uma das fases da matéria (sólido, líquido e gás) em relação as forças solicitantes.

Segundo Guidicini & Niebele (2006), a presença de água no solo causa a dissolução dos elementos solúveis constituintes do cimento que, por sua vez, é formado pelos próprios minerais formando, assim, uma rede de microfraturas no meio rochoso, que causa a diminuição dos parâmetros de resistência como coesão e ângulo de atrito. Além disso, segundo o mesmo autor, o processo de alteração das rochas tende a formar zonas de minerais com características de permeabilidade distintas entre si, normalmente dispostas em paralelo à superfície do talude. A presença de camadas menos permeáveis sobre camadas de maior permeabilidade pode resultar no desenvolvimento de vertentes, ou ainda, planos preferenciais de deslocamento de solo.

Outros autores contribuíram muito nas definições de parâmetros físicos dos solos de suma importância nos estudos aplicados de mecânica dos solos. Silva Vaz (2014) cita o princípio da pressão efetiva, de Terzaghi (1950), definido a partir de observações e da intuição positiva que o comportamento dos solos saturados quanto a compressibilidade e à resistência ao cisalhamento dos solos depende fundamentalmente da pressão média intergranular, a qual a chamou de pressão efetiva, como o marco fundamental do estabelecimento da Mecânica dos Solos com bases científicas independentes.

Segundo Mitchell & Soga (2005) a resistência à deformação dos solos é dada por forças físico-químicas de interação entre os átomos, moléculas e partículas, ou seja, compressibilidade e deformação dos solos dependem da desestabilização destas forças.

Dentre os parâmetros físicos mais importantes para este estudo, estão:

- A coesão que é definida como a força de resistência do solo ao cisalhamento. Quanto menor o raio das partículas do solo, maior a capilaridade do solo e maior a coesão do mesmo.
- O ângulo de atrito interno que corresponde ao ângulo de inclinação da linha de resistência ao cisalhamento (Mohr–Coulomb) em relação ao plano na horizontal.
- O índice de vazios que é definido pela relação do volume de vazios pelo volume de sólidos. Este índice influencia, por exemplo, na permeabilidade, compressibilidade e resistência a ruptura.
- A pressão estabelecida pela água na massa do solo. Segundo Ortigão (2007), essa pressão altera o peso específico aparente úmido que é utilizado para calcular as pressões interangulares ou efetivas.

8.5 INFLUÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL

A vegetação desempenha um papel importante na resistência do solo, uma vez que as raízes das árvores podem fornecer considerável coesão aparente através das ligações características do tapete de raízes contínuas ou

por ancorar raízes individuais em rochas, sob solos finos em vertentes íngremes (Keller,1992).

Para alguns autores, existe um consenso de que as florestas desempenham um importante papel na proteção do solo e de que o desmatamento pode propiciar não somente o aparecimento de erosão, mas também de movimentos coletivos de solos. Tal senso comum é também verificado nas populações cujas atividades estejam ligadas à exploração ou ocupação de vertentes, Silva Vaz (2014).

De maneira geral, a presença de vegetação nas vertentes protege o solo de fatores que condicionam os deslizamentos, além de reduzir a compactação do solo pelo impacto de gotas de chuva e consequente diminuição do escoamento superficial, uma vez que a cobertura vegetal intercepta as águas pluviais amenizando a energia cinética e favorecendo a infiltração. Outra característica positiva da vegetação é que alguns tipos de sistemas radiculares auxiliam na contenção da erosão por manterem a agregação do solo.

A estabilidade de uma encosta quando consideradas a interação da água da chuva, dos solos e a presença de cobertura vegetal, é diretamente influenciada pelo tipo de vegetação e atuação desta em relação à vertente, essa influência se dá de forma mecânica e hidrológica.

A Figura 16, expressa a influência da vegetação numa vertente considerando esses dois aspectos, os apontamentos em números estão descritos na Tabela 3.

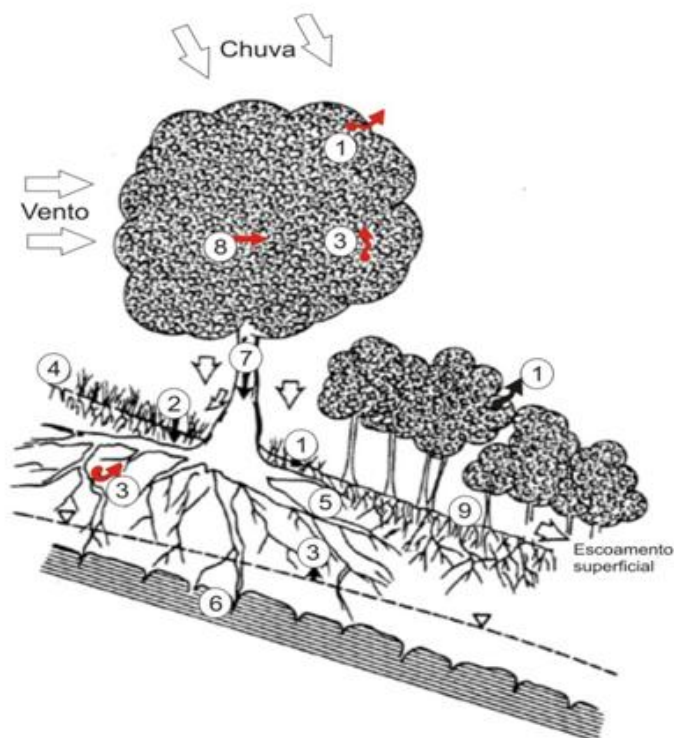


Figura 16: Influência da presença de vegetação numa vertente quando considerada a interação da água da chuva - solo - cobertura vegetal. Fonte: Silva Vaz (2014), modificado de Lemes, 2001 e Cornforth, 2005.

TABELA 3: Influência da presença de vegetação nas vertentes.

INFLUÊNCIA		
Hidrológica	1. Interceptação da água pela folhas causa absorção e perdas por evaporação que reduzem a disponibilidade de água para infiltração.	Benéfico
	2. Raízes e tronco aumentam a rugosidade da superfície e a permeabilidade do solo, levando ao aumento da capacidade de infiltração.	Adverso
	3. As raízes retiram a umidade do solo por evapotranspiração, reduzindo a poro pressão do solo.	Benéfico
	4. A redução da umidade pode acentuar rachaduras por ressecamento do solo, resultando em maior capacidade de infiltração.	Adverso
Mecânica	5. Raízes reforçam o solo, aumentando a resistência ao cisalhamento	Benéfico
	6. O ancoramento das raízes em locais mais estáveis ajuda a suportar o solo acima.	Benéfico
	7. O peso das árvores sobrecarrega a vertente, aumentando a tensão normal e de resistência (downhill force components).	Benéfico
	8. A vegetação exposta ao vento transmite a tensão a vertente	Adverso
	9. A junção das partículas do solo pelas raízes aumenta a rugosidade do solo e subsolo, consequentemente reduz a suscetibilidade a erosão	Benéfico

É sabido também que a vegetação, água da chuva e o solo, interagem entre si. Essa interação pode ser positiva ou não para a estabilidade da vertente, por essa razão cada caso é estudado em particular. Um exemplo de agente desestabilizador associado à vegetação de grande porte é que, numa vertente com inclinação superior a 45° , a vegetação atua como facilitadora dos movimentos de massa, visto que o peso das árvores somado a força do vento na copa das árvores transmitirem a pressão recebida ao solo.

Porém, mesmo nesses casos, não é recomendada a remoção total da vegetação do talude, pois a retirada da cobertura vegetal pode gerar uma camada superficial impermeável por selamento do terreno, onde partículas finas desagregadas obstruem os poros do solo e impedem a infiltração, provocando o arrastamento de grandes quantidades de sedimento sobre a superfície, via escoamento superficial.

9 VERTENTES E TALUDES

Fiori e Carmignani (2009) descrevem talude como um termo genérico que compreende qualquer superfície inclinada que limite um maciço de terra, rocha ou ambos. Pode ser natural ou artificial, quando diretamente relacionado a ação antrópica (cortes de estradas e aterros).

Do ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças: peso, escoamento da água e resistência ao cisalhamento (Caputo, 1987).

Veloso (2002) citado por Silva Vaz (2014), aponta que a maioria dos projetos de construção civil estão relacionados às vertentes, especialmente as rodovias, já que o gradiente dos taludes não devem exceder padrões aceitáveis de estabilidade (encostas naturais, são ditas estáveis quando não apresentam indícios de movimentos de massa), com intuito de evitar deslizamentos. Para que estes movimentos de massa possam ser evitados, é necessário reduzir ao máximo a inclinação do talude procurando sempre evitar o uso de aterros.

A análise de vertentes, tendo em vista avaliação de possíveis deslizamentos, se faz com o auxílio direto de mapas topográficos, pois estes ressaltam as áreas suscetíveis a movimentos de massa e portanto são de suma importância na definição de obras estabilizadoras e remediadoras. Estes mapas podem ser obtidos através de levantamentos topográficos, batimetria, ou por fotogrametria.

9.1 TIPOS DE VERTENTE

A morfologia de uma vertente é determinada pelas dinâmicas do relevo, englobando entre outras características: o tipo de rocha formadora do solo, a pluviosidade local, o gradiente de inclinação da vertente e a convergência do fluxo hídrico.

A forma da vertente é o que determina o comportamento do fluxo da água que pode ser acelerado ou desacelerado, auxiliando num possível processo de intervenção. Bonuccelli (1999) ponderou quais seriam as situações mais ou menos favoráveis à ocorrência de movimentos de massa gravitacionais segundo as feições verticais e longitudinais apresentadas por cada vertente (Tabela 4).

TABELA 4: Características do perfil de encostas relacionadas à ocorrência de movimentos de massa gravitacionais. Fonte: Milllan Coy (2015) alterado de Bonuccelli (1999).

PERFIL DA ENCOSTA	CARACTERÍSTICAS DO EVENTO
encosta côncava	são geralmente mais evoluídos em termos geomorfológicos e estariam menos sujeitas a ocorrência desses processos
encosta convexa	menos evoluídas e portanto mais sujeitas a ocorrência dos processos
encostas retílineas	estariam na situação intermediária, entre os dois casos anteriores
encostas convexo-côncavas	nessa ordem do topo para a base, seriam mais propensas
encostas convexo-retílineas	de topo para a base, também seriam mais propensas

A inclinação da vertente contribui com o incremento da atuação da força gravitacional sobre a cobertura do solo, ou seja, quanto maior a declividade, maior será a componente vertical da gravidade (Kozciak, 2005).

Silveira *et. al.*, (2012a) corrobora com a ideia de outros autores com relação à declividade como sendo um importante atributo topográfico no controle dos processos pedogenéticos, e que afeta diretamente a velocidade do fluxo superficial e subsuperficial da água; conseqüentemente, controla o regime hídrico e o potencial de erosão ou de deposição.

Dentre as características topográficas das vertentes, a mais significativa e apontada por diversos autores é a curvatura, principalmente a forma côncava (Figura 17). Vertentes côncavas, quando relacionadas a zonas convergentes, concentram o fluxo de água no centro da vertente; favorecem portanto, o controle hidrológico e o acúmulo de umidade.

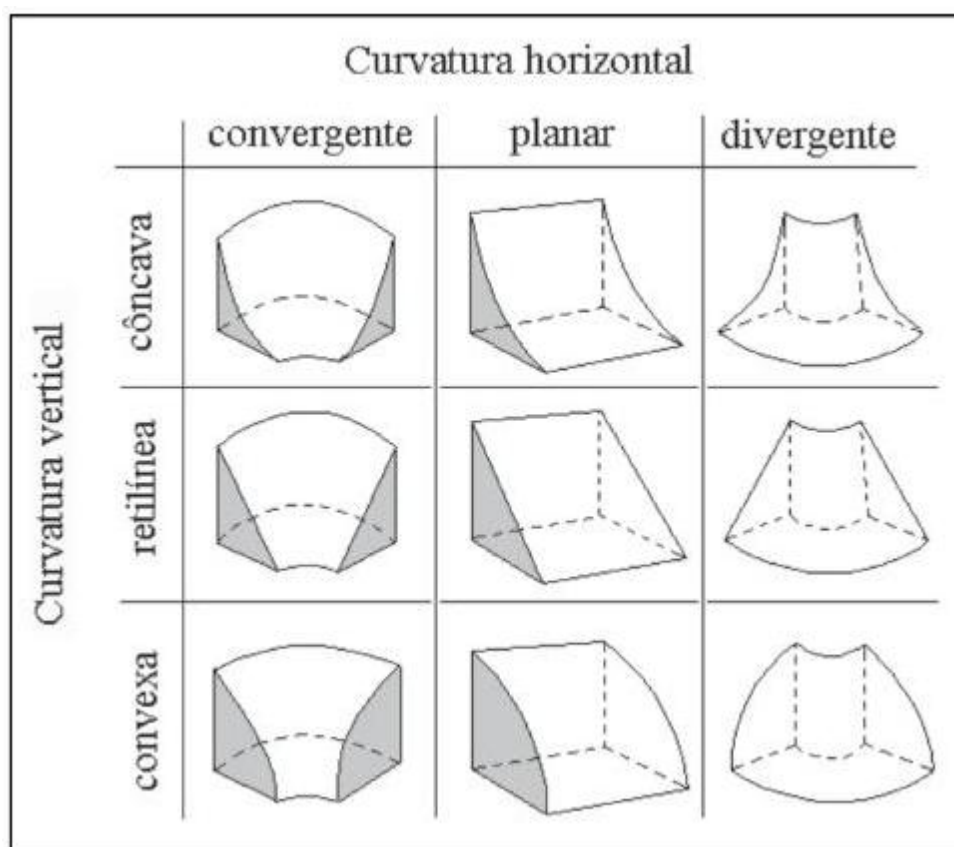


Figura17. Curvatura das vertentes. Fonte: Dikau (1990).

Outros atributos importantes são a declividade, e a orientação da vertente. Movimentos de massa podem ser desencadeados unicamente pela declividade, condicionados, portanto, à ação da gravidade. Kozciak (2005), defende que a declividade, quando utilizada para determinar maior ou menor suscetibilidade da vertente a movimentos de massa, deve sempre estar associada a outros atributos.

Quanto à orientação da vertente, é através deste atributo que se retiram informações das vertentes que se encontram mais expostas às variáveis climáticas, como o sol e o vento. Estas variáveis podem contribuir na suscetibilidade das encostas direta ou indiretamente.

9.2 ESTABILIDADE DE ENCOSTAS E TALUDES

Modificações realizadas em vertentes podem desencadear condições de instabilidade locais, é bastante comum a verificação de pontos de instabilidade de encostas quando há alteração na massa terrosa ou rochosa, cortes para implantação de obras, alteração brusca na inclinação do talude, entre outros. Essas modificações na geometria original, acrescentam comumente uma sobrecarga na porção superior da vertente, ou então retiram parte de sua massa na porção inferior (Guidicini & Nieble, 1983).

Em taludes naturais, grande parte das instabilizações ocorrem após períodos de chuva intensa ou estações chuvosas, demonstrando que a pluviosidade é, se não o parâmetro mais importante, o mais indispensável nas análises de estabilidade de encostas, Silva Vaz, (2014) citando Ahrendt, (2005).

Para Caputo (1987), um escorregamento é causado pelo aumento do peso do talude (incluindo as cargas aplicadas) e a diminuição da resistência ao cisalhamento do material. O autor classifica as causas como externas e internas. Caputo (1987) destaca ainda que, devido a complexidade do tema escorregamentos, qualquer estudo de estabilidade de massas terrosas, ou rochosas, deve ser alimentado com um razoável conjunto de dados sobre o comportamento das águas subterrâneas.

Os deslizamentos são desencadeados por fatores antrópicos e naturais, em alguns casos esses fatores atuam de forma conjunta e comumente são relacionados a grandes desastres com perdas humanas e estruturais.

A estabilização de uma vertente ou talude depende, antes de mais nada, do problema ou parâmetro a ser estabilizado. Além disso, devem ser consideradas as características individuais de cada vertente. Logo, cada obra de estabilização requer um estudo prévio detalhado, que deve contemplar a geologia (litologia e estrutural), geomorfologia, pedologia, finalidade da obra, durabilidade esperada, custos, entre outros.

Vários são os métodos utilizados para estabilização de taludes. Alguns dos mais usuais são:

- Diminuição da inclinação do talude;
- Drenagem (superficial e profunda);
- Retaludamento em bancadas;
- Revestimento do talude (malha ou grade);
- Emprego de materiais sintéticos estabilizantes;
- Muros de arrimo, gabiões e ancoragens;
- Utilização de bermas;
- Prévia consolidação da fundação, quando constituída por solos compressíveis;

10 MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS

Movimento de massa é o movimento (vertical, horizontal ou inclinado) de um volume de material litológico (rocha, formação superficial ou solo) ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como a água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais da vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos, Millan Coy (2015).

Segundo a USGS (2004), alguns sistemas de classificação de movimentos de massa incorporam variáveis como a velocidade do movimento, água, ar ou gelo contido no material do deslizamento.

Para Guidicini & Nieble, (1983) os movimentos de massa são definidos da seguinte maneira:

- Escoamentos: movimentos contínuos, com ou sem superfície definida no local de ocorrência, não está associado à velocidade e engloba movimentos lentos como no caso dos rastejos (associados a gravidade) ou os rápidos, neste caso as corridas que são essencialmente hidrodinâmicas como por exemplo as corridas de terra e avalanche de detritos;
- Escorregamentos: são movimentos rápidos, de duração relativamente curta em massas de terreno com volume bem definido. São divididos em escorregamentos rotacionais e translacionais. No primeiro, a ruptura é influenciada pela distribuição das pressões neutras, pelas variações de resistência ao cisalhamento e pelo próprio peso e via de regra ocorre em forma de um arco de circunferência em taludes mais íngremes. Por sua vez, os translacionais podem ocorrer em solo ou em rocha, o plano de movimentação ocorre paralelamente a vertente, este é condicionado por eventuais anisotropias acentuadas no interior da massa de solo ou rocha ou ambos;
- Queda de blocos: ocorre em penhascos verticais e vertentes muito íngremes onde os blocos se deslocam do maciço por ação da gravidade. Pode ser combinada a outros movimentos como saltos. As causas podem ser erosão hídrica, variação de temperatura (variação do volume), perda do apoio, alívio de tensões tectônicas, vibrações, ou combinações entre essas causas.
- Queda de detritos: é considerado um movimento de massa intermediário entre a queda de blocos e os escorregamentos propriamente ditos. É composto de fragmentos terrosos ou rochosos, inconsolidados ou pouco consolidados, em movimentos de pequena magnitude.

O referido autor descreve, além destes, outros movimentos de massa que não apresentam influência direta na estabilidade de vertentes, entre eles os movimentos de subsidência e recalque.

Para a USGS, (2004) o termo deslizamento pode ser amplamente empregado, sendo descrito como uma grande variedade de processos que resulta no movimento de descida ou de saída de materiais que formam uma vertente, incluindo rocha, solo, aterro ou uma combinação destes materiais. Os

materiais serão movimentados por queda, desabamento, deslizamento, espalhamento, corrida (Figura 18).

Kozciak (2005) ressalta que a alta suscetibilidade a escorregamento verificada na Serra do Mar Paranaense se deve à configuração paisagística e morfológica da área. Para a autora, a combinação de fatores naturais, tais como relevo acidentado, altos índices pluviométricos e a densa cobertura vegetal, configuram a geodinâmica evolutiva das vertentes, sendo o escorregamento o processo predominante de modificação dessa paisagem.

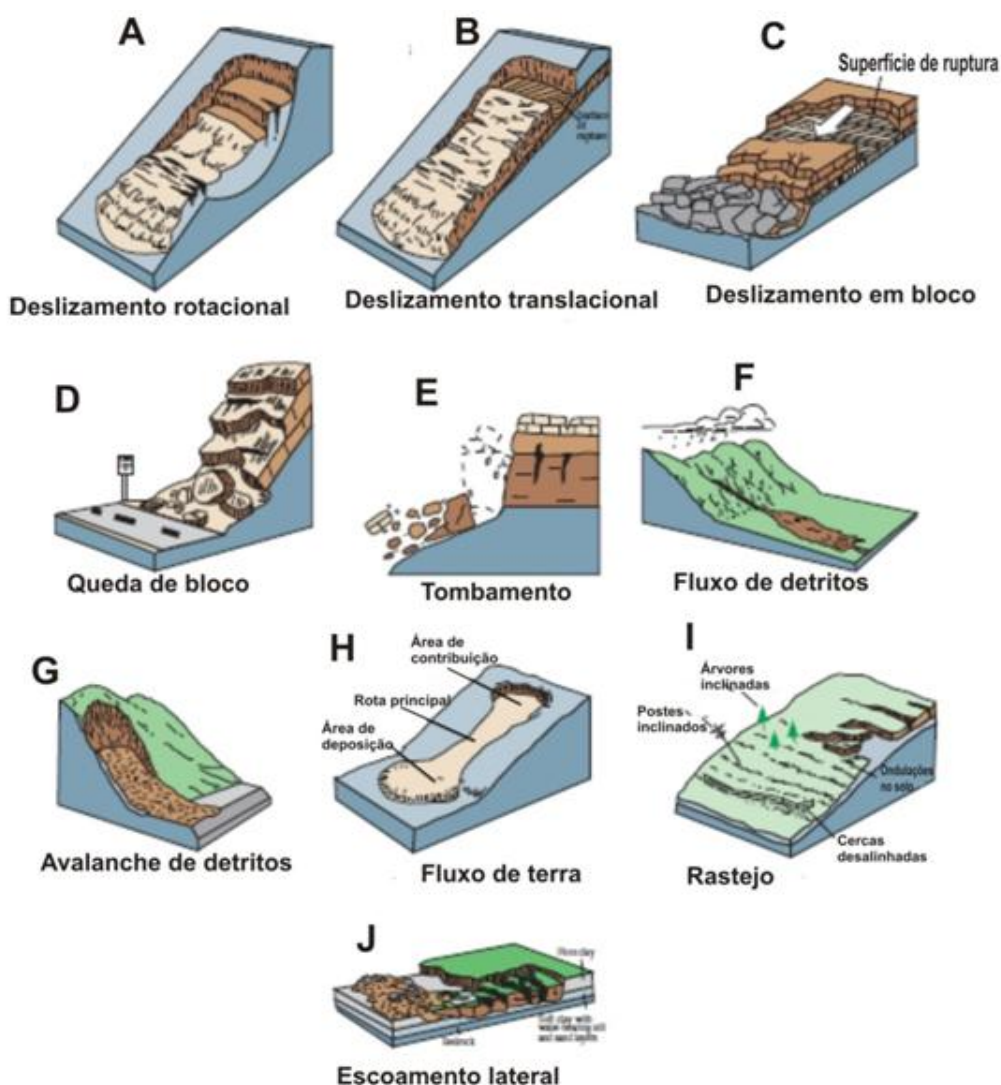


Figura 18: Tipos de movimentos de massa. Fonte: USGS, (2004).

11 FATOR DE SEGURANÇA

O Fator de Segurança (FS), é um modelo matemático desenvolvido para comparar a estabilidade de uma vertente diante de diversos cenários de equilíbrio de forças.

Trata-se da razão entre as forças resistentes ao deslizamento e a resultante das forças solicitantes (desencadeadoras). A condição especial de equilíbrio limite corresponde a um FS de valor igual a 1.00, nesse caso o escorregamento é eminente. Quanto maior for o valor acima da unidade, maior a estabilidade da vertente e, por consequência, menor a suscetibilidade de ocorrência desse processo (Silveira et. al, 2012a).

Fiori e Carmignani (2009) realizaram uma série de deduções matemáticas e relações entre os muitos fatores que influenciam no cálculo do FS para estabilidade de taludes. Os autores consideram que um talude é uma massa de solo submetida a três campos de força distintas: forças exercidas pelo peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento.

O equilíbrio limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços resistentes (Figura 19).

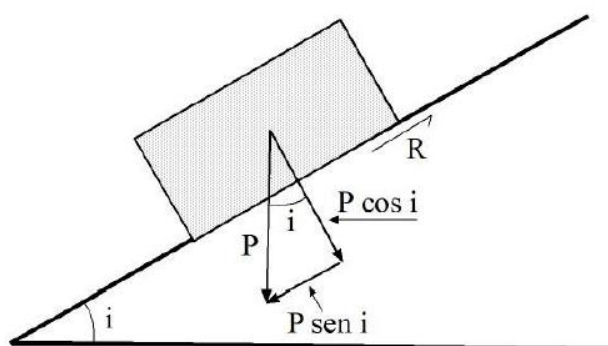


Figura 19: Decomposição da força peso (P) em sua componente tangencial e normal, e a força de resistência (R). Fonte: Fiori e Carmignani (2009).

O estudo da estabilidade de taludes condicionado pela teoria do equilíbrio limite deve necessariamente considerar a atuação desses 3 conjuntos

de forças, visto que os dois primeiros se somam e tendem a movimentar a massa de solo encosta abaixo, enquanto o último atua como um freio, barrando a movimentação, Fiori e Carmignani (2009).

Para Kozciak (2005), determinar o índice de segurança é uma maneira de representar a maior ou menor suscetibilidade a movimentos de massa em regiões de serra.

A aplicação dos dados em um programa computacional, aliado à técnicas de SIG, permite a avaliação de grandes áreas, onde os resultados são apresentados em forma de mapas temáticos confiáveis, de fácil leitura e interpretação, que auxiliam no planejamento territorial com baixo custo operacional.

O conceito de Fator de Segurança pode ser definido pela razão entre as forças resistentes e as forças solicitantes, conforme mostra a Equação 01.

$$F_s = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças atenuantes}} \quad \text{Equação 01}$$

11.1 DETERMINAÇÃO DE FORÇAS EM VERTENTES DE EXTENSÃO ILIMITADA, COM PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PARALELA À VERTENTE.

Do ponto de vista prático, qualquer vertente de grande extensão, e com perfis de solos essencialmente do mesmo tipo, pode ser considerado como um talude de extensão ilimitada (Dunn; Anderson; Kiefer, 1980).

Neste tipo de análise de vertentes de extensão ilimitada, são considerados os efeitos da água dentro da vertente, que induz ao surgimento da força de percolação e da pressão neutra. Admite-se que as linhas de fluxo são paralelas à superfície da vertente, com linhas equipotenciais perpendiculares, como é observado de forma esquemática na figura 20, onde o solo é considerado saturado, situação que ocorre na parte inferior de vertentes

naturais. As vertentes da área em estudo enquadram-se nos termos deste item, compostas por solos homogêneos.

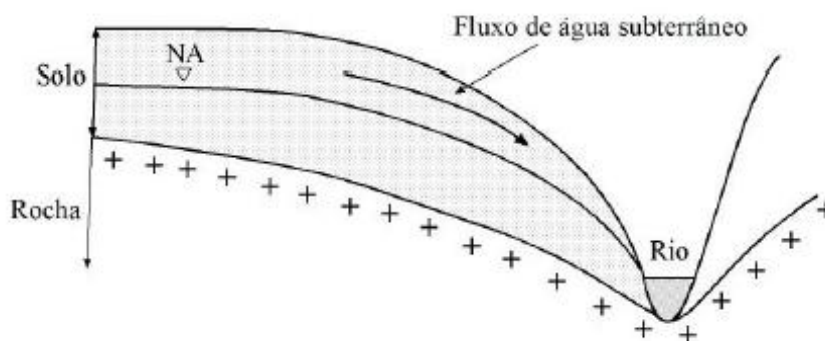


Figura 20: Fluxo da água em uma vertente natural. Fonte: Fiori e Carmignani (2009).

11.1.1 VERTENTE COM VEGETAÇÃO

No caso de uma vertente infinita que apresente cobertura vegetal, com o nível freático a uma profundidade (h_1) da superfície e uma distância (h_2) da base da camada de solo, deve-se considerar na análise da estabilidade outras forças exercidas pela vegetação, como a força do vento que atua sobre a copa das árvores (F_{ve}), a força exercida pelo peso das árvores no solo (σ_a), a força de ancoramento exercida pelas raízes (T), entre outras (Figura 21).

- PESO DAS ÁRVORES (P_a)

O peso das árvores 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 21), o peso das árvores será dado pela equação 02.

$$P_a = \frac{\sigma_a}{\cos i}$$

Equação 02

Segundo Fiori (2009), a pressão(σa) exercida sobre a vertente pelo peso das árvores é obtida dividindo o peso das árvores (Pa) pela área de abrangência das raízes.

Na Serra do Mar, Wolle e Pedrosa (1981) determinaram o valor da pressão (σa) em torno de 3,0 kPa.

- FORÇA DO VENTO (F_{ve})

Esta força é considerada em presença de vegetação na vertente, e é determinada através da razão entre a pressão exercida pelo vento (σve), nas copas das árvores, com a área da vertente ($1/\cos i$), de acordo com a equação 03:

$$F_{ve} = \frac{\sigma ve}{\cos i} \quad \text{Equação 03}$$

Styczen e Morgan (1995), estimaram que a força dos ventos é relevante apenas quando a velocidade exceder 40 km/h. Através de medições de velocidade de ventos feitos na estação climatológica de Morretes, Fendrich e Ferreira (1995) estipularam uma média de 50,4 km/h. Nunes (2002), determinou (σve) igual a 1kPa no Município de Morretes.

Portanto, unindo os apontamentos acima é possível concluir que no caso da Serra do Mar Paranaense a força que os ventos exercem nas copas das árvores, é um fator relevante na estabilidade das vertentes. Os resultados de (σa) 3,0 kPa obtidos por Wolle e Pedrosa (1981) e de (σve) 1kPa obtidos por Nunes (2002), foram considerados nesse trabalho como parâmetros fixos para os cálculos do FS relacionados à vegetação.

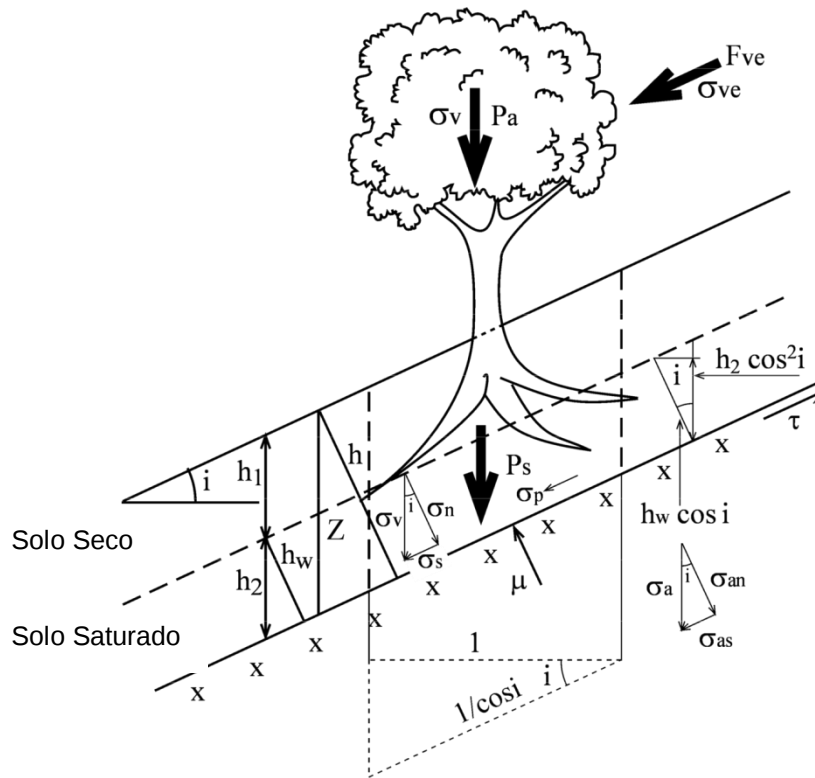


Figura 21: Representação dos fatores atuantes na estabilidade de vertentes considerados no cálculo do fator de segurança. Fonte: Fiori e Carmignani (2009).

Conhecidos os parâmetros de resistência do solo, as características da vertente e acrescidos os parâmetros fixos quando a cobertura vegetal está presente, segundo Fiori e Carmignani (2009), o cálculo do Fator de Segurança (FS) é fornecido pela seguinte equação :

$$F_s = \frac{C_s + \left[(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \phi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

F_s = Fator de segurança;

C_s = Coesão do solo (kPa);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m^3);

h_w = Altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente (m);

h = Altura da zona de solo não saturado, perpendicular à vertente (m);

γ_a = Peso específico da água (kN/m³);

i = Inclinação da vertente (graus);

σ_a = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

ϕ = Ângulo de atrito interno do solo (graus)

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento na cobertura vegetal (kPa).

Os resultados obtidos na aplicação do modelo matemático na análise de estabilidade foram especializados mediante o emprego de técnicas SIG.

Os mapas de FS tem por base o conjunto de mapas temáticos gerados com os dados preliminares da área de estudo. As informações contidas nesses mapas são combinadas com os parâmetros geotécnicos dos solos obtidos das sondagens e das análises de amostras indeformadas, e inseridos no modelo matemático adotado.

Para gerar os mapas de índice de segurança variando o grau de saturação no solo, foram criados 6 cenários distintos, sendo o primeiro 100% seco ou 0% saturado, e o último 100% saturado. Conforme citado nos materiais e métodos, tratam-se de 3 cenários hipotéticos (0%, 70% e 100% saturado) visto que o primeiro é inconcebível para a área em questão e os demais são completamente improváveis dada a fragilidade da área; e 3 cenários plausíveis (10%, 30% e 50%). É importante salientar que os episódios de escorregamentos registrados no Paraná em março de 2011, ocorreram com um cenário de saturação próxima a 30%, esse índice de saturação foi verificado através da leitura e interpretação de dados de piezômetros e pluviógrafos instalados nas áreas afetadas pelos eventos pluviais extremos deste ano e foram apresentados no relatório interno do Projeto Mapeamento geológico-geotécnico da porção leste da Serra do Mar do Estado do Paraná, desenvolvido pelos parceiros MINEROPAR, Defesa Civil-PR e Laboratório de pesquisas aplicadas a Geomorfologia e Geotecnologias - UFPR (Silveira. *et al*, 2011).

Os mapas apresentados estão inseridos na faixa de domínio (200 m de cada lado da rodovia), e utilizam a restituição fotogramétrica 1:1.000 (2008). A validação desses mapas foi feita através da comparação dos resultados com o inventário de escorregamentos e cicatrizes da área.

Para os cálculos do FS, a ferramenta utilizada foi o *Raster Calculator* presente no *software* ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012). Os mapas gerados contêm 5 classes quantitativas, onde cada pixel representa o resultado de uma equação.

Buscando uma melhor compreensão do produto final, essas classes foram readequadas e apresentadas de forma qualitativa (Tabela 5), o que culminou em um mapa espacializado de suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solo baseado nos cálculos desta variável.

TABELA 5: Representação das classes do Fator de Segurança, de forma quantitativa e qualitativa. Para efeito visual comparativo, as classe estão nas cores com as quais são contempladas no mapa.

CLASSES	RELAÇÃO QUANTITATIVA	RELAÇÃO QUALITATIVA
1	< 1	Muito alta suscetibilidade a escorregamento translacional
2	1 - 1,5	Alta suscetibilidade a escorregamento translacional
3	1,5 - 1,5	Moderada suscetibilidade a escorregamento translacional
4	1,5 - 2	Baixa suscetibilidade a escorregamento translacional
5	> 2	Muito baixa suscetibilidade a escorregamento translacional

12 AMOSTRAGEM

12.1 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO – STANDART PENETRATION TEST (SPT)

O *Standart Penetration Test* (SPT) é reconhecidamente a mais econômica ferramenta de investigação de solo amplamente utilizada em todo o mundo. Essa sondagem permite a indicação da densidade de solos granulares, além da consistência de solos coesivos e de rochas brandas (Silva Vaz, 2014).

A análise através de SPT indica a resistência à penetração do solo, conhecida como o número N_{SPT} , ou simplesmente, como SPT do solo. Dessa maneira, os solos são classificados através da compactidade quando se trata de areia ou silte argiloso, ou pela consistência para o caso das argilas ou silte argiloso.

Devido à disponibilidade de dados relativos a sondagens realizadas na área de estudo e próximo a ela, os valores de resistência à penetração foram utilizados para obtenção de valores de ângulo de atrito e coesão, em função da profundidade e N_{SPT} . Esses valores foram utilizados para confirmar a veracidade dos dados laboratoriais.

Entre os ensaios laboratoriais de caracterização, encontram-se: análise granulométrica, teor de umidade e limites de *Atterberg* (limite de liquidez e limite de plasticidade). Para o conhecimento das propriedades físicas dos solos, foram realizados ensaios de cisalhamento direto, que forneceram os parâmetros de resistência, tais como: ângulo de atrito interno e coesão, além do ensaio para determinar os pesos específicos aparentes.

Para os ensaios de cisalhamento direto, foram coletadas amostras indeformadas. Os procedimentos de coleta adotados seguiram rigorosamente a norma NBR 9604 (ABNT, 1986), Figura 22.

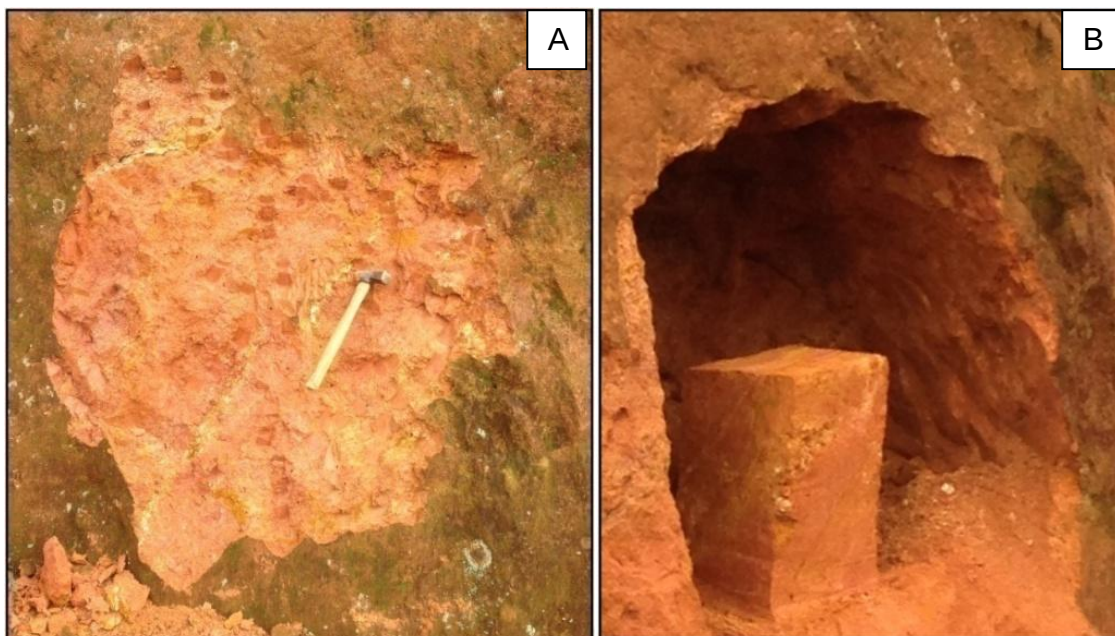


Figura 22: A) Solo residual de Migmatito Estromático; e B) detalhe da retirada da amostra indeformada na parede.

A profundidade da base dos blocos variou entre 1 e 1,5 metros. Essas variações ocorreram para que as amostras ficassem, o máximo possível, livres de raízes e pedregulhos; portanto a escavação procedeu até que o solo orgânico não estivesse mais presente.

A retirada das amostras indeformadas foi realizada através da abertura de trincheiras, onde blocos cúbicos com 30 cm de aresta foram moldados, cobertos com parafina e tecido. Por fim, foram identificados os topos dos blocos e acondicionados em caixas de transporte protegidos por serragem, (Figura 23).



Figura 23: Procedimento de coleta e armazenamento dos blocos de amostra de solo indeformada de Migmatito Oftálmico. Fonte: Silva Vaz (2014).

13 RESULTADOS E DISCUSÕES

Partindo dos objetivos a que se propôs este estudo, a apresentação dos resultados depende de uma construção de dados evolutiva. Portanto, esse capítulo não só apresenta os mapas gerados e as validações e constatações feitas à partir deles, como também expõe a importância de cada dado e os parâmetros escolhidos para confecção dos mapas.

13.1 PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS PRELIMINARES

Os parâmetros topográficos preliminares, são aqueles gerados com dados pré existentes em relação a área de estudo, ou extraídos da base mediante pequenos ajustes topológicos.

13.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO - MDE

Na geomorfometria, a superfície do terreno é representada por meio de modelos digitais de elevação (MDE's), onde informações podem ser extraídas a partir da representação contínua das características morfológicas da paisagem (Wood, 2009).

Geralmente são utilizados modelos digitais estruturados na forma de grades regulares retangulares, composta por uma matriz com valores de elevação da superfície do terreno. A estrutura de grade possibilita o emprego de cálculos de funções polinomiais entre o valor local e de sua vizinhança, sendo extraídos vários dados que são comumente designados de atributos topográficos e podem ser classificados como: primários - extraídos diretamente do modelo digital de elevação, e secundários - gerados a partir da combinação de atributos primários. Porém, os atributos topográficos apresentam limitações e nem sempre trazem informações fidedignas do terreno, em detrimentos de um conjunto de fatores de interferência.

A resolução horizontal e vertical dos dados de elevação, utilizados para retratar uma superfície de terreno, têm influência significativa no detalhamento e na precisão das representações. Visando minimizar esta interferência, foram gerados 2 modelos digitais do terreno (MDTs) em escalas diferentes.

A representação digital da superfície ou MDT (modelo digital de terreno), consiste na representação em SIG de uma seção da superfície terrestre, dada por uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas (x,y) e um valor de atribuído de pixel, correspondente à elevação (z). A escolha do valor que será atribuído ao pixel é feita através de cálculos determinísticos que consideram a resolução compatível com a base topográfica do modelo.

O primeiro modelo teve como base o mapeamento planialtimétrico elaborado pelo Programa de Proteção da Floresta Atlântica - Paraná (PRÓ-ATLÂNTICA) do Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG), que tem abrangência correspondente a área de ocorrência fitogeográfica da Floresta Ombrófila Densa, na escala 1:25.000. Esse modelo foi aplicado para a área total (o retângulo que contem o polígono limitante da área de estudo).

O segundo modelo foi elaborado com base na restituição fotogramétrica da faixa de domínio da Rodovia Prestes Maia (BR-376) sob concessão da Autopista Litoral Sul, na escala 1:1.000 referente ao vôle realizado em 2008 pela empresa Engefoto. Esse modelo foi aplicado para a área de estudo propriamente dita, visto que a restituição contempla apenas a faixa de domínio que ladeia as pistas da BR-376.

- CONFEÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO

Os MDTs foram processados no *software* ArcGIS versão 10.1 (ESRI, 2012), com algoritmo ANUDEM (*Topo To Raster*), que consiste em estimar os valores de cota de cada ponto da grade a partir de um conjunto de amostras de entrada que podem ser regularmente ou irregularmente espaçadas, tendo os vértices dos retângulos estimados a partir das amostras com relações topológicas explícitas entre os mesmos (Felgueiras, 1998). O interpolador *Topo to Raster* difere-se de outros métodos de interpolação, por gerar MDT's hidrologicamente corretos e com grade regular que possibilita a estimação de inúmeras variáveis do terreno como declividade, relevo sombreado e curvatura de vertentes.

Para a definição da resolução espacial das bases cartográficas foi utilizado como critério a acurácia, conforme as determinações das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (Decreto nº 89.817/1984), que coloca em seu artigo 9º que as cartas são classificadas nas Classes A, B e C, segundo sua exatidão, onde o erro-padrão correspondente é dado pelo intervalo entre 0,5 mm e 0,3 mm da escala da carta na Classe A, 0,8 mm à 0,5 mm na Classe B, e 1,0

mm à 0,6 mm na Classe C. Como os dados da bases cartográfica referentes a restituição fotogramétrica são bastante detalhados, possibilitaram uma resolução maior (pixel 1m). Já para a base cartográfica na escala 1:25.000, foi utilizado o pixel com resolução de 10 m, definido a partir do método proposto por Hengl (2005), para a escolha do tamanho de pixel que melhor se adéqua ao modelo, equação (5).

$$p \leq \frac{A}{2 \cdot \sum l} \quad \text{Equação 5}$$

Onde A é a área do recorte e $\sum l$ o comprimento da somatória das curvas de nível. Este método é baseado nas características e curvas do terreno para indicar a resolução do pixel.

O resultado dos MDT's utilizando as duas bases topográficas podem ser observados nas Figura 24. O primeiro mapa representa a área total, classificado em 10 classes de elevação, a maior cota registrada foi de 1.081m a sul e a menor elevação encontra-se a extremo sudeste com 497m. O segundo mapa com apenas 8 classes representa a área de estudo, nessa área a maior cota registrada foi de 851m, para que não houvesse erro de omissão foi criada a classe (> 850), ainda que não tenha representatividade no mapa.

Comparando os dois modelos gerados, é possível concluir que para as menores altitudes os modelos se apresentam condizentes mesmo com a diferença considerável de resolução espacial. Para as porções de altitudes medianas, que são as mais representativas no polígono limitante da área de estudo, o modelo com resolução de 1 metro mostrou-se bem mais preciso.

O comentário anterior pode ser aplicado para os demais mapas temáticos preliminares obtidos neste trabalho, declividade e curvatura.

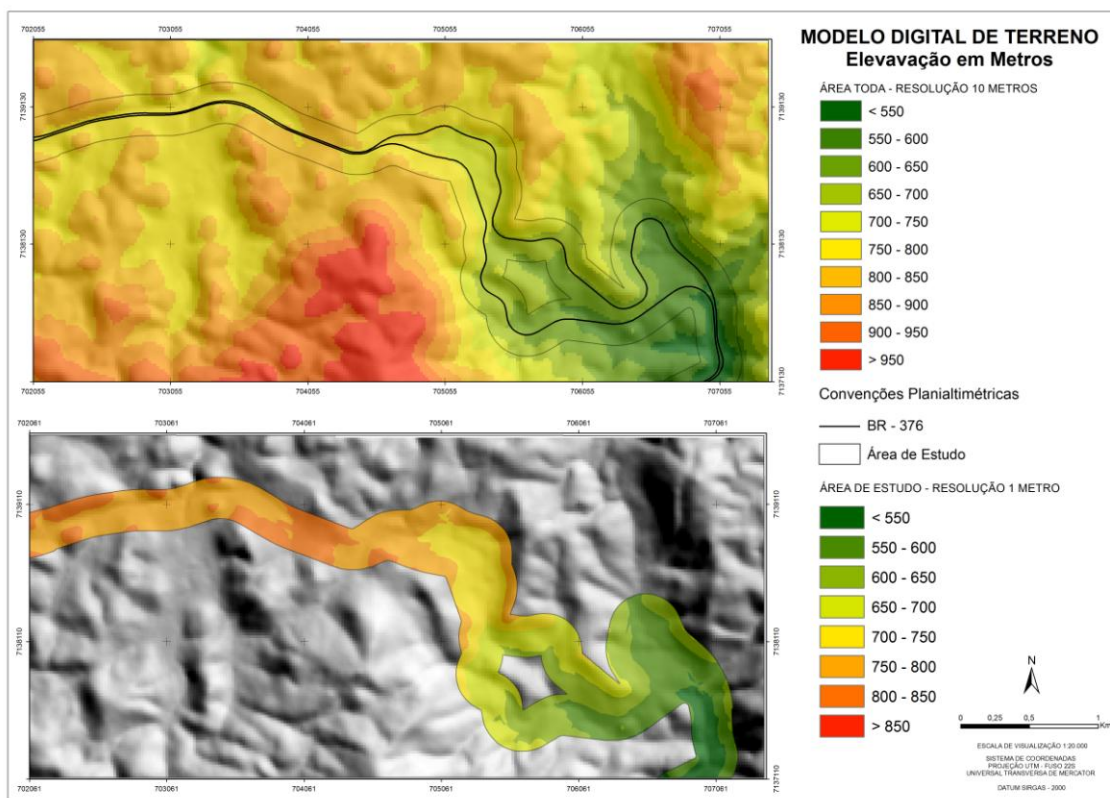


Figura 24: Modelo digital de terreno, classificado segundo a elevação. As cores mais quentes (vermelho) representam as maiores altitudes da área, e as cores mais frias (verde escuro) as menores cotas registradas.

13.1.2 CURVATURA DE VERTENTES

A curvatura de uma vertente representa o grau de concavidade ou convexidade da mesma, longitudinal e transversalmente. O mapa de curvatura foi gerado a partir da ferramenta “*Curvature*”, que permite com um único comando a obtenção do plano e perfil de curvatura para cada célula do grid. Este atributo topográfico caracteriza a forma da vertente, e é importante para determinação da concentração e mudanças na velocidade do fluxo de água, além de processos relacionados ao transporte de sedimentos vertente abaixo.

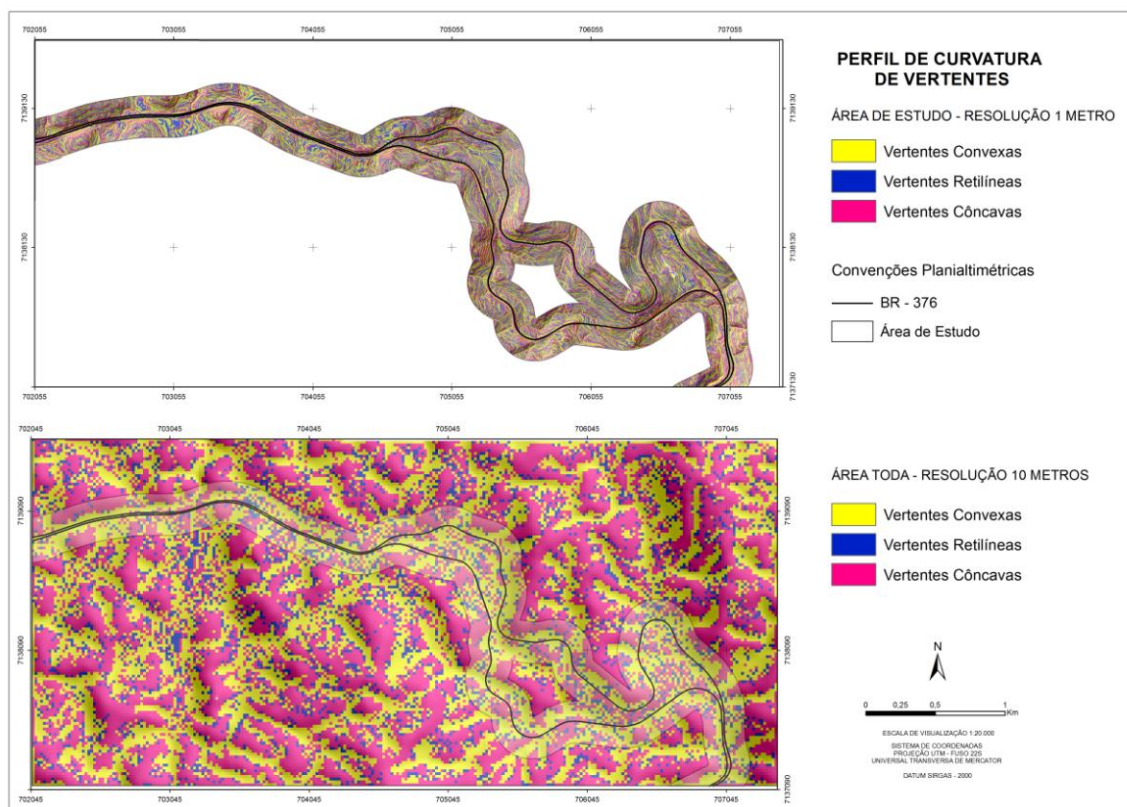


Figura 25: Perfil de Curvatura das vertentes. A imagem apresenta o relevo sombreado ao fundo com a sobreposição do perfil de curvatura com transparência de 30%, o que altera levemente a coloração indicada na legenda.

Cada curva de relevo positiva indica que a superfície do terreno está tendendo à convexidade e o fluxo desloca-se de forma divergente; uma curva negativa indica que a superfície tende à concavidade e o fluxo desloca-se de forma convergente, originando a concentração da umidade pela entrada de água; um valor igual a zero ou neutro indica que a superfície é retilínea (Figuras 25 e 26). O método de curvatura da superfície utilizado pelo ArcGIS é baseado nos estudos de Zevenbergen e Thorne (1987).

Alguns autores relacionam a curvatura das vertentes com a profundidade dos solos. Para Augusto Filho *et al.* (1988), as encostas retilíneas associam-se a solos mais rasos, enquanto as encostas côncavas são associadas a solos de espessura mediana e as encostas convexas associadas a solos mais espessos. Para a área de estudo não foi possível relacionar esse apontamento de forma direta, porém a análise do mapa de curvatura das

vertentes quando sobreposto pelo mapa geológico evidenciou a recorrência de diques de diabásio (básicos) associados a vertentes convexas ou convergentes, e diques de microgranito (ácidos) relacionados a vertentes côncavas ou divergentes (Figura 27).

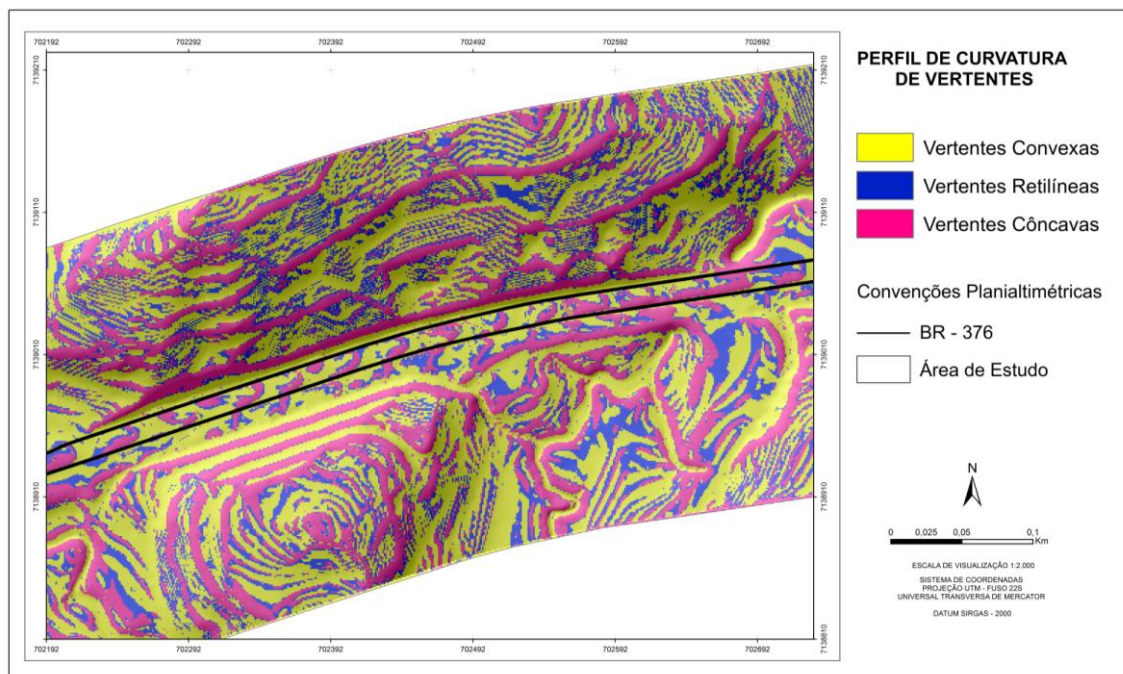


Figura 26: Perfil de curvatura das vertentes na porção oeste da área de estudo. A área representada encontra-se no domínio do Complexo Gnaissico-Migmatítico, mais precisamente dos Migmatitos Estromáticos. A imagem apresenta o relevo sombreado ao fundo com a sobreposição do perfil de curvatura com transparência de 30%, o que altera levemente a coloração indicada na legenda.

Embora ambas as rochas intrusivas tenham origem ígnea, a resistência ao intemperismo apresentada por elas é bem distinta quando nas mesmas condições ambientais. Sendo o diabásio uma rocha vulcânica máfica, é naturalmente mais suscetível as alterações intempéricas que o granito, uma rocha plutônica quartzo-feldspática ácida. Portanto, ainda que não possamos estimar a espessura dos solos associados a cada tipo de vertente, nas porções cortadas por diques, as evidências corroboram os estudos de Augusto Filho *et al.* (1988).

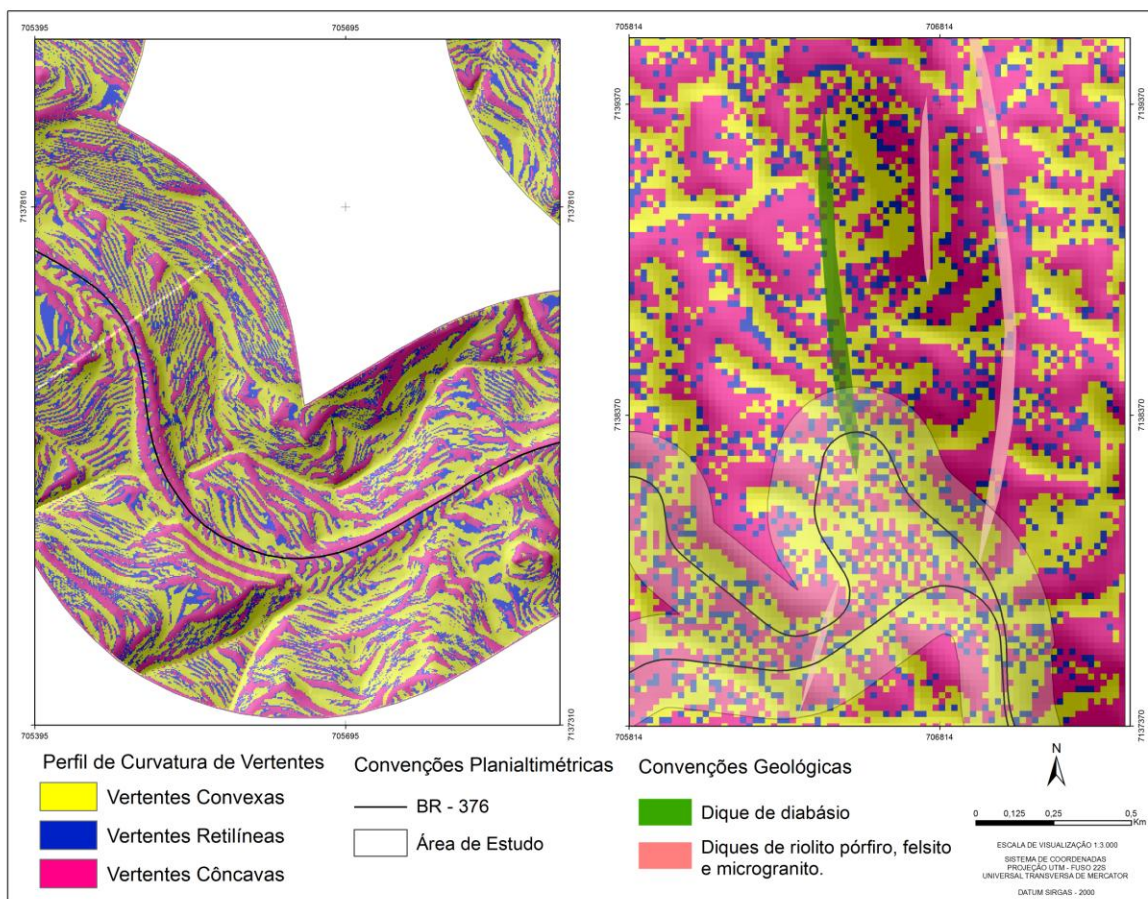


Figura 27: Mapa de curvatura de vertentes da porção leste da área sobreposto por diques. Em destaque, diques de diabásio (básicos) associados a vertentes convexas ou convergentes, e diques de microgranito (ácidos) relacionados a vertentes côncavas ou divergentes.

Analisando as classes do mapa de perfil de curvatura de vertentes, verifica-se que 40% das vertentes da área apresentam-se com forma convexa, 47 % forma côncava e 3% da área de forma retilínea.

13.1.3 DECLIVIDADE

Numa análise de suscetibilidade de vertentes um dos primeiros parâmetros considerados é a declividade. A declividade é o parâmetro físico que

define a inclinação do terreno ou plano a ser analisado, em relação a horizontal, e pode ser expressa em grau ou porcentagem.

O mapa da declividade da área de estudo foi elaborado utilizando a ferramenta "*Slope*", e classificado em seis classes de declividade em porcentagem, seguindo a proposta de EMBRAPA (2006). Na Tabela 06 é apresentada a classificação do relevo de acordo com a declividade das vertentes, os valores das classes em porcentagem foram alterados para graus, na aplicação da equação do fator de segurança.

TABELA 06: Classificação do relevo de acordo com a declividade, adotando intervalos em graus segundo os intervalos da EMBRAPA para classificação de solos. Fonte: Millán Coy (2015) adaptado de EMBRAPA (2006).

CLASSES DE DECLIVIDADE		CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO
(%)	(°)	
0 - 3	0 - 1,35	PLANO
3 - 8	1,35 - 3,60	SUAVE ONDULADO
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

A análise dos mapas de declividade (Figura 28), permite concluir que os intervalos com maior ocorrência na área de estudo pertencem a 4ª classes, tanto em porcentagem (20 - 45%) quanto em grau (9 - 20,25°), embora a 5ª classe em ambos os mapas apresente grande importância na classificação do relevo. O relevo é portanto classificado como preferencialmente forte ondulado, e secundariamente montanhoso.

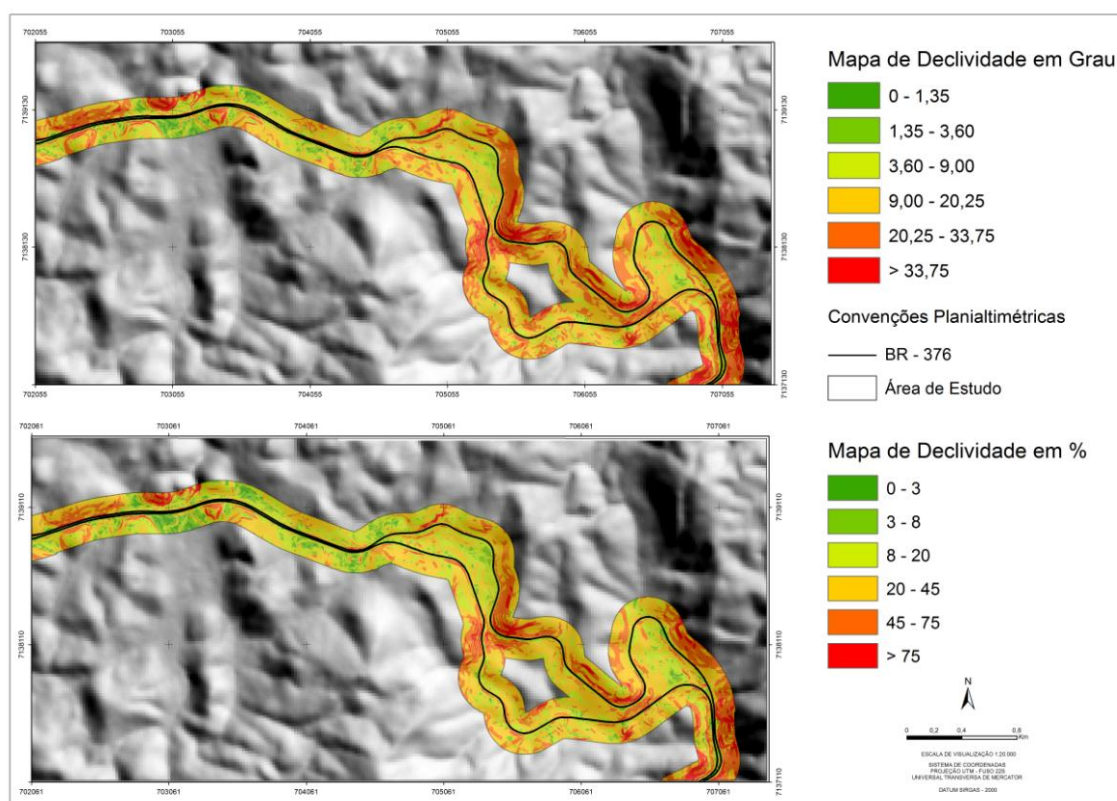


Figura 28: Mapas de declividade da área de estudo em grau e percentual. Ambos apresentados sobrepostos ao relevo sombreado para melhor visualização do declive.

Na porção sudeste do mapa de declividade em grau, é possível evidenciar a presença da 6ª classe ($> 33,75^\circ$) dentro da faixa de interferência direta na segurança das pistas, onde o declive registrado é de 61° , nesse ponto são recorrentes os escorregamentos translacionais. Analisando os relatórios de obras de estabilização da rodovia, fica evidente que os locais com valores de declividade superiores a 40° são aqueles que mais apresentam obras de contenção e remediação. Esses locais ainda que sejam classificados como tratados, não permitem a definição de “pontos seguros”, visto que as obras efetuadas apresentam em alguns casos registros de novos deslizamentos. São portanto pontos críticos que exigem monitoramento e constante manutenção, (Figuras 29 a 31).

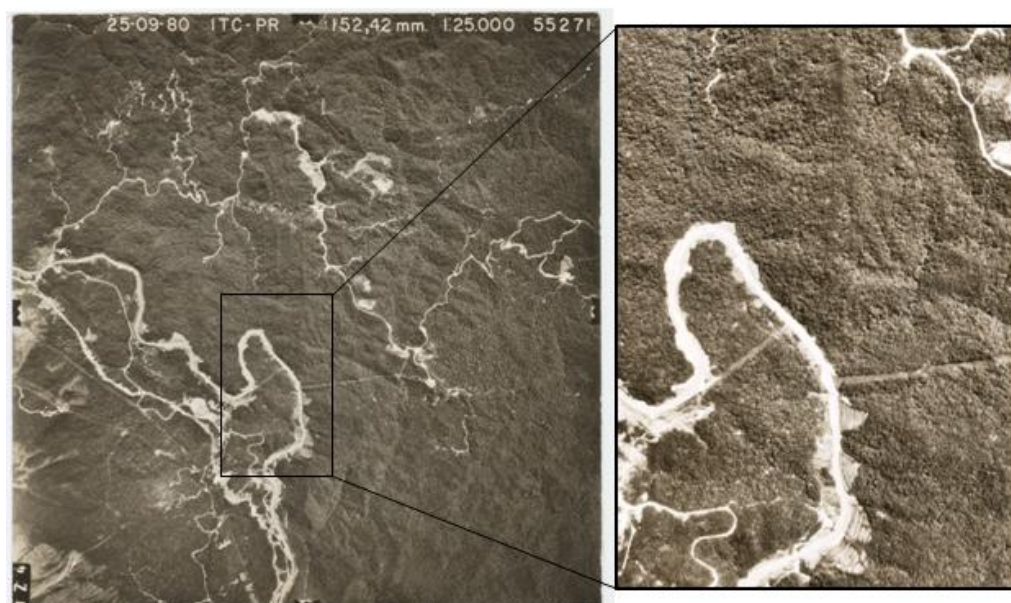


Figura 29: Fotografia aérea de Serra do Mar Paranaense, evidenciando a recorrência de movimentos de massa nas áreas próximas a BR-376 e as obras de retaludamento realizadas nestes locais. Fonte: ITCG, 1980.

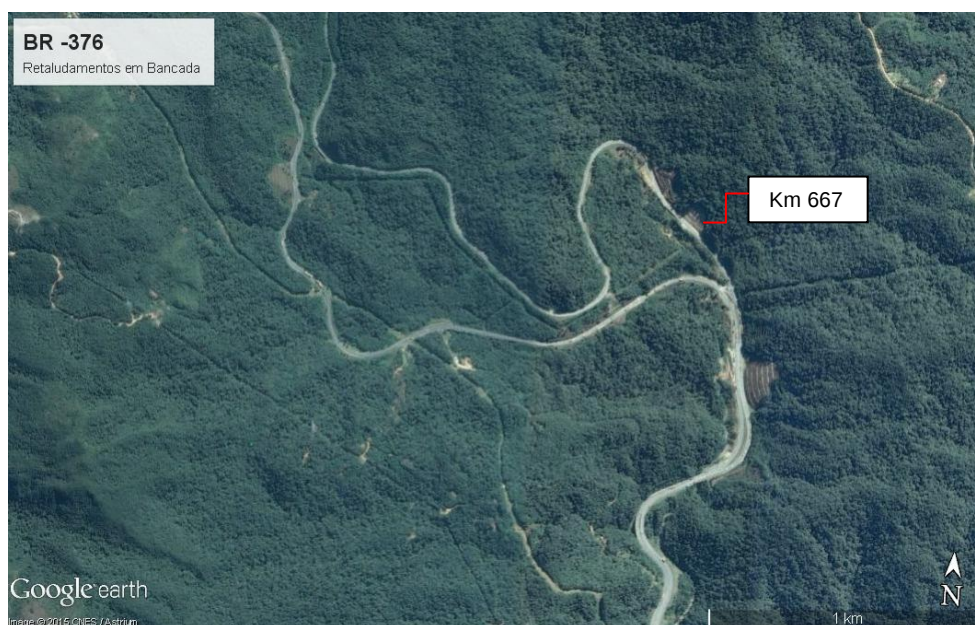


Figura 30: Imagem de satélite de 29/08/2013 da mesma área representada na figura anterior. Fonte: Google Earth PRO, agosto de 2015.



Figura 31: A e B) Fotografias do escorregamento ocorrido em 2014 no km 667 da BR-376, evidenciando a recorrência de escorregamentos neste ponto e as obras de estabilização realizadas. Fonte: (LAGEO, 2014). C) Imagem de maio de 2015, a encosta no km 667 da BR-376 foi novamente retaludada. Fonte: Google Earth, agosto de 2015.

13.2 MAPAS DE FATOR DE SEGURANÇA

Os parâmetros utilizados para a confecção dos mapas de FS foram diretamente obtidos dos ensaios de laboratório através de quinze (15) amostras indeformadas (Tabela 7). O peso específico natural do solo (γ_{nat}) foi de 18 g/cm³ e da água (γ_a) de 10 kN/m³, estes valores amostrais dos ensaios foram extrapolados para toda a área. 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, sendo os valores de σ_a iguais a 5,0kPa (Wolle e Pedrosa, 1981) e os valores de σ_{ve} iguais 1,0 kPa (Fendrich e Ferreira, 1995).

Para gerar um mapa de FS, o modelo é alimentado por dados únicos de inserção para cada litologia, logo faz-se necessário a escolha de um dado e este foi extrapolado para toda a porção representada. A escolha desses dados considerou duas linhas de pensamento, a primeira com critérios mais conservacionistas e a segunda balizada pelas características geotécnicas conhecidas da região; destas, a segunda se mostrou mais adequada para a proposta deste estudo.

A primeira linha de pensamento visa a utilização dos menores valores verificados em laboratório para cada parâmetro indispensável ao modelo, com intuito de minimizar os erros de omissão. Porém os dados laboratoriais apresentaram uma variação de valores incompatível com o conhecimento geotécnico da área de estudo. São dados pontuais observados em amostras retiradas muito próximas à superfície, logo, não refletem as características dos solos a ponto de representarem a área como um todo. A resposta do modelo quando aplicados os valores laboratoriais mínimos, foi considerada improvável, visto que num cenário hipotético de 0% de saturação de solo, a área de estudo apresentou alta suscetibilidade a escorregamentos, inviabilizando a utilização dos mapas de FS para qualificação de vertentes quanto a suscetibilidade a esses movimentos de massa.

Já a segunda linha de pensamento toma por base as médias dos valores apresentados nas análises laboratoriais, (Tabela 07). Quando se optou pela utilização desses dados, foram consideradas as possibilidades de omissão, porém os resultados apresentados para as 3 litologias presentes na área de estudo se mostraram satisfatórios e condizentes com o registro histórico de escorregamentos e cicatrizes. A validação desses mapas se deu pela análise de fotografias aéreas, imagens de satélite e campanhas de campo.

TABELA 07: Parâmetros físicos por litotipo utilizados na aplicação do método do Fator de Segurança.

SOLO	N° DE AMOSTRAS	C_s Coesão	ϕ ° Atrito Interno	Z Espessura do solo	(σa) Peso das árvores	σ_{ve} Força no vento
Migmatito Estromático	4	5	26	4m	3,0KPa	1,0KPa
Migmatito Oftálmico	6	6	32	3m	3,0KPa	1,0KPa
Granito Morro Redondo	5	15	29	2m	3,0KPa	1,0KPa

13.2.1 CONFECÇÃO DOS MAPAS DE FS

Para os cálculos do FS a ferramenta utilizada foi a álgebra de mapas, mais precisamente o “*Raster Calculator*” presente no software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012), aplicando a equação proposta por Fiori e Carmignani 2009. A fórmula do FS (equação 4) foi adequada a linguagem escrita da ferramenta álgebra de mapas, resultando na equação 06:

$$F_s = \frac{C_s + \left[\left(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \phi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad \text{Equação 04}$$

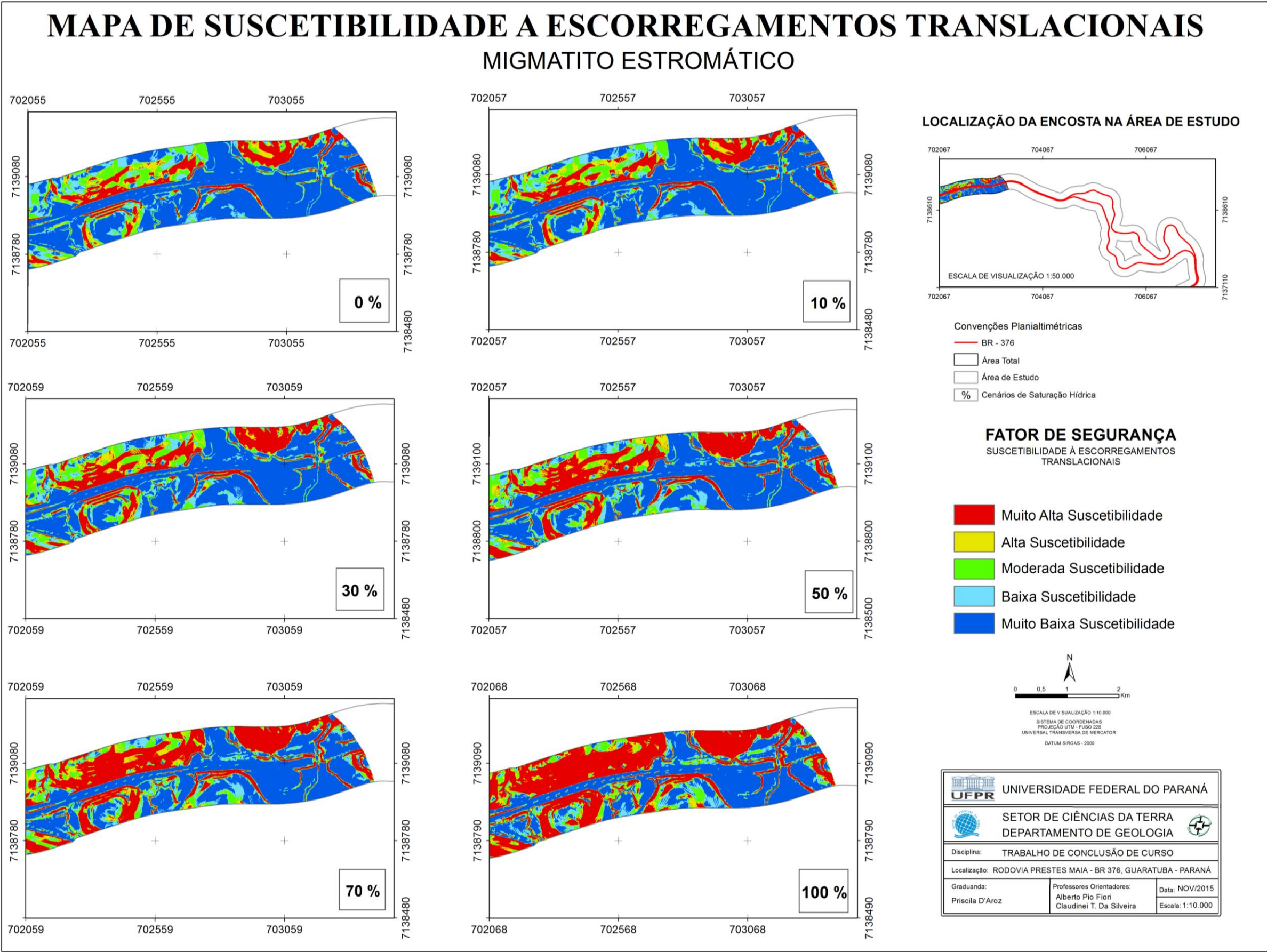
Equação 06:

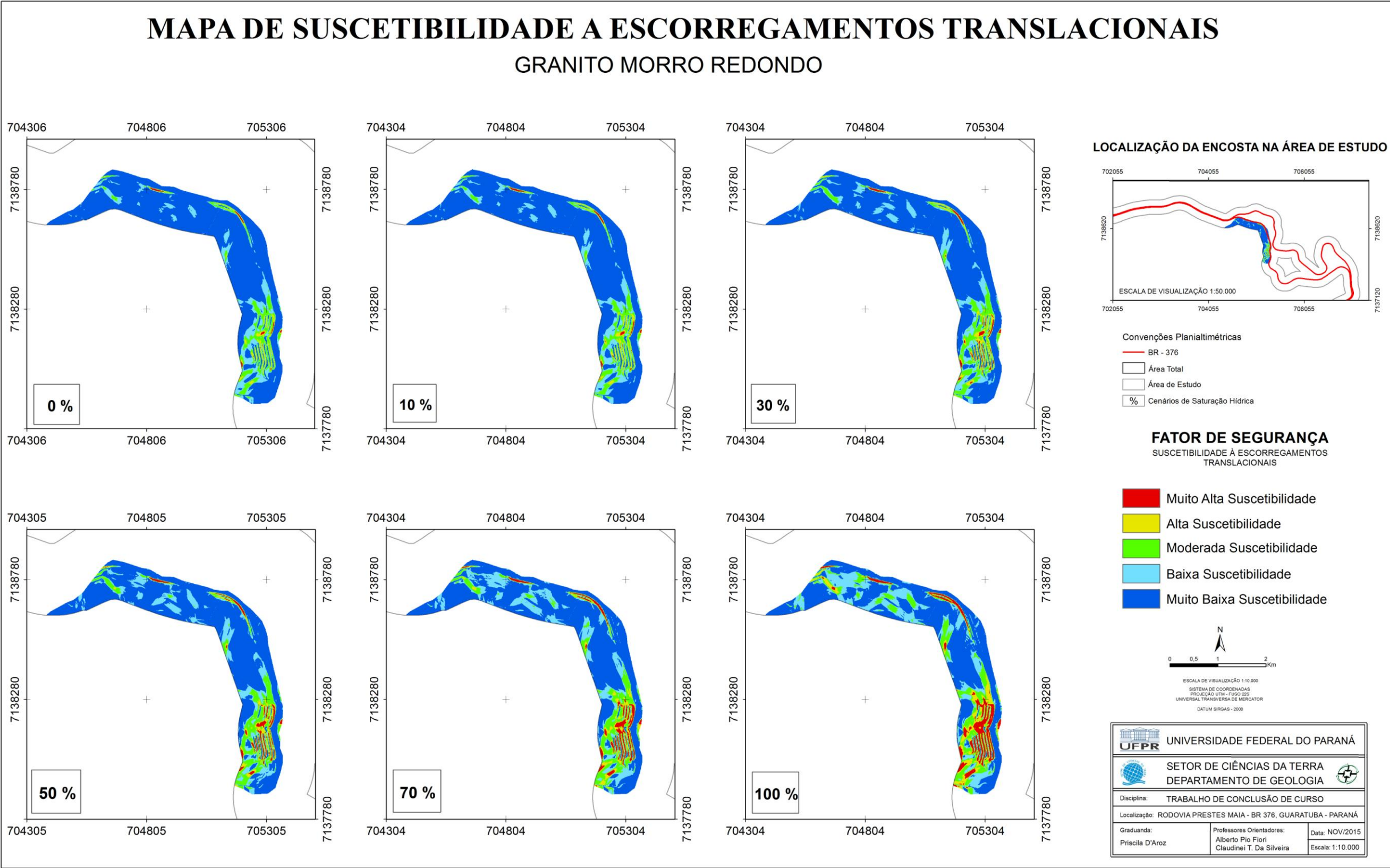
$$F_s = ("coesão" + ("gamanat - 1) * "espessura" * \cos("inclinação" * (\text{math.pi} / 180.0)) + \sigma_a * \cos("inclinação" * (\text{math.pi} / 180.0))) * \tan("phi" * (\text{math.pi} / 180.0)) / ((\text{"espessura"} * \text{"gamanat"} + \sigma_a) * \sin("inclinação" * (\text{math.pi} / 180.0)) + \sigma_{ve})$$

Uma vez consideradas as variáveis atuantes no processo de estabilidade de vertentes e dos solos, foram simulados seis (06) cenários de saturação de solo (0, 10, 30, 50, 70 e 100%), e cada cenário culminou num mapa de suscetibilidade a escorregamento translacional (Figuras 32, 33 e 34 - imagens meramente representativas, os mapas em tamanho original estão disponíveis em anexo. Os mapas de FS em anexo estão dispostos em 4 pranchas, com 6 mapas cada, todos em escala 1:10000). Portanto foram gerados 06 mapas para cada uma das 3 litologias presentes na faixa de domínio das pistas e 06 mapas da área total, que permitem observar lado a lado a resposta de cada tipo de solo às mesmas condições de saturação hídrica (Figura 35). Optou-se por não apresentar mapas para os solos originados das intrusões ígneas por 3 razões: tratam-se de corpos pouco espessos e de difícil limitação

nas encostas; as amostras coletadas para ensaios laboratoriais não contemplaram essas litologias; e por fim, os diques presentes no mapa geológico são estruturas fotointerpretadas e as campanhas de validação do mapa final, não contemplaram todas as feições estruturais do mesmo.

A superfície total da área estudada é de $2,96 \text{ km}^2$. Desse montante, 81% (2.417 m^2) é coberto por migmatito oftálmico, 14% é coberto por migmatito estromático (399 m^2) e apenas 5% é coberto pelo Granito Morro Redondo (144 m^2).





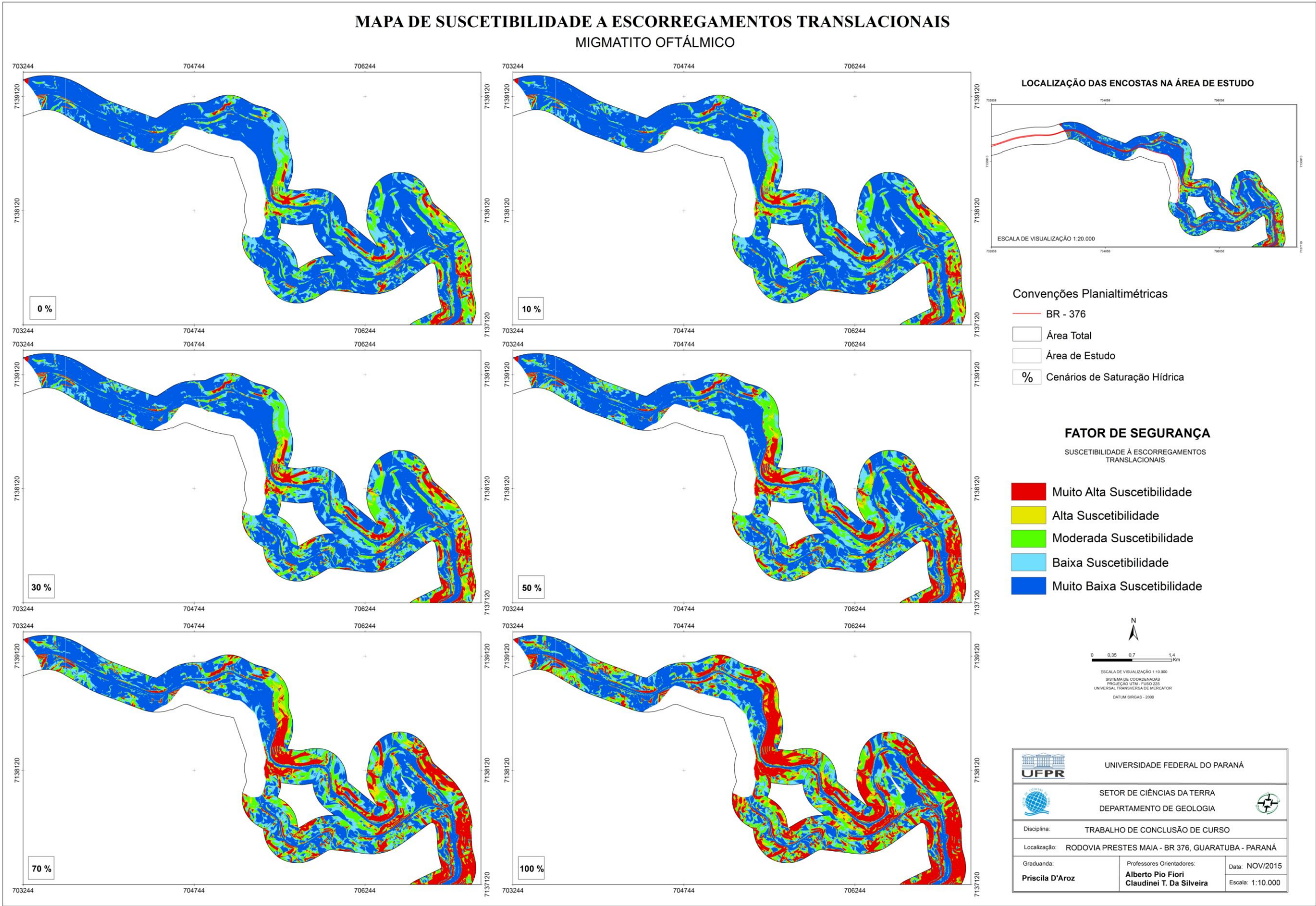


Figura 34: Mapas de Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais em vertentes com solo de origem migmatítica (Migmatito oftálmico com paleossoma de biotita gnaiss).

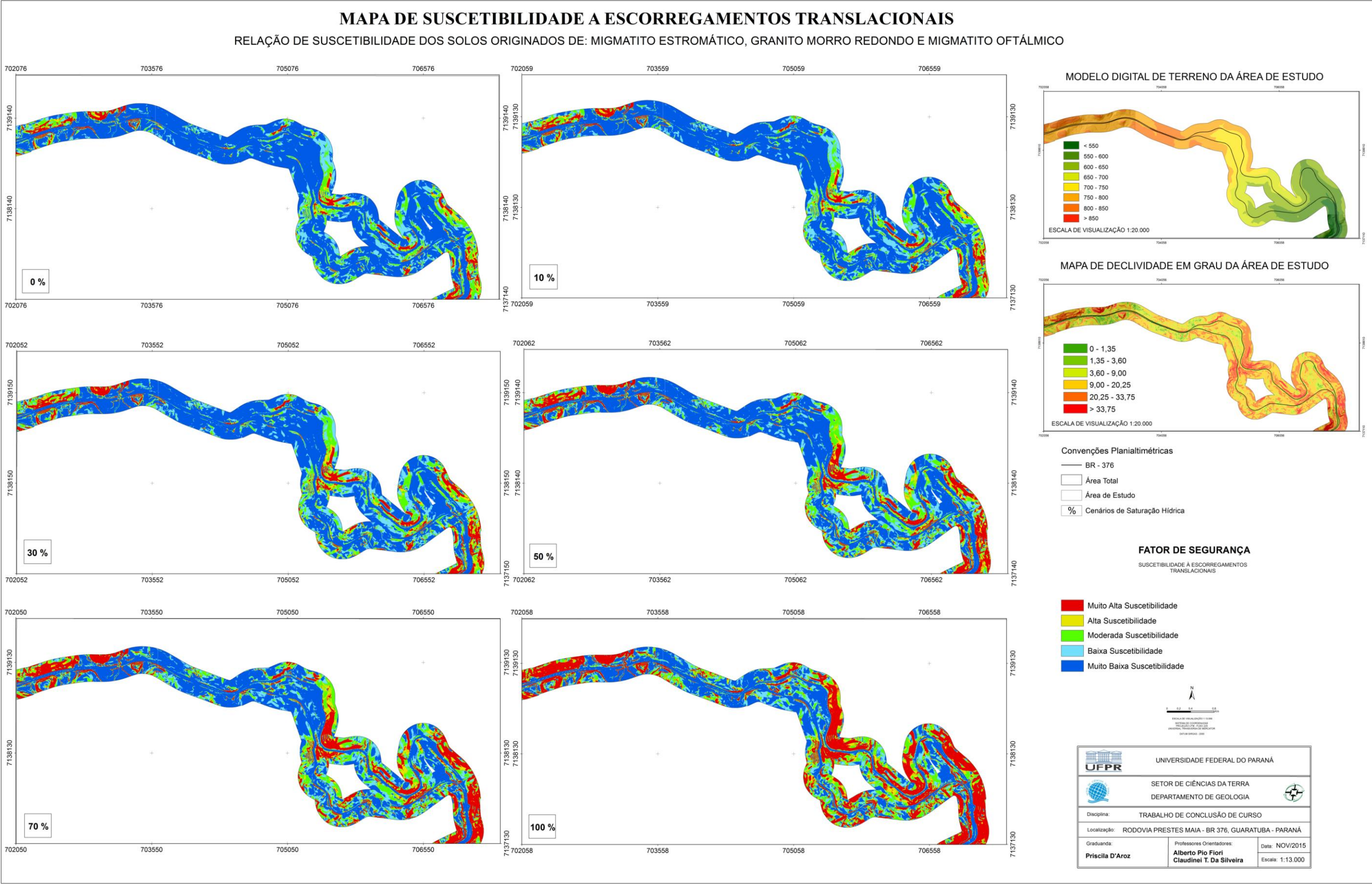


Figura 35: Relação entre os mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais. As três litologias encontram-se representadas em cada mapa, sendo um para cada cenário.

Analisando os contatos litológicos entre os migmatitos ou entre o granito e o migmatito oftálmico (Figura 36), é notável que os solos oriundos de migmatitos são mais suscetível a escorregamentos translacionais nos 6 cenários propostos para este estudo, sendo o solo relacionado ao migmatito estromático, levemente mais instável que o outro.

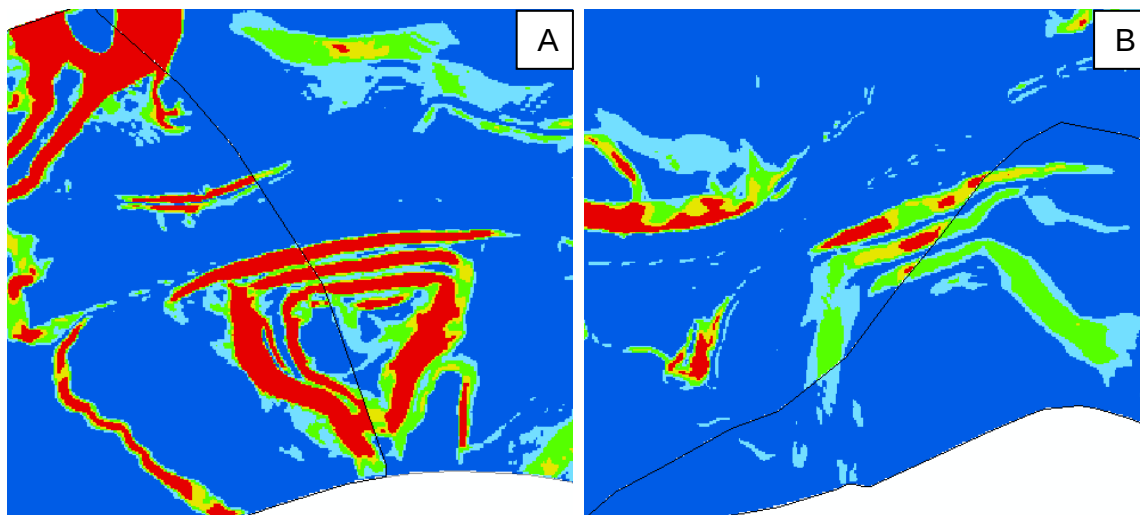


Figura 36: Imagens da relação entre as litologias da área de estudo no cenário de 30% de saturação hídrica. A) Detalhe do contato entre o migmatito estromático a esquerda e o migmatito oftálmico a direita, ressaltando a tendência de maior estabilidade do solo a direita. B) Detalhe do contato entre o granito Morro Redondo na parte inferior e do migmatito oftálmico na porção superior da imagem, segundo os parâmetros adotados o solo de origem granítica apresenta menor suscetibilidade a movimentos de massa.

Aparentemente os migmatitos são rochas de composição mineralógica semelhante, exceto pela presença mais significativa de anfibólio nos migmatitos estromáticos. Já a estrutura das rochas é bem distinta, os migmatitos estromáticos apresentam veios alongados de material neossômico paralelos ao bandamento estrutural (Figura 37); enquanto os migmatitos oftálmicos são caracterizados pela presença de porfiroblastos de feldspato potássico neossômicos dispersos por todo o paleossoma (Figura 38).

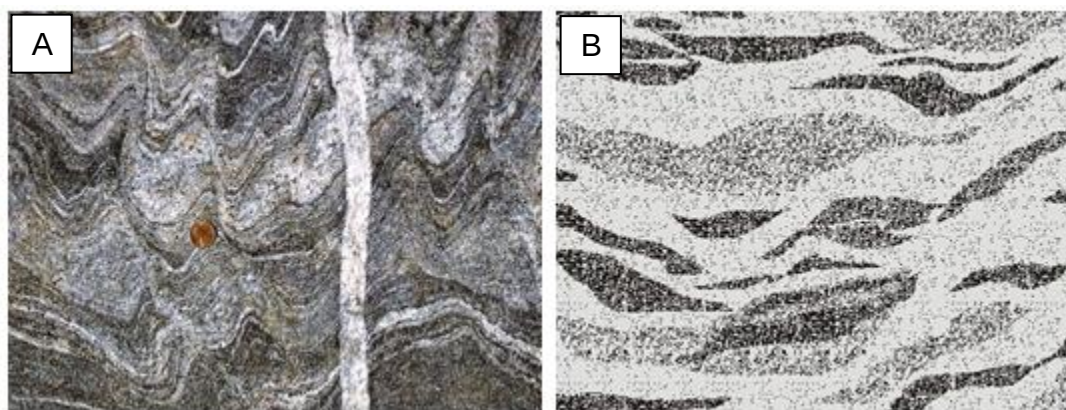


Figura 37: A) Imagem representativa de um migmatito estromático. B) Croqui representativo da estrutura bandada, detalhando os veios de material fundido ou neossômico paralelos ao bandamento.

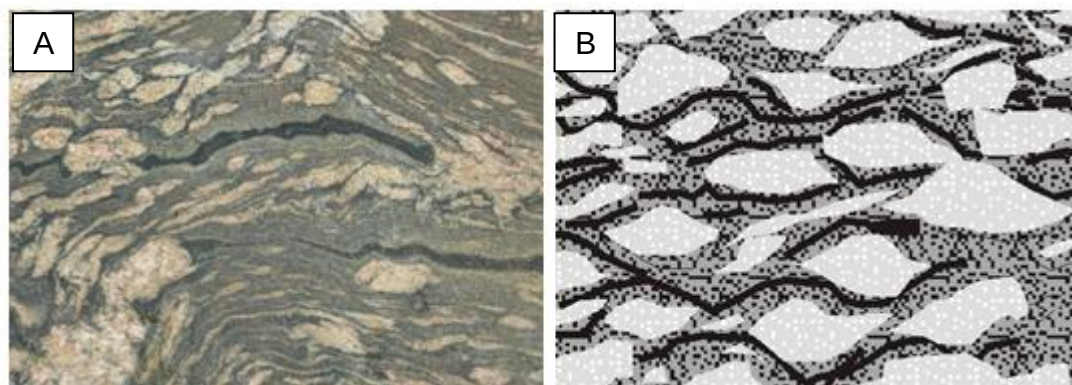


Figura 38: A) Imagem representativa de um migmatito oftálmico. B) Croqui representativo da estrutura ocelar (formato de olhos) dos cristas de feldspato alcalino.

Quando analisadas as litologias de forma isolada, a porção compreendida pelos migmatitos oftálmicos apresenta maior suscetibilidade ou maior instabilidade de encostas. A área mais suscetível a movimentos de massa nesse contexto litológico é a região leste/sudeste da área, alguns pontos encontram-se instáveis mesmo no cenário de menor saturação (0%).

Sabe-se que o cenário 1 (0%), não se verifica nessa porção do estado do Paraná, pois a Serra do Mar registra índices de umidade superiores a 70%, mas, para o modelo apresentado neste trabalho, o cenário 100% seco é fundamental, já que os mapas gerados para esse percentual de saturação hídrica evidenciam os outros agentes atuantes na instabilidade das vertentes.

No caso da porção leste da área, o principal fator determinante da instabilidade é a declividade (Figura 39).

O objetivo do modelo de Fator de Segurança é representar a área como um todo quanto a vulnerabilidade de suas vertentes à movimentos de massa, essa representação se dá por classes de estabilidade. Como o modelo considera cada vertente como um plano, a passagem entre as classes é transicional.

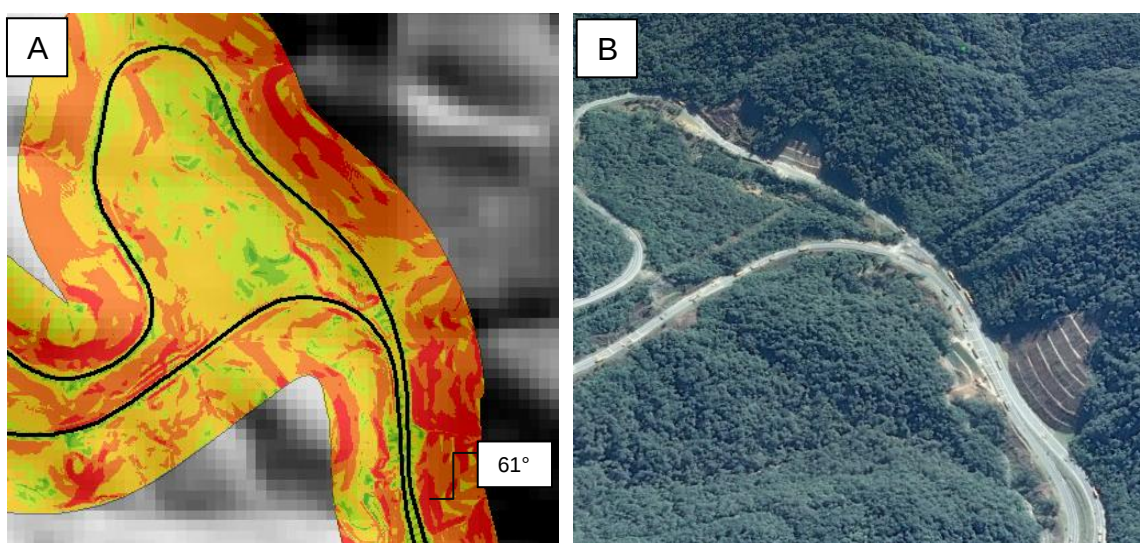


Figura 39: A) Mapa de declividade em graus. O ponto destacado a sudeste apresenta inclinação de 61° e é considerado instável no cenário de 0% de saturação. B) Detalhe do ponto de instabilidade destacado na imagem A, onde é possível verificar a inclinação do talude e um retaludamento em bancada realizado no local.

O anexo 4 apresenta o mapa final de suscetibilidade a escorregamentos para a faixa de domínio que interfere diretamente na segurança das pistas da BR-376. Assim como as demais pranchas em anexo, esta contém os 6 cenários propostos de saturação hídrica do solo, formados pela junção dos mapas anteriores.

O mapa final representa a relação entre os solos da área. O objetivo deste mapa é contrastar a reação de cada solo num mesmo cenário, e como não foi gerado por um único parâmetro de entrada, os contatos entre os solos são abruptos.

Optou-se por não gerar um mapa com parâmetros generalizados para a área total devido ao interesse do projeto de buscar uma relação entre o comportamento de cada solo segundo a origem (rocha matriz).

13.2.2 VALIDAÇÃO DOS MAPAS

Nessa última etapa do processo, os mapas gerados foram validados através de fotografias aéreas, imagens de satélite e campanhas de campo. O modelo representa a realidade do terreno como resposta aos dados inseridos na equação do fator de segurança, mas o resultado quando apresentado em classes qualitativas de suscetibilidade à escorregamentos translacionais da encosta pode ser irreal. Isso acontece porque os atributos utilizados para indicação de suscetibilidade são vistos como um todo e não de forma isolada; porém alguns deles podem se sobrepor ao modelo como é o caso da declividade.

Num corte de estrada com afloramento rochoso em ambos os lados da pista formando um corredor de lados quase verticalizados, o fator de segurança indicará que a área é altamente suscetível a escorregamentos devido à declividade altíssima, quando na realidade a área é “estável”. Outro caso comum são as áreas que apresentam obras de contenção ou estabilização (figuras 40 e 41), estas deverão conter a indicação de “áreas tratadas”.

A validação dos mapas finais é fundamental para a qualidade do trabalho, exatamente porque muitos dos pontos vulneráveis para o modelo devem conter uma indicação de estabilidade aparente.



Figura 40: Encosta nas adjacências da área de estudo classificada pelo FS como de muito alta suscetibilidade à escorregamentos. Área tratada, com retaludamento em bancadas coberto por injeção de concreto e com drenos de PVC instalados a cada 1 metro. Área tratada, aparentemente estável.



Figura 41: Encosta nas adjacências da área de estudo classificada pelo FS como de alta suscetibilidade à escorregamentos. Área tratada, com retaludamento em bancadas coberto malha de metal grampeada e sobreposta por malha sintética e gramíneas. Nos andares das bancadas foram instaladas canaletas de concreto para escoamento da água. Área tratada, aparentemente estável.

14. CONCLUSÃO

O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitiu a geração de um banco de dados georreferenciados, com o qual foi possível caracterizar os atributos presentes na deflagração dos escorregamentos, como a declividade das vertentes e a espessura do solo. Este banco permitiu ainda a aplicação direta dos parâmetros físicos da área, através do modelo matemático para o cálculo do fator de segurança.

A construção de um Modelo Digital do Terreno confiável permitiu a construção de mapas temáticos (declividade, curvatura das vertentes e relevo sombreado) consistentes com as características topográficas da região em estudo, minimizando os erros analíticos de suscetibilidade.

A validação dos mapas gerados, deu-se de forma satisfatória tanto em campo como em fotografias aéreas e o modelo é condizente com a ocorrência de cicatrizes de escorregamentos translacionais de solo.

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.

As vertentes convexas, apresentam-se mais instáveis que as côncavas e retilíneas. Os escorregamentos ocorreram principalmente nas encostas de perfil de curvatura convexas, com valores da declividade superior a $20,25^\circ$, muitas vezes relacionados aos diques básicos.

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

Outro parâmetro constatado como relevante nesse estudo, foi a declividade quando associada à presença de vegetação. Em área com inclinação de vertentes superiores a 45° , o peso da vegetação atua como facilitador do movimento. Quando a inclinação é inferior a 45° , a vegetação tende a estabilizar a vertente em baixa saturação; já em alta saturação, a vegetação não apresentou relevância significativa.

Os dados finais mostraram que apesar de existir uma tendência linear entre as duas escalas trabalhadas, a escala 1:25.000 tende a generalizar mais os valores dos parâmetros estudados, em comparação com a escala 1:1.000 que mostra valores mais detalhados no que diz respeito a precisão de ocorrência de cada parâmetro.

A metodologia empregada na aplicação do modelo matemático para o cálculo de Fator de Segurança apoiado no uso de SIG, mostrou-se satisfatória na identificação das áreas mais suscetíveis à ocorrência de escorregamentos translacionais, apresentando uma excelente correspondência com os eventos desse tipo, ocorridos na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, I. H. M.; BASSAM, S.; MOHANNED, S. A.; MUFID, S. H. "Mapping of landslide hazard zones in Jordan using remote sensing and SIG." Journal of Urban Planning and Development. March, 2001.

AHRENDT, A. Movimentos de Massa Gravitacionais – Proposta de um Sistema de Previsão: Aplicação na Área Urbana de Campos do Jordão - SP. Tese (Doutorado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, UFSCar, 2005

ALMEIDA, F.F.M, CARNEIRO, C.R, Origem e evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências 28(2), jun, p. 135-150, 1998.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 6459: Solo – Determinação de Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 6508: Solo – Peso Específico dos Sólidos. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 7180: Solo – Determinação de Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 6457: Solo – Preparação para Amostras de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - Associação Brasileira De Norma Técnicas. NBR 6508: Solos – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1995.

ANTT. Agência Nacional De Transportes Terrestres. Relatório Técnico do Projeto de Estabilização de Taludes, trechos 659+270, 659+300, 660+570 e 660+400., Curitiba. (Relatório inédito), 2012.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. Estabilidade de Taludes. In. Oliveira, A.M.S. e Brito.; S.N.A. (eds) Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo: 243-269, 1998.

BIGARELL J.; PASSOS, E.; HERRMANN, M.L.P.; SANTOS, G.F.; MENDONÇA, M.; SALAMUNI,E, SUGUIO,K, Estrutura e origem das Paisagens tropicais e subtropicais, vol(3). Editora da UFSC, p 552, Florianópolis, 2003.

BISPO, P. C.; ALMEIDA, C. M.; VALERIANO, M. M.; MEDEIROS, J. S.; CREPANI, E. 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, 2011.

BONUCCELLI, T. J. Estudo dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto, MG a escala 1:10.000. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 497 p, 1999.

BORCHARDT, N. Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade de encostas do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2005.

BRASIL, Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 – Normas Técnicas da Cartografia Nacional, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil, 1984.

BURTON, A.; BATHURST, J. C. Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale. Environmental Geology, v. 35, n. 2-3, p. 89-99, 1998.

CAPUTO, Homero P. Mecânica Dos Solos E Suas Aplicações. Volume 1, 6ª Edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 234p, 1988.

CORNFORTH, D.H. Landslides in Practice: Investigation Analysis and Remedial/Preventative Options in Soils. John Wiley e Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 596p, 2005.

CHORLEY,R.J.; SHUMM, S. A.; SUGDEN, D. E. Geomorphology.Cambridge: Methuen, 600 p, 1984.

DIKAU, R. Derivatites from detailed geoscientific maps usig computer methods.Zeitschrift fur Geomorphologic, v. 2, n. 80, p. 45-55, 1990.

DUNN, I. S.; ANDERSON, L. R.; KIEFER, F. W. Fundamentals of geotechnical analysis. New York: John Wiley & Sons, 414 p, 1980.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF, 2006.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro De Classificação De Solos. 3ª. Ed. – Rio de Janeiro, 2013.

ESRI. ArcGIS, versão 10.1. Environmental Systems Research Institute, 2012.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. 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, 1996.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica De Terreno. In. Câmara, G; Medeiros, J. S. (Org). Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ed. 2, p. 4-39, 1998. Disponível em: [Hhttp://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/4mnt.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/4mnt.pdf).

FIORI, A. P. E CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicação na estabilidade de taludes. 2ª edição revisada e ampliada. Editora da UFPR, Oficina de Textos, 2009.

FRENDRICH, R. & FERREIRA, M. A. Rosa de frequência dos ventos no Estado do Paraná. Revista acadêmica da PUC/PR, 11, p.49-57, 1995.

GOOGLE EARTH PRO. Imagens de satélite de agosto de 2013. (Acesso em 16 de novembro de 2015).

GOOGLE STREET VIEW. Imagens via satélite de maio de 2015. (Acesso em 16 de novembro de 2015).

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S.S. Aplicações dos Modelos de Elevação SRTM em Geomorfologia. Revista Geografia Acadêmica, v.2, n.2, p. 73-83, 2008.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Editora Edgard Blucher, 2ª ed. 194 p, 2006.

HENGL, T. Finding the right pixel size. Computers & Geosciences, v. 32, n. 9, p. 1283-1298, 2006.

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. Cartas Climáticas do Paraná – Classificação Climática – Segundo Köppen. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>>. (Acesso em 15 de novembro de 2015), 2013.

ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Cartas topográficas. Fotografias Aéreas da Serra do Mar Paranaense. Escala 1:25.000, Projeto Pró-Atlântica, 1980.

KELLER, E. Environmental Geology. 6th Ed. Ontario, 521p. USA, 1992.

KORUP, O. Large landslides and their effect on sediment flux in South Westland, New Zealand. Earth Surface Processes and Landforms, v. 30, n. 3, p. 305-323, 2005.

KOZCIAK, S. Análise da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi - Serra do Mar - Paraná. Curitiba,.Tese (Doutorado em Geologia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2005.

LEMES, M. R. T. Revisão dos Efeitos da Vegetação em Taludes. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2001.

LOOK, Burt. Handbook of geotechnical investigation and design tables. Taylor & Francis Group, 331p. London, UK, 2007.

MILLAN COY, Y. S. Avaliação da Suscetibilidade das Vertentes de um Trecho da BR-376, entre os Km 658+820m e 660+690m, PR. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, 2015.

MINEROPAR - Minerais do Paraná S/A. Mapa Geológico, Folha de Curitiba. Escala: 1:250.000, colorido. Paraná: MINEROPAR, 2005.

MINEROPAR - Minerais do Paraná S/A. Mapa Geomorfológico, Folha de Curitiba. Escala: 1:250.000, Paraná: MINEROPAR, 2005.

MITCHELL, J. K; SOGA, K. Fundamentals Of Soil Behaviour. John Wiley & Sons, Inc. USA, 2005.

MURATORI, A.; TREIN, E.; FUCK, R. A. Folha geológica de Pedra Branca do Araraquara. Curitiba : Comissão Da Carta Geológica Do Paraná. Escala 1:70.000, 1969.

NUNES, F. G. Levantamento de áreas de riscos a partir da dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar no Paraná. Curitiba, Dissertação (Mestrado em Geologia) –Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2002.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução À Mecânica Dos Solos Dos Estados Críticos. 3ª. Ed. Terratek, 2007.

PINTO, C. S. Resistência Ao Cisalhamento Dos Solos. Editora do Grêmio Politécnico, São Paulo, 137p, 1983.

SAKELLARIOU, M.G.; FERENTINOU, M. (2001).SIG-Based Estimation of Slope Stability. Natural Hazards b Review. Vol. 2, no. 1, pp. 12-21 -Feb, 2001.

SANTOS, M. O espaço dividido: os dois circuitos da economia urbana dos países subdesenvolvidos. Editora da USP, São Paulo, 2008.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Mosaico de fotografias ortorretificadas em escala 1:60.000, 1996.

SEMA. Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná. Curitiba, Secretária do Estado do Meio Ambiente e dos recursos hídricos de Paraná, p.40, 2002.

SEMA. Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná – Cartas Pedra branca do Araraquara (MI-2858-3 SO), Usina Chaminé (MI-2858-3 NO), Postinho (MI -2857-4 SE) e Represa de Voçoroca (MI-2857-4 NE), escala 1:25.000 Curitiba, Secretária do Estado do Meio Ambiente e dos recursos hídricos de Paraná, 2002.

SESTINI, M.F. Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba, SP utilizando Imagens TM-Landsat e SIG.São José dos Campos. 140 p. (INPE-7511-TDI/724). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

SILVA VAZ, A. P. Estudo de Áreas Suscetíveis a Escorregamento em Sub-Bacia do Rio São João, BR376 entre os KM 665 E 668. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, 2014.

SILVEIRA, C. T. ; FRONZA, G. ; FERREIRA, A. M. ; SILVEIRA, R. M. P. ; MASSULINI, N. E. B. ; LEONARDI, T. M. H. . Mapeamento geológico-geotécnico da porção leste da Serra do Mar do Estado do Paraná. 2011.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L.J.C.; SIRTOLI, A. E.; DA SILVA, C. R. Pedometria Apoiada em Atributos Topográficos com Operações de Tabulação Cruzada por Álgebra de Mapas. *In: Revista Brasileira de Geomorfologia*. V. 13, nº 2, (Abr-Jun) p. 125-137, 2012. (a).

SOARES, P.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Not. Geomorfológicas*, Campinas, v.16, n.32, 71p, 1976.

STYCZEN, M. E.; MORGAN, R. P. C. Engineering properties of vegetation. Edited by Morgan, R. P. C. e Rickson, R. J. London: E & FN SPON, 274p. Cap. 2, p. 2 -58, 1995.

TERZAGHI, K. Mecanismo dos escorregamentos de terra. Instituto de pesquisas Tecnológicas de São Paulo, separata nº467, tradução de Ernesto picheler, 30p. Mechanism of landslides: in paige, S., Chairman, Applications or geology in engineering practice: Geol. Soc. America Berkey Volume, p. 83-123, 1950. 1953.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landslide Types and Processes. Fact Sheet 2004-3072. July 2004.

VARNES, D. J. Slope movements: types and processes – landslides analysis and control. Washington: National Academy of Sciences, p. 11-13, 1978.

VELOSO, A. Importância do Estudo das Vertentes. *GEOgraphia*, vol.4, n.8, 2002.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. *In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. da; CARDOSO, E. J. (Ed.) Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.4, p.145-192, 2005.

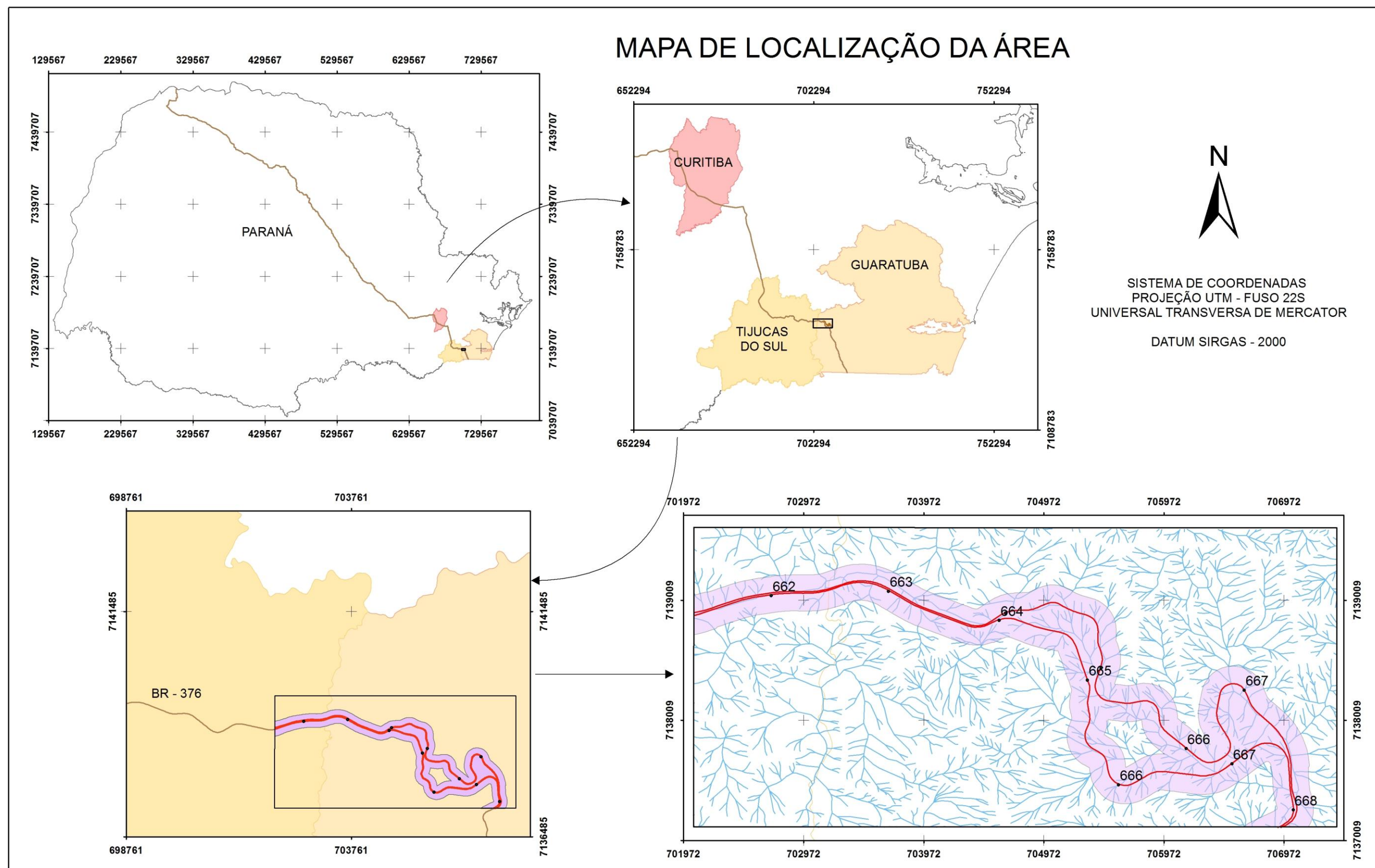
WOLLE, C. M.; PEDROSA, J. A. B. Horizontes de transição condicionam mecanismo de instabilização de encosta na Serra do Mar. *In: Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia*, 3, Itapema, SC. v.2, p. 121-135, 1981.

WOOD, J. Visualizing Geomorphometry: Lessons from Information Visualization. *Proceedings of Geomorphometry*, Zurich, Switzerland, p. 9-12, 2009.

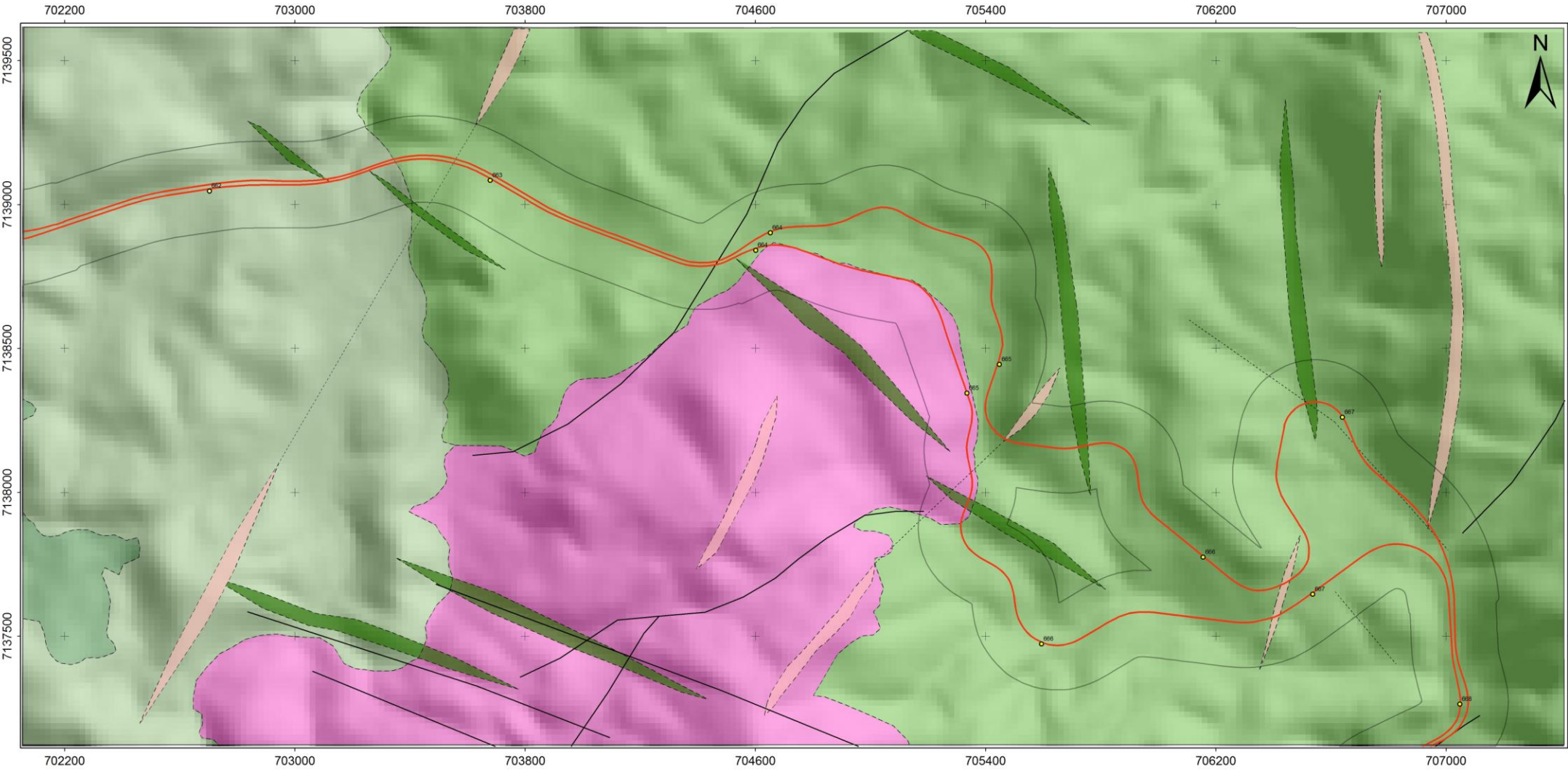
ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J.; GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A. B. Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamento de eventos perigosos e riscos associados. *Geociências*, v. 14, n.2, p.9-39, 1995.

APÊNDICES

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA



MAPA GEOLÓGICO DA RODOVIA PRESTES MAIA - GUARATUBA - PARANÁ



LEGENDA

Convenções Estratigráficas

- Dique de diabásio
- Diques de riolito pórfiro, felsito e microgranito.
- Granito Morro Redondo.
- Migmatitos Heterogêneo Indefinido
- Migmatito estromático com paleosoma de biotita-hornblenda gnaiss, mica-quartzo xisto, ultrabásito, metabásito e anfibolito.
- Migmatito oftálmico, com paleosoma de biotita gnaiss, biotita-hornblenda gnaiss e hornblenda gnaiss, localmente com quartzitos.

Convenções Geológicas

- Contatos Fotointerpretados
- Estruturas Rúpteis Definidas
- Estruturas Rúpteis Fotointerpretadas

Convenções Planialtimétricas

- Área de Estudo
- Rodovia Prestes Maia - BR 376
- Marco Quilométrico

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ		
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA		
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA		
Disciplina:	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	
Localização:	RODOVIA PRESTES MAIA - BR 376, GUARATUBA - PARANÁ	
Graduanda:	Professores Orientadores:	Data:
Priscila D'Aroz	Alberto Pio Fiori Claudinei T. Da Silveira	NOV/2015
		Escala: 1:60.000

SISTEMA DE COORDENADAS
PROJEÇÃO UTM - FUSO 22S
UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
DATUM SIRGAS - 2000

0 0.25 0.5 1 Km
ESCALA DE VISUALIZAÇÃO 1:10.000

