

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LAHIS GODOY

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO MAPEAMENTO DE
ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE
MASSA, NA BACIA DO RIO MARUMBI, SERRA DO MAR, PARANÁ.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2015

LAHIS GODOY

**APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO MAPEAMENTO DE
ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE
MASSA, NA BACIA DO RIO MARUMBI, SERRA DO MAR, PARANÁ.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato
Branco, como requisito parcial a obtenção do
título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Ney Lyzandro Tabalipa
Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elizangela Marcelo
Siliprand

PATO BRANCO

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE MASSA, NA BACIA DO RIO MARUMBI, SERRA DO MAR, PARANÁ

LAHIS GODOY

No dia 20 de novembro de 2015, às 13h00min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº34-TCC/2015.

Orientador: Prof. Dr. NEY LYZANDRO TABALIPA (DACOC/UTFPR-PB)

Co-orientador: Prof^ª. Dr^ª. ELIZÂNGELA MARCELO SILIPRANDI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^ª. Msc. DANIELLA BATISTELLA (DAAGR/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof.Dr. DANIEL CARVALHO GRANEMANN (DAAGR/UTFPR-PB)

Dedico este trabalho a quem me deu o dom da vida e ilumina o meu caminho, Deus!

E com muito carinho dedico aos meus pais Vanise e Ivair Godoy, e minha irmã Lívia Clara Godoy.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por estar sempre ao meu lado iluminando o meu caminho e por todas as bênçãos recebidas.

Aos meus pais Vanise e Ivair Godoy, e minha irmã Lívia Clara Godoy por todo apoio, suporte e amor. Vocês são um exemplo pra mim, obrigada por terem transformado essa família em um porto seguro para todos nós, por terem moldado meu caráter e todos os dias me ajudarem na realização dos meus sonhos. Tudo o que sou e o que tenho hoje é mérito de vocês.

Ao professor Dr^o. Ney Lyzandro Tabalipa, pela oportunidade de desenvolver este trabalho juntos e por todo o aprendizado compartilhado.

A professora Dr^a. Elizangela Marcelo Siliprandi por todo apoio e incentivo.

A todos os professores pelo aprendizado e dedicação que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Ao meu namorado Lucas Hoffmann, por toda paciência, apoio, carinho e amor.

Aos meus amigos por toda a força que me deram, por sempre acreditarem em mim e estarem ao meu lado nos momentos difíceis sempre me fazendo sorrir.

A todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a conclusão desta etapa.

“O mundo é um lugar perigoso de se viver, não por causa daqueles que fazem o mal, mas sim daqueles que o observam e deixam o mal acontecer”.

Albert Einstein

RESUMO

GODOY, Lahis. Aplicação do Modelo Shalstab no mapeamento de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa, na Bacia do Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná. 108 fls. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2015.

Este trabalho apresenta a aplicação do Modelo SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability) em uma abordagem quantitativa no mapeamento de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa, nas vertentes da bacia do rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná. Este modelo de estabilidade de encostas compila dados pedológicos, geomorfológicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis, determinando a pluviosidade necessária para deflagrar eventos extremos. Foi possível também fazer um comparativo dos resultados obtidos com os de outra metodologia, através do mapa de Fator de Segurança (FS) elaborado na pesquisa de outra autora, que utiliza um modelo matemático que tem por base a distribuição das forças atuantes em um talude de extensão finita, considerando como variáveis a inclinação do terreno, propriedades físicas e mecânicas do solo, a presença d'água e influência da vegetação. Os resultados encontrados foram satisfatórios e mostram que ambas as metodologias são eficientes na identificação de áreas instáveis, uma vez que os deslizamentos ocorridos na bacia em anos anteriores foram identificados nessas áreas pelos dois métodos. O SHALSTAB apresentou resultados mais precisos, uma vez que as dimensões das áreas consideradas instáveis se aproximaram mais as das catalogadas em eventos anteriores de movimentação de massa na bacia. Outro resultado importante do SHALSTAB foi a quantificação do evento hidrológico necessário para ocorrência dos deslizamentos. O nível de precisão das técnicas adotadas está diretamente relacionado com a precisão geométrica, detalhamento dos mapas temáticos e a determinação dos valores das variáveis envolvidas em cada método. Os resultados podem ser utilizados como sinais de alerta para medidas preventivas incorporadas ao plano diretor e de riscos da cidade como critério para o impedimento de ocupação antrópica ou a evacuação de áreas instáveis quando os índices pluviométricos previstos ultrapassarem os limites estabelecidos.

Palavras-chave: SHALSTAB. Escorregamentos. Fator de Segurança. Morretes. Serra do Mar.

ABSTRACT

GODOY, Lahis. Application of SHALSTAB Model in mapping areas susceptible to the occurrence of mass motion in the Marumbi River's Basin, Serra do Mar, Paraná. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2015.

This paper presents the application of the SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability) Model in a quantitative approach to mapping areas susceptible to the occurrence of mass motion at the Marumbi River's basin strands, Serra do Mar, Paraná. This slope stability model gathers pedological, geomorphological and hydrological data in the prevision of unstable areas which will determinate the rainfall needed to trigger extreme events. Also, it was possible to compare results obtained from other methodology through the Factor of Safety (SF) map elaborated in another author's research, which uses a mathematical model that has base in the distribution of forces acting on a slope of finite extension, regarding as variables the land's inclination, soil's physical and mechanical properties, water presence, vegetation influence. The results founded were satisfactory and they show that both methodologies are efficient to identification of unstable areas, once the landslides occurred in the basin in previously years were identified in this area from both methods. The SHALSTAB presented results more accurate, once the area's dimension considered unstable got more close to the cataloged areas in previously events of mass motion in the basin. Other important SHALSTAB's result was the hydrologic event's quantification needed to occur landslides. The accuracy's level the techniques applied is directly related to geometric accuracy, detailing of the themed maps and determination of the variable values involved in each method. The results can be used as alerts to preventive ways incorporated into the city's guide plan and risks plan as a criterion for the impediment of anthropic occupation or the evacuation of unstable areas when the rate rainfall exceeds the established limits.

Keywords: SHALSTAB. Landslides. Factor of Safety. Morretes. Serra do Mar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de Rastejo	22
Figura 2 – Esquema de Escorregamento	23
Figura 3– Esquema de Quedas	24
Figura 4 – Esquema de Corridas de Massa	24
Figura 5 - Principais fatores que influenciam na análise de vertentes e forças atuantes	31
Figura 6 - Modelo físico de referência para a implementação de SHALSTAB.....	33
Figura 7 - Definição de campos de estabilidade, mostrando relações entre a proporção da coluna de solo saturado (h/z) e a declividade expressa por $\tan \theta$	34
Figura 8 - Relações das classes de estabilidade de SHALSTAB representado sobre um plano $\tan \theta - a/b$. A linha pontilhada é o limite de saturação	37
Figura 9 – Diagrama dos Procedimentos Adotados	40
Figura 10 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Marumbi	42
Figura 11 - Geologia da Bacia do Rio Marumbi	45
Figura 12 - Temperatura Média Mínima (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.	49
Figura 13 - Temperatura Média (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.	50
Figura 14 - Temperatura Média (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.	51
Figura 15 – Precipitação Média Histórica (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.	53
Figura 16 - Pluviosidade em 24 horas acima de 50mm	54
Figura 17- Definição Sistema de Coordenadas	56
Figura 18 - Exportando dados para o ArcMap	57
Figura 19 - Criar TIN	58
Figura 20 - Atribuições para Criação do TIN	58
Figura 21 - Conversão TIN para RASTER	59
Figura 22 - Ferramenta para elaboração do Mapa de Declividade	61
Figura 23 - Definições para utilização da ferramenta SLOPE	61
Figura 24 - Mapa de Declividade da Bacia do Rio Marumbi	63
Figura 25 - Ferramenta para elaboração do Mapa de Forma das Vertentes	64
Figura 26 - Definições para utilização da ferramenta CURVATURE	65
Figura 27 - Mapa de Forma das Vertentes Bacia do Rio Marumbi.....	66
Figura 28 - Ferramenta para elaboração do Mapa de Orientação das Encostas	67
Figura 29 - Definições para utilização da ferramenta CURVATURE	68
Figura 30- Mapa de Orientação das Encostas Bacia do Rio Marumbi	69
Figura 31 - Mapa de Hipsometria Bacia do Rio Marumbi	71
Figura 32 - Tabela de Atributos	73
Figura 33 – Tabela de Atributos com as Classes	74
Figura 34 - Tabela de Atributos com Parâmetros Físicos e Mecânicos	75
Figura 35 – Elaboração da Classificação do Mapa de Solos	76
Figura 36 – Mapa de Solos Bacia do Rio Marumbi	79
Figura 37 – Definições para conversão do arquivo RASTER em GRID	84
Figura 38 – Ativar Extensões no ArcView GIS 3.2	85
Figura 39 – Criar View	85
Figura 40 – Menu SHALSTAB	86
Figura 41 – Importando o Grid	86
Figura 42 - Correção do Grid	87
Figura 43 - Elaboração Slope	88
Figura 44 - Elaboração do Flow Directions	88
Figura 45 - Elaboração da Área de Acumulação	89
Figura 46 – Elaboração do Mapa de Estabilidade	91

Figura 47 - Mapa de Áreas Estáveis SHALSTAB	93
Figura 48 - Mapa de Índices de Segurança Bacia do Rio Marumbi	95
Figura 49 - Escorregamentos observados e catalogados na área Bacia do Rio Marumbi	97
Figura 50 - Comparativo dos resultados encontrados entre SHALSTAB e Fator de Segurança tendo como base escorregamentos ocorridos em 2003 para área norte da bacia	98
Figura 51 - Comparativo dos resultados encontrados entre SHALSTAB e Fator de Segurança tendo como base escorregamentos ocorridos em 2003 para área ao sudoeste da bacia	99
Figura 52 - Comparativo dos resultados encontrados entre SHALSTAB e Fator de Segurança tendo como base escorregamentos ocorridos em 2003 para área ao sudeste da bacia	100
Figura 53 – Detalhe de áreas consideradas incondicionalmente instáveis localizadas na porção central da bacia do rio Marumbi	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Movimentos de Encosta.....	16
Tabela 2 – Classificação de Freire.....	17
Continuação da Tabela 2 – Classificação de Freire.....	18
Tabela 3 - Classificação de movimentos de massa apresentada.....	20
Tabela 4 - Principais tipos de movimentos de massa em encostas.....	21
Tabela 5 - Classes de suscetibilidade conforme SHALSTAB.	37
Tabela 6- Cartas topográficas utilizadas.....	55
Tabela 7 - Porcentagem de Área para cada Classe de Declividade Bacia do Rio Maumbi, Morretes, PR.....	62
Tabela 8 – Dados I obtidos por Kozciak (2005).....	81
Tabela 9 Dados II obtidos por Kozciak (2005)	81
Tabela 10 – Dados obtidos por Borchardt (2005)	82
Tabela 11 - Parâmetros do solo adotados para confecção do Mapa de Estabilidade	90
Tabela 12 – Reclassificação SHALSTAB.....	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
1.2	FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO	12
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	JUSTIFICATIVA	13
2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTENTES	15
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA.....	15
2.1.1	Classificação dos Movimentos de Massa	16
2.2	Análise de Estabilidade de Vertentes	25
2.3	Determinação do Fator de Segurança (Fs)	30
2.4	Modelo Shalstab	32
2.5	Elaboração e estruturação dos dados em ambiente SIG.....	38
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
4	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	41
4.1	LOCALIZAÇÃO.....	41
4.2	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E GEOLÓGICOS	43
4.3	ASPECTOS DA VEGETAÇÃO.....	46
4.4	ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	48
5	CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE ESTABILIDADE DE VERTENTES	55
5.1	PARÂMETROS MORFOLÓGICOS.....	60
5.2	PARÂMETROS PEDOLÓGICOS	72
5.3	PARÂMETROS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS SOLOS.....	80
6	DISCUSSÃO E RESULTADOS	83
6.1	APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB.....	83
6.2	COMPARATIVO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO SHALSTAB E O DE DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA.....	94
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

1 INTRODUÇÃO

As ocorrências de desastres naturais estão se tornando mais frequentes e com magnitudes cada vez maiores no cenário mundial. Envolvendo perdas e danos humanos, econômicos e ambientais. As características físicas do meio ambiente impróprias à ação antrópica, no uso e ocupação do solo, são fatores que contribuem para estes eventos.

O Anuário Brasileiro de Desastres Naturais apresenta para o ano de 2011, no Brasil, o registro oficial de 795 desastres naturais, que causaram 1094 óbitos sendo 43,14% decorrentes de deslizamentos. Afetando 2370 municípios, sendo 1247 destes localizados na região sul do país (CENAD et al., 2012).

Os deslizamentos são caracterizados por movimentos de descida do solo, de rochas e material orgânico, que ocorrem na ruptura de uma superfície, sob o efeito da gravidade (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008). Este processo é apenas uma classificação dos movimentos de massa, que na verdade, são fenômenos naturais de modelagem e formação da crosta terrestre. Os volumes de material e grande velocidade diferenciam este processo das demais classificações, e também agravam o grau de destruição, principalmente nos locais onde ocorrerem ocupações irregulares.

No estado do Paraná, entre os anos de 2011 e 2014 foram registrados 59 deslizamentos, sendo 17 deles ocorridos no ano de 2011 (CEPDEC, 2015). Este fato pode ser atribuído à formação geomorfológica do estado, que apresenta na região litorânea um grande sistema montanhoso conhecido como a Serra do Mar, que se eleva de 500 a 1.000 m sobre o nível do médio planalto (MAACK, 2001).

O ano de 2011 foi marcado por um dos piores desastres naturais ocorridos no Paraná com deslizamentos na região de Morretes e Antonina, oriundos da combinação entre a formação geológica da área com altas declividades, como por exemplo, o Pico Paraná com 1.922 m, que é a montanha mais alta da região sul do Brasil (MAACK, 2001), altos índices pluviométricos característicos da predominância do clima Subtropical Úmido, cobertura florestal da Floresta Atlântica (Floresta Ombrófila Densa) com interior bastante úmido e a ocupação irregular destas áreas.

Neste evento ocorreu uma série de diferentes movimentos de massa, predominantemente deslizamentos translacionais. A ação da água nestes movimentos é mais superficial e caracterizada por rupturas planas, que ocorrem quando as tensões estruturantes são superadas pelas tensões desestruturantes, consequência do aumento da umidade do solo

devido à alta intensidade pluviométrica em um curto intervalo de tempo, resultando na alteração da paisagem natural e em grandes prejuízos socioeconômicos para a comunidade local.

Na ocasião os movimentos de massa e os alagamentos afetaram 15.178 pessoas no município de Morretes, deixando 8.000 desalojadas e 1.180 desabrigadas, com 21 feridos e uma morte. Os prejuízos desta cidade juntamente com Antonina, Honório Serpa, Guaratuba e Paranaguá foram da ordem de R\$ 104.641.917,00, danificando pontes, estradas, vias urbanas, edificações públicas, residências e áreas agrícolas (DEFESACIVIL, 2011).

Com o objetivo de reduzir, prever e entender os fatores que condicionam estes eventos inúmeras metodologias vem sendo desenvolvidas. Esses métodos são baseados na combinação de modelos hidrológicos com modelos de estabilidade de taludes usando como referencial a modelagem matemática, através da avaliação das diferentes características do meio físico e princípios e técnicas relacionadas à cartografia geotécnica, tendo assim como resultado a definição de áreas susceptíveis a deslizamentos, permitindo assim reduzir ou evitar prejuízos materiais, ambientais e perdas de vidas.

No ano de 2005 foi desenvolvida uma abordagem quantitativa nas vertentes da bacia do Rio Marumbi, na Serra do Mar em Morretes - PR, que obteve a elaboração de mapeamento de índices de segurança, através do método determinístico, modelo matemático adotado, baseado no conceito de equilíbrio limite, que leva em consideração parâmetros morfológicos, pedológicos, aspectos físicos e mecânicos dos solos e influência da cobertura vegetal. (KOZCIAK, 2005).

A necessidade de obtenção de dados mais específicos sobre a área fez surgir a necessidade de testar outros modelos, em particular o modelo SHALSTAB - Shallow Landsliding Stability, que é um modelo matemático determinístico fisicamente baseado que associa dados topográficos extraídos de um Modelo Digital de Elevação (MDE) a equações derivadas da combinação entre o modelo hidrológico de estado uniforme e o de estabilidade de encostas baseado na equação do talude infinito de Mohr-Coulomb (DIETRICH; MONTGOMERY, 1994).

O desempenho do modelo SHALSTAB, segundo Tabalipa (2015), vem sendo testado em clima tropical a pelo menos uma década, apresentando excelentes resultados em vários trabalhos realizados.

Neste trabalho, para aplicação do método, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o assunto, também conceituação e classificação dos movimentos de massas. Também foi feita a elaboração de um modelo digital de terreno (MDT) e seus mapas

derivados, como mapa geológico, de uso do solo, mapa de declividade, orientação e forma das vertentes, da área em questão. Para que posteriormente pudesse ser feita a aplicação do método, que resultou no mapeamento das áreas susceptíveis a deslizamentos, através de valores máximos de precipitações que desencadearão estes eventos e permitiu a comparação dos resultados encontrados com o mapeamento dos índices de segurança elaborados no estudo de Kozciak (2005).

Assim a obtenção destes dados propiciou a análise de movimentações de massas e a prevenção de desastres naturais. O conhecimento das precipitações máximas para desencadear a instabilidade de áreas específicas, pode permitir a evacuação das pessoas destes locais a partir de dados de previsões do tempo, evitando assim danos e perdas humanas. Também pode ser usado para reforçar e aprimorar as leis de uso e ocupação do solo do município, permitido aos órgãos competentes fazerem fiscalizações mais rígidas e também maior conscientização da população através do conhecimento deste estudo. Ainda pode gerar uma contribuição ambiental, pois a partir do mapeamento, áreas de maior instabilidade ficaram evidentes, reforçando a necessidade da preservação da vegetação e se necessário à reestruturação da mesma. Propiciando assim a base para a elaboração de uma política de prevenção de riscos para o município de Morretes - PR.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Aplicação do modelo SHALSTAB no mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa, nas vertentes da Bacia do Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná.

1.2 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO

Quais os máximos índices pluviométricos necessários para ocasionar movimentações de massa nas áreas mapeadas localizadas nas vertentes da Bacia do Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho teve por objetivo aplicar o modelo SHALSTAB no mapeamento de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa, nas vertentes da Bacia do Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná, determinando o índice pluviométrico que ocasionará estes eventos. Ainda foi realizada a comparação com resultados de trabalhos anteriores que determinaram os fatores de segurança das encostas dessa área.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre o assunto, recuperando os parâmetros de propriedade dos solos, encontrados em Kozciak (2005) e Borchardt (2005), e os mapas de fatores de segurança das encostas elaborados por Kozciak (2005).
- Elaborar um modelo digital de terreno (MDT) e seus mapas derivados, como mapa geológico, de uso do solo, mapa de declividade, orientação e forma das vertentes, da área em questão;
- Aplicar o modelo SHALSTAB, mapeando as áreas susceptíveis a escorregamentos, comparando os resultados encontrados com os mapas de Fatores de Segurança (Fs) elaborados no estudo de Kozciak (2005).

1.4 JUSTIFICATIVA

A intensidade do crescimento populacional de diversas cidades do Brasil impossibilitou o prévio planejamento e a estruturação adequada de leis de uso e ocupação do solo, antes que este processo ocorresse de forma desordenada em áreas consideradas de risco. Uma das ações antrópicas resultantes deste processo é a retirada de vegetação, atitude grave,

principalmente em encostas, pois acelera a erosão, que é um processo natural de formação do relevo, e pode ter como consequências os deslizamentos de terra e o assoreamento dos rios.

O objetivo da análise de movimentações de massas está em evitar ou minimizar os efeitos negativos deste evento, que são de âmbito social, ambiental e econômico. Assegurando assim, o bem estar das populações humanas, a preservação da fauna, da flora e dos recursos hídricos e também evitando gastos com reestruturação da infraestrutura danificada por este tipo de evento.

A Região de Morretes, Paraná localizada na Serra do Mar, possui um histórico com vários registros de deslizamentos, dentre eles podemos citar os ocorridos no ano de 2011 que obtiveram proporções catastróficas, com prejuízos de todos os âmbitos. Na ocasião a combinação do relevo acidentado com fortes declividades, com a cobertura arbórea densa e uniforme caracterizada por um interior de florestas bastante úmido e pouco ventilado, com o clima tropical de elevados índices pluviométricos corroboraram para estes processos.

Assim surgiu a relevância de aplicar a esta região uma metodologia de avaliação da periculosidade e risco de movimentos de massa com o objetivo de possibilitar a adoção de medidas antecipatórias à ocorrência dos eventos. O método aplicado no seguinte trabalho, inédito para esta região, é o SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability) que foi desenvolvido por Dietrich & Montgomery (1994), e está baseado na combinação do modelo matemático determinístico com um modelo hidrológico de estabilidade da encosta.

Com este método foi possível mapear áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa na região de Morretes, com a determinação da pluviosidade necessária para desencadear estes eventos. Os mesmos foram comparados com fatores de segurança das encostas desta área, definidos em trabalhos anteriores através de análise determinística da estabilidade de vertentes. Outra contribuição importante do estudo foi gerar dados que poderão ser utilizados por autoridades locais e órgãos competentes como sinais de alerta para medidas preventivas como a evacuação da área, a partir dos máximos índices pluviométricos diários estabelecidos, objetivando a segurança da população que reside na região estudada.

2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTENTES

Nas vertentes existe uma movimentação contínua de materiais devido à ação da gravidade. A análise desta movimentação, a partir de um conjunto de agentes condicionantes atuantes que variam de acordo com o método utilizado, podem envolver parâmetros como inclinação das vertentes, ângulo de atrito, propriedades mecânicas e físicas do solo, vegetação, presença de água, entre outros. Permitindo assim a determinação de uma grandeza ou um índice de segurança que visa quantificar o quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra.

O estudo da estabilidade leva em conta o equilíbrio entre as forças solicitantes, que tendem a induzir a ruptura e movimentar a massa de solo, e as forças resistentes. Diversos são os métodos que podem ser empregados para realização deste estudo visando o mapeamento para previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos.

No presente estudo foi utilizado o método SHALSTAB que objetiva mapear áreas instáveis e susceptíveis a ocorrência de escorregamentos, a partir de valores de precipitação máxima diária. Baseado nisto o presente tópico apresenta uma revisão teórica do tema abordado, discorrendo sobre os tipos de movimentos de massa gravitacionais, principais condicionantes para deflagração dos escorregamentos baseados no método utilizado e foi feita também referência ao método para determinação do coeficiente de segurança (F_s) baseado no conceito de equilíbrio limite, para que possa ser feita uma comparação entre os resultados obtidos com a elaboração deste estudo e os anteriormente obtidos em Kozciak (2005).

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Caputo (1988) define sob o nome genérico de taludes quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de terra, de rocha ou de terra e rocha. Podendo ser naturais como as encostas, ou artificiais provenientes de cortes e aterros.

A estabilidade de taludes depende da capacidade do solo em suportar cargas, ou seja, depende da resistência ao cisalhamento do solo. Quando as forças resistentes do solo são superadas pelas forças solicitantes há o rompimento do mesmo ocasionando movimentos de massa.

Os movimentos de massa são um processo natural de formação e modelagem do relevo terrestre, a partir do desprendimento de solo sob a ação da gravidade.

Segundo Tominaga (2009) esta movimentação faz parte da evolução geomorfológica na dinâmica das vertentes atuando em regiões serranas, sendo mais frequentes na região sul, sudeste e nordeste do Brasil. Sendo que a redução da resistência dos materiais da vertente ocorre principalmente com a ação da água e/ou pela indução do comportamento plástico e de fluído dos solos.

As condições que favorecem os movimentos de massa dependem principalmente da estrutura geológica, topografia da vertente, índices pluviométricos, vegetação e atividade antrópica. (BIGARELLA et. al., 2003)

A classificação desses fenômenos varia de acordo com a velocidade e o mecanismo de movimento, material, modo de deformação, geometria da massa e conteúdo de água (SELBY, 1993).

2.1.1 Classificação dos Movimentos de Massa

Os movimentos de massa apresentam diversas classificações devido a sua complexidade que envolve uma variedade de materiais e processos. A classificação mais aceita internacionalmente é a de Varnes (1978) que se baseia no tipo de movimento e no tipo de material transportado, sendo adotada pela IAEG (Internacional Association of Engineering Geology) e apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos Movimentos de Encosta

Tipo de Movimento	Tipo de Material		
	Rocha	Solo (Engenharia)	
		Grosseiro	Fino
Quedas	De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos	De rocha	De detritos	De terra

Continuação Tabela 1 – Classificação dos Movimentos de Encosta

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Rocha	Solo (Engenharia)	
				Grosso	Fino
Escorregamentos	Rotacional	Poucas Unidades	Abatimento de Rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional	Muitas Unidades	De blocos Rochosos	De Blocos de detritos	De Blocos de terra
Expansões Laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/Escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
				Rastejo de Solo	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

Fonte: Adaptado Varnes, 1978.

Dentre as classificações brasileiras destacam-se as de Freire (1965), de Guidicini & Nieble (1984) e de Augusto Filho (1992).

A classificação de Magalhães Freire (1965) foi a primeira proposta no Brasil e sofreu modificações com o passar dos anos. De acordo com a mesma os movimentos coletivos de solo e de rocha são divididos em três grupos sendo eles escoamentos, escorregamentos e subsidências apresentados na Tabela 2 e descritos em seguida.

Tabela 2 – Classificação de Freire

Tipo Fundamental		Subtipo
a) Escoamentos	Consistindo em deformação ou movimento contínuo com ou sem superfície definida de deformação.	Rastejo
		Corrida
b) Escorregamentos	Consiste em deslocamento finito ao longo da superfície de movimentação ou deformação	Rotacionais
		Translacionais

Continuação da Tabela 2 – Classificação de Freire

Tipo Fundamental		Subtipo
c) Subsidência	Consiste em deslocamento finito ou deformação contínua vertical.	Subsidência
		Recalque
		Desabamento

Fonte: Adaptado Freire, 1965.

- a) Escoamentos: Consiste em uma deformação ou movimento contínuo com ou sem superfície definida de deformação. Abrangendo movimentos lentos denominados rastejos, e rápidos denominados corridas.
- Rastejos: Movimentos lentos e contínuos de material. Podem englobar grandes massas de solo, como taludes de uma região inteira, e como consequência da baixa velocidade que não chega a deslocar o material 0,3m em dez anos, pode não ocorrer a distinção entre o material em movimento e o material estacionário. Os movimentos são ocasionados por ação da força da gravidade e por variações de umidade e temperatura;
 - Corridas: São escoamentos que podem ocorrer rapidamente em consequência da perda de atrito interno na presença de excesso de água, que faz diminuir a resistência mecânica do solo e aumenta a erosão. São classificadas de acordo com o material e o grau de fluidez em corrida de terra, silte, areia ou lama.
- b) Escorregamentos: Consiste em deslocamento finito ao longo da superfície de movimentação ou deformação. São movimentos rápidos e de curta duração. A velocidade do movimento varia de acordo com a causa inicial do movimento, com a natureza e topografia do terreno. Baseado no tipo de superfície de ruptura podem ser classificados em rotacionais ou translacionais.
- Rotacionais: Também chamados de circulares, ocorre pela separação de uma massa de solo de material do terreno, delimitada de um lado pelo talude e de outro por uma superfície contínua de ruptura. A forma e posição da superfície de ruptura dependem da distribuição de pressões neutras e da variação de resistência ao cisalhamento;

- Translacionais: Também chamados de planos, são condicionados por anisotropias no interior da massa de solo ou rocha. Ocorre em maciços impermeáveis, com camada de intemperismo delgada, com fluxo paralelo a superfície. São distinguidos dos movimentos rotacionais principalmente pela superfície de ruptura ser plana e não curva.
- c) Subsidiências: Consiste em deslocamento finito ou deformação contínua vertical. Movimentos fortemente verticais de deslocamentos por não apresentar frente livre. Podendo ocorrer de três maneiras por subsidência pura, por recalque ou desabamento.
- Subsidiência pura: Ocorre por remoção de alguma fase de formação do subsolo sólida, líquida ou gasosa, que causa o adensamento de camadas do mesmo. Podem ser desencadeadas pela ação erosiva das águas subterrâneas, ou bombeamento para retirada das mesmas, trabalhos de mineração e ações de vibração sobre sedimentos inconsolidados. Geralmente possuem grandes áreas de abrangência;
 - Recalques: Por expulsão de um fluido verifica-se uma deformação global no solo produzida pelos deslocamentos e rearranjos das partículas individuais, se caracterizando por ocorrer em pequenas áreas de abrangência. São movimentos verticais de uma estrutura provocados pelo peso próprio da mesma ou pela deformação do solo por outros fatores.
 - Desabamentos: Formas de subsidência bruscas, que consistem em um movimento vertical rápido.

Guidicini e Nieble (1984) propõem uma classificação modificada de Freire (1965) apresentada na Tabela 3, onde os movimentos de solo e de rocha são diferenciados em diversas classes de acordo com os parâmetros físicos e mecânicos do solo, natureza e superfície de movimentação, inclinação do talude, tipo de movimento, velocidade, duração e causas intrínsecas e extrínsecas.

Tabela 3 - Classificação de movimentos de massa apresentada

Processos	Sub-processos	Classes
Escoamentos	Rastejo (escoamento plástico)	Rastejo de solo Rastejo de detritos de tálus Rastejo de rocha • Solifluxão Rastejo de detritos de geleiras
	Corridas (escoamento líquido)	Corrida de terra Corrida de areia e silte Corrida de lama Avalanche de detritos
Escorregamentos	Escorregamentos Rotacionais	Escorregamentos de taludes Escorregamentos de base Rotura rotacional do solo de fundação
	Escorregamentos Translacionais	Escorregamento Translacional de rocha Escorregamento Translacional de solo Escorregamento Translacional de solo e rocha Escorregamento Translacional retrogressivo Queda de rocha Queda de detritos
Subsidências	Subsidências	Por carreamento de grãos Por dissolução de camadas inferiores e cavernas Por deformações de estratos inferiores Por retirada do suporte lateral
	Recalques	Por consolidação Por compactação
	Desabamentos	Por rotura de camada Por subescavação Por retirada do suporte lateral
Formas de transição ou termos de passagem		
Movimentos de massa complexos		

Fonte: Adaptado Guidicini e Nieble, 1984.

Augusto Filho (1992), classifica genericamente os movimentos de massa em 4 grandes grupos: rastejos (creep), escorregamentos (landside), quedas (falls) e corridas (flows). Esta classificação é utilizada pelo IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas nas publicações do próprio autor e pelo Manual de Desastres da Defesa Civil Nacional. São levados em consideração para elaboração da mesma, parâmetros de dinâmica, geometria e material envolvidos no processo. A Tabela 4 apresenta os grupos desta classificação, que são descritos em seguida.

Tabela 4 - Principais tipos de movimentos de massa em encostas

Processos	Dinâmica/Geometria e Material
Rastejos (creep)	<ul style="list-style-type: none"> • vários planos de deslocamento (internos) • velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • solo, depósitos, rocha alterada/fraturada • geometria indefinida
Escorregamentos (landside),	<ul style="list-style-type: none"> • poucos planos de deslocamento (externos) • velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • pequenos a grandes volumes de material • geometria e materiais variáveis: <p>Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza;</p> <p>Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas</p> <p>Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza</p>
Quedas (falls)	<ul style="list-style-type: none"> • sem planos de deslocamento • movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • velocidades muito altas (vários m/s) • material rochoso • pequenos a médios volumes • geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.

Continuação Tabela 4 - Principais tipos de movimentos de massa em encostas

Processos	Dinâmica/Geometria e Material
Corridas (flows)	<ul style="list-style-type: none"> • muitas superfícies de deslocamento • movimento semelhante ao de um líquido viscoso • desenvolvimento ao longo das drenagens • velocidades médias a altas • mobilização de solo, rocha, detritos e água • grandes volumes de material • extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Adaptado Augusto Filho, 1992.

Rastejo (*creep*) como já foi definido anteriormente, é um movimento lento e contínuo, sem limites definidos. Ocorre devido à tensão constante aplicada durante longos períodos de tempo e pode envolver grande quantidade de material (SILVA, 2011).

A causa da movimentação nos rastejos é uma associação de efeitos de variações de umidade e temperatura com a ação da força da gravidade. O processo de expansão e contração da massa de material, devido à variação térmica, provoca o movimento, vertente abaixo (TOMINAGA, 2009). A Figura 1 apresenta um esquema de rastejo.



Figura 1 – Esquema de Rastejo
Fonte: Adaptado Gerscovich, 2012.

Escorregamentos (*landslide*) são deslocamentos finitos ao longo de uma superfície definida de deslizamento, preexistente ou de neoformação. Podendo ser classificados de acordo com o plano de ruptura em dois subtipos escorregamentos rotacionais ou translacionais, já definidos anteriormente (SILVA, 2011). A Figura 2 apresenta um esquema de escorregamentos.



Figura 2 – Esquema de Escorregamento
Fonte: Adaptado Gerscovich, 2012.

Quedas (*falls*) são movimentos rápidos em queda livre, sem a presença de uma superfície de deslizamento. Ocorrem em vertentes íngremes de paredões rochosos e contribuem decisivamente para a formação dos depósitos de tálus, rochas não consolidados material incoerente e heterogêneo. É favorecido pela presença de fraturas tectônicas ou discontinuidades e/ou alívios de tensão (SILVA, 2011). Estes movimentos apresentam velocidades muito altas, da ordem de metros por segundo. A Figura 3 apresenta um exemplo de esquema de quedas.



Figura 3– Esquema de Quedas
Fonte: Adaptado Gerscovich, 2012.

Corridas (*falls*) são caracterizadas por movimentos rápidos com alto poder de destruição, mobilizando geralmente um grande volume de material. Isso ocorre quando o solo está saturado e a massa encharcada se comporta como um fluido altamente viscoso, composto inclusive por grandes blocos (SILVA, 2011). A Figura 4 apresenta um esquema de corridas.



Figura 4 – Esquema de Corridas de Massa
Fonte: Adaptado Gerscovich, 2012.

2.2 Análise de Estabilidade de Vertentes

Os movimentos de massa podem ser desencadeados por diferentes tipos de agentes condicionantes, que atuam de forma interativa e, portanto não devem ser analisados isoladamente. A instabilidade do talude será deflagrada com o aumento das tensões cisalhantes ou com a redução da resistência ao cisalhamento do mesmo, quando a primeira se igualar ou superar a segunda se iniciará a movimentação do mesmo. Existem alguns fatores agravantes que tornam essa ação predisponente. Os mesmos podem possuir âmbito geológico, morfológico, físico e antrópico, e são utilizados por diferentes metodologias para definir áreas susceptíveis a estas movimentações.

A disponibilidade de dados e o enfoque do estudo influenciam no método a ser utilizado na análise da estabilidade de vertentes, estes dados são gerados a partir de complexas relações entre fatores climáticos, cobertura vegetal, geológicos, antrópicos que envolvem o tipo de uso e ocupação do solo, pedológicos e geomorfológicos. A seguir é descrita a forma como essas variáveis atuam na desestabilização de vertentes.

a) Clima

O clima está diretamente relacionado com a precipitação. Índices pluviométricos elevados provocam a saturação do solo ou rocha, reduzindo a coesão aparente entre as partículas do mesmo refletindo em perda de estabilidade de encostas.

A elevada umidade provoca o encharcamento do solo e este processo não está apenas relacionado a períodos de chuvas intensas, mas também a duração destes eventos, a condutividade hidráulica dos solos e a variação do grau de saturação (BIGARELLA et. al, 2003).

Neste contexto Guidicine e Nieble (1984) consideram que se a água percolar sem interrupção e em grande quantidade na massa de solo a coesão aparente será drasticamente reduzida, o ar será praticamente totalmente expulso e o talude entrará em colapso.

A água é considerada um dos principais agentes deflagradores imediatos de movimentos de massa. O volume de água da chuva e sua distribuição no tempo e em determinadas áreas são fatores que determinam a velocidade de processos erosivos (IPT, 1991).

Por exemplo, chuvas intensas de pequena duração podem ser menos nocivas que chuvas de menor intensidade, porém, de longa duração. Deve-se levar em consideração também que a umidade relativa do solo no momento da precipitação é um fator que se soma ao volume da mesma. A umidade pode variar para cada área, nesta perspectiva, de acordo com a sequência de eventos de chuva ocorridos no local em um determinado período de tempo.

Após chuvas prolongadas pode ocorrer a erosão que é agravada pela infiltração da água principalmente em terrenos onde não há nenhum tipo de proteção ao solo, papel que poderia ser feito pela vegetação. A erosão ocorre com a saturação hídrica do perfil do solo, que gera um desequilíbrio que pode resultar em um movimento lento ou rápido do mesmo. O excesso de água no subsolo lhe confere uma forma liquefeita tornando a superfície de cisalhamento lubrificada facilitando o movimento de massa (BIGARELLA et. al. 2003).

b) Cobertura Vegetal

Conforme citado anteriormente a vegetação pode atuar como uma maneira de proteção do solo contra fatores que condicionam os movimentos de massa mantendo o equilíbrio nas vertentes. A mesma intercepta as águas pluviais reduzindo o impacto causado no solo por gotas de chuva, e ao interceptar as águas pluviais reduz a energia cinética da chuva favorecendo assim a infiltração da água no solo. Também alguns tipos de raízes ajudam a manter a agregação e estruturação do solo, porém nem sempre isso acontece, pois, em alguns casos a vegetação pode atuar também como agente erosivo por provocar descontinuidade e formar canais no solo que aumentam a infiltração de água.

A presença da floresta ajuda a controlar o escoamento superficial e a infiltração das águas. A perda da vegetação expõe o solo a erosão, permitindo a penetração de um excesso de água no subsolo, o que reduz as tensões internas do mesmo e favorece a lubrificação dos panos de cisalhamento (BIGARELLA et. al. 2003).

Guidicine e Nieble (1984) descrevem que a cobertura vegetal protege as camadas de solo através de três conjuntos de ação, o conjunto das partes aéreas da floresta, que atua interceptando e defendendo o solo dos ventos, chuvas e raios solares, retendo o volume d'água em folhas, galhos e troncos e depois eliminando na forma de vapor por meio da evapotranspiração. O conjunto dos detritos vegetais, que tem uma boa capacidade de retenção e imobiliza grande parte da água que chega ao terreno, e freia o escoamento superficial, e por

fim o conjunto do sistema radicular, que sob o aspecto mecânico estrutura o solo, e sob o aspecto hidráulico estabelece o escoamento hipodérmico que desvia e/ou reduz a intensidade da infiltração efetiva no maciço.

Também existem efeitos desfavoráveis causados pela presença de vegetação, como o efeito alavanca desencadeado pela ação do vento nas copas das árvores que transmitem ao solo pelos troncos uma força cisalhante. O efeito cunha, causado pela pressão lateral de abertura das fendas e fissuras dos solos onde penetraram. O aumento da rugosidade do terreno, que aumenta a infiltração. A sobrecarga vertical causada pelo peso das árvores. A retirada de água prolongada do solo pode ressecar a encosta e formar fissuras de tração aumentando a infiltração (GRAY & LEISER, 1982).

Portanto conclui-se que o estudo da influência da cobertura vegetal deve se dar de maneira detalhada, variando com a região em estudo, condições climáticas, tipo de vegetação entre outros fatores. Salientando que processos de movimentação de massa já ocorrem em taludes que possuam vegetação, onde a mesma foi arrancada e se uniu a massa movimentada. Mas na maioria das vezes a vegetação desempenha um papel de agente protetor das encostas e o desmatamento é uma forma de desequilíbrio da mesma, tornando-a mais susceptível aos processos erosivos.

c) Geológicos

Para estudo das características geológicas considera-se a litologia e as características estruturais da área. A composição física e química da rocha e as propriedades mecânicas quando alteradas atuam diretamente na deflagração de movimentos de massa.

A litologia refere-se ao tipo de solo, a partir da descrição de aspectos como cor, textura, composição mineralógica, estrutura e granulometria.

As características estruturais variam de acordo com o tipo de rocha, que pode definir aspectos como permeabilidade e influenciar diretamente na infiltração e intemperismo da mesma, presença de falhas e fraturas que compõem pontos de descontinuidade da rocha tornando-se caminhos preferenciais ao fluxo da água, favorecendo assim a infiltração e conseqüentemente a diminuição da resistência da mesma facilitando a deflagração de processos de erosão. Também a estrutura planar de uma rocha que se torna repetitiva e tende a se romper ao longo da mesma. E por fim a inclinação das camadas formadoras dos solos. Todos esses aspectos influenciam diretamente na resistência mecânica das vertentes.

Bigarella e Passos (2003) consideram que os aspectos litológicos, as fraturas e diaclases, a coesão, o manto de intemperismo, o peso do material formador da vertente, a maneira com que se dá a circulação de água na mesma e os esforços cisalhantes são os fatores geológicos desencadeadores da ocorrência de movimentos de massa.

Também as variações de temperatura, com oscilações térmicas diárias ou sazonais, provocam variações volumétricas em estruturas rochosas atuando como agente de desagregação podendo ocasionar o desprendimento de blocos que estão sobre um plano inclinado do maciço, ultrapassando a resistência ao cisalhamento e ocorrendo a movimentação de material rochoso (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

d) Antrópicos

A ação antrópica de uso e ocupação do solo interfere na dinâmica natural de movimentos de massas nas encostas. Ainda que essa interferência possa ocorrer no sentido de minimizar essa dinâmica na maioria dos casos acaba agravando a situação através da remoção da cobertura vegetal, cortes e aterros para execução de edificações com acréscimo de cargas verticais e instauração de vibrações advindas do tráfego, lançamento nas encostas de lixo, águas pluviais e/ou servidas, e diversas outras interações que o homem realiza no meio e alteram o equilíbrio dos taludes.

Para Bigarella e Passos (2003) a ação antrópica tem uma participação significativa na desestabilização de vertentes da paisagem moderna, sendo que para que as mesmas consigam atingir um novo equilíbrio é necessário que ocorra extensas movimentações de massa.

Segundo Cunha (1991) as modificações causadas pelo homem no meio ambiente vem através dos tempos, se constituindo em um importante agente modificador, potencializando e acelerando diversos processos de dinâmica superficial, devido a ocupação de áreas que já são naturalmente susceptíveis a movimentos gravitacionais de massa. Isso é justificado geralmente pela ausência de infraestrutura e serviços públicos aliados muitas vezes a edificações de baixa renda construídas com materiais sem especificações técnicas, sobre um solo desprotegido. Isto faz parte da história de ocupação urbana com movimentos migratórios de grandes contingentes que precisavam ser adaptados ao meio.

e) Pedológicos

Além dos solos estarem correlacionados as variáveis de desestabilização de vertentes citadas anteriormente, também se configura como fator individual que influencia e sofre ação de processos erosivos em função de sua textura, estrutura, permeabilidade e densidade (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

A formação de um solo é função da rocha de origem, da ação dos organismos vivos, do clima, da fisiografia e do tempo (CAPUTO, 1988).

Nesse sentido o tipo de formação do solo influenciará diretamente na vulnerabilidade ao intemperismo e erosão. Conforme Bigarella et al. (1996) a textura do solo que esta ligada a proporção das partículas sólidas presentes na massa de solo , influencia na capacidade de infiltração e absorção da água da chuva. Por exemplo, solos mais porosos, como os arenosos, permitem uma rápida infiltração da água e por consequência possuem menor capacidade de armazenamento (SALOMÃO, 1999). Também a estrutura do solo que é o arranjo espacial das partículas do solo esta diretamente ligada a velocidade de infiltração da água, influenciando assim no aumento ou redução do atrito nas camadas detríticas (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

A permeabilidade é outro fator importante, por exemplo os Argissolos, que possuem igualdade em textura e relevo, são mais susceptíveis à erosão do que os Latossolos que são menos permeáveis devido a presença da acumulação de argila (LEPSCH, 2002).

E por fim a densidade do solo está relacionada também à infiltração da água, pois sabendo que o solo é formado por partículas de sólidas e volumes de ar e água, a densidade é a relação entre a massa total do mesmo e o volume ocupado por suas partículas sólidas. Assim solos com menor densidade possuem maior quantidade de vazios, permitindo maior infiltração de água.

f) Geomorfológicos

Os condicionantes geomorfológicos correspondem às formas das vertentes, as amplitudes de relevo, declividades e orientação das encostas.

Bigarella e Passos (2003) afirmam que a morfologia da vertente é basicamente o fator que influencia os movimentos de massa. A altura e a inclinação são fatores importantes a serem considerados na análise do problema.

A amplitude do relevo refere-se a variação de altura dada pela diferença em metros entre a cota mínima, sendo o nível de base geral, e a cota máxima. Embora não existam níveis limites para classificar o nível de susceptibilidade do terreno em relação à altitude, autores como Tricart (1972) afirmam que quanto maior esse valor, maior a energia cinética aplicada as vertentes e isso resulta em maior capacidade de deslocamento de material associadas a elevadas declividades.

A declividade do terreno influencia na concentração, dispersão e velocidade da enxurrada resultando em maior ou menor arrastamento superficial das partículas do solo. Em terrenos mais planos a água escoar em velocidades mais baixas, possuindo menor energia de arraste e maior tempo para se infiltrar. Em terrenos mais inclinados a resistência ao escoamento da água é menor e por isso atinge maiores velocidades, sendo assim estes mais susceptíveis a erosão hídrica (LEPSCH, 2002).

A orientação das encostas afeta a resistência ao cisalhamento, por estar relacionada à presença de umidade e cobertura vegetal. Em encostas expostas a concentração de chuva é maior em relação à direção predominante dos ventos. Quanto maior a exposição da vertente a ação do intemperismo ocasionado por chuvas, ventos, sol e outros agentes climáticos mais susceptíveis a movimentos de massa a mesma estará.

2.3 Determinação do Fator de Segurança (Fs)

Kozciak (2005) para analisar a estabilidade de vertentes e elaborar o mapeamento de índices de segurança utilizou-se do método determinístico baseado na teoria de equilíbrio-limite proposto por Fiori e Carmignani (2009)

A teoria considera que as condições de estabilidade são dadas por um fator de segurança que representa a relação entre as forças resistentes de um talude e as forças solicitantes que agem sobre o mesmo. Quando as forças resistentes, que são as que garantem o equilíbrio da encosta, forem superadas pelas forças que estão solicitando a mesma a movimentação de massa será desencadeada mas, enquanto isso não acontecer há um equilíbrio dessas forças na massa de solo.

O modelo matemático leva em consideração as variáveis como a coesão, contribuição da vegetação, altura do lençol freático, pesos específicos do solo, peso específico da água, ângulo de inclinação da vertente, força exercida pelo vento nas árvores e o ângulo de atrito interno do solo.

A Equação (1) representa o modo esquemático das variáveis consideradas, citadas anteriormente, e exemplificadas pela Figura 5.

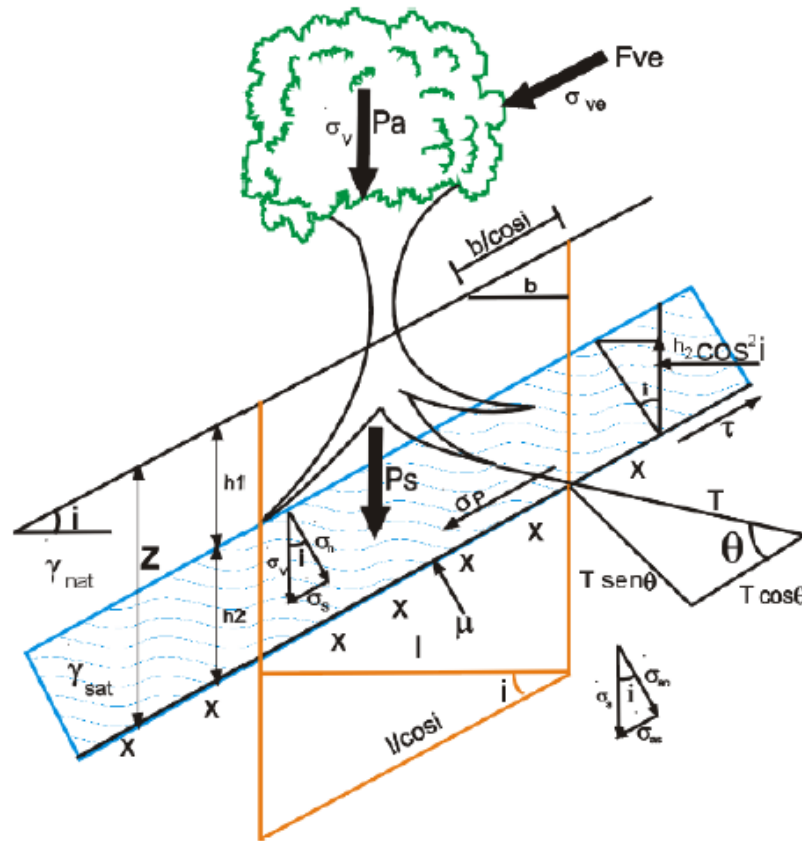


Figura 5 - Principais fatores que influenciam na análise de vertentes e forças atuantes
Fonte: Fiori e Carmignani (2009) apud Tabalipa (2015).

$$F_s = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \theta + T \cdot \cos \theta}{[(Z \cdot \gamma_{sub} + Z \cdot \gamma_a + P_a) \cdot \text{sen} i + F_{ve}] \cos i} \quad (1)$$

Onde:

C_s = coesão;

S_r = contribuição da raiz para a coesão do solo;

h_1 = espessura do solo não saturado;

γ_{nat} = peso específico natural do solo;

h_2 = espessura do solo saturado;

γ_{sub} = peso específico do solo submerso;

P_a = peso das árvores sobre o solo;

γ_a = peso específico da água;

i = ângulo de inclinação da vertente;

F_{ve} = força exercida pelo vento nas árvores;

φ = ângulo de atrito interno do solo.

2.4 Modelo Shalstab

Segundo Tabalipa (2015) muitas metodologias estão sendo utilizadas para entender os fatores que condicionam os movimentos de massa, as mesmas estão baseadas em dois componentes principais, a ação da gravidade sobre a fricção e coesão do solo e a presença de água no solo, que está ligada a precipitação na área e ao movimento da água no subsolo que depende da morfologia do terreno.

Dentro deste contexto, o modelo SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model) foi desenvolvido para predição de escorregamentos, tendo como base a combinação de um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade de encosta em ambiente SIG (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

Com este modelo é possível definir a quantidade de chuva necessária para ocasionar o rompimento do equilíbrio da vertente. O mesmo leva em consideração a intensidade da chuva, a área de drenagem a montante do ponto, a inclinação local do declive as características geotécnicas e hidrológicas da encosta (TABALIPA, 2015).

O modelo SHALSTAB tem como base a teoria de talude-infinito da lei de ruptura de Mohr-Coulomb, em que a resistência ao cisalhamento é igual a força de resistência causada

pela coesão e pela resistência ao atrito, devido a tensão normal eficaz no plano de ruptura (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

Estabelecendo uma proporção entre a coluna de solo que está saturada e a espessura de solo (Z) e baseado em um modelo físico de referência presente na Figura 6 o método SHALSTAB se pode chegar à Equação (2) a seguir, onde θ a inclinação e h o nível das águas subterrâneas:

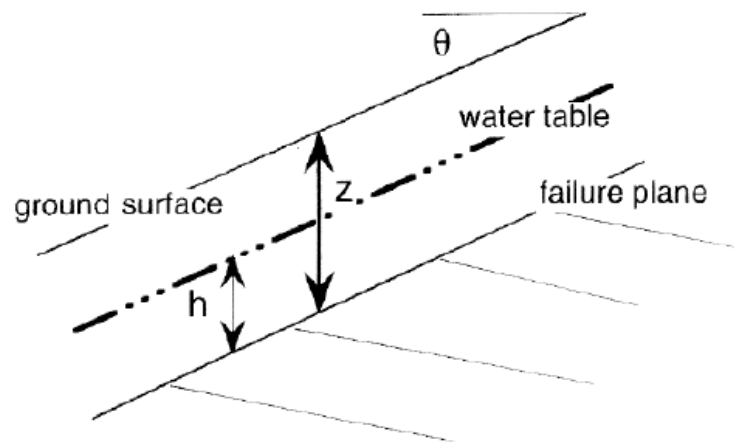


Figura 6 - Modelo físico de referência para a implementação de SHALSTAB.
Fonte: Montgomery & Dietrich (1994) apud Tabalipa (2015).

$$\frac{h}{Z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \quad (2)$$

A partir da relação estabelecida pela Equação (2), Montgomery e Dietrich (1994) definiram diferentes campos de estabilidade que podem ser conferidos na Figura 7, onde inclinações iguais ou superiores ao ângulo de atrito irão deixar o lado direito da Equação (2) menor que zero caracterizando assim o local como instável, mesmo apresentando solo seco ($h/z = 0$), enquanto que a relação h/z não pode ultrapassar 1,0, se $\tan\theta$ for igual ou inferior a $\tan\phi (1 - (\rho_s - \rho_w))$, a área é “incondicionalmente estável” não sendo susceptível a deslizamentos. Há também outros dois estados de estabilidade são “estável” e “instável”, que dependem da relação h/z ser superior ou igual ao valor necessário para se tornar instável ou quando h/z é menor do que o valor necessário para propiciar a instabilidade (TABALIPA, 2015).

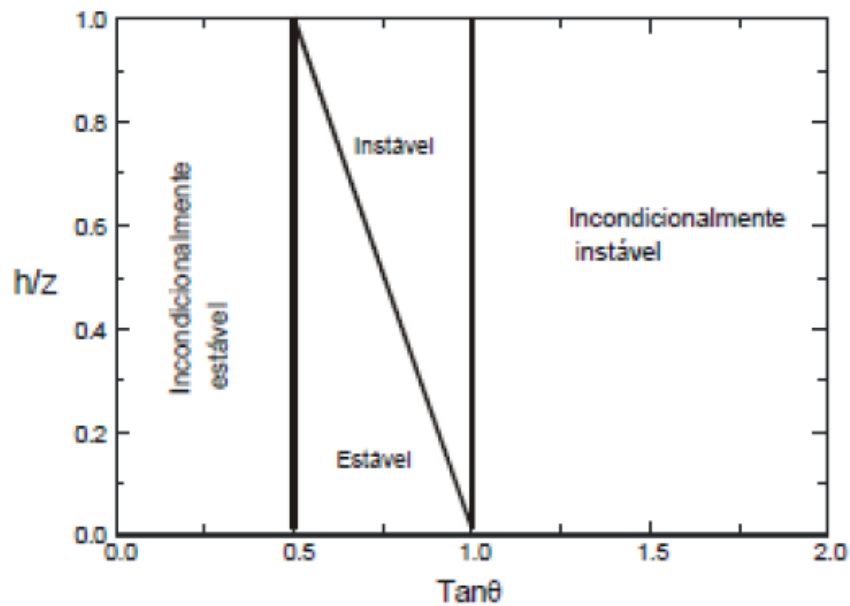


Figura 7 - Definição de campos de estabilidade, mostrando relações entre a proporção da coluna de solo saturado (h/z) e a declividade expressa por $\tan \theta$.

Fonte: Montgomery e Dietrich (1994) apud Tabalipa (2015)

Conforme Tabalipa (2015, p.13):

Para modelar os controles hidrológicos em h/z , Montgomery & Dietrich (1994), usaram um fluxo de subsuperfície raso em estado estacionário com base no trabalho de O'Loughlin (1986) e que tem semelhanças com TOPOG (Beven & Kirkby, 1979) que mostram que a saturação do solo tem relação direta com a razão entre a área de drenagem a montante de um ponto dividida por uma unidade de comprimento de contorno e a declividade. O'Loughlin (1986), através destes princípios, estabeleceu uma relação entre a saturação do solo, a área de contribuição a montante, a precipitação, a transmissividade do solo e a declividade.

O modelo determina a condição de saturação do solo (W), que está definido na Equação (3), como sendo a razão entre a quantidade de chuva Q em mm que ocorre em uma área específica de saturação da camada de solo correspondente. Resultados de W superiores a 1 indicam que o solo possui condições suficientes para saturação (TABALIPA, 2015).

$$W = \frac{Q}{T} \times \frac{a}{b \cdot \sin\theta} \quad (3)$$

Onde:

Q = quantidade de chuva (mm)

a = representa a área de contribuição (m²);

b = comprimento de contorno unitário (m);

θ = declividade;

T = transmissividade do solo que corresponde ao produto entre a condutividade hidráulica saturada e a espessura do solo (m²/dia).

A equação (4) pode ser obtida através da simplificação da equação (3) onde h é a espessura do solo saturado, e z é a espessura do solo (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

$$W = \frac{h}{z} \quad (4)$$

Ao combinar o modelo de estabilidade de taludes da Equação (2) ao modelo hidrológico expresso pela Equação (4) encontra-se a equação de estabilidade hidrológica da encosta, que é utilizada pelo método SHALSTAB para que se possa resolver a relação hidrológica expressa pela equação (5a) ou para a área de contribuição por comprimento de contorno unitário (5b).

$$\frac{q}{T} = \frac{\rho s}{\rho w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{b}{a} \sin\theta \quad (5a)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{\rho s}{\rho w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \frac{T}{q} \sin\theta \quad (5b)$$

Que pode ser apresentado em termos de precipitação crítica Q_c em m/dia (Equação 6):

$$Qc = \frac{T \times \sin\theta}{\frac{a}{b}} \left[\frac{c}{\rho_w \cdot g \cdot Z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\emptyset} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\emptyset} \right) \right] \quad (6)$$

Onde

Qc = precipitação estacionário eficaz (m/dia);

T = transmissividade do solo (m²/dia);

θ = inclinação (°);

a = área contribuinte da célula examinada (m²);

b = largura da sua secção de saída (correspondente ao tamanho do pixel - m);

c = coesão;

ρ_s = densidade do solo (kg/m³);

ρ_w = densidade da água (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

Z = profundidade do solo;

\emptyset = ângulo de atrito (°).

A saturação é a relação da condutividade hidráulica K_s multiplicada pela profundidade Z do solo

Ao resolver a equação (6) encontra-se a relação de (Q/T) e com auxílio da Tabela 5 e traçando a Equação (6) no gráfico apresentado na Figura 8, que possui eixos de área pela sua secção de saída (a/b) e o gradiente da encosta $(\tan\theta)$, é possível obter um mapa da susceptibilidade de deslizamentos de terra (TABALIPA, 2015).

Tabela 5 - Classes de suscetibilidade conforme SHALSTAB.

Código da Classe	Descrição da Classe	Condição
1. Estável	Incondicionalmente estável e saturado	$a/b > (T/Q) \text{sen}\theta$ $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho W/\rho S)$
2. > -2.2	Incondicionalmente estável e não saturado	$a/b < (T/Q) \text{sen}\theta$ $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho W/\rho S)$
3. -2.5 - -2.2	Estável e não saturado	$a/b < \rho S/\rho W(1-\tan\theta/\tan\phi)(T/Q)\text{sen}\theta$ $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\phi(1 - \rho W/\rho S) < \tan\theta < \tan\phi$
4. - 2.8 - - 2.5	Instável e não saturado	$a/b \geq \rho S/\rho W(1-\tan\theta/\tan\phi)(T/Q)\text{sen}\theta$ $a/b < (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\phi(1 - \rho W/\rho S) < \tan\theta < \tan\phi$
5. -3.1 - -2.8	Instável e saturado	$a/b > \rho S/\rho W(1-\tan\theta/\tan\phi)(T/Q)\text{sen}\theta$ $a/b > (T/Q)\text{sen}\theta$ $\tan\phi(1 - \rho W/\rho S) < \tan\theta < \tan\phi$
6. < -3.1	Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan\phi > \tan\theta$; $a/b < (T/q)\text{sen}\theta$
7. Instável	Incondicionalmente Instável e saturado	$\tan\phi > \tan\theta$; $a/b > (T/q)\text{sen}\theta$

Fonte: Adaptado Montgomery e Dietrich, 1994.

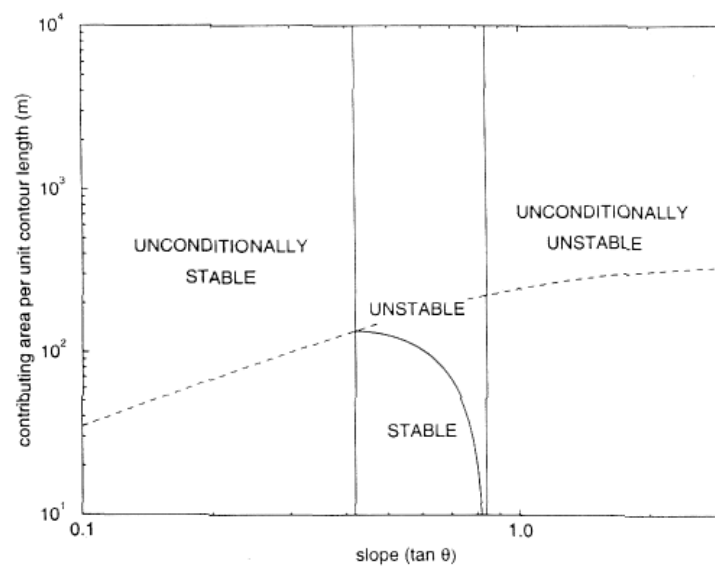


Figura 8 - Relações das classes de estabilidade de SHALSTAB representado sobre um plano $\tan \theta - a/b$. A linha pontilhada é o limite de saturação

Fonte: Montgomery e Dietrich (1994) apud Tabalipa (2015).

2.5 Elaboração e estruturação dos dados em ambiente SIG

O SIG é conceituado com um sistema constituído por um conjunto de informações computacionais, que integram dados, com o objetivo de manipular, analisar e visualizar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido (FITZ, 2008).

Para compilação dos dados utilizados no presente estudo foram utilizados o ArcGIS 10.2 versão demo módulo ArcMap e o ArcView GIS 3.2 onde foi instalada a extensão SHALSTAB.

O ArcGIS é produzido pela ESRI (Environmental Systems Research Institute), e é disponibilizado no site da mesma gratuitamente em uma versão demo. Este *software* fornece ferramentas baseadas em padrões para análise espacial, armazenamento, processamento e manipulação de dados geográficos e mapeamento. Os dados geográficos são organizados de acordo com suas semelhanças temáticas e vêm acompanhados por uma correspondente tabela de atributos. Os formatos de armazenamento de dados espaciais podem ser divididos em dois tipos o vetorial, que representa pontos, linhas e polígonos, e o raster que representa um espaço dividido em células, nas quais são armazenados dados numéricos, representados por uma matriz que podem se referir a altimetria, temperatura, cor etc., mas ambos são modos de representar o espaço por estruturas geométricas. Os mapas temáticos de declividade, forma das vertentes, orientação das encostas e tipo de solos que foram utilizados para análise do mapa de áreas estáveis obtido por SHALSTAB, foram elaborados através deste *software*.

O ArcView é um *software* GIS rico em funcionalidades para visualização, gerenciamento, elaboração e análises de dados geográficos. Com o mesmo é possível entender o contexto geográfico de seus dados, bem como relacionamentos e identificar padrões de distribuição espacial ArcView é o nível de entrada de licenciamento básico do ArcGIS. Para executar o modelo SHALSTAB foi desenvolvida uma rotina para o ambiente ArcView, em linguagem AVENUE, que permite automatizar tarefas individuais, criar e integrar tarefas com o ArcView, denominada SHALSTAB.avx. Esta verifica e remove as depressões geradas pelo interpolador, calcula a declividade, orientação das encostas e a área de drenagem, e por fim resulta no mapa de estabilidade de vertentes de acordo com as condições pluviométricas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi classificado com uma pesquisa quantitativa com o intuito de traduzir em números informações para classifica-las e assim poder analisa-las. Segundo Richardson (1989), este tipo de pesquisa caracteriza-se pela quantificação, tanto na etapa de coleta de informações, quanto no tratamento das mesmas que usa de técnicas estatísticas, desde as mais simples até as mais complexas.

Este método é frequentemente aplicado em estudos descritivos, que procuram descobrir e classificar a relação entre variáveis, descobrindo as características de um tal fenômeno (RICHARDSON, 1989). Neste sentido fica evidente a classificação deste estudo dentro deste tipo de metodologia de pesquisa, pois, para formação da amostra o primeiro passo é identificar as variáveis envolvidas, para poder realizar uma análise estatística e obter os resultados quantificados de forma direta.

Em relação aos procedimentos técnicos, o trabalho se baseia em dados obtidos de fontes bibliográficas principalmente em Kozciak (2005), além de livros e artigos científicos.

Este trabalho tem como local de estudo as vertentes da Bacia do Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná.

A metodologia pode ser agrupada nos seguintes procedimentos:

- ✓ Levantamento bibliográfico com recuperação dos parâmetros de propriedades dos solos, encontrados em Kozciak (2005) e Borchardt (2005), e dos mapas e fatores de segurança das encostas elaborados por Kozciak (2005).
- ✓ Obtenção de um modelo digital do terreno (MDT) a partir da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná (SEMA).
- ✓ Elaboração de mapas derivados do MDT como mapa geológico, de uso do solo, mapa de declividade, orientação e forma das vertentes, da área em questão.
- ✓ Organização das informações encontradas em banco de dados geográfico, para utilização do *software* ArcGis, possibilitando a integração de informações a partir da concepção e combinação de mapas e tabelas.

- ✓ Aplicar o modelo SHALSTAB, mapeando as áreas susceptíveis a escorregamentos, comparando os resultados encontrados com os mapas de Fatores de Segurança (Fs) elaborados no estudo de Kozciak (2005).

Com base nessas etapas de fluxo sequencial foi criado um diagrama contemplando os procedimentos adotados no decorrer deste trabalho, apresentados na Figura 9.

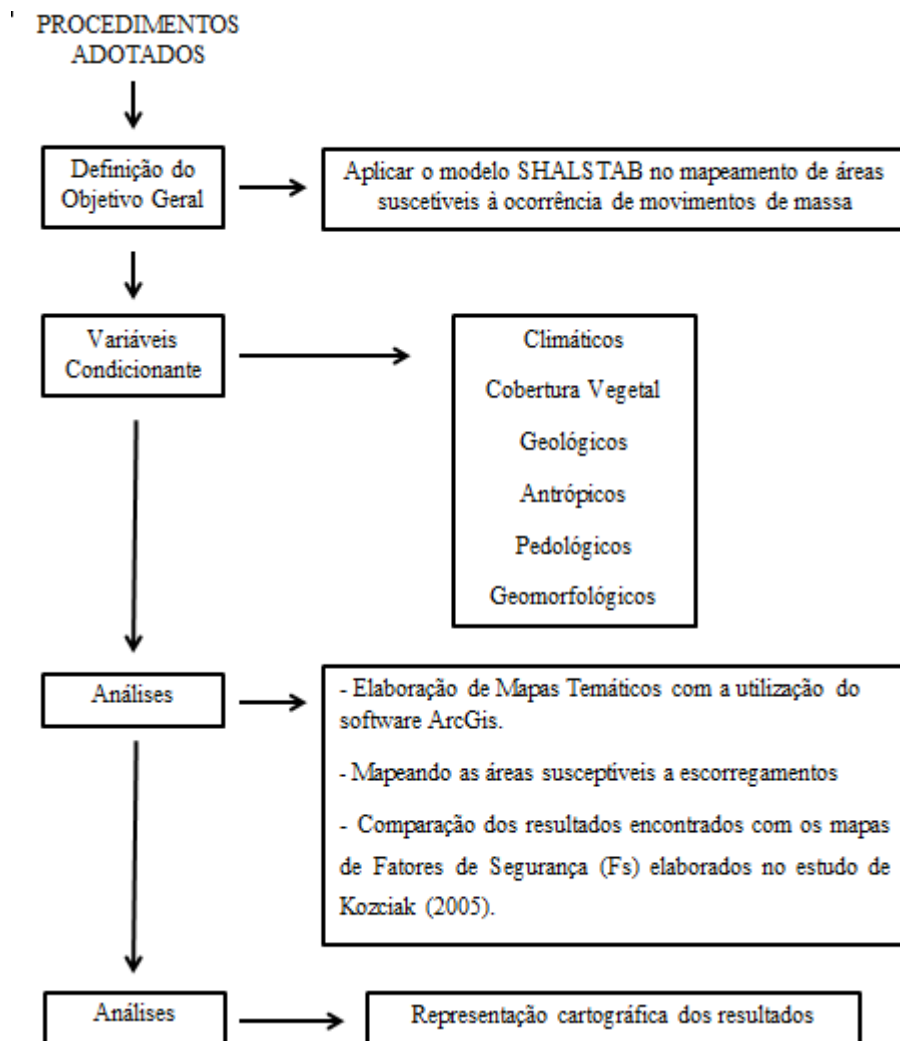


Figura 9 – Diagrama dos Procedimentos Adotados
 Fonte: Autoria Própria, 2015.

4 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO

A área do presente estudo corresponde à bacia hidrográfica do Rio Marumbi situada no município de Morretes na porção costeira do estado do Paraná conforme a Figura 10, entre as coordenadas 25°27' e 25°36' de latitude sul e 48°58' e 48°48' de longitude oeste, conforme apresentado na Figura 10. Com 102,8 km² de extensão a área da bacia abrange parte da Área Especial de Interesse Turístico do Marumbi e importantes áreas de proteção ambiental, tais como o Parque Estadual do Pico Marumbi e o Parque Estadual do Pau-Oco. O rio principal tem suas nascentes na Serra do Marumbi e deságua no Rio Nhundiaquara (CUNICO, 2007).

Morretes situa-se a 68 km da capital do estado Curitiba, tendo como principal via de ligação entre essas cidades a BR-277. O acesso ao município também é possível pela rodovia estadual PR-408 que interliga os municípios litorâneos e através da Ferrovia Curitiba-Paranaguá, que constitui uma importante rota turística para o município.

Há duas unidades morfológicas bem distintas na bacia do Rio Marumbi, a Serra do Mar e a Planície Litorânea. A Serra do Mar constitui o limite entre o Primeiro Planalto e a Planície Costeira. É o grande divisor de águas entre a drenagem das águas para o litoral e aquelas que drenam para o interior para formar os Tributários do Rio Iguaçu. A Planície Litorânea possui relevo plano e suave ondulado de declividade pouco acentuada (KOZCIAK, 2005).

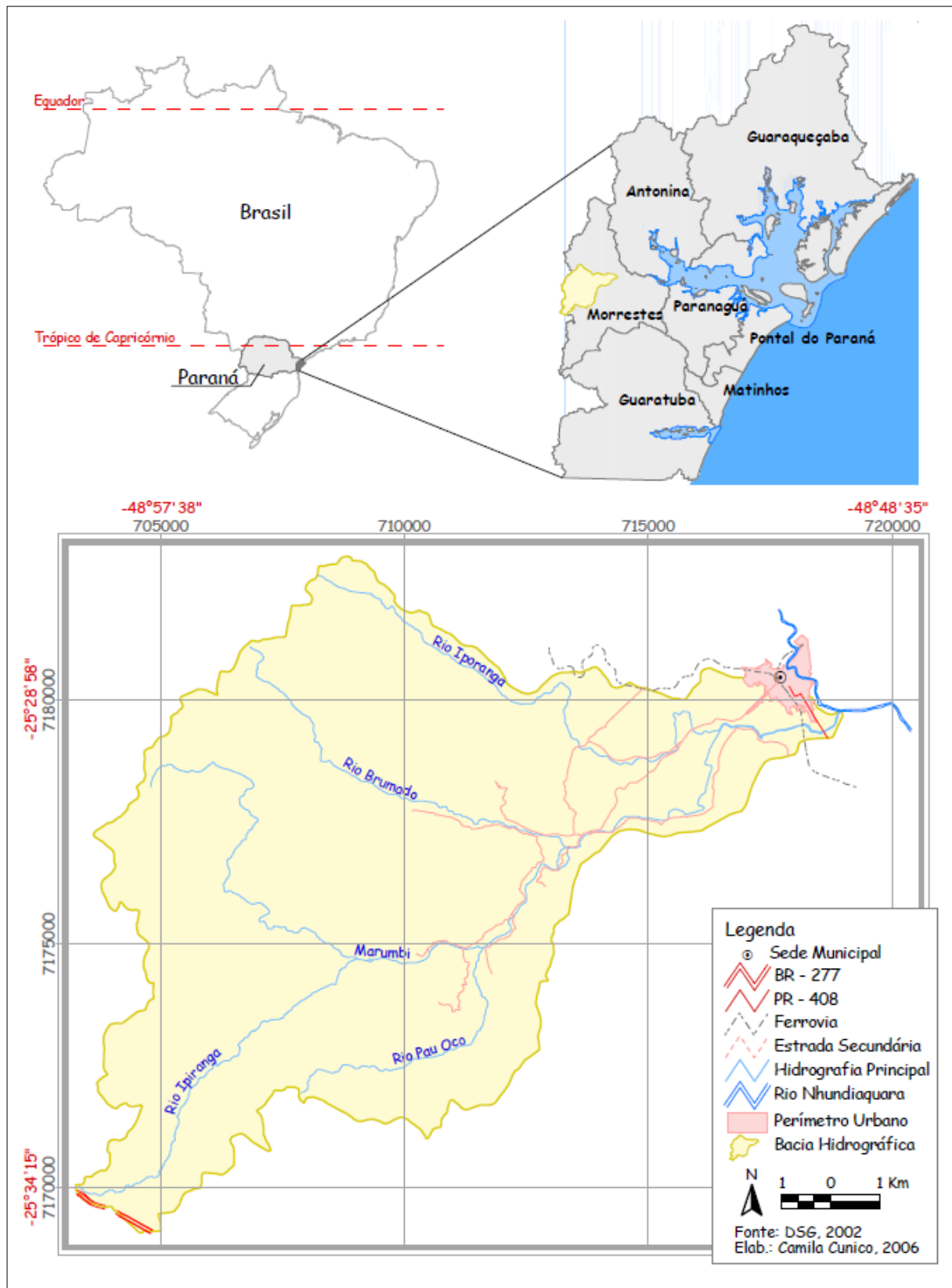


Figura 10 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Marumbi
Fonte: Cunico, 2007.

4.2 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E GEOLÓGICOS

A porção costeira do estado do Paraná é constituída por uma cadeia de montanhas marginal do Primeiro Planalto Paranaense conhecida como Serra do Mar, que separa o mesmo da planície litorânea. Essa foi originada em uma escarpa de falha com mais de 1000 km de extensão compreendidos entre o estado do Espírito Santo e o de Santa Catarina, com larguras entre 5 km e 10 km, e um desnível médio de 1000 m. Predominam nesta unidade as formas de relevo constituídas basicamente por escarpas, e cristas. Com o relevo bastante acidentado a drenagem caracteriza-se por possuir uma grande quantidade de afluentes e subafluentes encaixados nas linhas de falhas ou fraturas (OKA-FIORI et al., 2006).

De acordo com Cordani e Girardi (1967) a Serra do Mar apresenta um desnível acentuadamente maior para o lado do oceano do que para o continente, possuindo taludes e vertentes íngremes para os dois flancos. O relevo é bastante acidentado apresentando vales profundos, estreitos e vertentes rochosas abruptas.

No Paraná a Serra do Mar apresenta algumas características diferentes das apresentadas nos demais estados que a compreendem, pois, ela não constitui apenas uma serra de borda de planalto ou de escarpa, mas também possui áreas originadas por erosão diferencial. Assim em áreas onde as rochas são mais resistentes as serras sobressaem algumas centenas de metros do nível médio do planalto, como exemplo disso temos a Serra do Marumbi que tem altitudes de 1300m a 1800m, ou seja, aproximadamente 400m a 900m acima do nível do planalto. Justificando assim a formação de duas vertentes serranas uma ocidental orientada para o lado do planalto e outra oriental voltada para o mar (IPARDES, 1989).

O Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social- IAPARDES fez no ano de 1989 um zoneamento do litoral do Paraná a partir de seus aspectos geomorfológicos, agrupando porções do território com características naturais físicas ou biológicas que as diferenciasssem das demais. Assim a região em estudo foi subdividida em três sub-regiões principais: Montanhosa Litorânea, Planícies Litorâneas e Planaltos:

- A sub-região **Montanhosa Litorânea** abrange a Serra do Mar possuindo um relevo com grandes desníveis e fortes declividades em geral superiores a 45%. Os solos são pouco desenvolvidos e de pequenas profundidades ocorrendo áreas de afloramento rochoso. Uma combinação de fatores climáticos e tectônicos submeteu a

área a intensos processos de erosão, atualmente o clima é o fator que atenua a alta potencialidade morfogenética da área, ou seja, alta capacidade de promover uma rápida evolução das vertentes. Em contra partida a vegetação natural torna-se um elemento de estabilização da paisagem.

- A sub-região **Planícies Litorâneas** apresenta um relevo plano e suavemente ondulado com altitudes geralmente inferiores a 40 m, onde se sobressaem morros e colinas de diversos tamanhos. As variações do nível do mar e as mudanças climáticas deram origem às planícies que estão divididas em seis grupos de acordo com o diferente processo de formação : Planícies Aluviais, Planícies de Restingas, Morros, Colinas, Mangues e Áreas Aluviais.

- E por fim a sub-região **Planaltos** abrange setores da borda oriental do Primeiro Planalto Paranaense e o planalto do extremo norte do município de Guaraqueçaba conhecido como Planalto do Rio Turvo. É remanescente de antigas superfícies de erosão e atualmente localiza-se entre 600 e 900 m acima do nível do mar, sofrem decomposição pela drenagem superficial, e devido a esse último aspecto são divididos em: Planaltos Ondulados e Planaltos Dissecados.

A geologia do litoral do Paraná abrange rochas que iniciaram sua formação na idade proterozóica, época de formação dos migmatitos que constituem os morros da baixada litorânea, até formações mais recentes como os sedimentos arenosos, que constituem a planície costeira (MINEROPAR, 2014). As litologias mais importantes e de maior distribuição são quase sempre metamórficas de alto grau, como migmatitos, gnaisses e xistos e com menos frequência os quartzitos, os quais estão associados a rochas intrusivas de ciclos metamórficos mais jovens (OKA-FIORI et al., 2006).

A Serra do Mar apresenta como tipos litológicos predominantes os granitos e os migmatitos conforme a Figura 11. Em proporções mais limitadas estão presentes sequências vulcânicas ácidas e sequências sedimentares do Eo-Paleozóico, quartzitos, diques de diabásio e depósitos colúvi-aluvionares do Quaternário. Quase todas estas sequências litológicas tiveram suas origens associadas a processos tectônicos-orogênicos antigos que orientam as principais direções do conjunto morfo-estrutural da Serra do Mar. Para gnaisses e migmatitos predominam as direções estruturais de foliações NE-SW. Na direção N50W a tectônica rígida contribui para alinhamentos estruturais com um cerrado sistema de fendas, as quais em maioria foram preenchidas com diques de diabásio do Jurássico-Cretáceo (FUCK, et al., 1969).

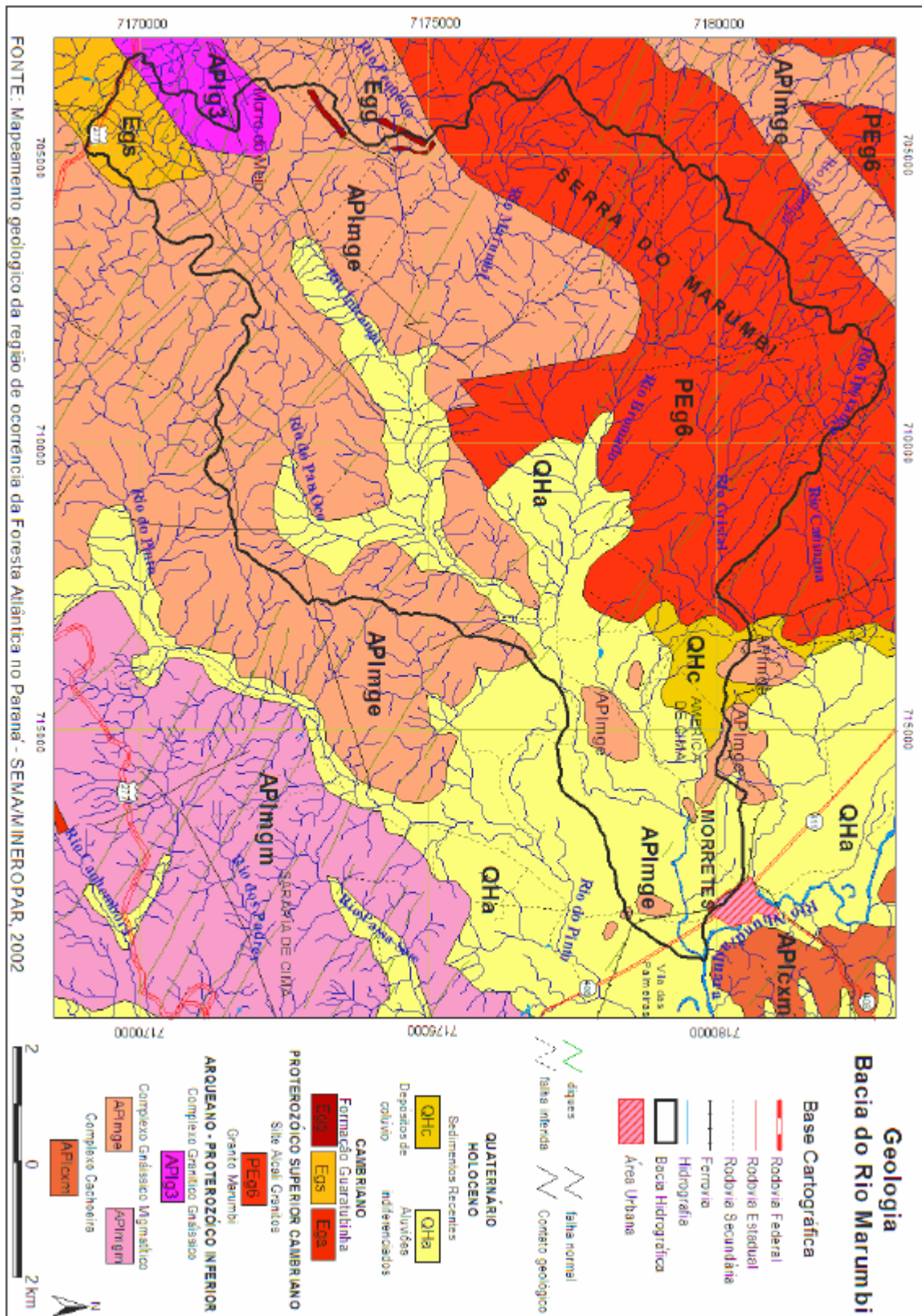


Figura 11 - Geologia da Bacia do Rio Marumbi
fonte: SEMA/MINEROPAR (2002) apud. Kozciak (2005).

Presentes em toda área da bacia em estudo estão intrusões de diques de diabásio, diorito, pórfiro e microdiorito os quais se alojam nas fraturas profundas e paralelas com orientação geral N40-60W, cortando granitos e migmatitos com intrusões na disposição vertical ou quase vertical. Os diques constituem cristas alongadas que se sobressaem na topografia, isto está associado a sua maior resistência em relação aos migmatitos principalmente, porém formando vales nos maciços graníticos (KOZCIAK, 2005).

Na Planície Litorânea são comuns os morros isolados e espigões, que são constituídos de rochas pré-cambrianas ou de diques de diabásio, e entre pequenos maciços existem níveis de sedimentos embutidos em largos alvéolos irregulares. Na Bacia do Rio Marumbi ocorrem os solos hidromórficos gleyzados indiscriminados, formados a partir da meteorização de sedimentos aluviais ou colúvio aluviais do Quaternário, ocorrendo nas partes baixas do relevo plano (KOZCIAK, 2005).

No sopé das vertentes da Serra do Mar aparecem os depósitos de colúvio, e ao longo dos vales dos mais importantes fluxos d'água e sobre a planície aluvial do Nhundiaquara situada a noroeste da área de estudo aparecem os depósitos aluvionares, ambos formados por sedimentos não consolidados de origem terrígena. A maioria trata-se de siltes e argilas que deram origem a depósitos coluviais sem estrutura sedimentar, provenientes de deslizamentos de materiais em grande escala e do profundo manto de decomposição das rochas do substrato. Ao longo dos rios algumas vezes aparecem aluviões fluviais de caráter arenoso e leito de cascalho (CORDANI & GIRARDI, 1967).

Segundo Kozciak (2005) os aluviões associam-se a sedimentos de deposição fluvial e os colúvios estão associados ao deslizamento de materiais provenientes do substrato rochoso, sendo muito comum ao longo de alguns rios a presença de areias de diferentes granulções e também de seixos indicando efetivo transporte.

4.3 ASPECTOS DA VEGETAÇÃO

O estado do Paraná compreende três principais tipos de vegetação a mata pluvial tropical, mata fluvial subtropical e os campos. A mata conquistou a maior parte das áreas do estado, isso está relacionado a fatores climáticos predominantes no Quaternário Recente. Nesse período existiam os campos limpos e cerrados propiciados pelo clima semiárido da época, abrangiam grande parte do Paraná. Devido às mudanças climáticas pelas quais a região passou, a mata acabou dominando os campos a partir dos declives das escarpas e dos vales

dos rios, e hoje o clima subtropical mesotérmico favorece o desenvolvimento da mesma (MAACK, 1961).

A Serra do Mar em sua totalidade é coberta por formações da Floresta Ombrófila Densa, que varia em relação à altura e ao substrato. Nos cumes da serra acima de 1400m situam-se os Refúgios Ecológicos, onde as altitudes influenciam o microclima, desenvolve-se uma flora específica desse ambiente que se diferencia da vegetação regional. No terço superior da serra, em média entre 1200 a 1400m define-se a Floresta Ombrófila Densa Altomontana, caracterizada por uma predominância arbórea compacta de porte reduzido com uma flora pouco diversa. Nos terços médios estão a Floresta Ombrófila Densa Submontana (de 50 a 500 m) e a Floresta Ombrófila Densa Montana (de 500 a 1200 m), que apresentam flora bem desenvolvida e fisionomicamente muito semelhante, com diversidades florísticas devido as diferenças climáticas impressas pela variação de altitude. Entre 5m a 50m de altitude esta a Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, onde a fisionomia é a mesma das anteriores, porém com condições diferentes de substrato arenoso e do padrão de drenagem (IBGE, 1994; RODERJAN, 1994).

Portanto a vegetação da área de estudo, que se localiza na Serra do Mar, pode ser caracterizada da seguinte maneira:

- Floresta Ombrófila Submontana (ou de início de encosta): Caracteriza-se por uma cobertura arbórea densa e uniforme, atingindo de 25 a 30 m de altura. O clima tipicamente tropical influencia no crescimento contínuo da vegetação, e torna o interior destas florestas, bastante úmido e mal ventilado, rico em epífitas e espesso manto de detritos vegetais (IAP, 2003).
- Floresta Ombrófila Montana (ou de meio de encosta): Difere pelas declividades mais acentuadas e pelo ambiente superúmido provocado pela elevação, resfriamento e precipitação das massas úmidas do oceano. Apresenta árvores de grande porte, ultrapassando os 30 m de altura. As espécies de clima tropical escasseiam ou desaparecem. O ambiente no interior das florestas assemelha-se ao dos níveis inferiores submontanos (IAP, 2003).
- Floresta Ombrófila Altomontana (ou do alto das encostas): Com solos mais rasos e erodidos, apresenta uma redução no porte e diversidade da flora, com árvores baixas e retorcidas com troncos cobertos de musgos. Nestas altitudes, sobre solos localmente favorecidos, observa-se o avanço de espécies características da formação Montana, porém com desenvolvimento reduzido. Os limites superiores atingem altitudes de até 1500 m,

quando a fisionomia característica dos campos de altitude determina o limite entre Floresta Ombrófila Densa Altomontana e Refúgio Ecológico (IAP, 2003).

- Refúgios Ecológicos (ou campos de altitude): Os solos rasos ou incipientes não permitem o desenvolvimento de vegetação arbórea, restringindo-se, apenas a composições graminóide-arbustivas, misturadas a ervas e arbustos (IAP, 2003).

4.4 ASPECTOS CLIMÁTICOS

Os aspectos climáticos de uma região podem apresentar condições bastante diversificadas influenciadas pela configuração geográfica, sua extensão costeira, sua topografia e a dinâmica das massas de ar que atuam sobre o seu território. A região em estudo no litoral do Estado do Paraná, tem parte do território localizado na Região Sul do Brasil entre as latitudes 24°30`S e 26°00`S e longitudes 48°00`W e 49°00`W conhecido como a Planície Litorânea e parte localizado na Serra do Mar. Segundo a classificação de Koeppen o clima da planície da costa paranaense é do tipo Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfa) com temperaturas médias superiores a 22° no mês mais quente, e inferiores a 18° no mês mais frio sem estação seca definida com verão quente e com pouca frequência de geadas. Esse mesmo tipo climático ocorre na Serra do Mar até uma altitude de 700m, a partir da qual passa a ser Subtropical Úmido Mesotérmico- com verão fresco, caracterizado por precipitações mais abundantes e a temperatura média do mês mais quente não atinge os 22°C (VANHONI & MENDONÇA, 2008).

A Figura 12 que apresenta as médias anual e sazonal de temperaturas mínimas mostra que a média anual fica entre 16° e 18°C na planície litorânea e com o aumento da altitude vai decaindo, já nas Serras a média fica entre 11° e 13°C. No verão a média sobe e fica entre 19° e 21°C na planície e entre 15° e 16°C nas regiões mais altas, e essa média cai mais para picos montanhosos ficando entre 12° e 13°C. No inverno, as médias situam-se entre 12° e 14°C na planície, e nas regiões montanhosas chega a valores entre 09° e 11°C. E no outono e na primavera as médias se assemelham às médias anuais.

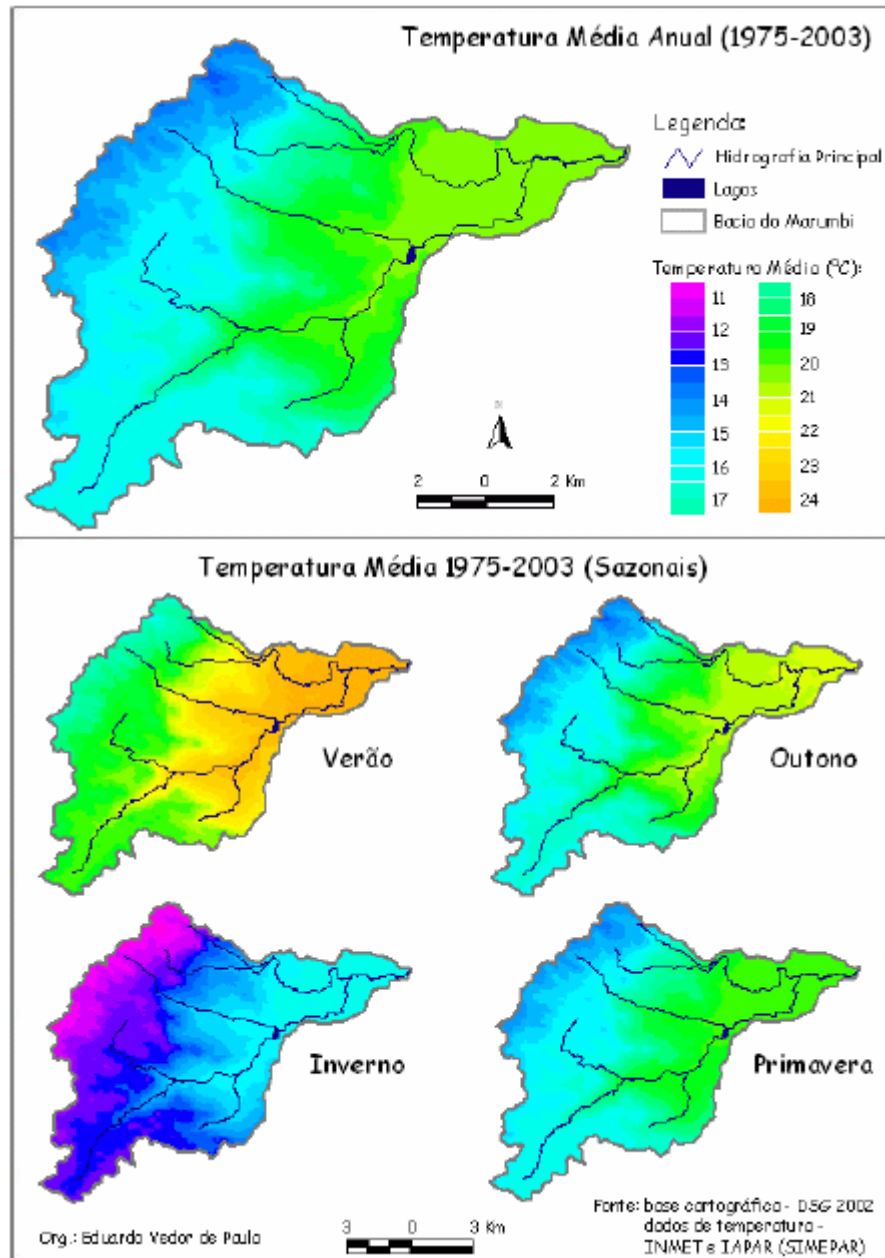
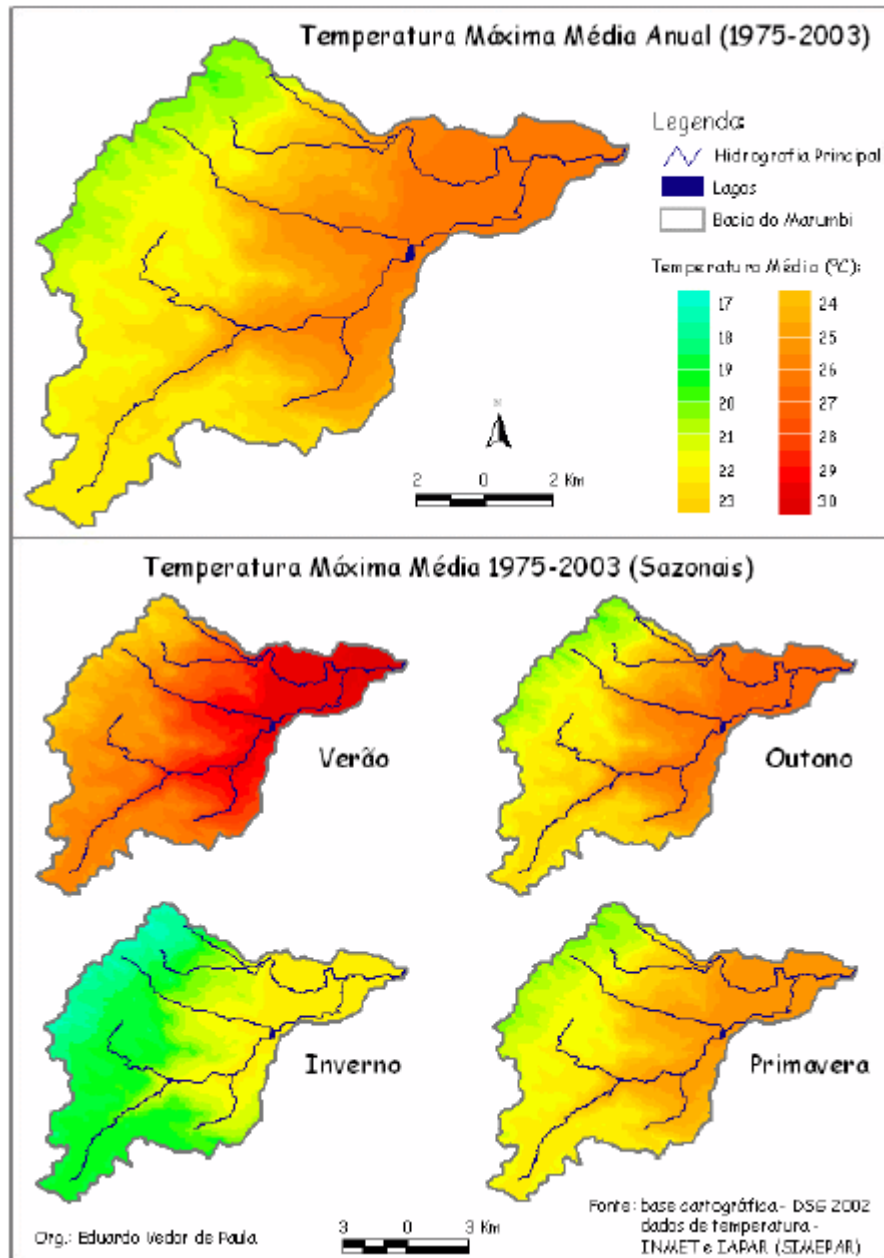


Figura 12 - Temperatura Média Mínima (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.
Fonte: Vanhoni & Mendonça, 2008.

Em relação às temperaturas médias anuais e sazonais apresentadas na Figura 13, a média situa-se entre 19° e 21°C na planície e entre 15° e 17°C nas serras exemplificado na Figura 13. Sendo que no verão a média fica entre 22° e 24°C nas planícies e entre 19° e 21°C nas porções mais elevadas. No outono fica entre 20° e 22°C nas planícies e entre 15° e 17°C nas serras. No inverno as médias estão entre 15° e 17°C e podendo chegar nas porções mais elevadas a valores entre 13° e 14°. Para a primavera as médias se assemelham às médias anuais.



**Figura 13 - Temperatura Média (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.
Fonte: Vanhoni & Mendonça, 2008.**

Para as temperaturas máximas presentes na Figura 14, a média anual fica entre 25° e 27°C na planície e chega a valores entre 22° e 23°C nas serras. No verão essa temperatura média máxima fica entre 29° e 30°C na área de planície e passa para valores entre 25° e 27°C na porção mais elevada do relevo. No outono gira em torno de 26° e 27°C, sendo de 23° e 24°C nas porções mais elevadas do relevo. No inverno fica entre 22° e 23°C na planície, e entre 19° e 20°C nas serras. E na primavera se assemelha as médias anuais.

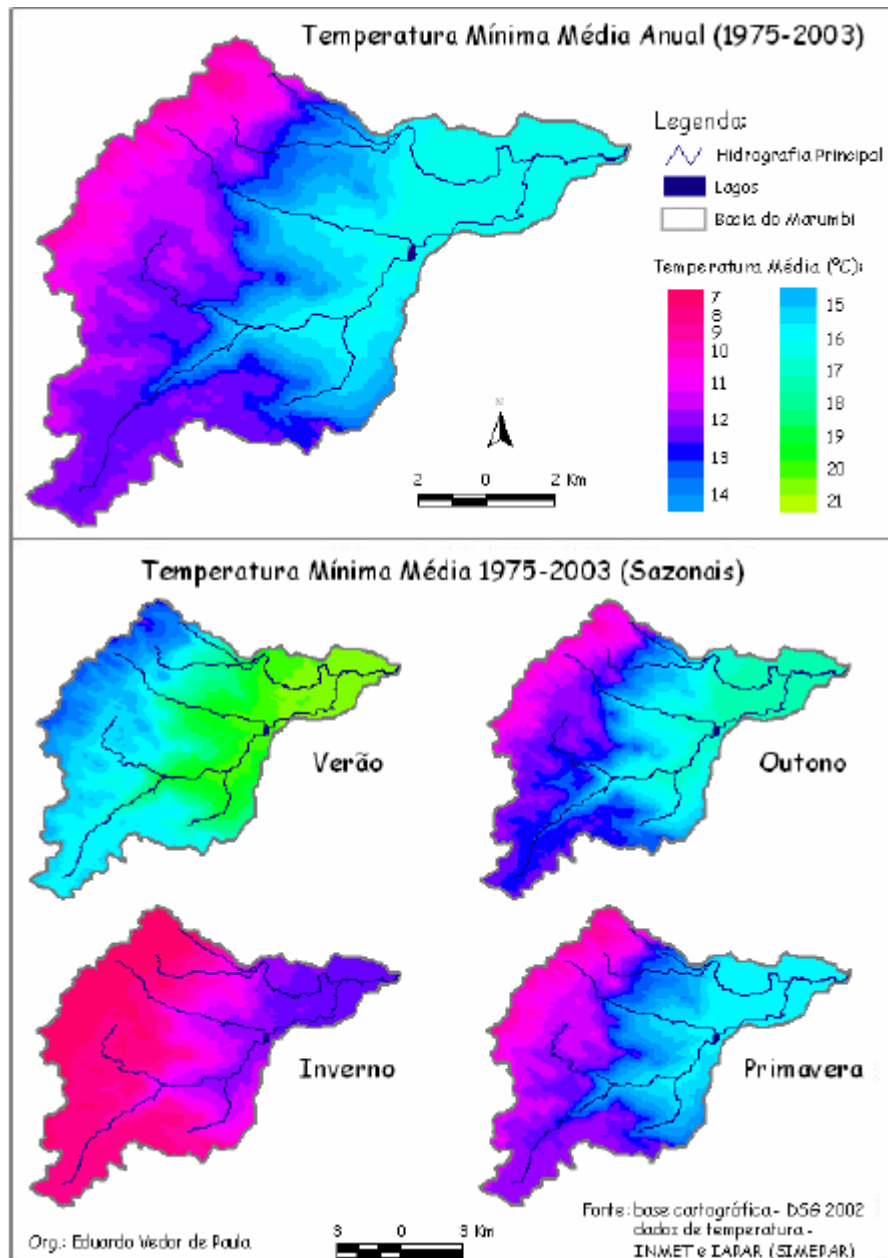


Figura 14 - Temperatura Média (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.
Fonte: Vanhoni & Mendonça, 2008.

Para Vanhoni & Mendonça (2008) a análise destes mapas mostra uma relativa homogeneidade dos resultados no decorrer do ano, presente em todas as estações. Sendo que o período mais quente compreende os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, sendo que o de fevereiro se caracteriza por apresentar as temperaturas mais altas entre os citados. E os meses de junho, julho e agosto são os que apresentam as menores temperaturas, sendo que o mês de julho apresenta a menor média entre os três. No inverno são registradas as menores médias, que podem ser atribuídos aos fatores climáticos dinâmicos que atuam sobre a região neste

período como a Frente Polar Atlântica (FPa) e a Massa Polar Atlântica (MPa). Ainda pode-se observar a grande influência do relevo e de outros fatores como a diferença de pressão e a maritimidade na determinação das médias (anual e sazonal) das temperaturas.

A pluviosidade é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos climáticos na análise regional. A média pluviométrica anual no litoral do Paraná é de 2435,8mm, sendo que a máxima é registrada na estação Veu de Noiva (em Morretes) com média de 3465,4mm, e a mínima registrada na estação de Morretes, com média de 1958,7mm. Estes dados podem ser explicados pela sua localização num vale profundo, com orientação favorável a penetração das massas de ar provenientes do oceano Atlântico com 680 m de altitude (VANHONI & MENDONÇA, 2008).

As precipitações na Serra do Mar são elevadas e distribuídas durante o ano todo como exemplificado na Figura15, sendo o inverno menos chuvoso com média que varia de 300 a 400 mm/ano, e o verão o mais chuvoso com precipitações de 1000mm/ano nas áreas mais altas. No outono a média varia entre 500 e 800 mm/ano, sendo que na Serra do Mar apresenta uma média maior entre 700mm e 800mm. Na primavera a chuva se distribui com maior homogeneidade e a média situa-se entre 500mm e 600mm.

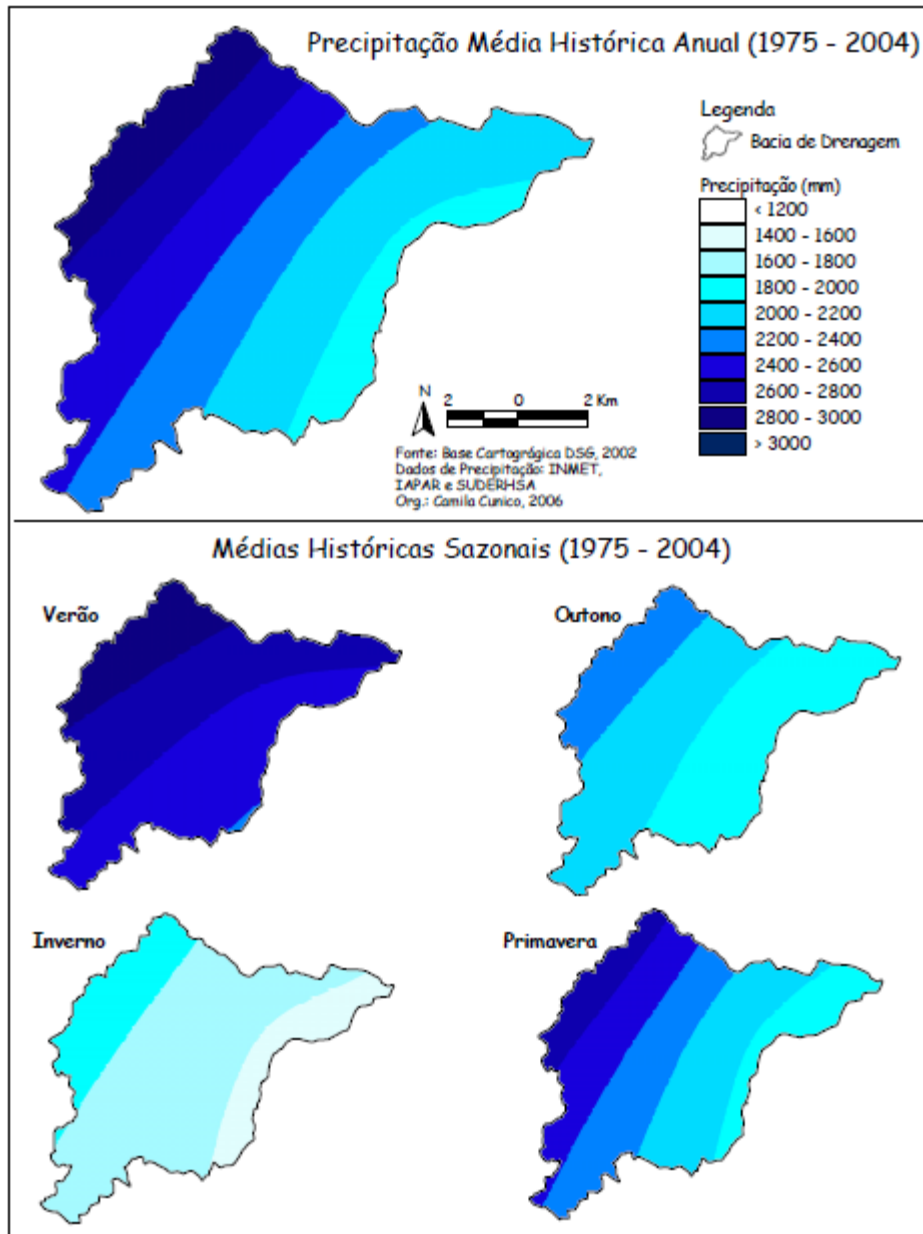


Figura 15 – Precipitação Média Histórica (Anual e Sazonal) no Litoral do Paraná.
 Fonte: Vanhoni & Mendonça, 2008.

A pluviosidade média mensal para a região como podemos conferir na Figura 16, é maior nos meses de verão, como janeiro e fevereiro, tendo o mês de janeiro média de 350 mm/ano. O inverno é o período com menor média pluviométrica, principalmente o mês de agosto, com média em torno de 80 a 150 mm.

Em geral as estações localizadas acima de 100 m do nível do mar apresentam médias pluviométricas mais elevadas, como é o caso da estação de São João da Graciosa (Morretes) e Vêu de Noiva. Na planície de Antonina, Morretes e Paranaguá, a média pluviométrica fica

entre 2.000 e 2.200 mm/ano. Em áreas montanhosas próximas a esses municípios a média pode ultrapassar este valor (VANHONI & MENDONÇA, 2008).

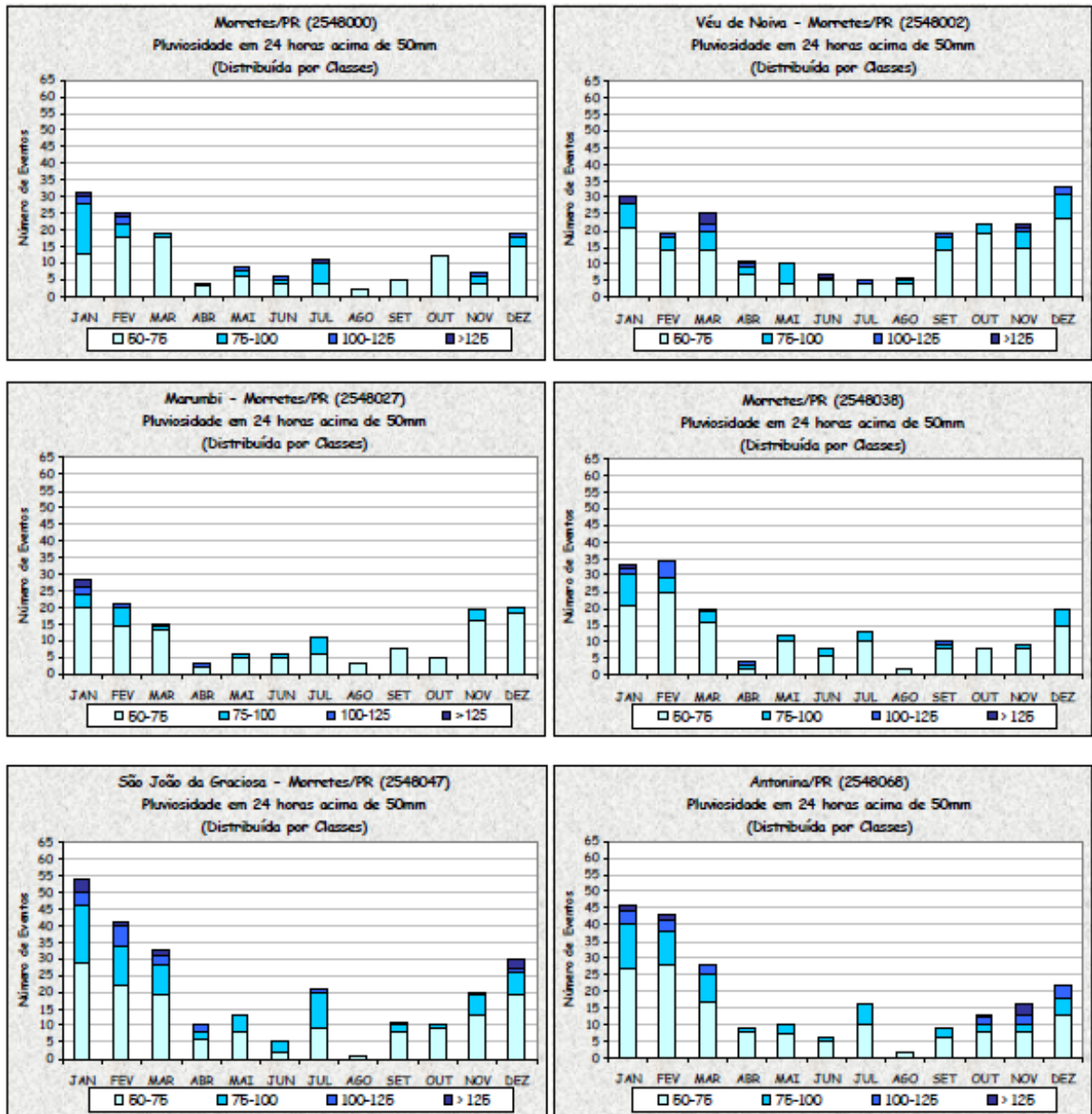


Figura 16 - Pluviosidade em 24 horas acima de 50mm
 Fonte: SUDERSHA (2006) e IAPAR (2006) apud. Cunico (2007).

5 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE ESTABILIDADE DE VERTENTES

Para elaboração do mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos, primeiramente foi feita a análise de cada parâmetro envolvido separadamente. Para isto foram gerados os mapas de declividade, forma das vertentes, orientação das encostas e hipsometria da bacia do rio Marumbi. Estes foram confeccionados a partir do modelo digital de elevação do terreno (MDE), que consiste na representação do terreno através da modelagem em três dimensões. Esse tipo de modelagem foi possível a partir da base do terreno em duas dimensões e a altimetria do mesmo. A altimetria é representada a partir de curvas de nível, que são linhas dispostas sobre o terreno que unem pontos de igual altitude, representando graficamente as irregularidades do relevo local.

A representação planimétrica digital do terreno em 2D foi obtida através da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná (SEMA-PR), que tem em seu site disponível as cartas topográficas do litoral paranaense em formato DGN e DWG na escala 1:25.000 com curvas de nível de intervalo de 10 m. A base cartográfica utilizada é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6- Cartas topográficas utilizadas

Carta	Folha
Morretes	MI 2843-3 SE
Serra do Marumbi	MI 2843-3 SO
Rio Marumbi	MI 2858-1 NO
Rio Sagrado	MI 2858-1 NE

Fonte: Autoria Própria, 2015.

As cartas foram convertidas todas para o formato DGN e georreferenciadas no *software* da Autodesk o AutoCAD 2014 versão para estudantes. Neste mesmo programa foram unidas as linhas que formavam cada curva de nível a fim de transformá-las em *polilines* para facilitar o passo seguinte que foi a inserção manual das alturas respectivas de cada curva de nível. Além das curvas de nível outra informação contida nos arquivos da

Secretaria do Estado de Meio Ambiente (SEMA) e importante para o trabalho foi a vetorização dos rios do terreno, os quais também foram unidos em *polilines* e atribuído o valor zero para a altitude. Foram criados dois diferentes arquivos, um contendo as curvas de nível e o outro contendo a hidrografia.

Então a integração dos dados anteriores foi feita em ambiente SIG tendo como ferramenta o *software* ArcGIS 10.2 módulo ArcMap disponibilizada no site da ESRI gratuitamente em uma versão demo.

O primeiro passo no *software* ArcGIS 10.2 módulo ArcMap é determinar o sistema de coordenadas utilizado nas cartas topográficas, que para este caso foi o SIRGAS 2000 UTM zone 22S, isso foi feito clicando com o botão direito na tela de visualização do programa escolhendo a opção *Data Frame Properties* e em seguida *Coordinate System* e então na opção *Predefined* selecionou-se a opção citada acima, que pode ser vista na Figura 17 já tendo sido marcada como favorita para melhor visualização das opções escolhidas.

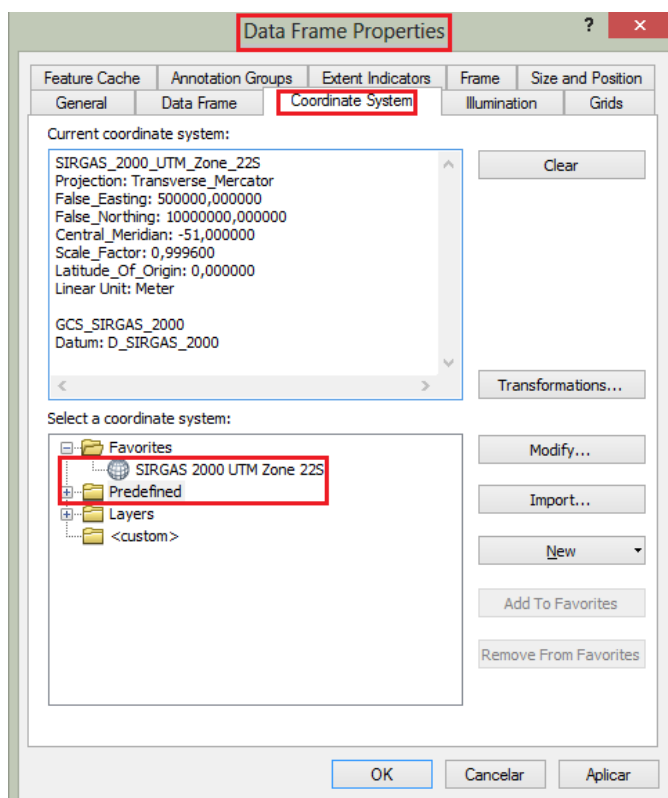


Figura 17- Definição Sistema de Coordenadas
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Em seguida os dados em DGN foram exportados para o ArcMap através da ferramenta *add data* situada na barra de ferramentas, tanto para as curvas de nível quanto para a hidrografia foram exportados os dados referentes as *polilynes* conforme exemplificado na Figura 18 um desses casos.

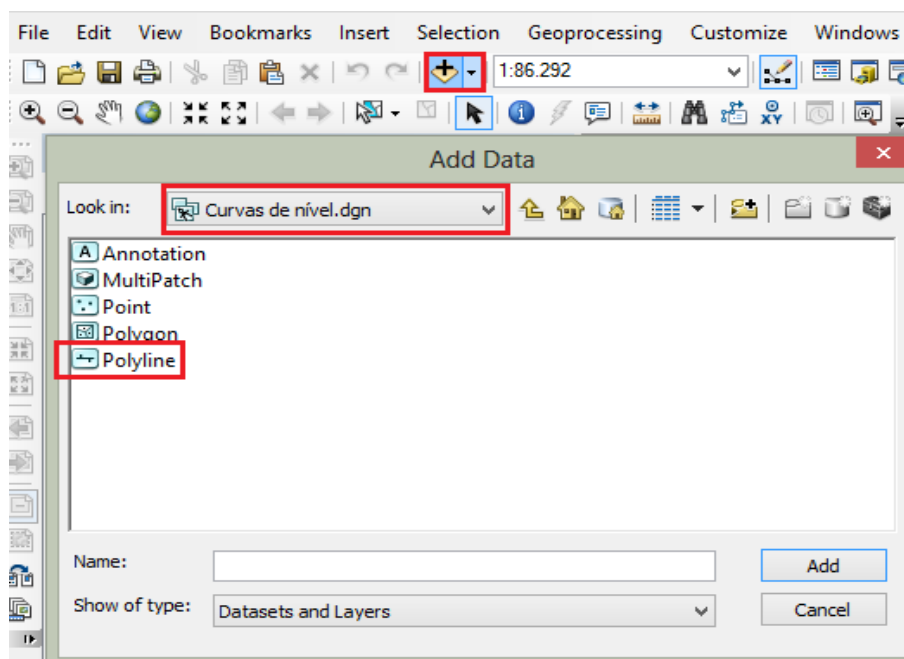


Figura 18 - Exportando dados para o ArcMap
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O próximo passo foi criar com as informações de curvas de nível e hidrologia do terreno o MDE em formato TIN conforme a Figura 19. Para isto utilizou-se da janela *ArctoolBox*, opção *3D Analyst Tools, TIN Management, Creat TIN*. Então em *Output TIN*, foi dado o nome de “Tin” ao arquivo e selecionado o seu local de armazenamento, em *Spatial Reference* foi selecionada a referência espacial já citada anteriormente, em *Input Feature Class* foram selecionados os arquivos de hidrografia e curva de nível e feita as atribuições presentes na Figura 20. Estas considerações permitem que a representação gráfica gerada do terreno apresente os rios sobre os contornos do relevo e não sendo tratado como uma curva de nível de altitude zero, o que o desenharia na parte mais baixa do perfil do terreno, como se houvesse um corte no mesmo.

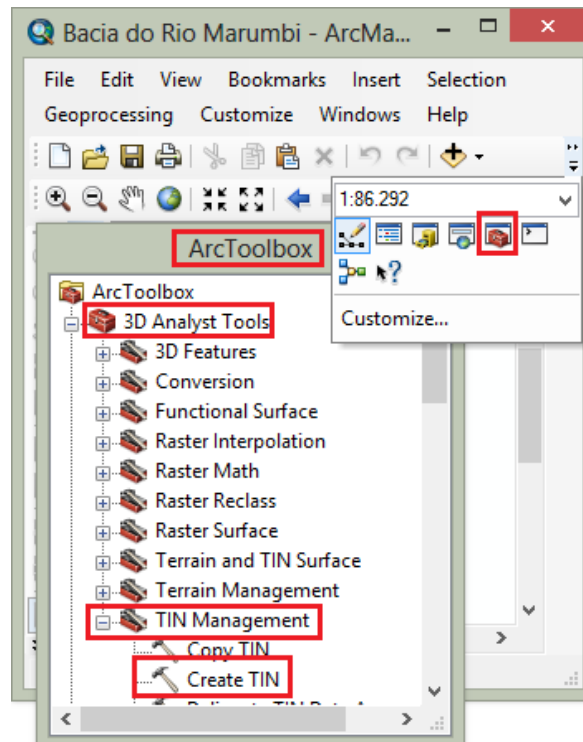


Figura 19 - Criar TIN
Fonte: Autoria Própria, 2015.

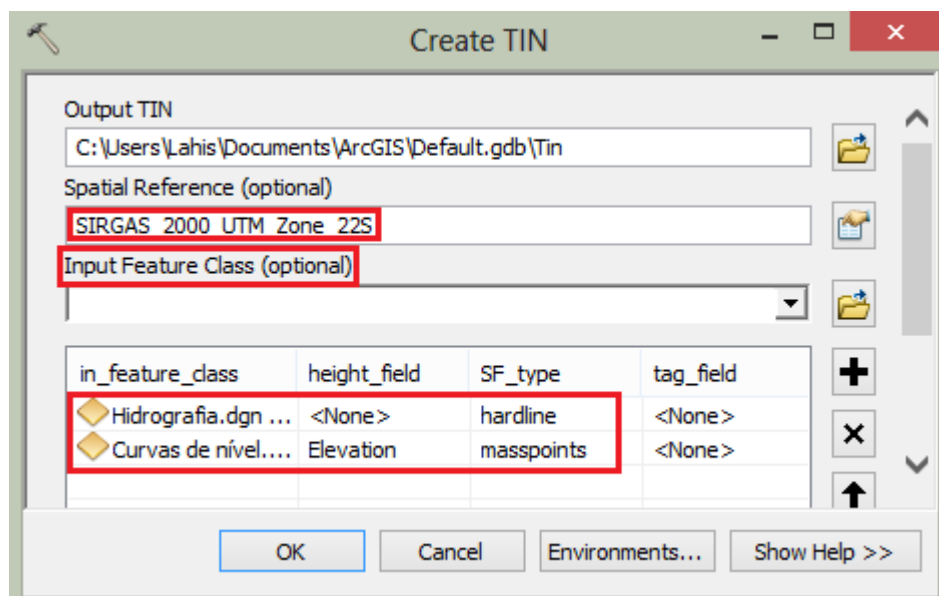


Figura 20 - Atribuições para Criação do TIN
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O arquivo no formato TIN foi criado, e então foi adicionado ao ArcMap através da ferramenta *Add Data*. Este arquivo foi convertido para o formato raster, para que a partir deste fossem gerados os demais mapas temáticos do terreno. Isto foi feito também na janela

ArcToolBox, opção *3D Analyst Tools*, agora na opção *Conversion, From TIN, TIN to raster*. As considerações adotadas e a sequência para execução são apresentadas na Figura 21. As opções *Float* e *Linear* foram selecionadas para que o raster de saída fosse criado com valores de célula de pontos flutuantes sem arredondar para números inteiros mais próximos e para calcular os valores de célula usando interpolação linear de triângulos TIN. Em *Sampling Distance* foi selecionado um tamanho de célula de 10 devido a 10m ser o distanciamento entre as curvas de nível, e ao *Z factor* foi atribuído o valor de 1, que seria o fator de correção para ajuste das unidades de medida para Z caso elas fossem diferentes das de X e Y da superfície de entrada.

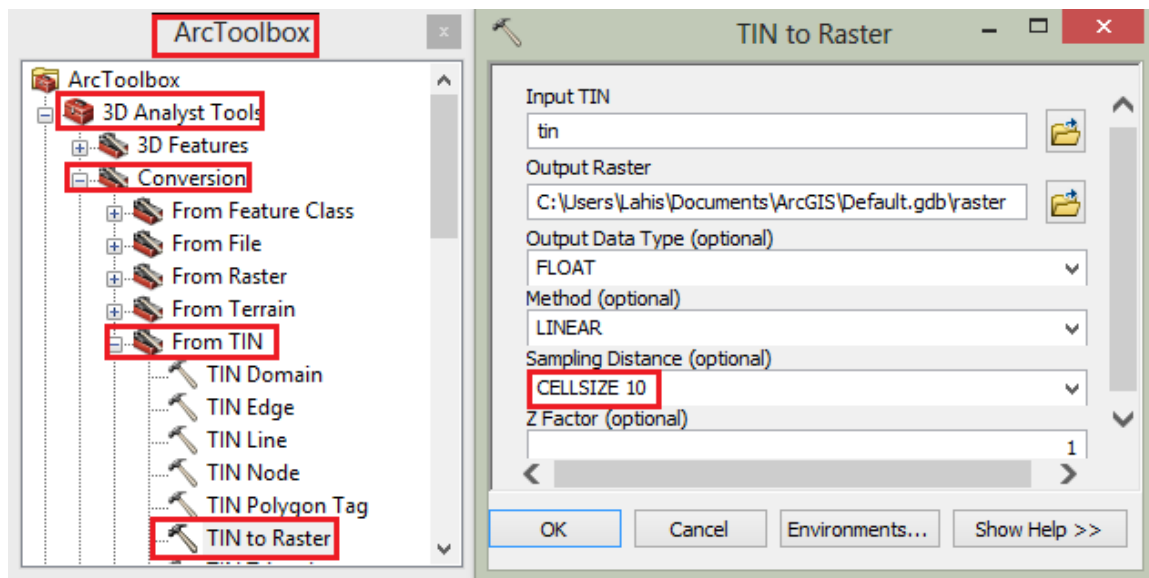


Figura 21 - Conversão TIN para RASTER
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O arquivo gerado foi utilizado para elaboração dos demais mapas temáticos que possibilitaram a análise dos parâmetros morfológicos e pedológicos da bacia do rio Marumbi.

5.1 PARÂMETROS MORFOLÓGICOS

A geomorfologia das encostas atua direcionando os fluxos de água sobre a vertente e consequentemente a dispersão e concentração dos mesmos, criando caminhos preferenciais de acordo com a morfologia do terreno.

Os parâmetros morfológicos atuam diretamente no equilíbrio das forças em um talude, a topografia do terreno é um dos principais condicionantes às movimentações de massa, com destaque para a influência das formas das vertentes, das amplitudes do relevo, declividades e orientações das encostas.

A declividade associada à ação da gravidade e a presença de água, está diretamente ligada aos processos erosivos e de deslizamento de uma encosta. Um maior ângulo de inclinação de um talude causa uma redução da resistência ao cisalhamento do maciço, e gera um aumento na velocidade do escoamento superficial sobre a encosta.

Para entender como este parâmetro atua, foi elaborado um Mapa de Declividade apresentado na Figura 24. O mesmo foi gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, através da ferramenta *slope*, que identifica o declive, ou a taxa de variação máxima de valor z, para cada célula de uma superfície raster. Este comando localiza-se na caixa de ferramentas *ArctoolBox* dentro de *3D Analyst Tools* na opção *Raster Surface*, esta sequência pode ser conferida na Figura 22.

A Figura 23 representa o próximo passo para criação deste mapa, onde no campo *Input raster* foi selecionado o arquivo raster gerado anteriormente, em *Output raster* foi escolhido o local de armazenamento para o mapa a ser gerado, em *output measurement* foi escolhido a opção *DEGREE* para que o fosse gerado em graus, mas também poderia ter sido feito em porcentagem e por fim atribui-se 1 ao *Z factor*.

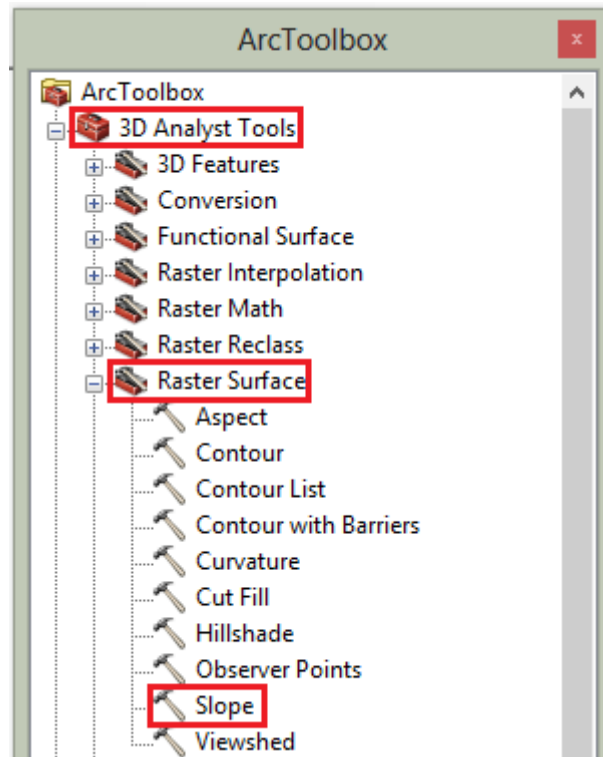


Figura 22 - Ferramenta para elaboração do Mapa de Declividade

Fonte: Autoria Própria, 2015.

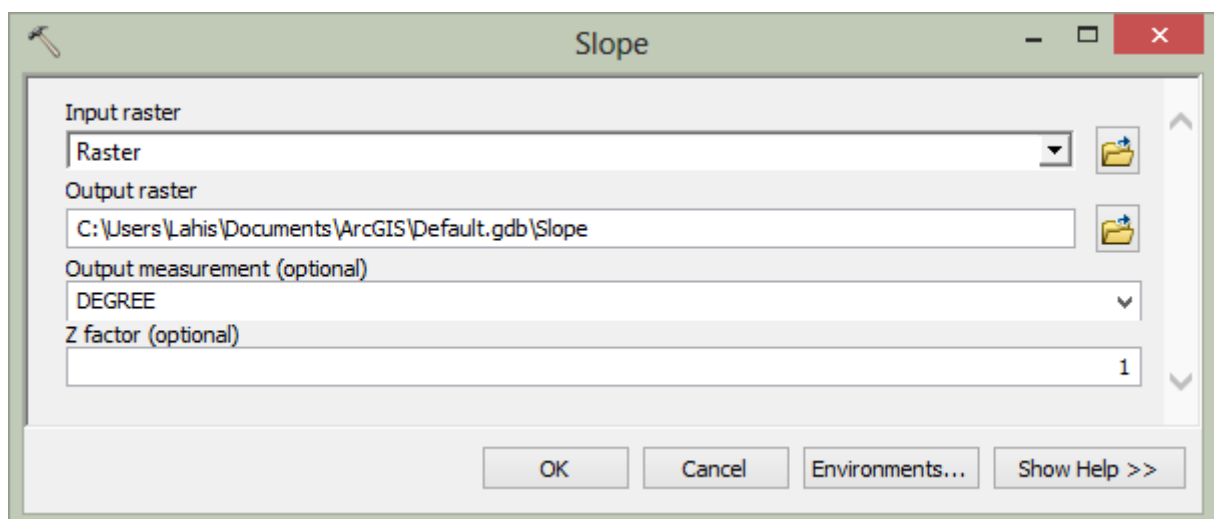


Figura 23 - Definições para utilização da ferramenta SLOPE

Fonte: Autoria Própria, 2015.

O mapa obtido foi reclassificado, clicando-se duas vezes sobre o nome da *layer* gerada, para abrir a janela de propriedades da *layer*, na opção *symbology* em *show: classifield*.

A opção adotada foi distribuir a classificação em seis classes com intervalos de 10° entre cada uma delas e a última abrangendo todas as demais superiores que não haviam sido englobadas.

A distribuição da porcentagem de área pertencente a cada classe de declividade está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Porcentagem de Área para cada Classe de Declividade Bacia do Rio Maumbi, Morretes, PR

Declividades	Porcentagem da Área (%)
<10°	26,27
10° - 20°	37,27
20° - 30°	23,05
30° - 40°	10,15
>50°	3,26

Fonte: Aatoria Própria, 2015.

De acordo com a Tabela 7 aproximadamente 60% da área da bacia possui declividades inferiores a 20°, assim as declividades superiores a 20° compreendem 40% da área total, uma porção muito significativa.

A Figura 24 mostra a distribuição espacial destas declividades e a partir da mesma pode-se constatar que as maiores inclinações encontram-se concentradas no centro da bacia, na região denominada escarpa da serra, e na porção oeste da mesma onde localiza-se o divisor natural de águas denominado Serra do Marumbi.

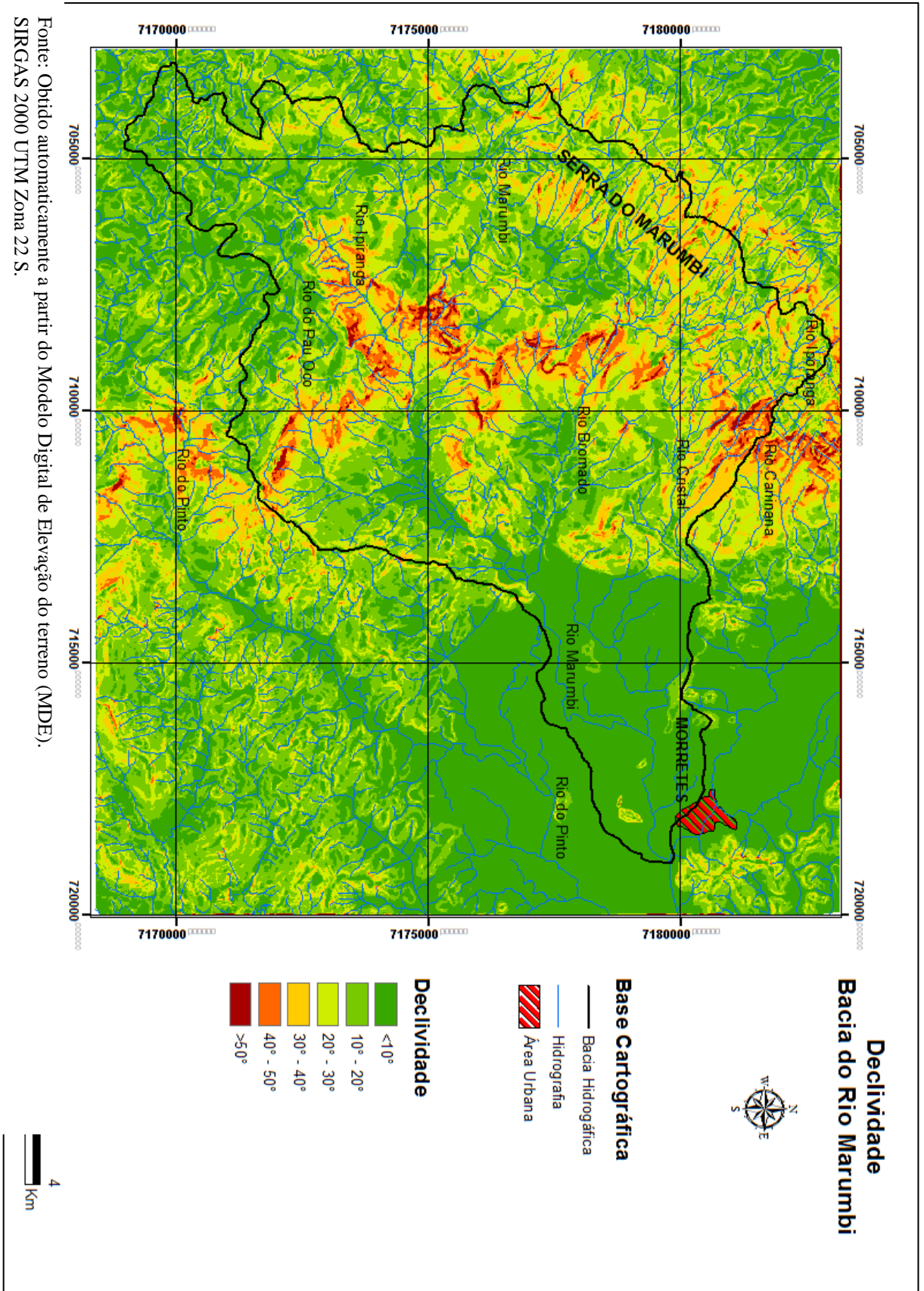


Figura 24 - Mapa de Declividade da Bacia do Rio Marumbi
Fonte: Autoria Própria, 2015.

A forma das encostas está diretamente relacionada ao fluxo de água sobre a superfície da vertente, podendo ser divididas em côncavas, convexas e retilíneas. As encostas côncavas tornam-se zonas de convergência para fluxos d'água, que fluem em direção ao eixo de drenagem da bacia, enquanto que as convexas tendem a divergir fluxos hídricos (GUERRA, 2001).

O Mapa de Forma das Vertentes apresentado na Figura 27, também foi gerado a partir do MDE através da ferramenta *curvature*, que calcula a curvatura de cada célula para uma superfície raster. Este comando também localiza-se na caixa de ferramentas *ArcToolBox* dentro de *3D Analyst Tools* na opção *Raster Surface*, esta sequência pode ser conferida na Figura 25.

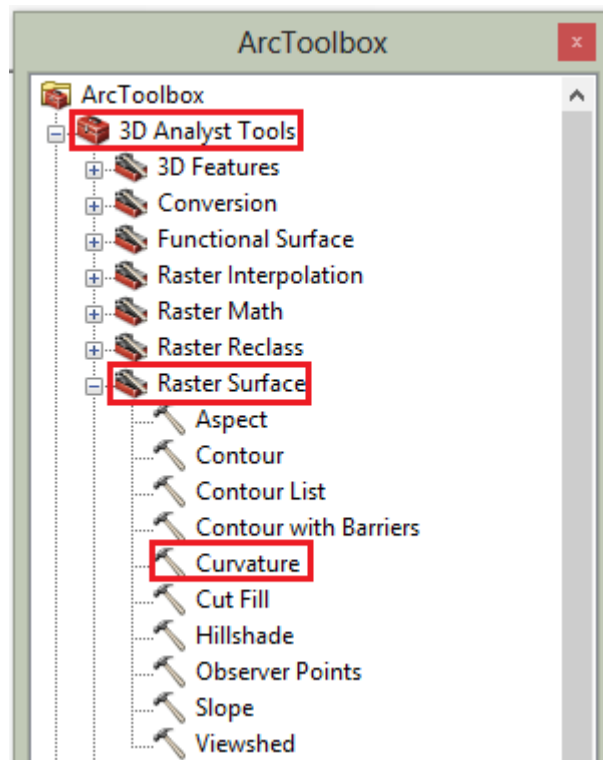


Figura 25 - Ferramenta para elaboração do Mapa de Forma das Vertentes
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Em seguida na janela representada pela Figura 26, no campo *Input raster* foi selecionado o arquivo raster gerado anteriormente, em *Output raster* foi escolhido o local de armazenamento para o mapa a ser gerado, em *Z factor* foi utilizado o valor de 1 novamente, e os demais campos não foram preenchidos.

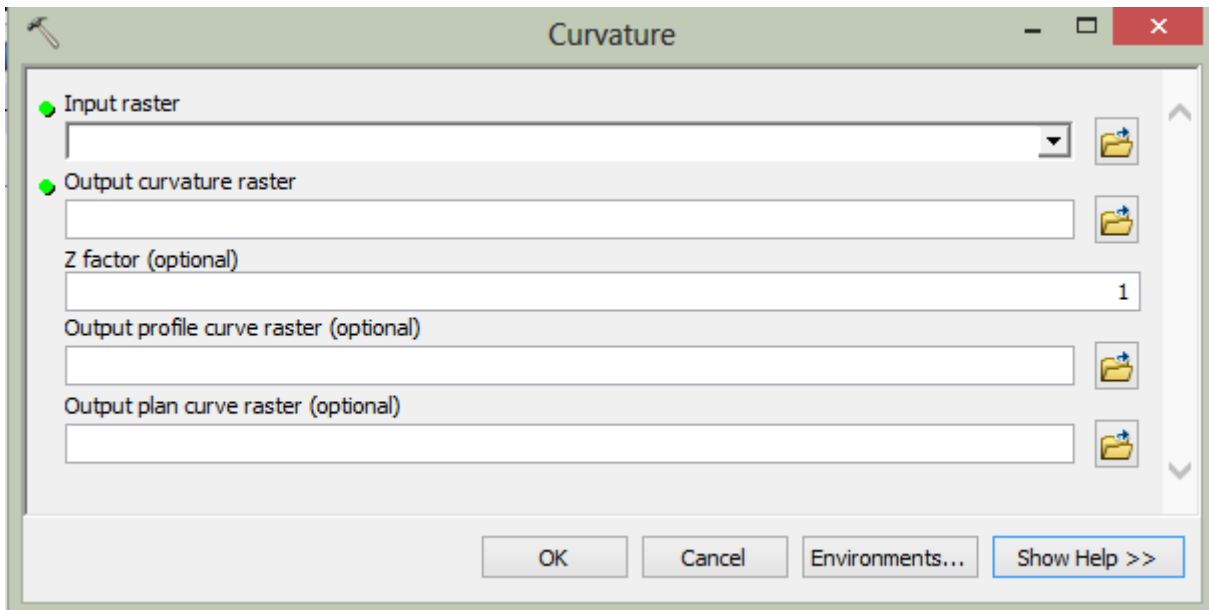


Figura 26 - Definições para utilização da ferramenta CURVATURE
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O mapa obtido foi reclassificado utilizando os mesmos comandos que para o anterior, e os intervalos foram definidos baseados no fato de que uma curvatura positiva indica que a superfície é convexa para cima naquela célula, a curvatura negativa que é côncava para cima e o valor de zero indica que a superfície é retilínea.

Com a representação da hidrografia neste mapa constata-se que realmente as vertentes côncavas tornam-se zonas de convergência para os fluxos d'água, pois, ficou evidente que ambos estão localizados no mesmo lugar, já as vertentes convexas localizam-se em regiões que dividem dois ou mais diferentes fluxos d'água, comprovando seu papel de divergência dos mesmos.

Em comparação com o Mapa de Declividades da Figura 24 pode-se constatar que as áreas em que as declividades foram inferiores a 10° coincidem com a região de forma de vertentes retilíneas, o que já era esperado devido ao fato de que menores declividades apresentam uma forma mais retilínea.

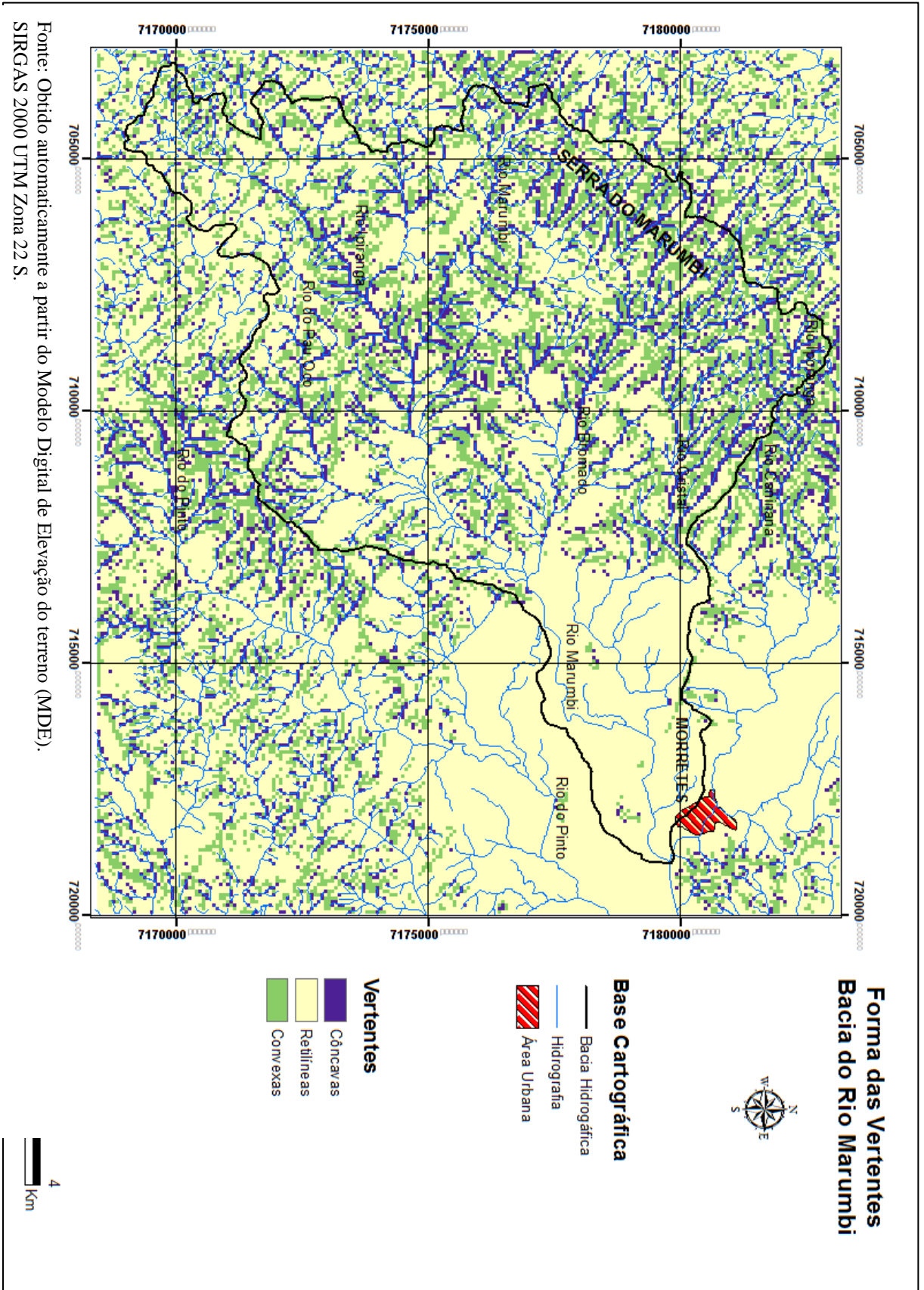


Figura 27 - Mapa de Forma das Vertentes Bacia do Rio Marumbi
Fonte: Autoria Própria, 2015.

A orientação das encostas relaciona-se com os fatores climáticos e de vegetação. Quanto mais expostas à ação do intemperismo mais susceptíveis aos movimentos de massa. Também a exposição à concentração de chuva aumenta a presença de umidade o que ocasiona uma diminuição de resistência ao cisalhamento.

O Mapa de Orientação das Encostas apresentado na Figura 30, assim como os já apresentados anteriormente, foi gerado a partir do MDE através da ferramenta *aspect*, que identifica a direção da curva descendente da taxa máxima de mudança de valor de cada célula em relação as células vizinhas em uma superfície raster. Este comando também localiza-se na caixa de ferramentas *ArcToolBox* dentro de *3D Analyst Tools* na opção *Raster Surface*, esta sequência pode ser conferida na Figura 28.

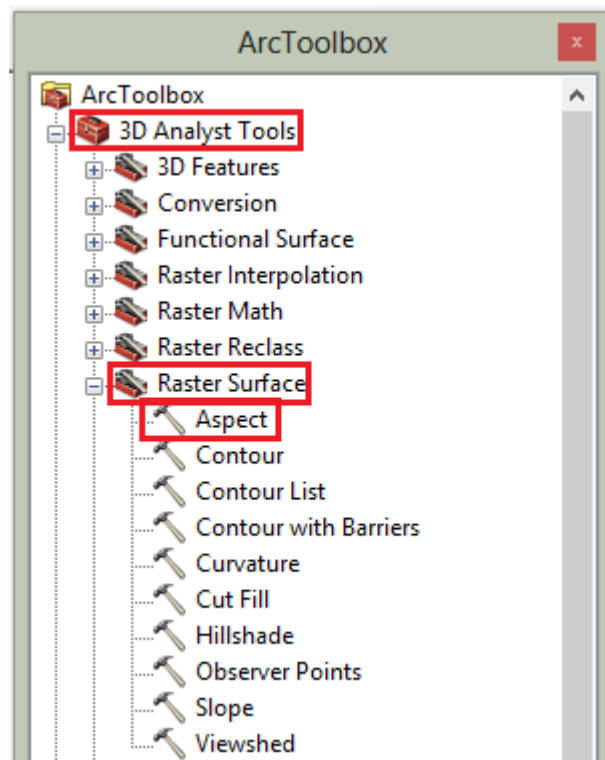


Figura 28 - Ferramenta para elaboração do Mapa de Orientação das Encostas
Fonte: Autoria Própria, 2015.

As definições solicitadas para elaboração deste mapa presente na Figura 29 foram apenas a de *Input raster*, onde foi selecionado o arquivo em formato raster do MDE, gerado anteriormente, e *Output raster*, onde foi escolhido o local de armazenamento.

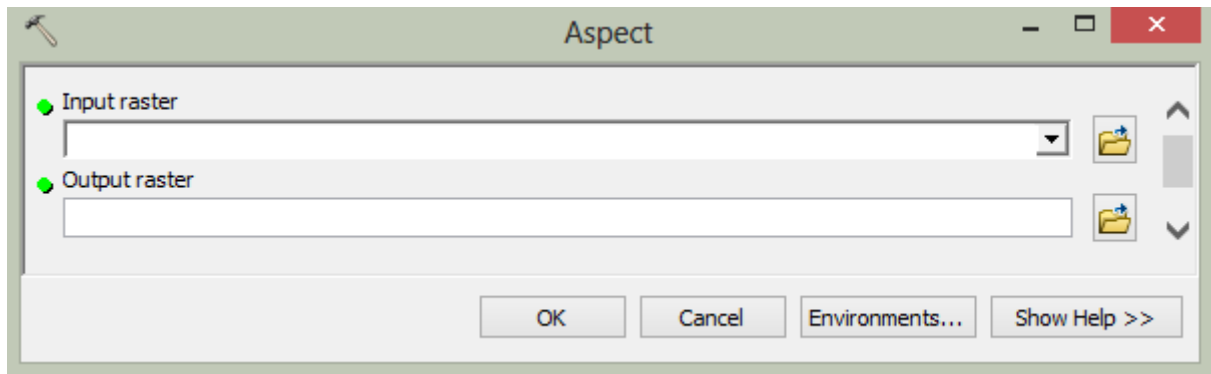


Figura 29 - Definições para utilização da ferramenta CURVATURE
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O mapa gerado presente na Figura 30 não sofreu modificações em sua classificação. Pode-se perceber uma área de tamanho significativo sendo classificada como plana próxima a área urbana do município de Morretes, isso se deve ao fato de que o MDE utilizado não apresentar curvas de nível próximas nesta região o que justifica as declividades menores que 10° exemplificadas na Figura 24, e caracteriza assim a área como plana.

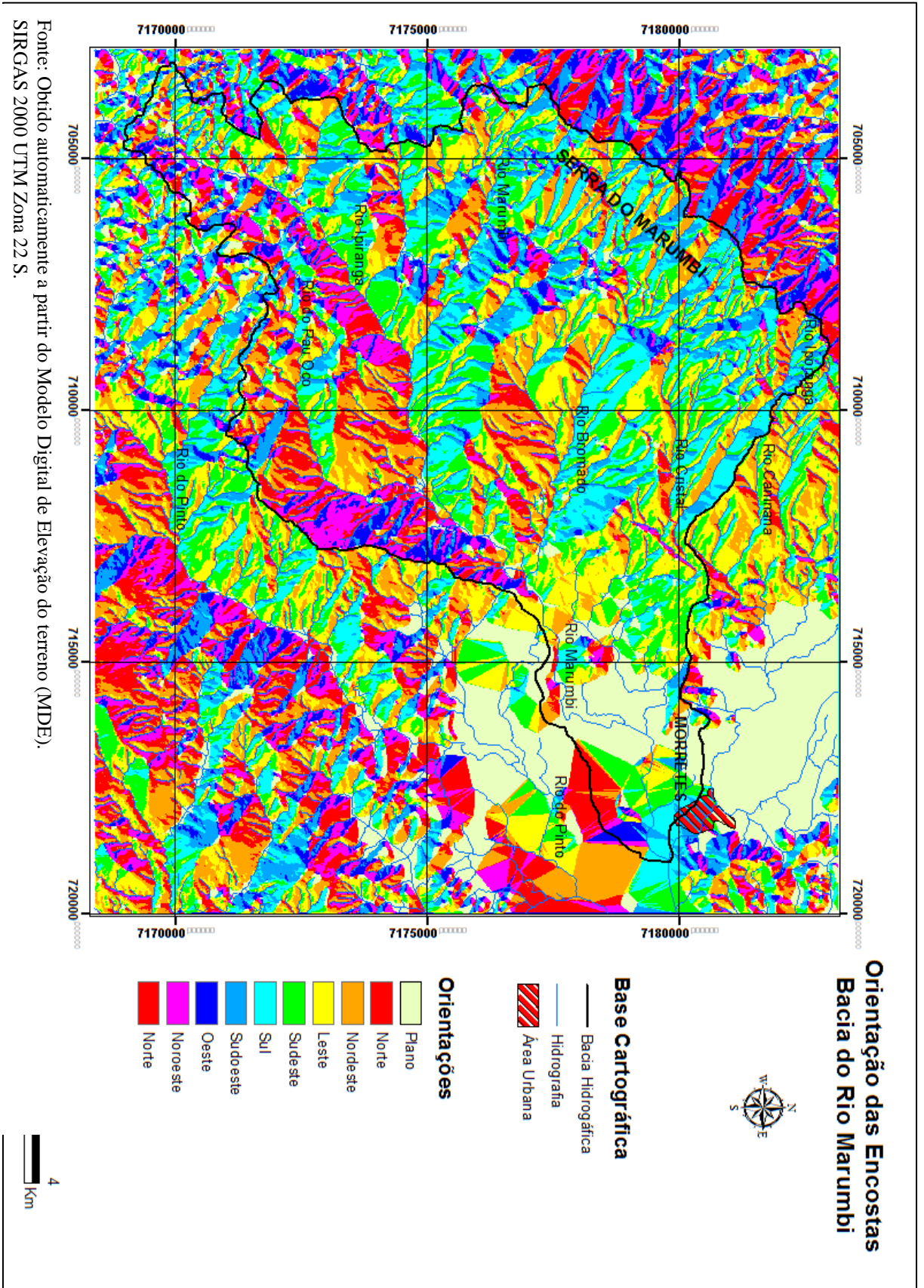


Figura 30- Mapa de Orientação das Encostas Bacia do Rio Marumbi
Fonte: Autoria Própria, 2015.

A hipsometria do terreno está relacionada à ação da energia cinética aplicada na vertente, quanto maior for a diferença entre as cotas máximas e mínimas do terreno, maior a capacidade de deslocamento de material.

O Mapa hipsométrico apresentado na Figura 31 foi elaborado fazendo uma nova classificação do arquivo raster gerado clicando duas vezes sobre o nome da *layer* gerada, para abrir a janela de propriedades da *layer*, na opção *symbolology* em show: *classifield*.

As classes foram definidas baseadas na classificação utilizada por Kozciak (2005), que segue a divisão feita por Florenzano (1993) a partir da cota 100m e abaixo desta foram criadas três novas classes.

Segundo Kozciak (2005) a primeira classe de 0m a 20m teve o intuito de abranger a planície litorânea separando-a das de maior declividade. A segunda classe de 20m a 50m buscou separar as áreas de deposição coluvionar evidentes pelo acumulo de detritos no sopé das encostas que foram transportados pela ação gravitacional. E a terceira classe de 50m a 100m compreende a transição entre as áreas de depósito coluvionais e as de depósito eluvionais, com detritos oriundos da rocha matriz *in situ*.

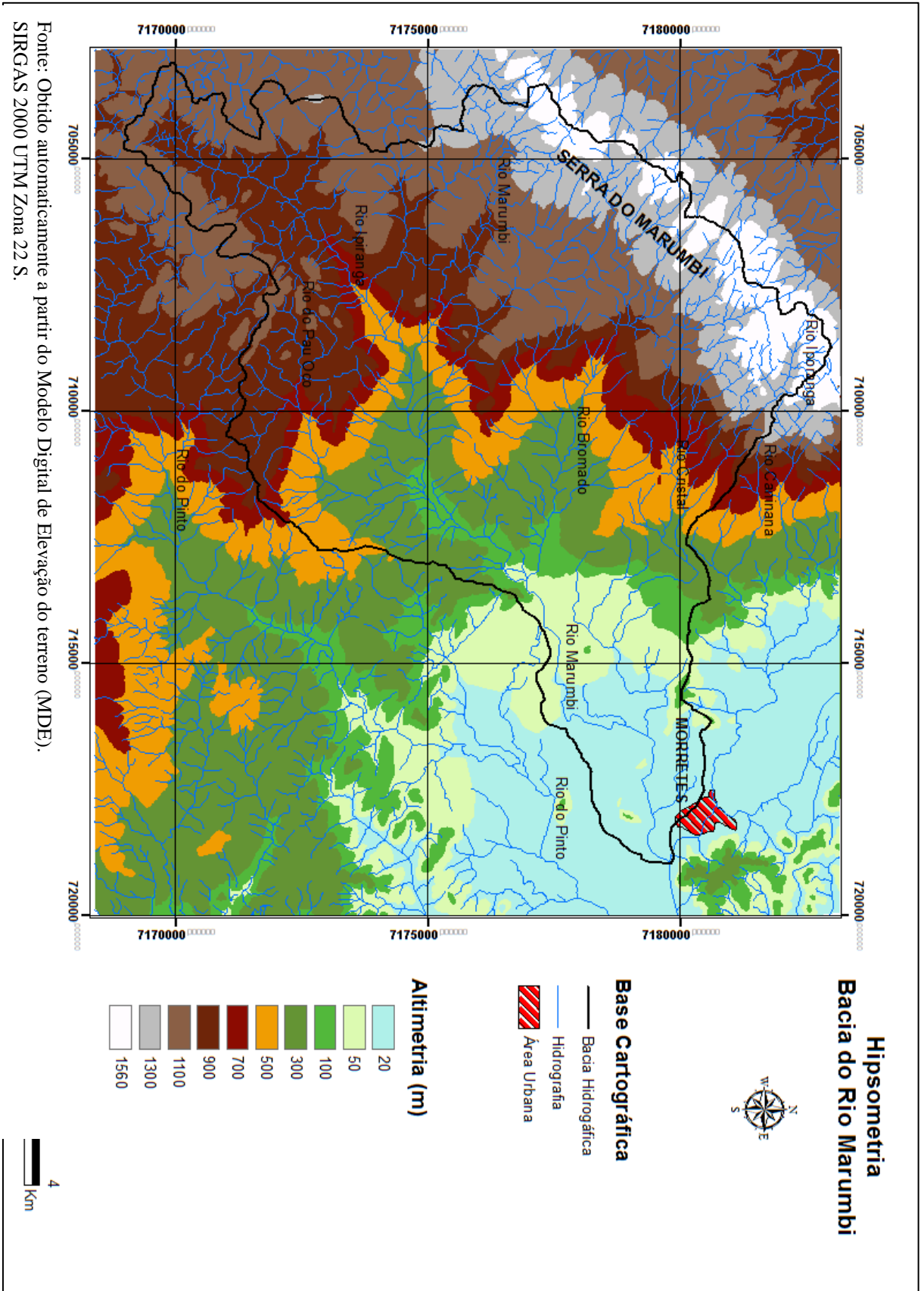


Figura 31 - Mapa de Hipsometria Bacia do Rio Marumbi
Fonte: Autoria Própria, 2015.

5.2 PARÂMETROS PEDOLÓGICOS

Os parâmetros pedológicos podem agir de forma direta ou indireta na deflagração de deslizamentos e isso pode ocorrer em função do tipo de solo, de sua textura, estrutura, permeabilidade e/ou densidade. Para análise desses parâmetros elaborou-se o Mapa de Solos da Bacia do Rio Marumbi.

Este mapa foi elaborado a partir da digitalização do mapa de solos modificado por Kozciak (2005) da EMBRAPA & IAPAR (1984), com auxílio do *Software* da Autodesk o AutoCAD versão para estudantes.

De acordo com Kozciak (2005) o mapa original da EMBRAPA & IAPAR (1984), possui uma escala de 1:600.000, e após a compilação foi verificado que o mesmo apresentava erros cartográficos grosseiros devido a diferença de escalas. Então a mesma realizou um ajuste neste mapa com correção das feições poligonais através da interpretação sobre imagem de satélite e de sobreposição com outras feições tais como geologia, declividade, hipsometria, tipos de encostas e orientação das vertentes.

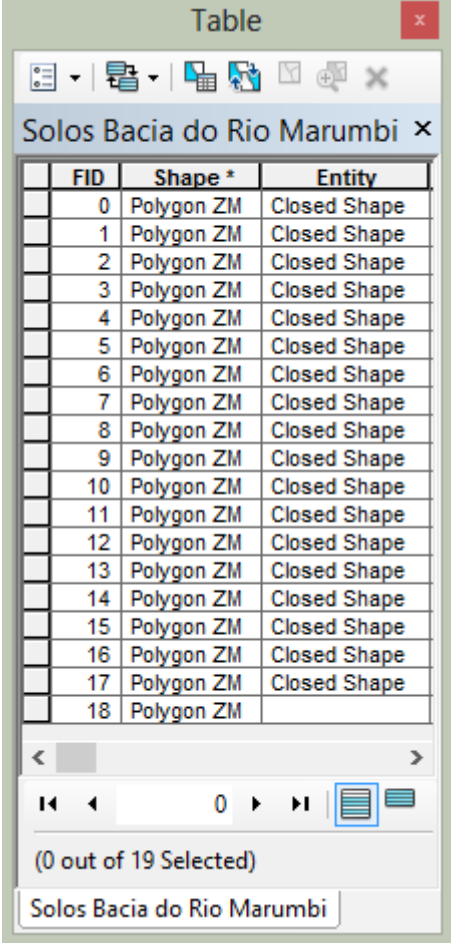
Na etapa de digitalização foi preciso tornar o contorno de cada tipo de solo um polígono, para que a importação no *software* ArcGIS 10 se desse nesse formato de *layer*. Então após a importação foi feita a classificação de cada polígono de acordo com o tipo de solo a que o mesmo pertencia, para isto clicou-se com o botão direito em cima da *layer* criada selecionou-se a opção *Open Attribute Table* que está apresentada na Figura 32.

Esta tabela apresenta informações contidas na *layer*, e nela podem ser adicionadas mais colunas com o intuito de aumentar a caracterização destas informações. Então para classificação dos polígonos que representam os tipos de solo foi criada uma coluna denominada Classe, e na mesma foi inserido o nome da classe de solo correspondente a cada polígono, baseado no mapa de solos modificado por Kozciak (2005), esta etapa pode ser conferida na Figura 33.

Nesta mesma tabela após compilação e organização dos parâmetros físicos e mecânicos do solo elaborados por Kozciak (2005), foram elaboradas novas colunas para inserção destes dados, conforme apresentado na Figura 34.

Para atribuir cores diferentes as classes, clicou-se duas vezes sobre o nome da *layer* para abrir a janela de propriedades da *layer*. Na opção *symbology* em *show: categories, unique values* selecionou-se a opção Classe, que corresponde à coluna criada na etapa anterior, então

em *Value Field* clicando sobre a cor de cada classe fez-se as alterações necessárias, sequência ilustrada na Figura 35.



FID	Shape *	Entity
0	Polygon ZM	Closed Shape
1	Polygon ZM	Closed Shape
2	Polygon ZM	Closed Shape
3	Polygon ZM	Closed Shape
4	Polygon ZM	Closed Shape
5	Polygon ZM	Closed Shape
6	Polygon ZM	Closed Shape
7	Polygon ZM	Closed Shape
8	Polygon ZM	Closed Shape
9	Polygon ZM	Closed Shape
10	Polygon ZM	Closed Shape
11	Polygon ZM	Closed Shape
12	Polygon ZM	Closed Shape
13	Polygon ZM	Closed Shape
14	Polygon ZM	Closed Shape
15	Polygon ZM	Closed Shape
16	Polygon ZM	Closed Shape
17	Polygon ZM	Closed Shape
18	Polygon ZM	

Figura 32 - Tabela de Atributos
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Table

Solos Bacia do Rio Marumbi

FID	Shape *	Entity	Classe
0	Polygon ZM	Closed Shape	Ca5
1	Polygon ZM	Closed Shape	Ca1
2	Polygon ZM	Closed Shape	Ca1
3	Polygon ZM	Closed Shape	Af
4	Polygon ZM	Closed Shape	Ca3
5	Polygon ZM	Closed Shape	Ca3
6	Polygon ZM	Closed Shape	Ca8
7	Polygon ZM	Closed Shape	Ca5
8	Polygon ZM	Closed Shape	Af
9	Polygon ZM	Closed Shape	HG1
10	Polygon ZM	Closed Shape	Cd
11	Polygon ZM	Closed Shape	PVa2
12	Polygon ZM	Closed Shape	Cd
13	Polygon ZM	Closed Shape	Cd
14	Polygon ZM	Closed Shape	Cd
15	Polygon ZM	Closed Shape	Cd
16	Polygon ZM	Closed Shape	Área Urbana
17	Polygon ZM	Closed Shape	PVa2
18	Polygon ZM		

(0 out of 19 Selected)

Solos Bacia do Rio Marumbi

Figura 33 – Tabela de Atributos com as Classes
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Table

Solos Bacia do Rio Marumbi

FID	Shape *	Entity	Classe	Coesão	KP	Ângulo de	Espessura	Ynat	Ysub	Ysat
0	Polygon ZM	Closed Shape	Ca5	13,5		21,700001	150	17,16	7,43	17,43
1	Polygon ZM	Closed Shape	Ca1	14,8		23,200001	100	17,790	7,58	17,58
2	Polygon ZM	Closed Shape	Ca1	14,1		23,200001	100	17,790	7,58	17,58
3	Polygon ZM	Closed Shape	Af	17		23	50	15,5	5,54	15,54
4	Polygon ZM	Closed Shape	Ca3	9,6		17	100	14,82	6,75	16,75
5	Polygon ZM	Closed Shape	Ca3	9,6		17	100	14,82	6,75	16,75
6	Polygon ZM	Closed Shape	Ca8	17		23,5	100	17,290	7,54	17,540001
7	Polygon ZM	Closed Shape	Ca5	13,5		21,700001	150	17,16	7,43	17,43
8	Polygon ZM	Closed Shape	Af	17		23	50	15,5	5,54	15,54
9	Polygon ZM	Closed Shape	HG1	10,9		25,5	200	18,450	8,65	18,65
10	Polygon ZM	Closed Shape	Cd	7,1		30,1	200	16,92	7,82	17,82
11	Polygon ZM	Closed Shape	PVa2	0		0	0	0	0	0
12	Polygon ZM	Closed Shape	Cd	7,1		30,1	200	16,92	7,82	17,82
13	Polygon ZM	Closed Shape	Cd	7,1		30,1	200	16,92	7,82	17,82
14	Polygon ZM	Closed Shape	Cd	7,1		30,1	200	16,92	7,82	17,82
15	Polygon ZM	Closed Shape	Cd	7,1		30,1	200	16,92	7,82	17,82
16	Polygon ZM	Closed Shape	Área Urbana	0		0	0	0	0	0
17	Polygon ZM	Closed Shape	PVa2	0		0	0	0	0	0
18	Polygon ZM			0		0	0	0	0	0

(0 out of 19 Selected)

Solos Bacia do Rio Marumbi

Figura 34 - Tabela de Atributos com Parâmetros Físicos e Mecânicos
Fonte: Autoria Própria, 2015.

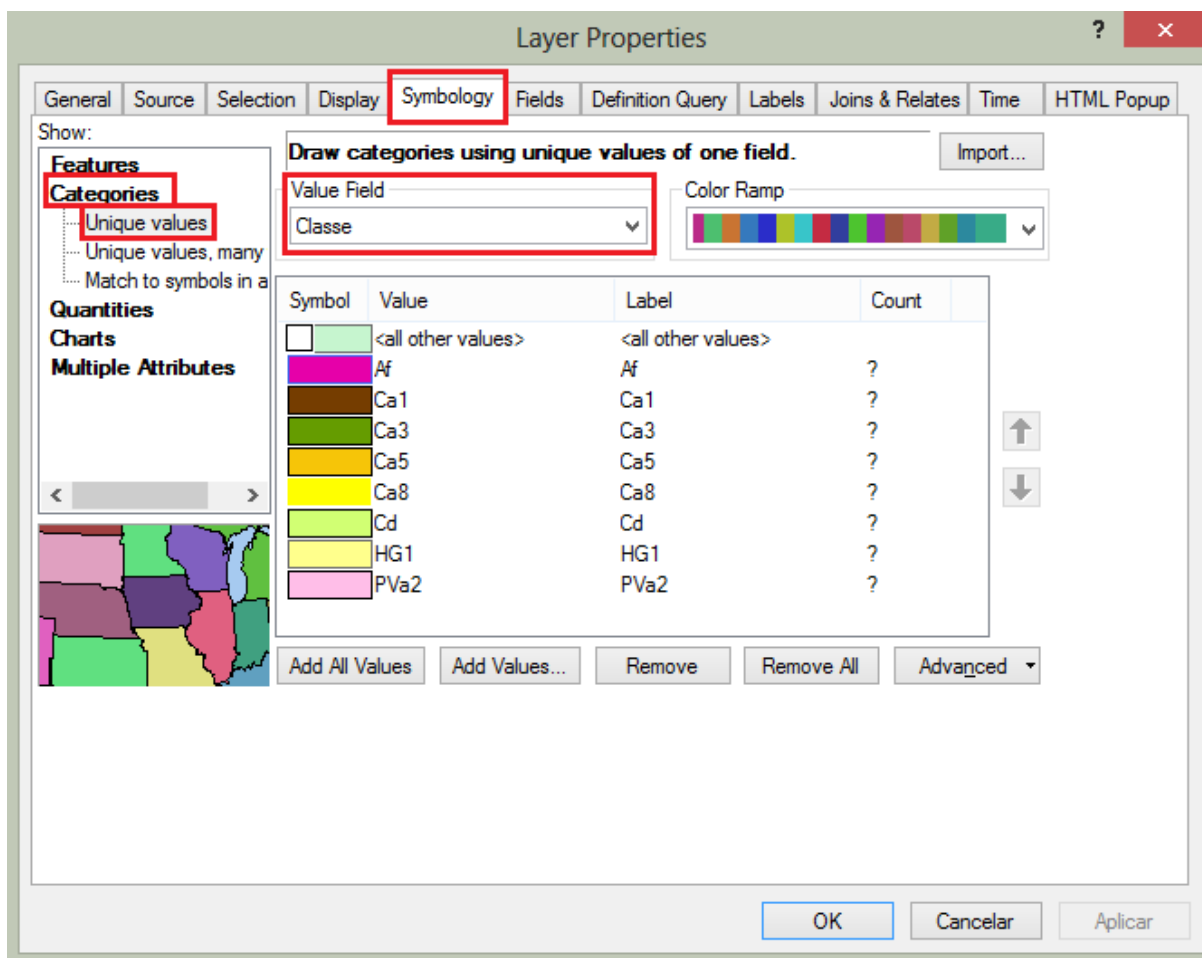


Figura 35 – Elaboração da Classificação do Mapa de Solos
Fonte: Autorial Própria, 2015.

A Bacia do Rio Marumbi compreende basicamente três tipos diferentes de solos como pode ser visto na Figura 36 no Mapa de Solos, os Cambissolos, Solos Hidromórficos e Solos Litólicos. A caracterização destes solos segundo a EMBRAPA & IAPAR (1984) é:

- a) Cambissolos: Solos constituídos por material mineral, com horizonte B, não hidromórficos. São solos pouco desenvolvidos, que ainda apresentam características do material originário (rocha) evidenciado pela presença de minerais primários com meteorização incompleta, e de fácil intemperização. Apresentam textura média ou mais fina, com pequenas profundidades não excedentes a 100cm. Possuem moderada ou boa drenagem com horizontes A, B e C com transição evidente entre eles. A textura pode ser uniforme ao longo de um perfil e muda em função do substrato rochoso. De acordo com Kozciak (2005) na área de Morretes predominam as classes texturais argila, franco argiloso e muito argiloso. Sendo os cambissolos naturalmente pouco

estáveis aos problemas geotécnicos. Podendo tornar-se extremamente erodíveis e friáveis quando expostos a cortes e taludes.

Foram encontradas cinco unidades de solos na Bacia do Rio Marumbi pertencentes a classe dos cambissolos:

- Cambissolo Álico Tb com A moderado (Ca1): Possui textura argilosa ou muito argilosa, ocorrem em relevo fortemente ondulado ou ondulado. Encontra-se na porção sudoeste da bacia com declividades inferiores a 20° e altitudes superiores a 700 m.
- Cambissolo Álico Tb com A proeminente (Ca3): Possui uma textura argilosa e muito argilosa com relevo fortemente ondulado ou ondulado. Encontra-se em uma pequena porção da área da bacia na região mais extrema do sudoeste, com declividades inferiores a 20° e altitudes superiores a 1100 m.
- Associação de Cambissolos Álicos Tb com Solos Litólicos Álicos (Ca8): Encontra-se na porção central da bacia correspondendo ao solo de maior abrangência do território, nesta faixa estão compreendidas a concentração das maiores declividades da bacia com alturas inferiores a 900 m.
- Associação de Cambissolos Álicos Tb com Latossolos Vermelho – Amarelo Álico Podzólico (Ca5): Associado à textura média e argilosa, relevo forte ondulado e montanhoso. Aparece ao leste do Ca8 em outra porção central da bacia, e estende-se em uma faixa que vai de norte a sul da mesma. Possui declividade inferiores a 50° em sua maioria inferiores a 30°. Com altitudes inferiores a 300 m.
- Cambissolos Distróficos (Cd): Localizado na porção lesta da bacia, possui declividades inferiores a 20° e altitudes inferiores a 50 m, e compreende aproximadamente 6,5 % da área da bacia. Segundo Kozciak (2005) esta unidade de solo foi desenvolvida a partir de produtos provenientes da intemperização de sedimentos recentes do Quaternário. Ocorre em relevo plano ao longo dos rios, situando-se em áreas menos alagadiças que os solos hidromórficos, de drenagem

imperfeita ou restrita. Quanto a erosão são menos suscetíveis, devido ao relevo plano que torna o escoamento superficial praticamente nulo.

- b) Solos Hidromórficos:** Solos minerais sem características aluviais, com drenagem interna e externa muito limitada, com inundação temporária à superfície e encharcamento quase permanente dos níveis superiores do perfil, possibilitando o acúmulo de matéria orgânica e fenômenos de redução e reoxidação de compostos de ferro e/ou manganês que tem uma redistribuição descendente quando não existe lençol freático e ascendente quando existir (DINIZ, 2005).
- Solos Hidromórficos Gleyzados Indiscriminados (HG1): Localizado no extremo leste da bacia e em uma região centro-leste, encontra-se margeando o Rio Nhundiaquara, com declividades inferiores a 10° e altitudes inferiores a 20 m.
- c) Solos Litólicos:** Compreendem solos rasos, onde geralmente a espessura da camada não ultrapassa 50 cm, estando associados geralmente a relevos mais declivosos. Ocorrem geralmente onde há afloramento rochoso, são pouco desenvolvidos e não hidromórficos. Apresentam horizonte A diretamente sobre a rocha ou horizonte C de pequena espessura. São normalmente pedregosos e/ou rochosos, bem drenados com horizonte A pouco espesso, cascalhento, de textura predominantemente média, podendo também ocorrer solos de textura arenosa, siltosa ou argilosa (JARBAS et al., 2010).
- Associação de afloramentos de Rocha com Solos Litólicos (Af): Localizado na região noroeste da bacia, na porção conhecida como Serra do Marumbi. Compreende declividades de até 50° com altitudes superiores a 1300 m.

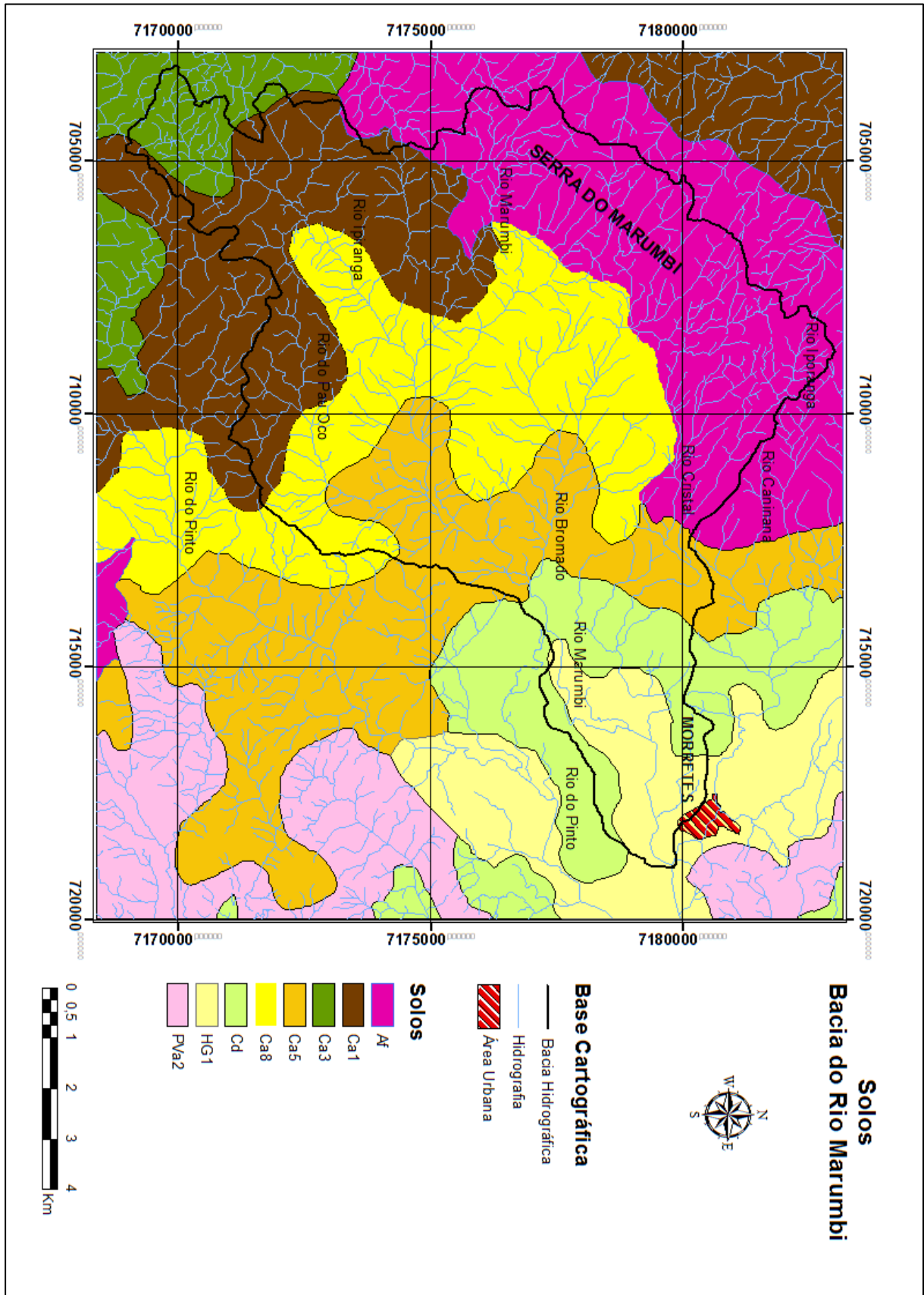


Figura 36 – Mapa de Solos Bacia do Rio Marumbi
Fonte: Autoria Própria, 2015.

5.3 PARÂMETROS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS SOLOS

Os parâmetros físicos e mecânicos dos solos a serem analisados são a condutividade hidráulica saturada, granulometria, coesão, ângulo de atrito, massa específica dos grãos e espessura considerada para cada classe de solo.

Estes parâmetros serão obtidos a partir da compilação de dados obtidos por duas autoras diferentes, Kozciak (2005) e Borchardt (2005), e posterior organização dos mesmos e filtragem para utilização na aplicação do Modelo SHALSTAB.

A condutividade hidráulica e a granulometria são parâmetros que possibilitam a compreensão do comportamento hidrológico do solo em relação à estabilidade das encostas, pois, estão diretamente relacionadas à velocidade de infiltração da água no solo.

Para obtenção dos dados Kozciak (2005) fez a coleta de dezessete amostras em pontos diferentes distribuídos ao longo de toda área da bacia do rio Marumbi na Cidade de Morretes, visando a representação de cada tipologia de solo presente na área em estudo. Segundo a autora a análise foi realizada no Laboratório de Física dos Solos, no setor de Ciências Agrárias da UFPR, o procedimento obedeceu o Manual de Ensaio de Laboratório de Campo para Irrigação e Drenagem de Canduro e Dorfman e a condutividade hidráulica foi determinada pelo método do permeâmetro constante. A análise granulométrica segundo a autora foi realizada no Laboratório de Estudos Sedimentológicos do Departamento de Geologia da UFPR, seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O ângulo de atrito e a coesão foram obtidos através do ensaio de cisalhamento direto para seis pontos das amostras coletadas.

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão ao cisalhamento suportada sem que o solo sofra ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver acontecendo, portanto determinar a resistência de um solo é definir sua envoltória de resistência, ou seja, os parâmetros de coesão e ângulo de atrito do solo (KOZCIAK, 2005).

Juntamente com os ensaios de cisalhamento Kozciak (2005) obteve os índices físicos do solo, utilizando índices que correlacionam os pesos e os volumes das três fases que formam o solo, sólidos, líquidos e gases. Sendo o peso específico dos grãos uma característica dos sólidos, que representa a relação entre o peso das partículas sólidas e seu volume (KOZCIAK, 2005).

Os dados obtidos por Kozciak (2005) foram organizados e são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 2 – Dados I obtidos por Kozciak (2005).

Classe	Un.	Espessura	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	$\gamma_{\text{solo saturado}}$ (kN/m³)
Cambissolos	Ca1	1 m	14,8	23,2	17,58
	Ca3	1 m	9,6	17,0	16,75
	Ca5	1,5 m	13,5	21,7	17,43
	Ca8	1 m	17,0	25,5	17,54
	Cd	2 m	7,1	30,1	17,82
Hidromórficos	HG1	2 m	10,9	25,5	18,65
Litólicos	Af	0.5 m	17,0	23,0	15,54

Fonte: Adaptado Kozciak, 2005.

Tabela 9 - Dados II obtidos por Kozciak (2005)

Classe	Condutividade Hidráulica (cm/h)	Textura do Solo	% Areia	% Silte	% Argila
Cambissolos	Ca1	Argiloso	39,82	15,61	44,58
	Ca3	Franco Argilo Siltoso	10	60	30
	Ca3	Franco Arenoso	71,57	20,46	7,97
	Ca3	Franco Argilo Arenoso	61,32	17,49	21,19
	Cd	Argilo Arenoso	59,55	5,29	35,15

Fonte: Adaptado Kozciak, 2005.

A segunda autora Borchardt (2005) realizou os ensaios com amostras obtidas do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado, que também está inserida na Serra do Mar no litoral paranaense, também dentro dos limites da bacia de Morretes. Para o ensaio de cisalhamento direto a autora coletou amostras de três pontos distintos, uma para cada classificação

pedológica existente na área, segundo a mesma os ensaios também obedeceram a ABNT, e os resultados obtidos pela mesma estão presentes na Tabela 10.

Tabela 3 – Dados obtidos por Borchardt (2005)

Classe	Unidade	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
Podzólico	PVa	5,84	30,51
Cambissolo Álico	Ca	7,185	24,56
Cambissolo Distrófico	Cd	0	33,11

Fonte: Adaptado Borchardt, 2005.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB

Para aplicação do modelo SHALSTAB foi utilizado o modelo digital do terreno (MDE) já citado anteriormente, que foi gerado no *software* ArcGis 10. A partir desta base com auxílio do ArcView GIS 3.2 e da extensão SHALSTAB já previamente instalada, foram gerados outros grids, o de declividade, orientação da vertente, forma de vertente e área de contribuição.

Primeiramente para que o MDE pudesse ser exportado para o ArcView GIS 3.2 foi necessário alterar o formato do arquivo de raster para grid. Isto pode ser feito no ArcGis 10 clicando com o botão direito sobre a *layer* do raster, escolhendo a opção *Data* e em seguida *Export Data*.

As definições solicitadas para esta operação são exemplificadas na Figura 37, onde é necessário que para a extensão do arquivo e a referencia espacial sejam marcadas a opção *Raster Dataset (Original)*, o tamanho da célula precisa ser compatível com o arquivo que gerou o raster, neste caso *cx,cy* tem valor de 10, pois é este o intervalo das curvas de nível, foi escolhido o local para armazenar o arquivo, dado um nome para o mesmo e em *format* foi selecionado a opção “GRID”.

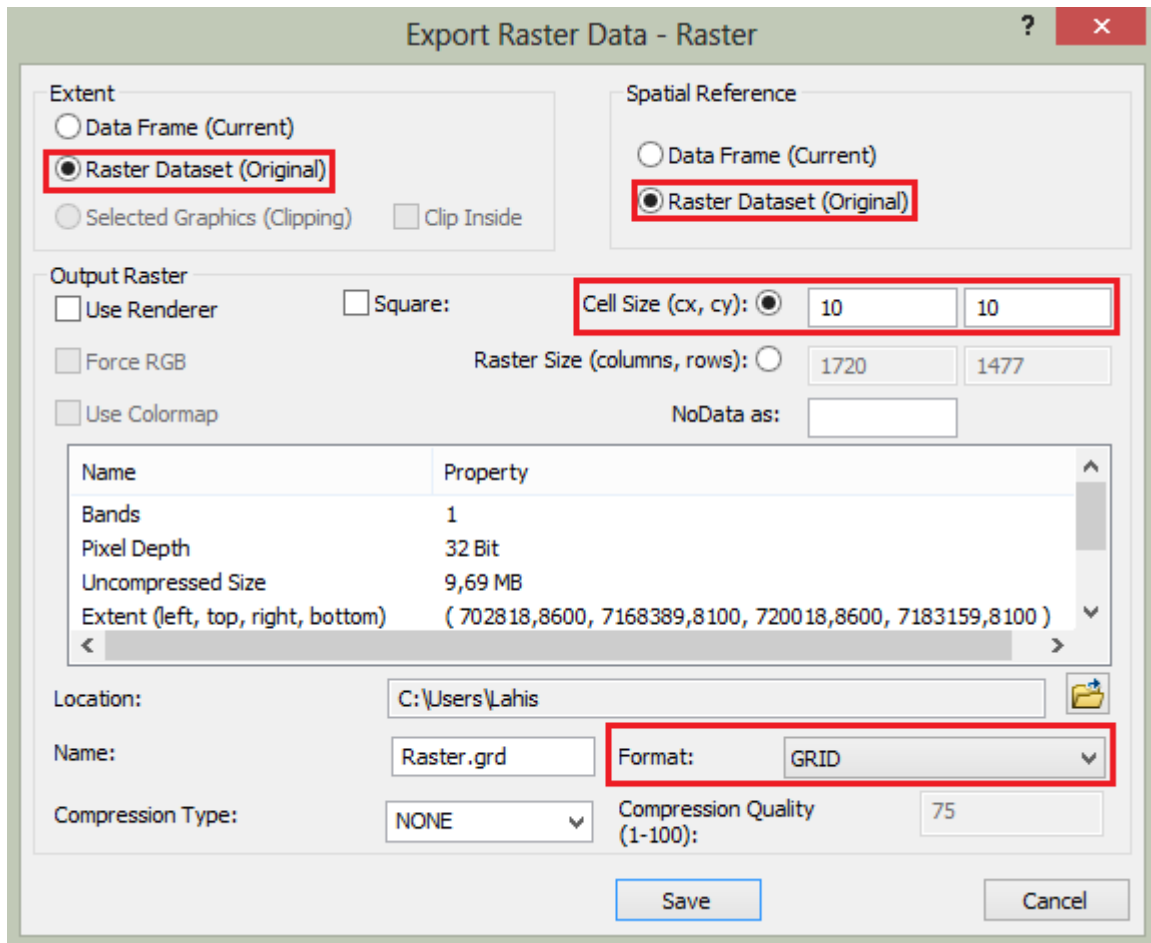


Figura 37 – Definições para conversão do arquivo RASTER em GRID
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Antes de exportar o arquivo criado para o ArcView GIS 3.2 fez-se necessária a ativação das extensões para funcionamento do SHALSTAB. Isso se deu através do menu *file* opção *extensions...*, neste foram ativados os itens SHALSTAB e *Spatial Analyst* conforme a Figura 38 mostra. E após foi criada uma nova *View* como mostrado na Figura 39, com isto a extensão SHALSTAB já pode ser vista na barra de menus como mostra a Figura 40.

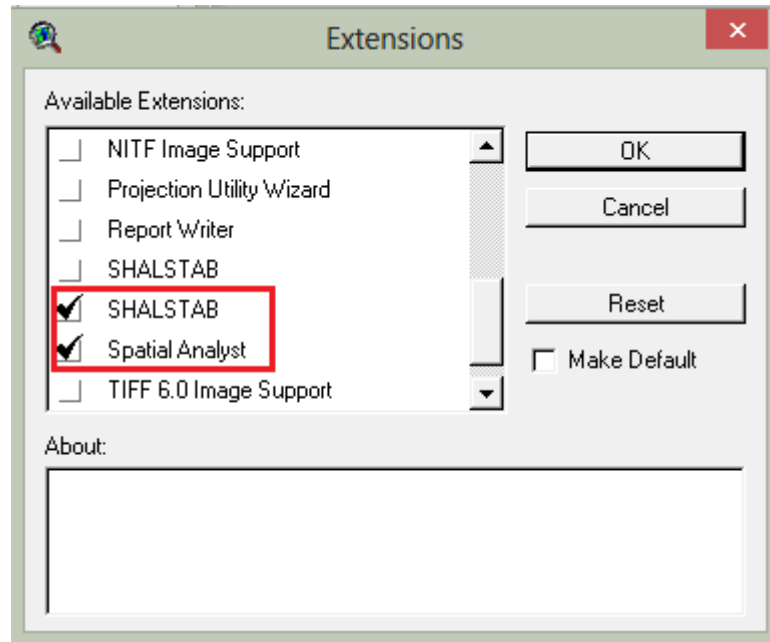


Figura 38 – Ativar Extensões no ArcView GIS 3.2
Fonte: Autoria Própria, 2015.

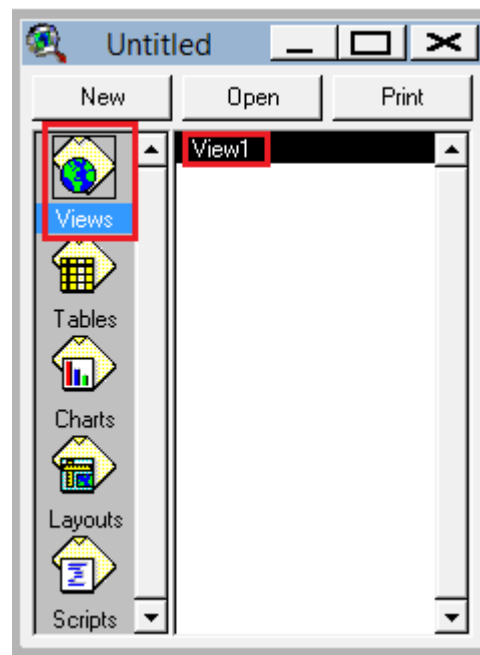


Figura 39 – Criar View
Fonte: Autoria Própria, 2015.

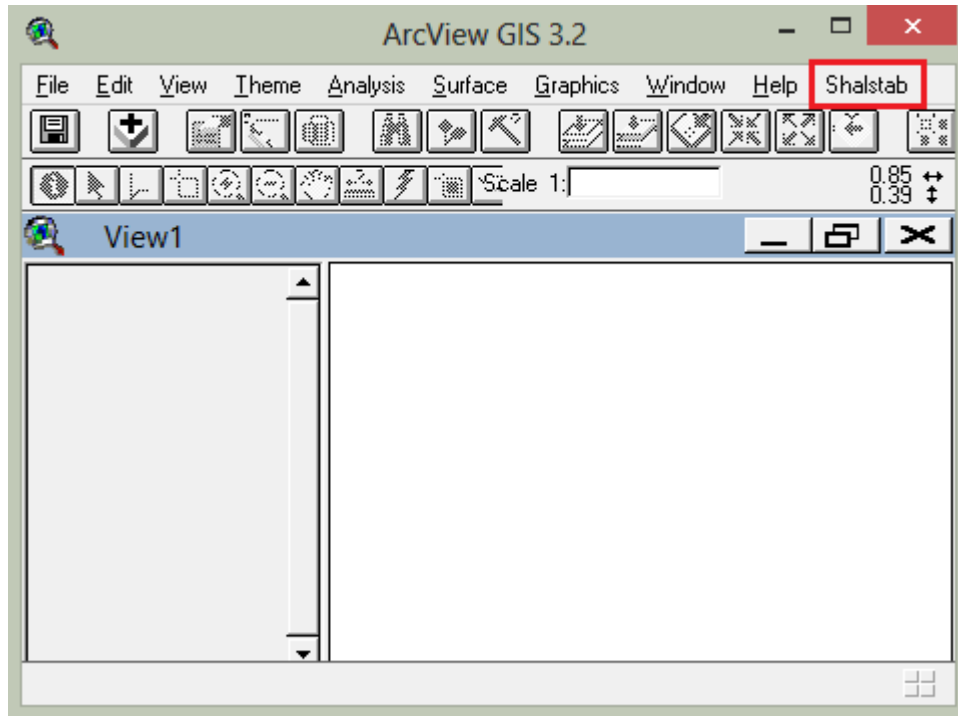


Figura 40 – Menu SHALSTAB
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Para importar o arquivo utilizou-se a ferramenta *Add Theme* localizada no menu *View*. E então selecionar a local onde foi armazenado o grid conforme a Figura 41.

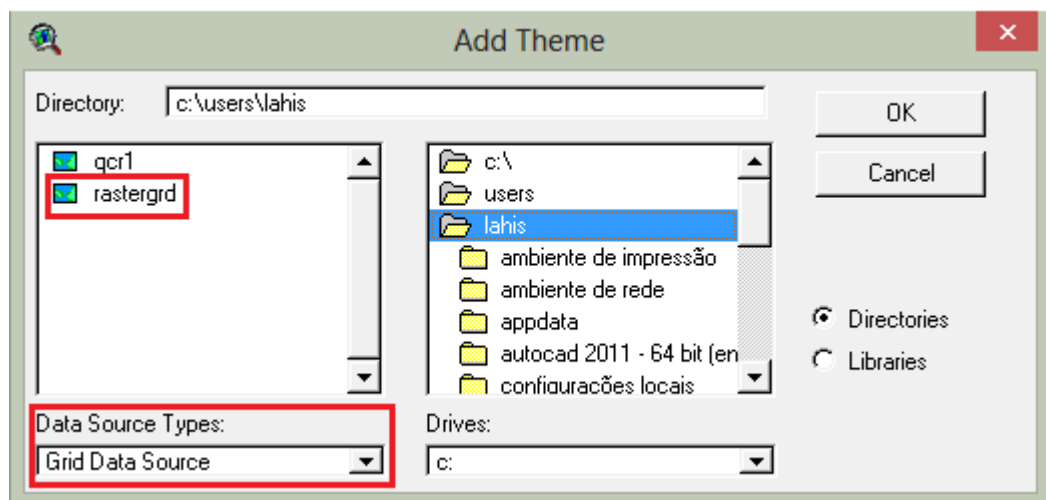


Figura 41 – Importando o Grid
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O primeiro passo no menu SHALSTAB foi remover as possíveis depressões do terrenos para que não influenciem no fluxo hídrico da bacia, com base no DEM, utilizou-se a ferramenta *Fill Sinks in DEM* exposta na figura 42, que subtraiu o DEM original de um DEM preenchido.

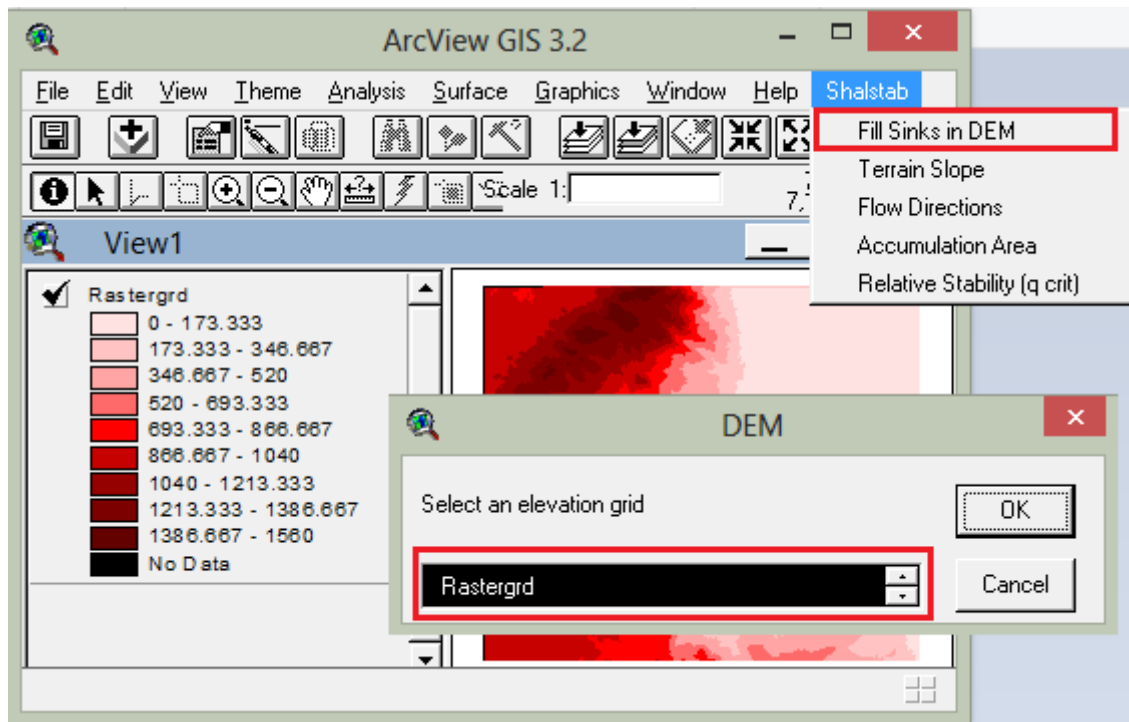


Figura 42 - Correção do Grid
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O próximo passo presente na Figura 43, foi a criação do mapa de declividade a partir da opção *Terrain Slope* do menu SHALSTAB, tendo como base o DEM corrigido.

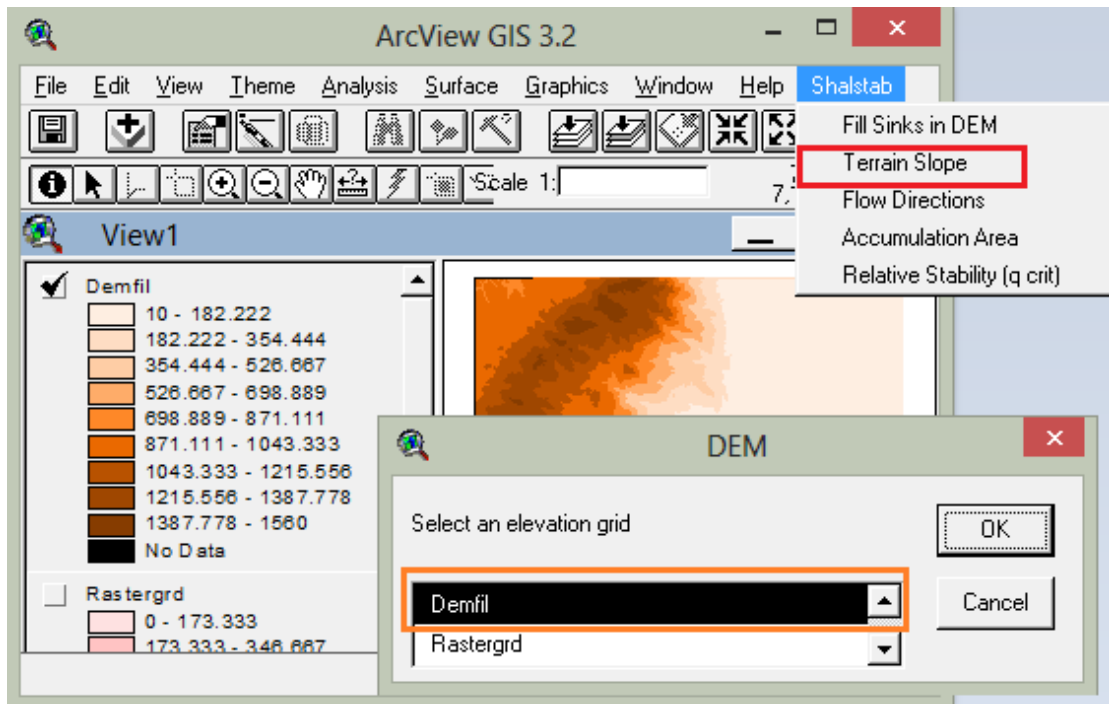


Figura 43 - Elaboração Slope
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Depois também no menu SHALSTAB foi criado o mapa de direções das vertentes usando a opção *Flow Directions*, também a partir do DEM corrigido como mostra a Figura 44.

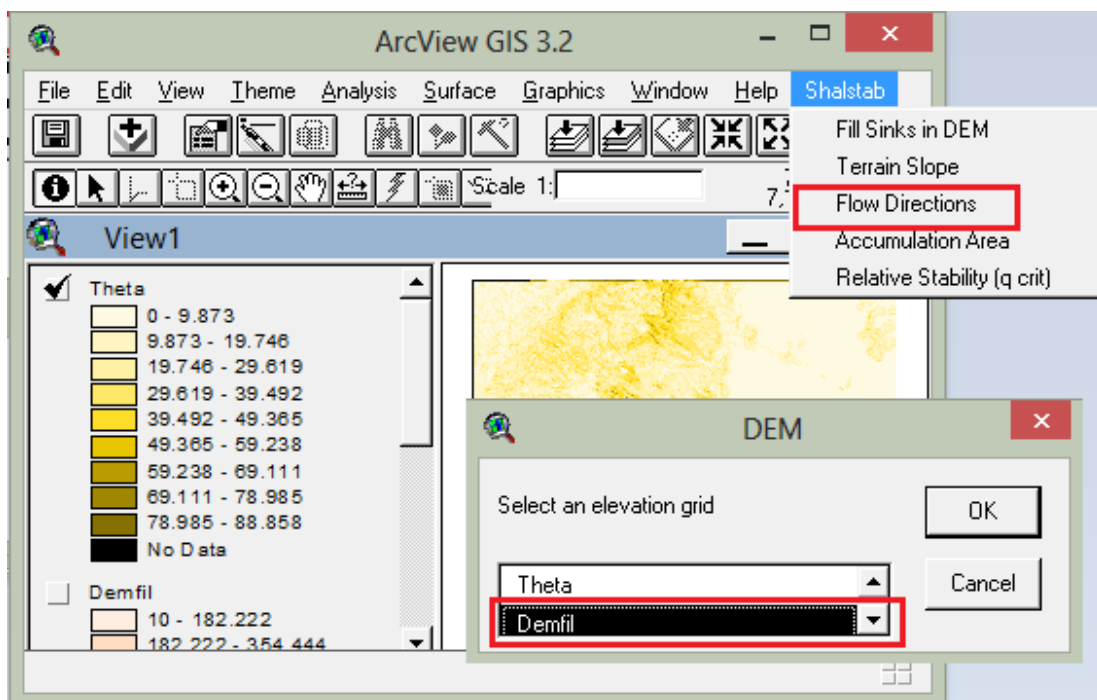


Figura 44 - Elaboração do Flow Directions
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Para criar o mapa seguinte de Área de Acumulação, que expõe a direção do fluxo hídrico da bacia, foi utilizado o DEM corrigido e o mapa de direções das vertentes, com auxílio da opção *Accumulatin Area* do menu SHALSTAB apresentada na Figura 45.

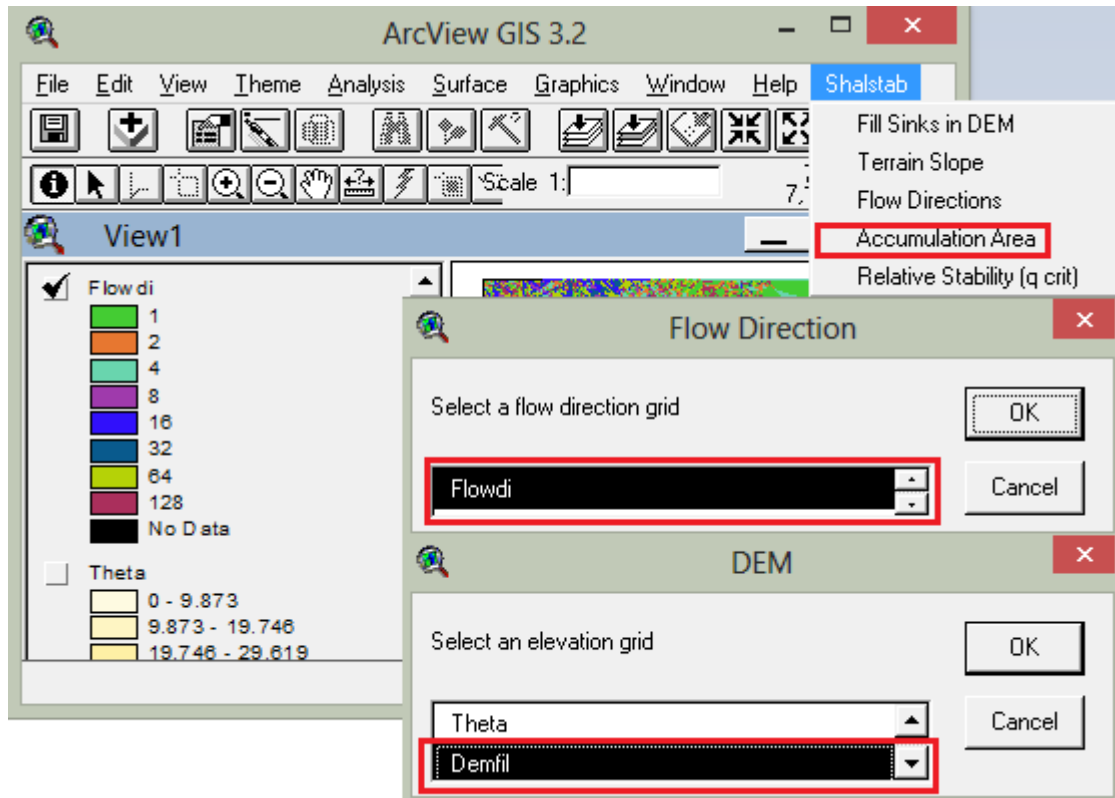


Figura 45 - Elaboração da Área de Acumulação
Fonte: Autoria Própria, 2015.

O último mapa gerado foi o de estabilidade, para isto foi necessário os parâmetros físicos e mecânicos dos solos, o mapa de declividade e o de área de acumulação conforme a Figura 46.

Para definição dos parâmetros do solo utilizados analisou-se a Figura 36 que mostra que os Cambissolos abrangem mais de 70% do território total da bacia, e de acordo com a Tabela 7 os valores encontrados por Kozciak (2005) possuem grande variação, a coesão varia de 7,1 kPa e 14,8 kPa, e também nos valores de ângulo de atrito interno, variam entre 17° e 30,1°. Outro fato é o de os Cambissolos Álicos abrangerem mais de 50% e Borchardt (2005) encontrou o valor de coesão do solo de 7,185 kPa com ângulo de atrito de 24,56°. Sabendo que menores valores de coesão do solo e maiores valores de ângulo de atrito tornam o solo

mais suscetível a movimentações de massa, buscando maior segurança na definição de áreas estáveis para elaboração do mapa final utilizou-se os dados presentes na Tabela 11.

A densidade do solo, espessura da camada e condutividade hidráulica teve que ser escolhida entre os solos Ca1, Ca3 e Cd. Como os valores de coesão e ângulo de atrito são para Cambissolos Álicos então não foram adotados os valores de Cd por esse ser um Cambissolo Distrófico. Ainda baseado na Figura 37 pode-se perceber que a abrangência do Ca3 é maior do que a do Ca1 na bacia, também este solo engloba alguns pontos de declividades superiores ao segundo citado, por esses motivos adotou-se os valores do mesmo, representados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros do solo adotados para confecção do Mapa de Estabilidade

Coesão (Pa) Borchardt (2005)	Densidade do solo saturado (kg/m³) Kozciak (2005)	Espessura (m) Kozciak (2005)	Condutividade Hidráulica (m/dia) Kozciak (2005)	Ângulo de Atrito (°) Borchardt (2005)
7185	1758	1	0,03408	24,56

Fonte: Autoria Própria, 2015.

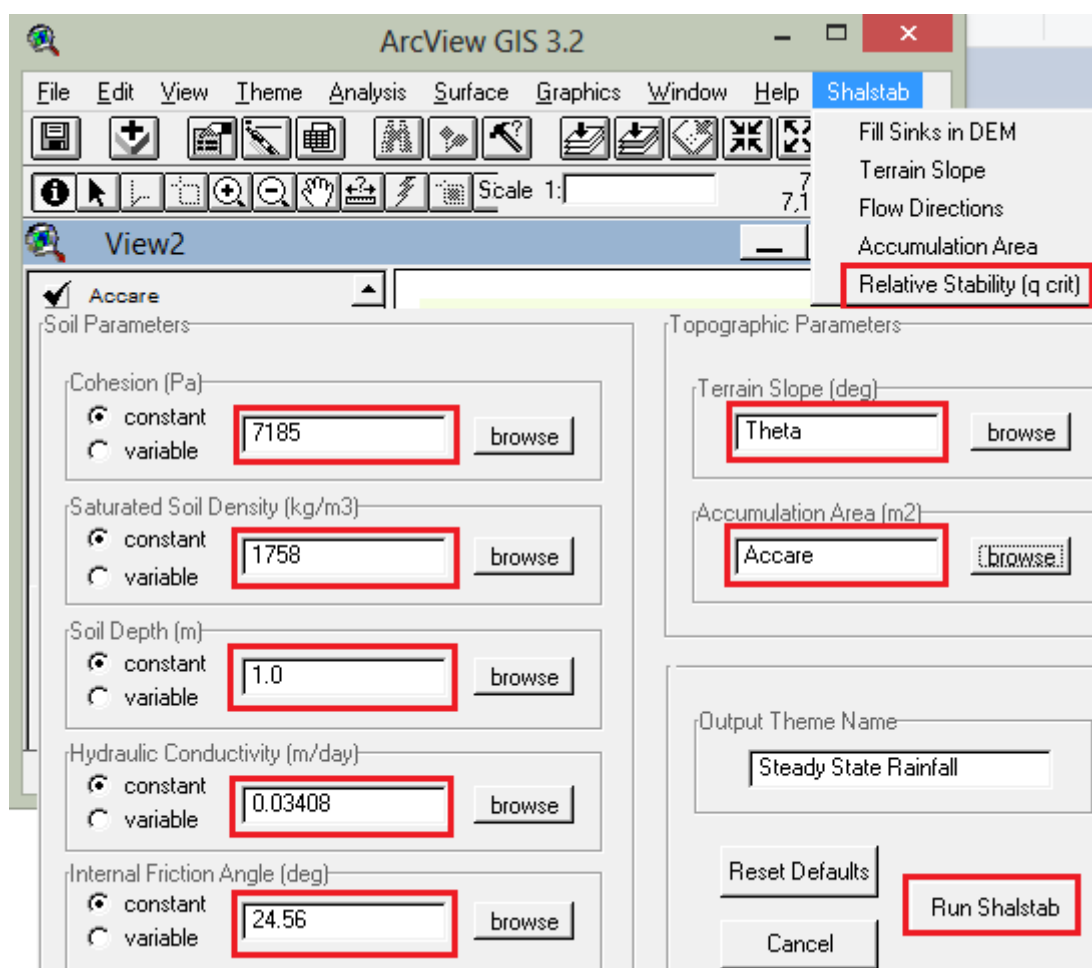


Figura 46 – Elaboração do Mapa de Estabilidade

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A Bacia do Rio Marumbi tem encostas que apresentam características propícias para a deflagração de movimentos de massa. Eventos deste tipo já ocorreram na região em períodos de grande pluviosidade. No ano de 2011 no mês de março entre os dias 10 e 12 a estação meteorológica de Morretes registrou 537mm de chuva, valor superior a média histórica para este mês que fica entre 250mm e 350mm (LOPES et al., 2012).

De acordo com o Boletim de Médias diárias Históricas de Morretes, que contém dados coletados pela estação de Morretes, as médias das precipitações diárias não ultrapassam 45mm, porém em março de 2011 esse valor foi de 50,2mm, em um total de 20 dias chuvosos (IAPAR, 2013).

O mapa elaborado por SHALSTAB gera sete classes de estabilidade, que vão desde áreas incondicionalmente estáveis até áreas incondicionalmente instáveis, e possui cinco classes intermediárias em função da pluviosidade em mm.

Para melhor análise dos dados obtidos o mapa foi reclassificado em quatro classes conforme apresentado na Tabela 12, para isto foi levado em consideração os dados de média de pluviosidade diária da região para o mês de março de 2011 que foi quando ocorreram movimentos de massa. Assim o terreno foi classificado como incondicionalmente estável as áreas que não apresentam risco de escorregamento independente da pluviosidade, áreas estáveis que precisam de precipitações acima de 200mm para se tornar instável, áreas instáveis que representam as encostas propícias a sofrer movimentos de massa com chuvas mais intensas que 50mm, e áreas incondicionalmente instáveis que não precisam que ocorra precipitação para que ocorram deslizamentos.

Tabela 12 – Reclassificação SHALSTAB

Nº de Classes	Classes SHALSTAB	Reclassificação
1	Incondicionalmente Instável	Incondicionalmente Instável
2	0 – 50	Instável
3	50 – 100	
4	100 – 200	
5	200 – 400	Estável
6	400 – 872	
7	Incondicionalmente Estável	Incondicionalmente Estável

Fonte: Autoria Própria, 2015.

O mapa de estabilidade gerado por SHALSTAB apresentou áreas classificadas em três das quatro classes, sendo a maioria da área da bacia considerada incondicionalmente estável, uma área de tamanho considerável na porção central da bacia considerada instável, e algumas pequenas porções nesta mesma região consideradas incondicionalmente instáveis. Devido à dificuldade de visualização dada pela escala do mapa e também pelo fato de a área considerada instável ser pequena e a maior parte da bacia estável o mapa de estabilidade apresentado na Figura 47 não apresenta os diferentes valores de pluviosidade e sim classifica as áreas em estáveis, que são as que não estão propícias a deslizamentos, e em instáveis aquelas que a partir de uma chuva de 50 mm já se tornam susceptíveis a movimentações de massa.

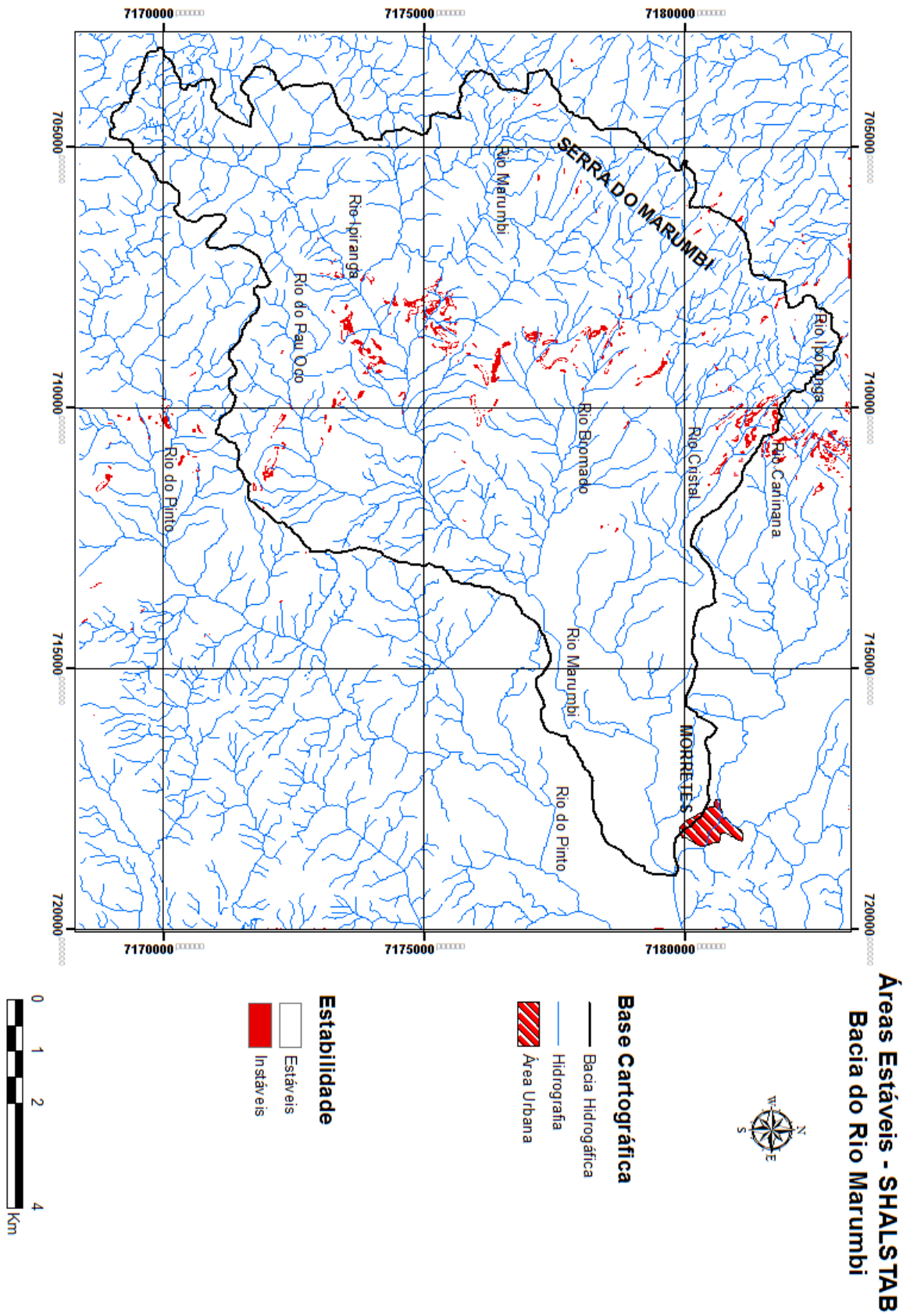


Figura 47 - Mapa de Áreas Estáveis SHALSTAB
Fonte: Autoria Própria, 2015.

6.2 COMPARATIVO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO SHALSTAB E O DE DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

O estudo elaborado por Kozciak (2005) resultou em quatro diferentes mapas de índices de segurança. Para a comparação entre os dois métodos foi levado em consideração o fato de que o método SHALSTAB aplicado no presente trabalho não considerou os efeitos mecânicos da vegetação na deflagração de escorregamentos. O mapa elaborado por Kozciak (2005) que considera a área da bacia sem vegetação está apresentado na Figura 48. Outra consideração deste mapa é que o solo apresenta-se totalmente saturado, a mesma é feita para que se torne possível a aplicação do método para determinação do fator de segurança. Diferente disto no modelo SHALSTAB foi assumido um estado uniforme de recarga d'água, que através da transmissividade do solo, que é o valor da condutividade hidráulica multiplicado pela espessura da camada do solo, simula o padrão de variação espacial da altura da coluna d'água que ocorre durante um evento pluviométrico. Outra diferença é o fato de que para aplicação do SHALSTAB foram feitas as considerações da Tabela 11 para toda a área da bacia, já para o fator de segurança foram utilizados os valores das Tabelas 8 e 9 que variam para cada tipo de solo.

O mapa da Figura 48 que considera que o solo está saturado até a superfície, foi gerado a partir da Equação (1) desconsiderando os parâmetros de influência da vegetação e considerando, $h_1=0$ e $h_2=z$ que resultou na Equação (7).

$$F_s = \frac{C_s + [(Z \cdot Y_{sub}) \cdot \cos^2 i] \cdot tg\phi}{[(Z \cdot Y_{sat}) \cdot \text{sen} i] \cos i} \quad (7)$$

Apesar das diferentes considerações para aplicação de cada método a comparação dos resultados é muito válida, pois a diferença esta na precisão da quantidade de áreas instáveis.

Como a coesão do solo utilizada no SHALSTAB foi a menor encontrada para as áreas de maior declividade, gerou uma margem de segurança maior, que diminuiu a precisão das áreas instáveis, mas não as descaracterizou tornando-as estáveis. O mesmo ocorre com a consideração de que o solo esta totalmente saturado feita pelo fator de segurança.

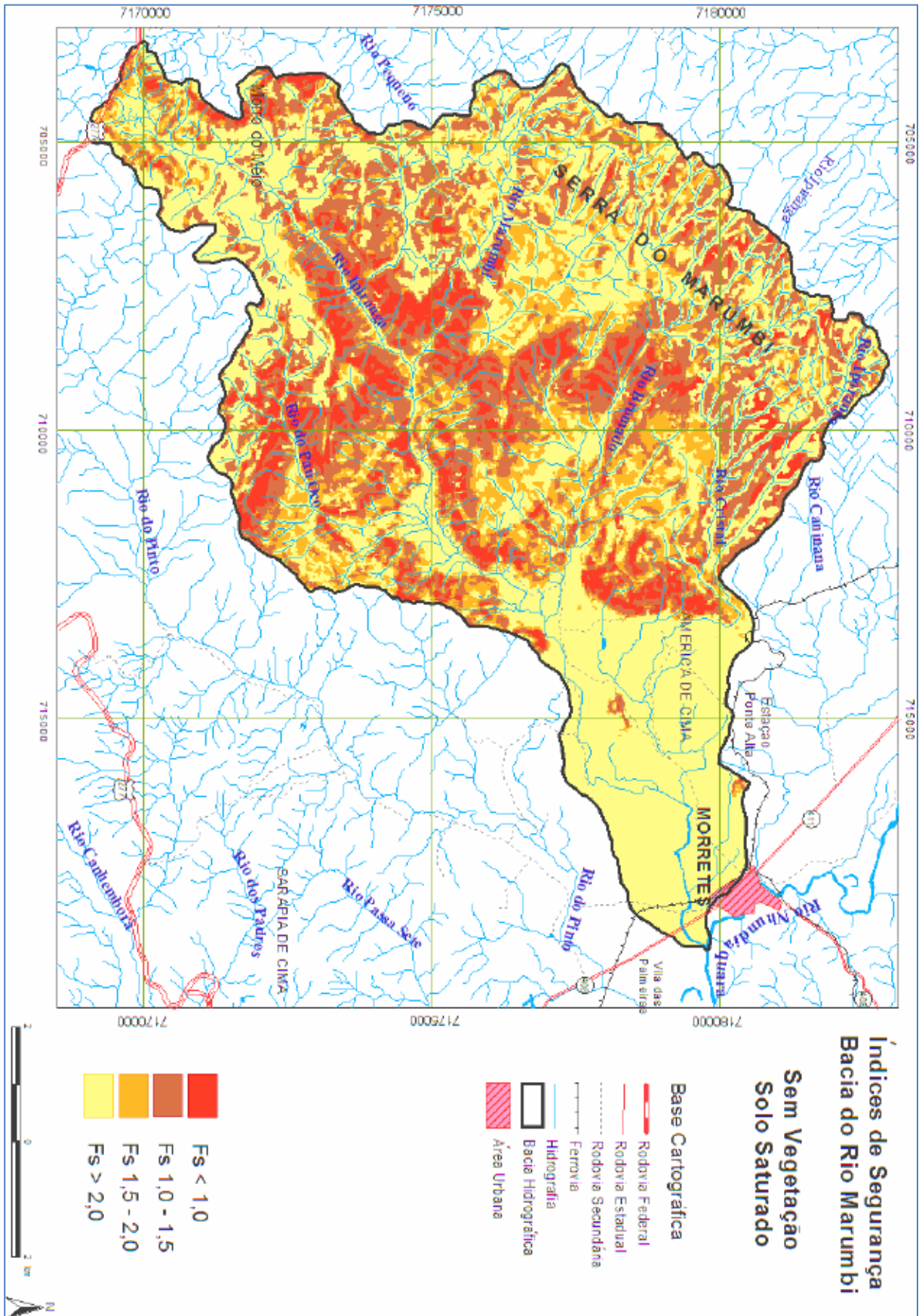


Figura 48 - Mapa de Índices de Segurança Bacia do Rio Marumbi
Fonte: Kozciak, 2005.

A pesquisadora Kozciak também mapeou os escorregamentos ocorridos até a data de sua pesquisa, e elaborou o mapa apresentado na Figura 49, que inclui o ano de 1980, 2000 e 2003. Este mapa é uma ferramenta importante para comparação das tuas metodologias aplicadas na área, pois pôde constatar a boa correlação entre os dois métodos, uma vez que os dois registraram esses locais como instáveis.

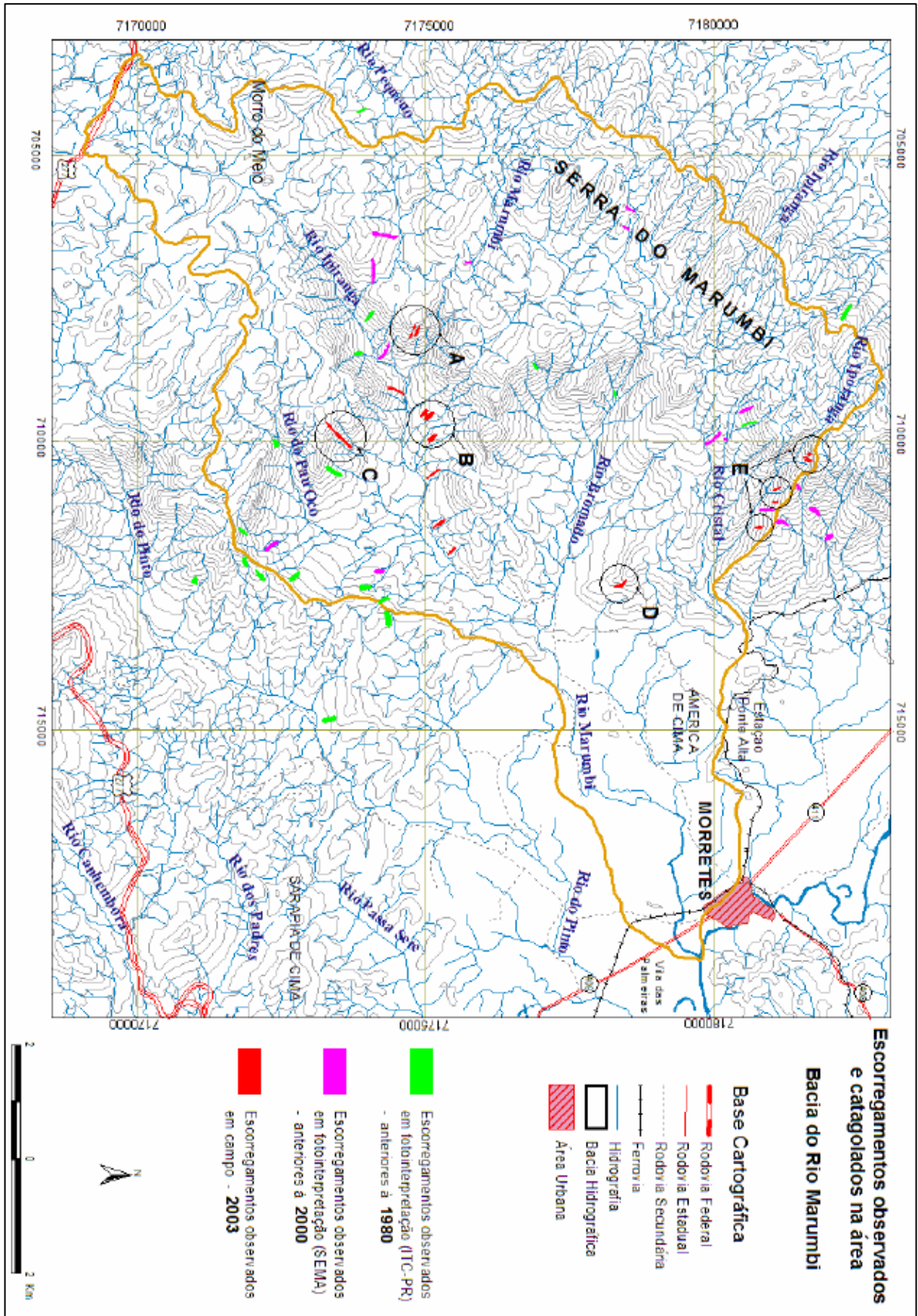


Figura 49 - Esco regamentos observados e catalogados na área Bacia do Rio Marumbi
 Fonte: Kozciak, 2005.

Foi possível estabelecer correlações entre o mapa de Áreas Estáveis gerado por SHALSTAB, o de Índices de Segurança, o de declividade e o de Escorregamentos Observados e Catalogados na área. Utilizou-se como base os últimos eventos catalogados no ano de 2003, e fazendo uma aproximação sem escala definida, porém da mesma área para os quatro mapas, observou-se as semelhanças e diferenças entre eles.

Para a primeira área a ser analisada no norte da bacia constatou-se que os escorregamentos catalogados e apresentados na Figura 49 e presentes nas aproximações da Figura 50, ocorreram em encostas de declividades superiores a 40° de acordo com o mapa de declividade da Figura 24. Tanto o mapa gerado por SHALSTAB apresentado na Figura 47 quanto o de Fator de Segurança da Figura 48. A diferença entre os dois está na precisão da área considerada instável, percebe-se que SHALSTAB restringe mais a área de instabilidade e se aproxima mais da área atingida em 2003.

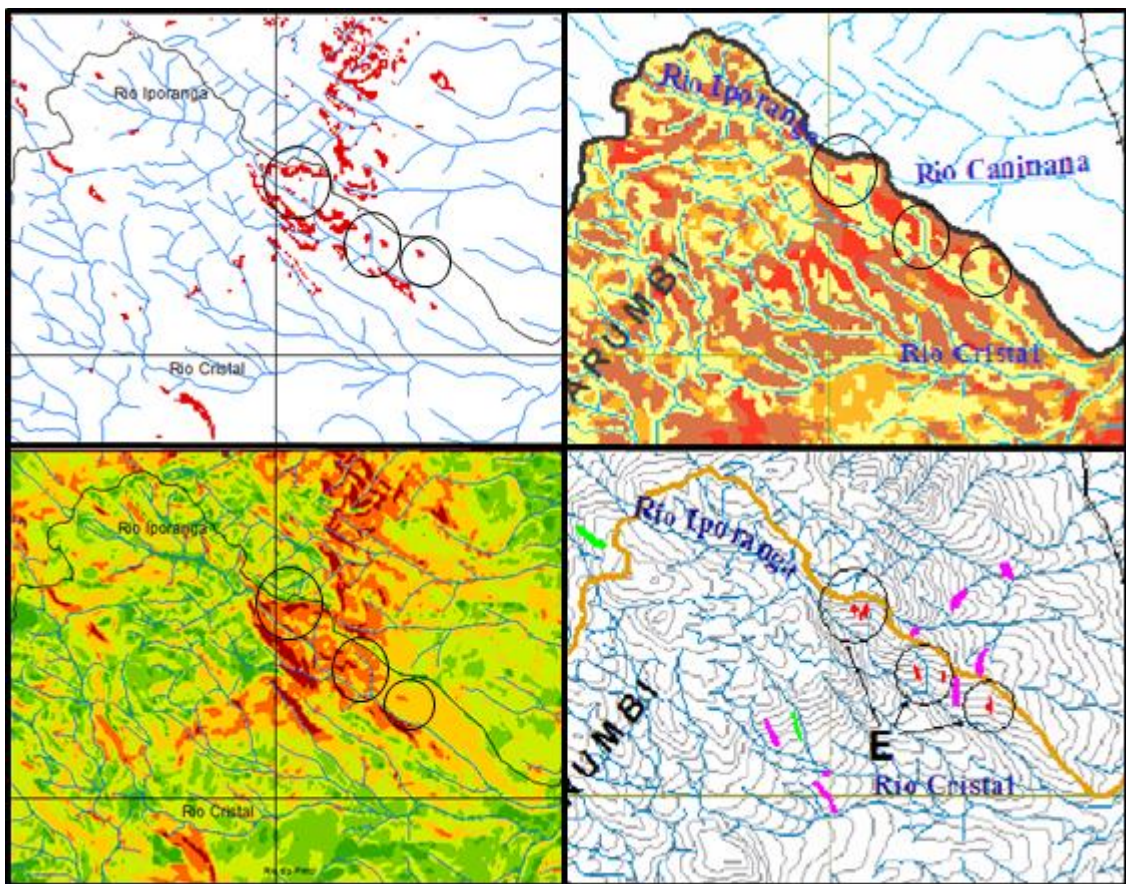
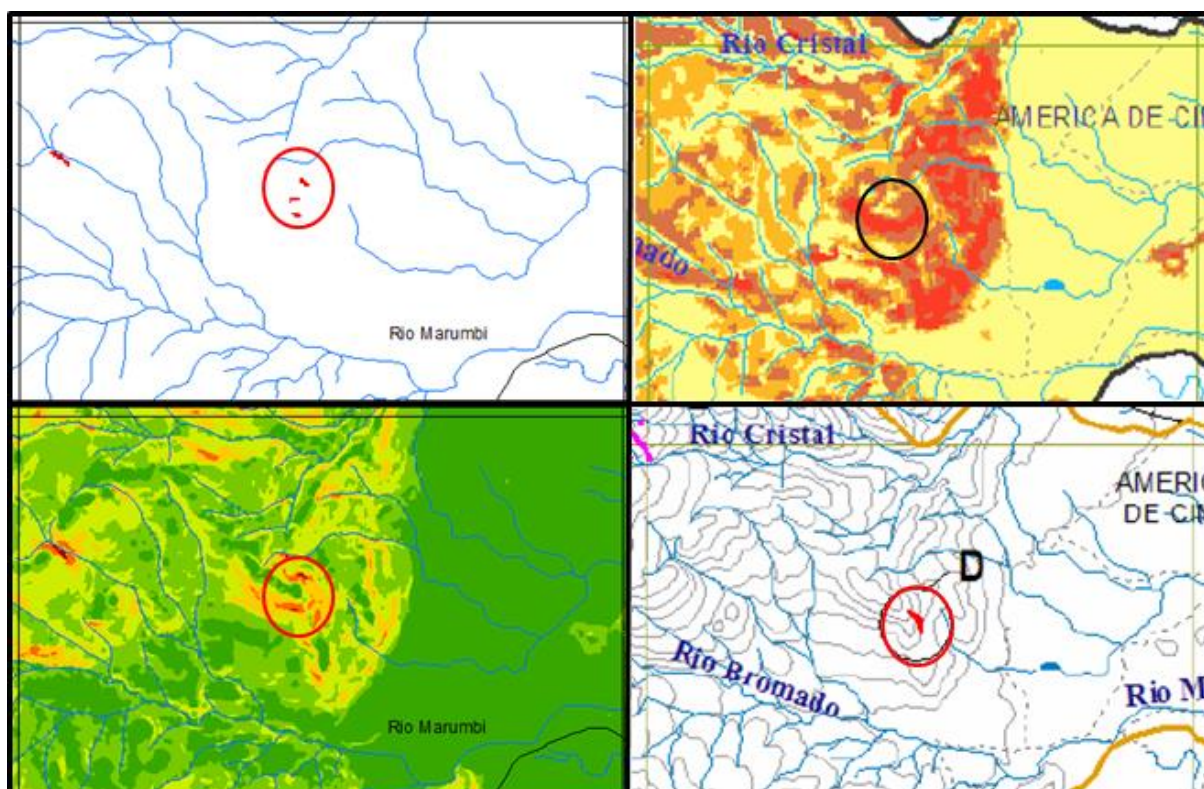


Figura 50 - Comparativo dos resultados encontrados entre SHALSTAB e Fator de Segurança tendo como base escorregamentos ocorridos em 2003 para área norte da bacia

Fonte: Autoria Própria, 2015.

Para uma segunda área situada ao sudoeste da bacia apresentada na Figura 51, as mesmas observações feitas anteriormente são válidas, e fica mais evidente a diferença de quantificação de áreas instáveis enquanto o fator de segurança considerou uma grande área como instável, SHALSTAB se restringiu a três pequenas porções, e o escorregamento ocorrido está localizado no local que estas porções estão presentes. Percebe-se também pela aproximação do mapa de declividade que estas três áreas restritas possuem declividade superior a 50° , comprovando mais uma vez a influência da declividade na deflagração de movimentos de massa.



**Figura 51 - Comparativo dos resultados encontrados entre SHALSTAB e Fator de Segurança tendo como base escorregamentos ocorridos em 2003 para área ao sudoeste da bacia
Fonte: Autoria Própria, 2015.**

Para uma terceira área situada ao sudeste da bacia e apresentada na Figura 52, além das mesmas constatações anteriores para um dos pontos de escorregamento a metodologia SHALSTAB não previu as áreas como instáveis e a do fator de segurança apenas um dos eventos. Isso pode ser atribuído a diversos fatores, por exemplo, ao observar o mapa de declividade constata-se que nesta área as declividades são inferiores a 20° , como este

parâmetro é levado em consideração em ambos os métodos e esta declividade é considerada baixa para ambos, este pode ter sido um fator que influenciou neste resultado. Outros fatores são as simplificações feitas para aplicação de cada metodologia, no SHALSTAB, pode ser citado o fato de ter considerado os mesmos parâmetros físicos e mecânicos de solo para todo o território da bacia, e os valores adotados não foram os referentes ao solo Ca 5 que é o presente na região que os escorregamentos não foram previstos. O distanciamento entre as curvas de nível que geraram o MDE também influenciou o resultado, quanto menor o distanciamento entre elas maior seria a precisão dos resultados.

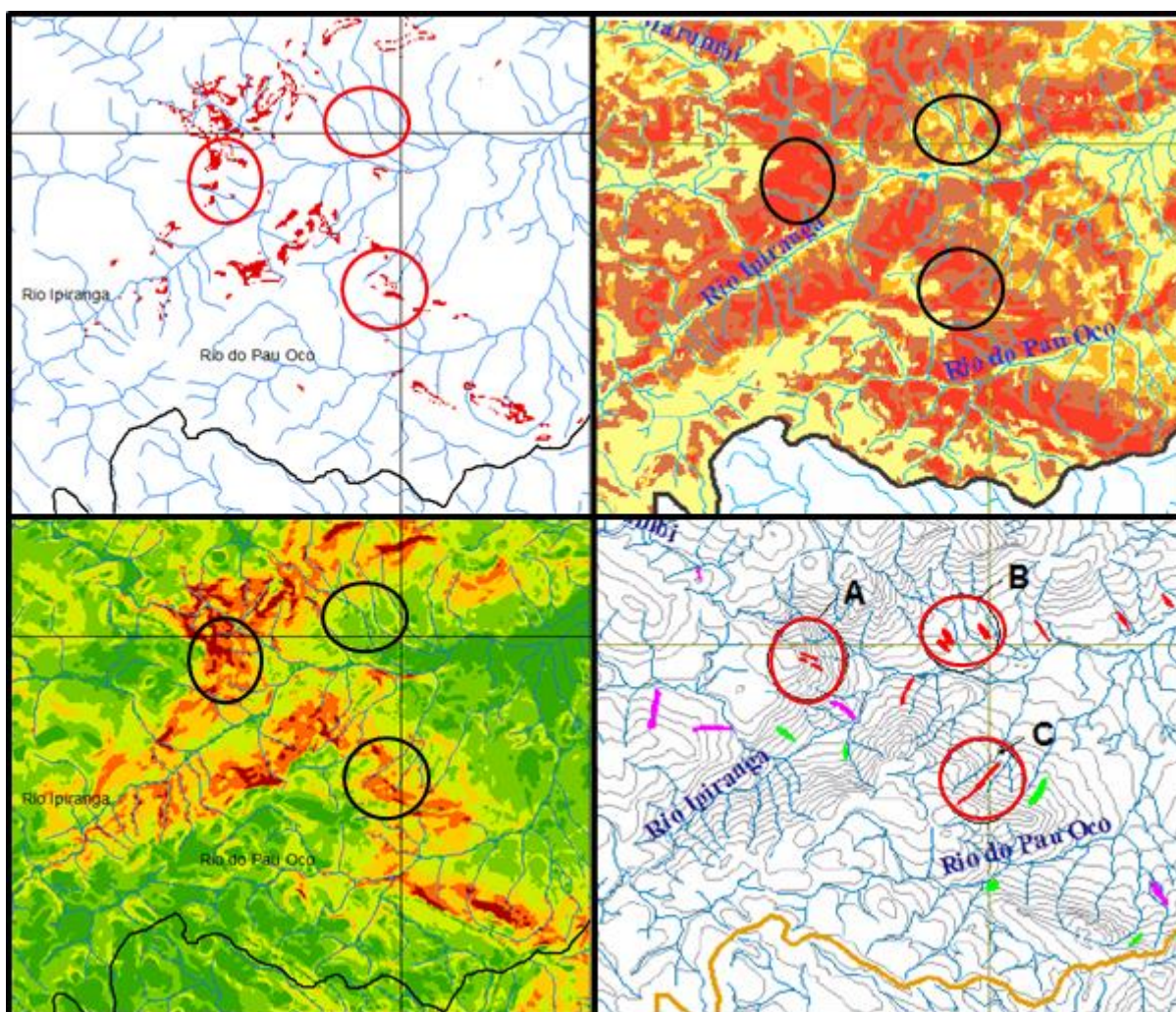


Figura 52 - Comparativo dos resultados encontrados entre SHALSTAB e Fator de Segurança tendo como base escorregamentos ocorridos em 2003 para área ao sudeste da bacia
Fonte: Autoria Própria, 2015.

A Figura 53 apresenta uma aproximação da área central da bacia nos resultados obtidos com SHALSTAB, em uma área considerada instável na Figura 47 devido à dificuldade de visualização. Nela ficam evidentes as classes encontradas por SHALSTAB conforme a classificação da Tabela 12. Assim percebe-se a existência de áreas incondicionalmente instáveis, ou seja, que não dependem de um evento hidrológico para que ocorram movimentos de massa.

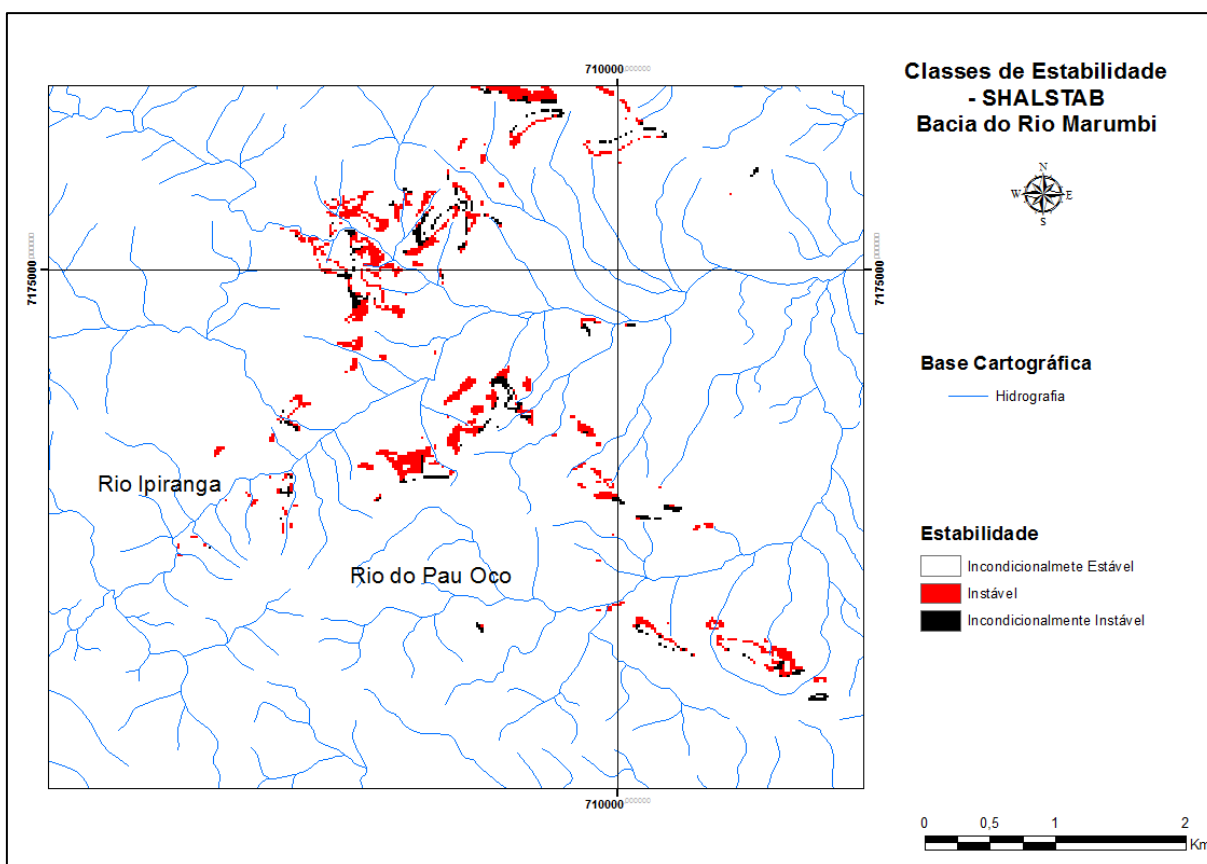


Figura 53 – Detalhe de áreas consideradas incondicionalmente instáveis localizadas na porção central da bacia do rio Marumbi
Fonte: Autoria Própria, 2015.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia hidrográfica do rio Marumbi de acordo com os resultados obtidos no presente estudo apresenta grande vulnerabilidade a movimentos de massa, como escorregamentos translacionais, devido aos condicionantes ambientais que a integram, entre os quais se destacam uma altimetria elevada associada a altas declividades, a formação pedológica e elevados índices pluviométricos registrados na região.

Os resultados encontrados foram satisfatórios e mostram que ambas as metodologias são eficientes na identificação de áreas instáveis, uma vez que a maioria dos deslizamentos ocorridos na bacia em anos anteriores foram identificados nessas áreas pelos dois métodos.

Através da observação dos mapas temáticos elaborados e do mapa de áreas estáveis obtidos por SHALSTAB, foi possível constatar que as áreas de instabilidade estão localizadas em maioria em regiões com declividades superiores a 30°, o que reafirma o fato de este fator associado à ação da gravidade e na presença de água estar diretamente ligado a processos erosivos e de deslizamento de uma encosta, devido a um maior ângulo de inclinação em um talude causar redução da resistência ao cisalhamento do maciço e aumentar a velocidade de escoamento superficial sobre a encosta. As regiões consideradas instáveis possuem faixa de altimetria entre 300m e 800m, e diferentemente do que se esperava apresentam uma predominância de formas convexas de vertentes, isso demonstra que apesar de as vertentes côncavas tornarem-se zonas de convergência para fluxos d'água, as vertentes convexas apresentam maior espessura de solo acumulado, parâmetro este levado em consideração para aplicação do método. Com o mapa de orientação das encostas foi possível constatar que há predominância na área em encostas voltadas para a direção Leste, Sudeste e Sul, e estas também são as que apresentam a maioria das regiões demarcadas como instáveis e também das áreas onde os escorregamentos foram catalogados. Isso devido ao fato de que a brisa marítima provinda do oceano, que é frequente na região da Serra do Mar, trás consigo grande umidade que tende a saturar mais rápido essas vertentes do que as voltadas para outras direções. Outro fato importante é que o solo Ca8, Associação de Cambissolos Álicos Tb com Solos Litólicos Álicos, é o que abrange maior parte das áreas consideradas instáveis, como os parâmetros físicos e mecânicos do solo adotados não foram os referentes a esta tipologia isso pode ter potencializado situações de risco, uma vez que a coesão que já foi caracterizada como um dos principais fatores influenciantes em processos de deflagração de

escorregamentos ser maior para este solo, de 17,0 kPa, conforme a Tabela 8 do que a utilizada para aplicação do método presente na Tabela 11, de 7,185 kPa.

De maneira geral, a metodologia adotada para avaliação da susceptibilidade a movimentação de massas apresentou-se satisfatória, sendo os resultados obtidos coerentes com o da área de estudo. No entanto, a avaliação dos parâmetros físicos e mecânicos do solo, apesar de ter sido bastante criteriosa, pode ter causado certa vulnerabilidade nos resultados finais obtidos, podendo atenuar situações de risco, bem como potencializá-las. Na intenção de obter maiores margens de segurança foram adotados os valores considerados mais críticos para cada parâmetro conforme citado anteriormente na apresentação dos valores utilizados, o que gerou então um acréscimo em quantias de áreas instáveis, que do ponto de vista da segurança é melhor do que haver uma descaracterização das mesmas.

Esta vulnerabilidade também é vista nos dados gerados por Kozciak (2005) com aplicação do Fator de Segurança, pois, para este método é feita a consideração de que o solo apresenta-se totalmente saturado, o que não é verdade, e diferente disto no modelo SHALSTAB foi assumido um estado uniforme de recarga d'água, que através da transmissividade do solo, que é o valor da condutividade hidráulica multiplicado pela espessura da camada do solo, simula o padrão de variação espacial da altura da coluna d'água que ocorre durante um evento pluviométrico.

Outra questão que é importante ressaltar é o fato de que os aspectos da vegetação não foram levados em consideração, e sabe-se que eles podem ter caráter positivo ou negativo na estabilização de encostas, porém, já existem estudos que verificam a influência da mesma nos resultados obtidos através do SHALSTAB, que incluem neste método as equações obtidas por Borga et al. (2002) que consideram o efeito da vegetação no cálculo do Fator de Segurança para vertentes infinitas. Por esse motivo o mapa do FS utilizado para comparação dos métodos neste trabalho foi o que não levou em consideração os efeitos da mesma.

Assim partir da comparação dos mapas gerados e compilados observou-se que o modelo SHALSTAB, apresentou um melhor desempenho com resultados mais precisos, isso devido ao fato de que a dimensão das áreas consideradas instáveis se aproximou mais as das catalogadas em eventos anteriores de movimentação de massa na bacia.

Outro resultado importante do SHALSTAB foi a quantificação do evento hidrológico necessário para ocorrência dos deslizamentos, que de acordo com o método ocorrerão quando a precipitação diária ultrapassar 50mm, isto para a maioria das áreas consideradas instáveis, mas também foi possível identificar uma minoria que receberam a classificação de áreas incondicionalmente instáveis, ou seja, que não dependem de um evento hidrológico para que

ocorram movimentos de massa, essas regiões necessitam de uma maior atenção pois diversos outros fatores independentes da pluviosidade podem gerar um escorregamento, como por exemplo o aumento da carga axial sobre o terreno, que pode ser dar com a instalação de construções civis, depósito de materiais ou até mesmo tráfego de equipamentos pela região.

O nível de precisão das técnicas adotadas está diretamente relacionado com a precisão geométrica, detalhamento dos mapas temáticos e a determinação dos valores das variáveis envolvidas em cada método. As técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas foram muito eficientes na elaboração dos mapas temáticos e do SHALSTAB, em função da diminuição da imprecisão na combinação de dados espaciais e permitindo uma rápida identificação visual de áreas críticas.

A principal contribuição deste estudo é servir como subsídio ao planejamento e gestão territorial, os resultados podem ser utilizados por autoridades locais e órgãos competentes, como sinais de alerta para medidas preventivas incorporadas ao plano diretor e de riscos da cidade como critério para o impedimento de ocupação antrópica ou a evacuação de áreas instáveis quando os índices pluviométricos previstos ultrapassarem os limites estabelecidos, buscando reduzir assim perdas humanas, ambientais e materiais.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de Risco de Escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP**. Dissertação mestrado em engenharia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1992.
- BIGARELLA, J. J. et al. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: v. 2**. Florianópolis:UFSC, 1996.
- BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Ed. UFSC. Florianópolis, Santa Catarina, v. 3, 2003.
- BORCHARDT, N. **Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade de vertentes do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado, PR**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.
- BORGA, M.; FONTANA, G.D.; GREGORETTI, C.; MARCHI, L. **Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. Hydrological Processes**. v. 16. Padova, 2002
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científico, v.2, 1988.
- CENAD et al. **Anuário Brasileiro de Desastres Naturais 2011**. Brasília, Goiás, 2012.
- CEPDEC. **Relatório Quadrienal: Gestão 2.011 a 2.014**. Curitiba, Paraná, 2015.
- CORDANI, U.G.; GIRARDI, V.A.V. **Geologia da Folha de Morretes**. Curitiba: Departamento de Geologia da UFPR, 1967.
- CUNHA, M. A. **Manual de ocupação de encostas**. São Paulo: IPT, 1991.
- CUNICO, C. **Zoneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Marumbi – PR: Perspectivas para Análise e Avaliação das condições Sócio-Ambientais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007.

DEFESACIVIL, Defesa Civil do Paraná. **Boletim das chuvas do Estado**, 24 de março de 2011. Disponível em: <<http://www.defesacivil.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=885>> Acesso em: 28 de Abril de 2015.

DINIZ, A. Castanheira. **Grandes Bacias Hidrográficas de Angola - Recursos em terras com aptidão para o regadio**. Lisboa, 2005.

EMBRAPA & IAPAR. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná**. Londrina: Convênio EMBRAPA/SUDESUL/ Governo do estado do Paraná/IAPAR, 1984.

ESRI, **Free ArcGIS trial**. Disponível em : < <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop/free-trial>> Acesso em : 01 de ago. de 2015.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes**. ed 2. Curitiba, 2009.

FITZ, Paulo Roberto, **Geoprocessamento sem Complicação**. São Paulo, Ed. Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, T. G; CSORDAS, S. M. **Mapa Geomorfológico da Região do Vale do Paraíba e litoral norte do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1993.

FREIRE, E.S.M. **Movimentos Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática. Construção**. Rio de Janeiro, 1965.

FUCK, et al. **Mapa Geológico preliminar do Litoral, da Serra do Mar e parte do primeiro Planalto do Paraná**. Curitiba: Boletim Paranaense de Geociências, 1969.

GERSCOVICH, Denise. **Estabilidade de taludes**. São Paulo : Oficina de Textos, 2012.

GRAY, G.L.; LEISER, A.J. **Role of vegetation in stability and protection of slopes**. In: Biotechnical slope protection and erosion control. New York. Van Norstrand Reinhol Company, 1982.

GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 4ª Ed. 2001.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de Escavação**. 2 ed. São Paulo. Edgard Blücher, 1984.

HIGHLAND, L. M; BOBROWSKY, Peter. **O manual de deslizamentos – um guia completo**. Reston, Virginia, 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1994.

IAPARDES. **Zoneamento do Litoral Paranaense**. Curitiba: Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 1989.

IAP - Instituto Ambiental do Paraná. **Encarte II: Análise Regional da EEG**. Curitiba: IAP, 2003.

IAPAR, Instituto Agrônomo do Paraná. **Boletim de Médias diárias Históricas de Morretes**. Curitiba: IAPAR, 2013.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. **Ocupação de encostas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991

JARBAS, Tony et al. **Solos Litólicos**. Brasília: Ageitec, 2010.

KOZCIAK, S. **Análise Determinística da Estabilidade de Vertentes na Bacia do Rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná**. Dissertação (Doutorado). Curitiba: UFPR, 2005.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LOPES, F.C.A. et al. **Análise de um evento extremo e desastre natural nas cidades de Antonina/PR e Morretes/PR**. Curitiba, 2012.

MAACK, Reinhard. **A modificação da paisagem natural pela colonização e suas conseqüências no norte do Paraná**, *Boletim Paranaense de Geografia*. Curitiba, 1961.

MAACK, Reinhard. **Breves Notícias Sobre a Geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina**. Curitiba, Paraná, 2001.

MINEROPAR, **Geologia do Paraná.** Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/Paineis_geologicos/LitoralParanaense_portugues.pdf> Acessado em: 10 de ago. de 2015.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. **A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding.** Water Resources Research, v. 30, 1994.

OKA-FIORI, Chisato et al. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná.** Curitiba: Mineropar, 2006.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas.** São Paulo: Atlas, 1989.

RODERJAN, C. V. **Classificação da vegetação no Estado do Paraná.** Curitiba: Ipardes, 1994.

SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção dos processos erosivos.** In: Guerra, A. J. T.; Silva, A.S.; Botelho, R. G. M. (Ed.) Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

SELBY, M.J. **Hillslope: materials and process.** Oxford, England: Oxford University Press, 1993.

SEMA, **Cartas Topográficas.** Disponível em : <<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo/print.php?conteudo=51>> Acesso: 02 mai. de 2015.

SILVA, J.P. **Análise do Índice de Estabilidade das Vertentes da Bacia Hidrográfica do Rio Ribeirão – Paranaguá/PR.** Curitiba, Paraná, 2011.

TABALIPA, N.L. **Comparativo de técnicas no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos no município de Pato Branco, Paraná.** Pato Branco, Paraná, 2015.

TOMINAGA, L. K. (Org.); SANTORO, J. (Org.); AMARAL, R. (Org.) . **Desastres Naturais: conhecer para prevenir.** 1ª. ed. São Paulo: Instituto Geológico . v.01, 2009.

TRICART, J. **The Landforms of the humid tropics, forest and savanas.** Londres: Longman, 1972.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. **O Clima do Litoral do Estado do Paraná.** Curitiba: Revista Brasileira de Climatologia, 2008.

VARNES, D. J. **Slope movements: types and processes – landsides analysis and control.** Washington: Nacional Academy of Scienses, 1978.