

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC  
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



INFLUÊNCIA DA ESCALA NO MAPEAMENTO DE ÁREAS  
SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA COM O SHALSTAB NA  
MICROBACIA DO RIBEIRÃO DO BAU, ILHOTA/SC

Vinícius dos Santos

Florianópolis  
2015

Vinícius dos Santos

**INFLUÊNCIA DA ESCALA NO MAPEAMENTO DE ÁREAS  
SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA COM O SHALSTAB NA  
MICROBACIA DO RIBEIRÃO DO BAU, ILHOTA/SC**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de Engenharia Civil  
da Universidade Federal de Santa Catarina como  
requisito parcial para a obtenção do grau de  
bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rafael A. dos Reis Higashi.

Coorientadora: Me. Gisele Marília Reginatto.

Florianópolis  
2015

Vinicius dos Santos

INFLUÊNCIA DA ESCALA NO MAPEAMENTO DE ÁREAS  
SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA COM O SHALSTAB  
NA MICROBACIA DO RIBEIRÃO DO BAU, ILHOTA/SC

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil, e aprovado na sua forma final pelo curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 08 de dezembro de 2015.

Professor Luiz Alberto Gomez, Dr.  
Coordenador do Curso

Banca examinadora:



---

Prof. Rafael A. dos Reis Higashi, Dr.

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.  
Regiane Mara Sbroglia, Me.

*“O futuro está no ar, eu posso senti-lo em todo  
lugar, soprando com o vento da mudança”*

*(Klaus Meine - Scorpions)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais, por me propiciarem tudo que foi necessário durante toda minha vida para que pudesse buscar e alcançar meus objetivos.

Aos meus irmãos Gustavo e Paloma, pela vida em família que compartilhamos e apesar de todos os conflitos, eu sei que sou o ídolo de vocês.

A meus tios Edilson e Mariza, por me acolherem durante a graduação.

A todos amigos e colegas, que ajudaram a moldar a pessoa que sou hoje, em especial aos “adquiridos” durante a graduação, por compartilhar toda a experiência que a Universidade nos fornece.

Ao orientador Pr. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi, por aceitar a tarefa de orientar este trabalho e ser sempre solícito e capaz quando solicitado.

A coorientadora Me. Gisele Marília Reginatto, por todo suporte e dedicação fornecida durante a execução deste trabalho.

A Me. Regiane Mara Sbroglia, pelo fornecimento de material de suma importância para execução deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem disponibilizar o seu tempo para realização da avaliação deste trabalho.

Aos professores que fizeram parte da minha caminhada até aqui.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

No Brasil, movimentos de massa são frequentes nas regiões montanhosas e serranas, relacionados a períodos de precipitação intensa, e são causadores de inúmeras perdas humanas e prejuízos sócioeconômicos. Entretanto, apesar de sofrer frequentemente com esses fenômenos, os estados brasileiros carecem de uma base cartográfica, disponível de forma gratuita, que permita obter detalhes importantes do terreno nesse tipo de análise, tornando importante a validação de mapeamentos em escalas menos precisas. Sendo assim, este estudo objetiva verificar a influência da escala na distribuição das classes de estabilidade definidas pelo modelo matemático SHALSTAB (Shallow Landslide Stability Analysis), que integra um modelo hidrológico a um de estabilidade de encosta na elaboração de um mapa de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais. Ele considera dados hidrológicos, topográficos e pedológicos na determinação da razão entre a quantidade de chuva ( $q$ ) e a transmissividade do solo ( $T$ ) necessária para tornar uma encosta instável. Para a elaboração dos mapas de áreas suscetíveis a escorregamentos foram realizadas modelagens com o SHALSTAB variando a espessura do solo, para isso, foram utilizados dados topográficos extraídos do Modelo Digital de Terreno (MDT) na escala 1:10.000 (pixel de 1m) e 1:50.000 (pixel de 10m) e dados geotécnicos obtidos em laboratório por amostras de solos rompidas no ensaio de cisalhamento direto. A coleta de amostras indeformadas ocorreu no horizonte C dos solos residuais da microbacia localizados em superfícies de ruptura, tendo como base o mapeamento geotécnico elaborado por Sbroglia (2015) a partir da metodologia de Davison Dias (1995). A área de estudo é a microbacia do Ribeirão do Baú, localizada em Ilhota/Santa Catarina, onde há grande ocorrência de escorregamentos do tipo translacionais, conforme evidenciado na tragédia ocorrida na região em novembro de 2008. Salienta-se que, ao comparar os mapas elaborados nas diferentes escalas, verificou-se que sua diminuição influenciou de forma distinta na distribuição das classes de estabilidade definidas pelo modelo, que, ao serem divididas em dois grupos: estáveis e instáveis, resultou na superestimativa das áreas instáveis em 2%. Entretanto, a escala 1:10.000 apresentou maior compatibilidade com os escorregamentos mapeados em campo, representado de forma mais coerente a situação da microbacia. A partir deste estudo é possível identificar em função da escala, se as análises de suscetibilidade a

escorregamentos translacionais com o SHALSTAB estão sendo conservadoras frente a esta problemática, ou não, quantificar esta diferença e compará-la a situação de campo, auxiliando, desta forma, estudos relacionados ao tema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escorregamentos translacionais, áreas suscetíveis, escala cartográfica, SHALSTAB

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Árvores inclinadas e degrau de abatimento podem indicar processo de rastejo. ....	24
Figura 2 – Perfil esquemático do processo de rastejo.....	25
Figura 3 – Rastejo (Creep).....	25
Figura 4 – Tipos de escorregamentos .....	26
Figura 5 – Escorregamento planar induzido pela ocupação indevida .....	27
Figura 6 – Escorregamentos Planar de origem natural .....	27
Figura 7 – Perfil esquemático de escorregamento planares .....	28
Figura 8 - Escorregamento circular ou rotacional .....	28
Figura 9 – Perfil esquemático do escorregamento Circular .....	29
Figura 10 – Escorregamentos em cunha .....	29
Figura 11 – Área de Risco .....	30
Figura 12 – Perfil esquemático de área sujeita a queda .....	30
Figura 13 – Situação de risco de tombamento.....	31
Figura 14 – Situação de risco de rolamento.....	31
Figura 15 – Corridas de massa .....	32
Figura 16 – Dados Vetoriais .....	37
Figura 17 – Objetos Vetoriais.....	38
Figura 18 – Diferentes representações gráficas para um mesmo mapa.....	39
Figura 19 - Fluxograma da metodologia de cartografia geotécnica aplicada no IPT.....	45
Figura 20 - Roteiro Metodológico para elaboração de cartas de risco. ....	47
Figura 21 – Princípios básicos da metodologia Davison Dias .....	49
Figura 22 – Simbologia de unidades geotécnicas .....	50
Figura 23 – Cruzamento de mapas pela metodologia Davison Dias e Higashi .....	51
Figura 24 – Exemplo de definição de ponto de coleta .....	52
Figura 40: Análise das forças atuantes em um talude infinito .....	56
Figura 41: Decomposição das forças atuantes no talude infinito .....	57
Figura 42 - Representação do modelo hidrológico de estado uniforme, sendo “q” a taxa de recarga uniforme, “a” a área de contribuição a montante, “b” o comprimento de contorno unitário, “z” a espessura do solo, “h” a altura da coluna de água e “ $\theta$ ” a declividade da encosta. ....	58
Figura 25 – Localização da microbacia do Ribeirão do Baú .....	64
Figura 26 - MDT com altimetria da microbacia do Ribeirão do Baú .....	65
Figura 27: Mapa de declividade em porcentagem da microbacia do Ribeirão do Baú.....	65
Figura 28: Mapa ilustrando as unidades geotécnicas da microbacia do Ribeirão do Baú .....	68
Figura 29 – Correção de discrepâncias do MDT.....	72
Figura 30 - Mapa de Declividade em porcentagem da microbacia do Ribeirão do Baú. ....	74
Figura 31 - Representação do fluxo d’água em função das células vizinhas.....	74



Figura 32 - Vetores de direção de fluxo .....	75
Figura 33 - Mapa de direção de fluxo na escala 1:50.000 gerado pelo método das oito direções de fluxo .....	76
Figura 34 - Direção de fluxo definida pelo método D-Infinito proposto por Tarboton (1997). ....	77
Figura 35 - Mapa de direção de fluxo gerado pelo método das infinitas direções no TauDEM .	78
Figura 36 - Processo de formação de uma superfície de acumulo de fluxo a partir da direção de fluxo. ....	79
Figura 37 - Mapa de área de contribuição hidrológica gerado pelo método das oito direções .	80
Figura 38: Mapa de área de contribuição hidrológica pelo método das infinitas direções de fluxos gerado pelo <i>TauDEM</i> . ....	82
Figura 39 - Fluxograma da modelagem do <i>SHALSTAB</i> . ....	83
Figura 43 - Mapa de peso específico saturado do solo ( $\gamma_{sat}$ ) estimado através dos resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto .....	86
Figura 44 - Mapa representando os diferentes ângulos de atrito interno encontrados por Sbroglia (2015) para cada unidade geotécnica. ....	87
Figura 45 - Mapa representando a coesão para cada uma das unidades geotécnicas. ....	88
Figura 46 - Modelo Digital do Terreno gerado com curvas de nível na escala 1:50.000 e com pixel de 10m x 10m .....	90
Figura 47 – Mapa de Declividade em graus da microbacia do Ribeirão do Baú .....	93
Figura 48 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 3m) .....	96
Figura 49 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 5m) .....	97
Figura 50 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 7m) .....	98
Figura 51 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 10m) .....	99
Figura 52 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 12m) .....	100
Figura 53 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 15m) .....	101
Figura 54: Mapas com as classes de estabilidade do <i>SHALSTAB</i> para as profundidades de solo em estudo na microbacia do Ribeirão do Baú. ....	102
Figura 55 - Mapa de estabilidade <i>SHASLTAB</i> para a profundidade de 10m com as cicatrizes de escorregamentos sobrepostas. ....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5- Classes de estabilidade geradas pelo SHALSTAB pela razão $\text{Log}(q/T)$ .....	62
Tabela 1 - Caracterização das unidades geotécnicas na microbacia do Ribeirão do Baú....	67
Tabela 2- Resultados obtidos através dos ensaios de caracterização física, método expedito das pastilhas e classificação de Munsell (1971).....	69
Tabela 3- Parâmetros obtidos por Sbroglia (2015) no ensaio de cisalhamento direto .....	70
Tabela 4- Resultado obtido por Sbroglia (2015) no ensaio de compressão confinada .....	70

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo entre as porcentagens ocupadas pelas classes de altitudes .....	92
Gráfico 2 - Comparação entre as % de áreas corresponde às classes de declividade. ....	94
Gráfico 3- Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente instável e saturado .....	104
Gráfico 4 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente instável e não saturado .....	104
Gráfico 5 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Instável e saturado.....	105
Gráfico 6 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Instável e não saturado.....	105
Gráfico 7 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Estável e não saturado.....	106
Gráfico 8 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente estável e não saturado.....	106
Gráfico 9 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente estável e saturado.....	107
Gráfico 10 - Comparativo entre os percentuais de área referente às classes estáveis do <i>SHALSTAB</i> para as diferentes escalas .....	108
Gráfico 11 - Comparativo entre os percentuais de área referente às classes instáveis do <i>SHALSTAB</i> para as diferentes escalas .....	109
Gráfico 12 – Diferença entre os percentuais de área referente às classes do <i>SHALSTAB</i> para as diferentes escalas .....	110
Gráfico 13 - Profundidade x percentual de área ocupada pelas classes de estabilidade .....	111

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978). .....	20
Quadro 2 - Classificação de movimentos de massa segundo Magalhães Freire.....	21
Quadro 3 - Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992) .....	22
Quadro 4 - Classificação conforme a velocidade do movimento de massa .....	23
Quadro 5 - Classificação quanto a profundidade do movimento de massa .....	23
Quadro 6 – Elementos a serem considerados na elaboração de mapas geotécnicos .....	41
Quadro 7 – Fatores que influenciam na qualidade dos mapas geotécnicos .....	41
Quadro 8 – Principais metodologias do mapeamento geotécnico .....	43
Quadro 9 – Classes de Relevos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos .....	73
Quadro 10 - Dados de entrada do modelo, associados aos seus respectivos símbolos e unidades.....	84
Quadro 11 - Porcentagem corresponde a área ocupada por cada uma das classes de altitudes	91
Quadro 12 - Porcentagem de área correspondente a cada uma das classes de declividade e Porcentagem acumulada.....	94
Quadro 13 - Porcentagem da área da bacia pertencente às classes de estabilidade do <i>SHALSTAB</i> x Profundidade do solo (análise na escala 1:10.000) .....	103
Quadro 14 – Porcentagem da área da bacia pertencente às classes de estabilidade do <i>SHALSTAB</i> x Profundidade do solo (análise na escala 1:50.000) .....	103
Quadros 15 - Porcentagens de área da microbacia correspondentes às classes estabilidade do <i>SHALSTAB</i> para a escala 1:50.000 .....	108
Quadros 16 - Porcentagens de área da microbacia correspondentes às classes estabilidade do <i>SHALSTAB</i> para a escala 1:10.000 .....	108
Quadros 17: Análise da eficácia do modelo <i>SHALSTAB</i> com 1:50.000 na profundidade de 10m. ....	113
Quadro 18 - Análise da eficácia do modelo <i>SHALSTAB</i> com 1:10.000 na profundidade de 10m .....	113
Quadro 19 - Análise da eficácia do modelo <i>SHALSTAB</i> com 1:50.000 na profundidade de 3m .....	114
Quadro 20 - Análise da eficácia do modelo <i>SHALSTAB</i> com 1:50.000 na profundidade de 5m ....	115
Quadro 21 - Análise da eficácia do modelo <i>SHALSTAB</i> com 1:50.000 na profundidade de 7m ....	115
Quadro 22 - Análise da eficácia do modelo <i>SHALSTAB</i> com 1:50.000 na profundidade de 12m .....	115
Quadro 23 - Análise da eficácia do modelo <i>SHALSTAB</i> com 1:50.000 na profundidade de 15m .....	116

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
	2.1 Objetivo geral.....	17
	2.2 Objetivos específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
	3.1 Movimentos de Massa .....	18
	3.1.1 <i>Definição e fatores condicionantes</i> .....	18
	3.1.2 <i>Classificação dos Movimentos de Massa</i> .....	19
	3.1.2.1 Rastejo.....	23
	3.1.2.2 Escorregamentos.....	25
	3.1.2.3 Quedas .....	30
	3.1.2.4 Corridas .....	32
	3.2 Metodologia de Mapeamentos dos Movimentos de Massa .....	32
	3.2.1 <i>Sistemas de Informações Geográficas (SIG)</i> .....	35
	3.2.1.1 Mapas Temáticos .....	36
	3.2.1.2 Topologia.....	36
	3.2.1.3 Atributos.....	36
	3.2.1.4 Dados Vetoriais .....	36
	3.2.1.5 Objetos Vetoriais.....	38
	3.2.1.6 Dados Matriciais (ou Rasters) .....	39
	3.2.2 <i>Mapeamento Geotécnico</i> .....	40
	3.2.2.1 Histórico .....	42
	3.2.2.2 Metodologias de Mapeamento Geotécnico Nacionais.....	43
	3.2.3 <i>Modelos de Previsão de Movimentos de Massa</i> .....	53
	3.2.3.1 Modelo de Instabilidade de Encosta Infinita.....	55
	3.2.3.2 Modelo Hidrológico.....	58
	3.2.3.3 Combinação entre o modelo de estabilidade de encosta e o modelo hidrológico ..	60
4	ÁREA DE ESTUDOS.....	62
	4.1 Localização e Clima.....	63

4.2	Geologia, Geomorfologia e Características Topográficas.....	64
4.3	Unidades Geotécnicas.....	66
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	70
5.1	Modelo Digital do Terreno.....	71
5.2	Mapa de Declividade.....	73
5.3	Mapa de Direção de Fluxo.....	74
5.4	Mapa de Área de Contribuição.....	79
5.5	Modelagem com o <i>SHALSTAB</i> .....	83
5.5.1	<i>Elaboração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais.....</i>	<i>84</i>
5.5.1.1	Mapa de Peso Específico Saturado.....	86
5.5.1.2	Mapa de Ângulo de Atrito Interno dos Solos.....	87
5.5.1.3	Mapa de Coesão dos Solos.....	88
6	RESULTADOS.....	90
6.1	Modelo Digital do Terreno.....	90
6.2	Mapa de Declividade.....	92
6.3	Modelo <i>SHALSTAB</i> .....	95
6.3.1	<i>Mapa de suscetibilidade representativo da microbacia do Ribeirão do Baú.....</i>	<i>111</i>
7	Conclusões.....	116
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

# 1 INTRODUÇÃO

A ocorrência dos movimentos de massa vem sendo cada vez mais responsável por prejuízos sociais e econômicos no Brasil. De acordo com Guimarães et al. (2008), o Brasil apresenta condições geomorfológicas e climáticas que propiciam a ocorrência desses fenômenos, em especial nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, evidenciados principalmente durante as estações chuvosas. Além disso, um dos fatores que contribui para a sua ocorrência é a ocupação em áreas de risco, como por exemplo, de encostas com elevada declividade.

O estado de Santa Catarina é historicamente conhecido pela ocorrência de desastres. Cita-se a tragédia ocorrida em novembro de 2008, onde eventos pluviométricos extremos desencadearam movimentos de massa que resultaram em mortes e prejuízos materiais incalculáveis. Sendo assim, é importante caracterizar a região e, principalmente, os fenômenos ocorridos, a fim de compreender seus mecanismos, bem como os fatores que influenciam na sua deflagração, visando a identificação dos locais que apresentam riscos à população.

Kobyama et al. (2004, *apud* SBROGLIA, 2015), apontam dois tipos de medidas preventivas quanto à ocorrência de desastres naturais, as estruturais e as não estruturais. A primeira compreende obras de engenharia que visam a prevenção e a contenção dos desastres, e a segunda envolve ações voltadas a políticas urbanas de planejamento e gerenciamento. Dentre as medidas não estruturais, o mapeamento geotécnico representa uma ferramenta que ganha cada vez mais espaço entre os pesquisadores. O mapeamento consiste no estudo do meio físico, envolvendo, desta forma, o estudo dos fenômenos ocorridos, suas causas e possíveis consequências, localização espacial, magnitude, entre outros (SBROGLIA, 2015).

No mapeamento dos movimentos de massa, além da metodologia de mapeamento geotécnico, destaca-se o uso de modelos matemáticos associados a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), responsáveis por analisar processos evolutivos do relevo, como os escorregamentos, e ao mesmo tempo contribuir para a previsão destes. Neste contexto, destaca-se o modelo *Shallow Landslide Stability Analysis* (SHALSTAB), o qual possibilitou, neste estudo, a elaboração de mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais, a comparação dos mapas em

diferentes escalas cartográficas (1:10.000 e 1:50.000). Além disso, a verificação da influência da escala na distribuição das classes de estabilidade definidas pelo modelo.

Segundo Gomes (2004), para que o modelo *SHALSTAB* apresente resultados satisfatórios é necessária a utilização de dados cartográficos em escala igual ou superior a 1:10.000, sendo escalas menores utilizadas apenas para estudos preliminares. Entretanto, Ramos et al. (2002), em seus estudos com o *SHALSTAB* no estado de Minas Gerais, obtiveram resultados coerentes com a situação de campo na identificação das áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais com a escala cartográfica 1:50.000. Reginatto (2013) também utilizou um Modelo Digital de Terreno (MDT) na escala 1:50.000 e obteve resultados positivos com o *SHALSTAB*.

É importante mencionar que o Brasil, apesar de sofrer frequentemente com os movimentos de massa, carece de uma base cartográfica, disponível de forma gratuita e que abrange todos os estados, em escala que permita obter detalhes importantes do terreno nesse tipo de análise, sendo a utilização de dados cartográficos na escala 1:10.000 e 1:50.000 comumente evidenciados. Salvo no Estado de Santa Catarina, que recentemente disponibilizou dados na escala 1:10.000. Logo, é importante a validação de análises nessas escalas e a comparação destas com escalas mais precisas. Esta comparação visa identificar, por exemplo, em análises de suscetibilidade a movimentos de massa, se o mapa gerado está sendo conservador frente a este problema, ou não, e quantificar esta diferença, auxiliando estudos relacionados na interpretação dos mapas obtidos em função da escala utilizada.

O presente estudo foi realizado na microbacia do Ribeirão do Baú, localizada no município de Ilhota, no Vale do Itajaí em Santa Catarina, um dos municípios mais atingidos pelos movimentos de massa ocorridos em novembro de 2008, destacando-se os escorregamentos do tipo translacional. Esta área possui dados cartográficos disponíveis em diferentes escalas, possibilitando as análises propostas neste estudo. Destaca-se que os resultados obtidos na escala 1:10.000 referem-se ao trabalho de Sbroglia (2015), o qual apresentou resultados bastante satisfatórios na modelagem com o *SHALSTAB*.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Verificar a influência da escala cartográfica na modelagem com o *SHALSTAB* na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Elaborar na escala cartográfica 1:50.000 os mapas temáticos: Modelo Digital do Terreno (MDT) e mapa de declividade;
- Quantificar a ocorrência de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais com o modelo *SHASLTAB* para diferentes profundidades de solo, com o emprego da escala cartográfica 1:50.000;
- Comparar os mapas temáticos e o mapa de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais na escala cartográfica 1:50.00 com os respectivos mapas na escala 1:10.000;
- Confrontar os resultados “de validação” da simulação mais representativa da microbacia, na escala 1:10.000, com os resultados obtidos para a escala 1:50.000.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Movimentos de Massa**

A crescente ocupação de áreas de risco como, por exemplo, em encostas com altas declividades, fez com que os movimentos de massa passassem a ser considerados como um dos principais tipos de desastres no Brasil e no mundo, estando associado a um número elevado de mortes e a grandes prejuízos materiais (GUESSER, 2013). Assim, salienta-se a importância do estudo dos movimentos de massa, compreendendo suas definições fatores condicionantes e classificações.

##### **3.1.1 Definição e fatores condicionantes**

Segundo Selby (1993) os movimentos de massa são definidos como o escorregamento de material sólido encosta abaixo, o qual pode ser formado por diferentes componentes, como solos, rochas e vegetação, sendo que o movimento do material dá-se pela influência da força da gravidade. De acordo com Queiroz (2009), o termo “movimento de massa” é utilizado na engenharia civil para designar qualquer tipo de ruptura e deslocamento de solos e rochas sob ação da gravidade

Em regiões tropicais dentre os fatores associados a ocorrência dos movimentos de massa destaca-se a pluviometria (CUNHA, 1991). Kobiyama et al. (2006) mencionam que tanto chuvas intensas de curta duração, quanto chuvas mais brandas que ocorrem de forma contínua por um longo período, diminuem a resistência ao cisalhamento dos solos e propiciam condições necessárias para a ocorrência dos movimentos de massa. Reginatto (2013) cita também fatores como o relevo, características geológicas-geotécnicas, vegetação e a ação humana.

Os movimentos de massa podem ocorrer tanto em região rural quanto em áreas urbanas, sendo que, em áreas urbanas geralmente têm o agravante da ocupação irregular em áreas de risco. Observa-se que:

“Os movimentos gravitacionais de massa ocorrem com relativa frequência em áreas de encostas desestabilizadas por ações antrópicas, provocando graves desastres, que costumam ocorrer de forma brusca. Dessa forma, estes desastres tem componentes de desastres mistos e assumem características de desastres de evolução aguda.

Por ocorrerem em épocas de chuvas intensas e concentradas e se distribuírem por numerosas cidades brasileiras, esses desastres assumem características nitidamente sazonais e quando computados os danos anuais, distribuídos pelas diferentes cidades, assumem proporções de um imenso desastre nacional por somação de efeitos parciais”, CASTRO, 2003. P.104.

### **3.1.2 Classificação dos Movimentos de Massa**

Segundo Fernandes (2000) existem inúmeras formas de classificar os movimentos de massa, ou seja, pode-se levar em consideração a velocidade e a direção do movimento, o tipo de material, a geometria, a profundidade, entre outros. Caputo (1987) propõe a classificação em três grandes grupos: desprendimentos de terra ou rocha, deslizamentos e rastejos. As primeiras tentativas de classificar estes movimentos foram em 1862 por Dana e por Sharpe (1938), os quais utilizaram como parâmetros a velocidade do movimento, tipo do material e a quantidade de água ou gelo contido na massa. Este trabalho influenciou a maioria das classificações posteriores, dentre as quais está aquela apresentada por Varnes (1958 e 1978) e por Hutchinson (1988).

No quadro 1 apresenta-se a proposta de Varnes (1978) para a classificação dos movimentos de massa, a qual é considerada como oficial para a Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAEG). Nos quadros subsequentes estão ilustradas as classificações de Freire (1995) que subdivide os movimentos em escoamento, escorregamento e subsidência (Quadro 2) e também a classificação de Augusto Filho (1992) que divide os movimentos em quatro grupos principais: rastejos, escorregamentos, quedas e corridas (Quadro 3). Neste estudo, dentre as diversas classificações apresentadas, optou-se por apresentar de forma mais detalhada aquela proposta por Augusto Filho (1992).

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978).

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiros	Finos
Quedas ( <i>fall</i> )			Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de terras
Tombamentos ( <i>topple</i> )			Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de terras
Escorregamento ( <i>slide</i> )	Rotacional	Poucas unidades	Escorregamento de rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamento de terras
	Translacional	Muitas unidades			
Expansões laterais ( <i>lateral spread</i> )			Expansões de rocha	Expansões de detritos	Expansões de terras
Corridas ( <i>flow</i> )			Corridas de rochas (rastejo profundos)	Corrida de detritos	Corrida de terras
				(Rastejo de solo)	
Complexos ( <i>complex</i> )			Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos		

Fonte: Varnes (1978).

**Quadro 2 - Classificação de movimentos de massa segundo Magalhães Freire**

NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS
ESCOAMENTO	Corresponde a uma deformação ou movimento contínuo, com ou sem superfície definida. Dependendo do movimento, são classificados como: Rastejo – escoamento plástico; Corrida – escoamento fluido-viscoso.
ESCORREGAMENTO	Deslocamento finito ao longo de uma superfície bem definida. Dependendo da forma, são classificados como rotacional ou translacional.
SUBSIDÊNCIA	Deslocamento finito ou deformação contínua de direção essencialmente vertical. Podem ser subdivididos em: subsidência propriamente dita, recalque e desabamento/quedas

Fonte: Quadro adaptado de Thives; Trichês (2009 *apud* GUESSER, 2013).

**Quadro 3 - Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992)**

Tipo do movimento	Característica do movimento, material e geometria
Rastejos ( <i>creep</i> )	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 ( <i>slides</i> )	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidades médias (m/h) e altas (m/s) Pequenos e grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares - solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares - solos e espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha - solos e rochas com dois planos de fraquezas
Quedas ( <i>falls</i> )	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. Rolamento de matacão Tombamento
Corridas ( <i>flows</i> )	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimento) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo de 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: Augusto Filho (1992).

Thives e Trichês (2009 *apud* GUESSER, 2013) ainda apresentam outros dois exemplos de classificação, uma em função da velocidade (Quadro 4) e outra em função da profundidade (Quadro 5).

**Quadro 4 - Classificação conforme a velocidade do movimento de massa**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Velocidade</b>
Extremamente rápido	> 3m/s
Muito rápido	0,3m/s a 3m/s
Rápido	1,6m/s a 0,3m/s
Moderado	1,6m/mês a 1,6m/dia
Lento	1,6m/ano a 1,6m/mês
Muito lento	0,06m/ano a 1,6m/ano
Extremamente lento	< 0,06m/ano

Fonte: Quadro adaptado de Thives; Triches (2009).

**Quadro 5 - Classificação quanto a profundidade do movimento de massa**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Profundidade</b>
Superficial	< 1,5m
Raso	1,5m a 5m
Profundo	5m a 20m
Muito profundo	> 20m

Fonte: Quadro adaptado de Thives; Triches (2009).

### 3.1.2.1 Rastejo

O rastejo é um fenômeno bem lento e por consequência seu potencial de destruição é menor que dos demais tipos de movimentos de massa. Porém, pode ser facilmente identificado pela mudança na verticalidade das árvores, postes, muros, etc., como pode ser observado na figura 1 (SELBY, 1993; AUGUSTO FILHO, 1994). Segundo Massad (2010) este tipo de movimento de massa geralmente é desprezado pela engenharia, porém com o tempo o rastejo pode vir a se tornar um movimento de massa.

**Figura 1 – Árvores inclinadas e degrau de abatimento podem indicar processo de rastejo.**



Fonte: Brasil (2006).

O rastejo normalmente atua sobre os horizontes superficiais dos solos, em horizontes de transição solo/rocha e até mesmo em rochas em profundidades maiores (BRASIL, 2006). Segundo Queiroz (2009) este o fenômeno é comum em solos residuais e em clima tropical úmido onde o intemperismo é intenso, esses fatores acarretam num vagaroso aumento da espessura da camada de solo e por consequência em alguns casos, devido ação da gravidade.

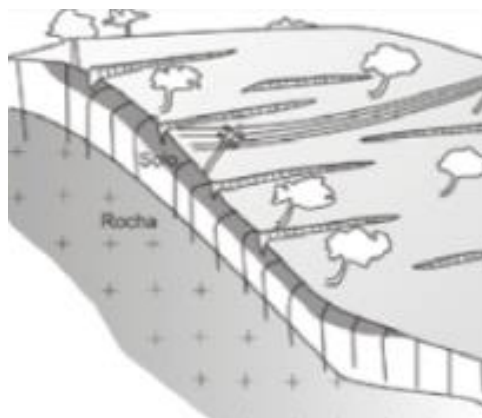
De acordo com Guessser (2013), o processo de rastejo é resultado da atuação conjunta ou individual de quatro fatores, sendo estes:

- ➔ Expansão e contração como resultado das variações térmicas e de umidade que ocorrem de forma sazonal;
- ➔ Ação da gravidade, que ainda é potencializada em períodos chuvosos que acarretam num aumento do peso do solo e por consequência das tensões cisalhantes.
- ➔ Percolação da água gerando o surgimento de tensões positivas. Esta água provinda do fluxo subterrâneo ou de pressões neutras hidrostáticas durante chuvas intensas;
- ➔ Redução da coesão do solo como resultado do aumento da umidade

A figura 2 e a figura 3 apresentam perfis esquemáticos de locais onde há a ocorrência de rastejo.

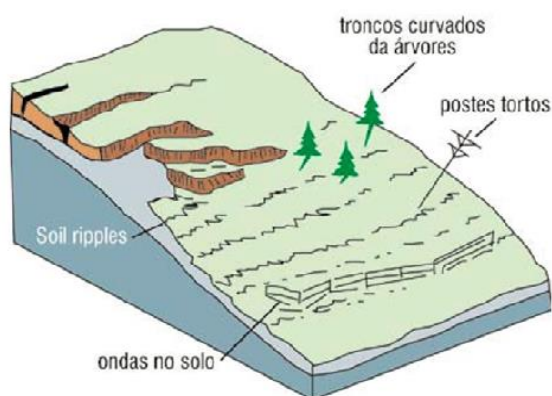


**Figura 2 – Perfil esquemático do processo de rastejo.**



Fonte: Brasil (2006).

**Figura 3 – Rastejo (Creep)**



Fonte: Highland; Brobowsky (2009)

### 3.1.2.2 Escorregamentos

Segundo Brasil (2006) os escorregamentos são processos marcantes na evolução das encostas, caracterizando-se por movimentos rápidos, com limites laterais e profundidade bem definidos (superfície de ruptura). Os escorregamentos, são de curta duração e com alto poder destrutivo, possuem alta incidência em todo mundo e sendo assim tem sua dinâmica muito estudada com intuito de mapear as áreas de risco e diminuir danos físicos e materiais associados a sua ocorrência (GUIDICINE; NIEBLE, 1993 *apud* AUGUSTO FILHO 1994; KOBAYAMA et al., 2006).

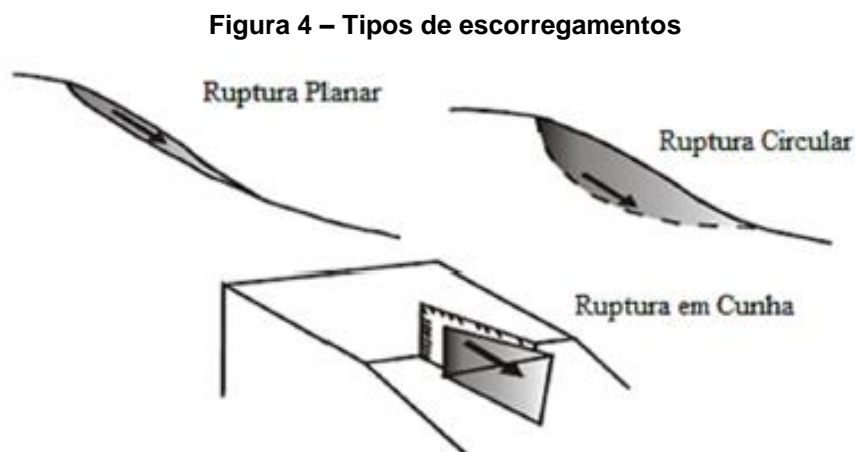
De acordo com Augusto Filho (1992), o mecanismo de ruptura desses deslizamentos dá-se pelo aumento das tensões atuantes e/ou diminuição da resistência do solo, que acabam por levar a encosta a ruptura por tensões de

cisalhamento. Caputo (1987) menciona que em solos coesivos homogêneos deflagram-se predominantemente movimentos rotacionais, por sua vez em maciços rochosos estratificados o predomínio é de movimentos translacionais, denominados deslizamentos translacionais.

Pode-se classificar os escorregamentos quanto a geometria e também quanto ao tipo de material instabilizado (MASSAD, 2010).

Segundo Brasil (2006), o principal agente deflagrador dos escorregamentos são as chuvas, sendo a quantidade pluviométrica necessária para causar um escorregamento induzido menor do que para gerar um escorregamento generalizado. Contudo, em ambos os casos a variação rápida do nível de água na encosta diminui a sua resistência ao cisalhamento ocasionando escorregamento. Massad (2010), ainda cita o corte do talude, realizado de forma inadequada e a colocação de sobrecarga nas encostas como os fatores principais para a deflagração dos escorregamentos.

Assim como afirma Guesser (2013) em seus estudos quanto a geometria pode-se classificar os escorregamentos em três tipos, rotacionais, translacionais e em cunha (figura 4).



Fonte: Jesus (2002).

*a) Escorregamentos Planares ou Translacionais:*

São processos frequentes na dinâmica das encostas serranas brasileiras, com ocorrência predominante em solos pouco desenvolvidos nas vertentes com altas declividades. Quanto a geometria, é caracterizado por uma espessura fina de forma retangular e estreita (BRASIL, 2006).

Este tipo de escorregamento pode movimentar tanto rocha quanto solo e está condicionado à planos de fraqueza nos materiais, como por exemplo, contato de solos com diferentes permeabilidades, fraturas, foliações e xistosidades em rochas (FERNANDES, 2000).

**Figura 5 – Escorregamento planar induzido pela ocupação indevida**



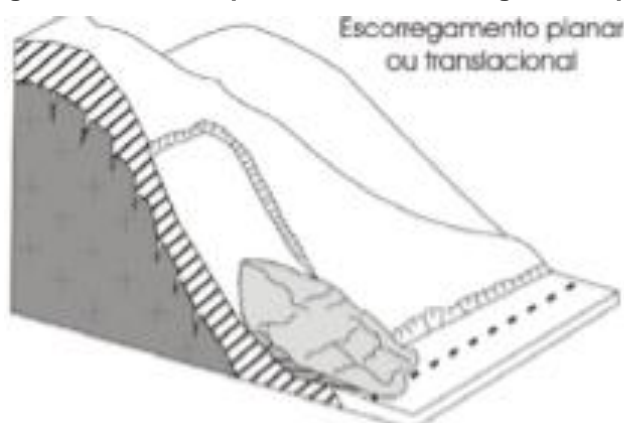
Brasil (2006).

**Figura 6 – Escorregamentos Planar de origem natural**



Fonte: Highland; Brobowsky (2009).

**Figura 7 – Perfil esquemático de escorregamento planares**



Fonte: Brasil (2006).

Estes movimentos costumam ser deflagrados durante eventos de chuva intensas, quando a taxa de infiltração torna-se superior à taxa de retirada de água do interior da massa da encosta. Com isso, tem-se um aumento da poro-pressão e consequentemente da possibilidade de ruptura (DIAS, 2002 apud OLIVEIRA, 2013).

*b) Escorregamentos Rotacionais ou Circulares:*

Possuem superfícies de deslizamento curvas, sendo comum a ocorrência sucessiva de rupturas combinadas (Figuras 8 e Figura 9). Estão associadas a aterros, pacotes de solo ou depósitos mais espessos, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas. Tem um raio de alcance relativamente menor que os escorregamentos translacionais (Brasil, 2006).

**Figura 8 - Escorregamento circular ou rotacional**



Fonte: Highland; Brobowsky (2009).

**Figura 9 – Perfil esquemático do escorregamento Circular**



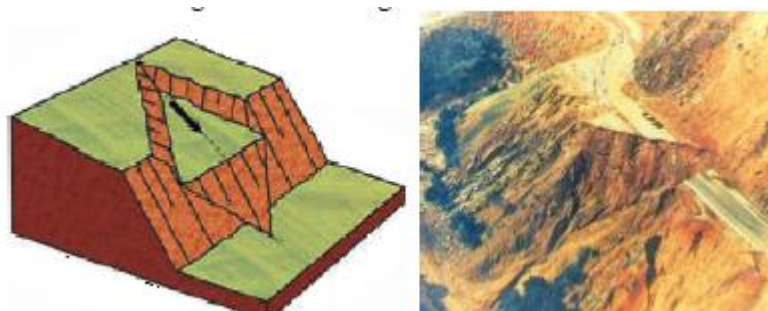
Fonte: Brasil (2006).

Outro fato a se ressaltar é a baixa deformação da massa rompida durante a ruptura, sendo comum a vegetação acima dela manter-se na vertical ou com pequena inclinação e o solo apresentar poucas trincas (WOLLE, 1988 apud OLIVEIRA, 2014).

*c) Escorregamento em cunha:*

São restritos às regiões de relevo controlado por estruturas geológicas. Sua maior incidência dá-se nas regiões que passaram por desconfinamento, seja por ação do homem ou natural (GUESSER, 2013). A figura 10 apresenta um exemplo de escorregamento em cunha e do seu perfil esquemático.

**Figura 10 – Escorregamentos em cunha**



Fonte: Oliveira (2014).

Segundo Massad (2010), os principais agentes deflagradores deste tipo de escorregamento são:

- ➔ Alteração da geometria do talude;
- ➔ Colocação de sobrecarga no topo das encostas;

- Elevação das pressões neutras devido a ocorrência de chuvas, reduzindo a resistência do solo devido às chuvas;
- Remoção da cobertura vegetal;

### 3.1.2.3 Quedas

Neste tipo de movimento de massa (Figura 11 e Figura 12), rochas soltam-se do alto de encostas íngremes e despencam em alta velocidade. Há grande preocupação com a trajetória das mesmas durante a queda devido a periculosidade envolvida (AUGUSTO FILHO, 1994). A ocorrência deste processo é condicionada pela existência de rochas aflorando no topo das encostas com elevada declividade (relevo escarpado) ou devido ao corte de taludes, sendo que os principais fatores deflagradores deste tipo de movimentação são: descontinuidade do maciço rochoso, subpressão devido ao acúmulo de água e penetração de raízes (BRASIL, 2006).

**Figura 11 – Área de Risco**



Fonte: Brasil (2006).

**Figura 12 – Perfil esquemático de área sujeita a queda**



Fonte: Brasil (2006).



Segundo Brasil (2006), existem ainda outros dois processos que envolvem diretamente o afloramento do maciço rochoso. O primeiro deles é o tombamento (Figura 13), que acontece em encostas e taludes íngremes de rocha com descontinuidades verticais. Em geral apresentam um movimento lento, principalmente em taludes de corte (BRASIL, 2006).

De acordo com Castro (2003), o tombamento diferencia-se da queda pelo sentido do plano de clivagem. Assim quando rompida a inércia, ocorre um movimento de bascula, provocando o tombamento.

**Figura 13 – Situação de risco de tombamento**



Fonte: Brasil, 2006

O segundo processo é o rolamento de blocos (Figura 14), muito comum em áreas de rochas graníticas, onde há predisposição a ocorrência de matacões de rocha sã, isolados e expostos em superfície (BRASIL, 2006). São causados essencialmente pela erosão, que desestrutura a base de apoio do bloco, desestabilizando-o e provocando o rolamento (CASTRO, 2003).

**Figura 14 – Situação de risco de rolamento**

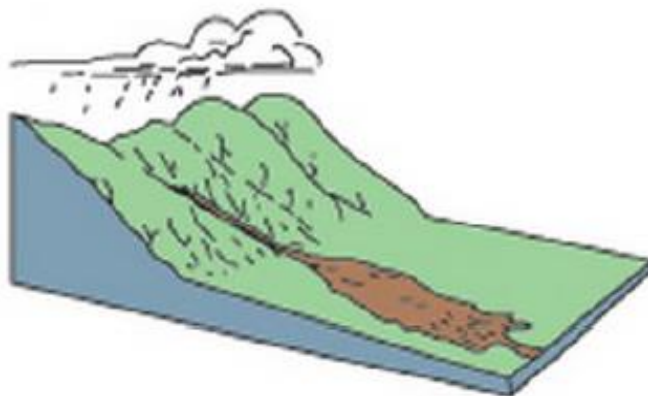


Fonte: Brasil (2006).

#### 3.1.2.4 Corridas

São processos que ocorrem rapidamente (Figura 15), principalmente devido ao tipo de material transportado que comporta-se de maneira semelhante a um fluido muito viscoso. Apesar de mais raras, as corridas são mais destruidoras que os escorregamentos (KOBAYAMA et al., 2006). São processos de movimentos gravitacionais complexos, ligados a eventos pluviométricos excepcionais (BRASIL, 2006). Devido à grande rapidez com que se deslocam esses processos são devastadores, possuem alto poder de erosão e atingem distâncias enormes em pouco tempo (MASSAD, 2010).

Figura 15 – Corridas de massa



Fonte: USGS (2014 *apud* Rosolem, 2014).

### 3.2 Metodologia de Mapeamentos dos Movimentos de Massa

Com o aumento da população e o crescimento constante das manchas urbanas nas cidades brasileiras, adicionados a fatores econômicos, políticos, sociais e culturais, observou-se um aumento considerável da população que reside em áreas consideradas de risco, seja de movimentos de massa, enchentes ou inundações (OLIVEIRA, 2014).

IPT (2007 *apud* OLIVEIRA, 2014), aponta que no gerenciamento das áreas de risco, são dois os principais fundamentos: a previsão e a prevenção, sendo que a primeira trata de identificar os possíveis locais onde os desastres irão acontecer e a segunda consiste em uma tomada de decisões que impeça que os desastres, caso ocorram, sejam danosos. Michel et al. (2012) afirma que a identificação das áreas de risco contribui consideravelmente com a elaboração de mapas de previsão e



prevenção, estimativas de produção de sedimentos e planejamento de medidas estruturas para proteção de infraestrutura.

Segundo Higashi (2002), o mapeamento geotécnico é uma ferramenta extremamente útil e eficaz para fazer o gerenciamento adequado da utilização do solo em grandes áreas. Reginatto (2013) enfatiza que o mapeamento geotécnico é de fundamental importância na identificação e caracterização de áreas atingidas e sujeitas a movimentos de massa, contribuindo para a elaboração de um banco de dados que pode ser utilizado em modelagens e análises ambientais. Salienta-se que esse banco de dados agrega confiabilidade às análises realizadas. Observa-se que Reginatto (2013) e Sbroglia (2015) utilizaram a metodologia de mapeamento geotécnico em seus estudos relacionados a análise de suscetibilidade a escorregamentos translacionais.

AGS (2007 *apud* ROSOLEM, 2014), cita que com dados do local disponíveis é possível a aplicação de diversos métodos que estabeleçam graus de suscetibilidade e risco em ambiente SIG. Alguns deles citados a seguir.

#### **a) Métodos Heurísticos**

Neste método a avaliação da suscetibilidade e perigo é realizada de acordo com opinião do profissional. São dois os principais métodos heurísticos: análise geomórfica e combinação de mapas qualitativos. A análise geomórfica o perigo e a suscetibilidade são determinados diretamente pelo profissional com base na experiência individual e por analogia. Já na combinação de mapas qualitativos o profissional desenvolve o estudo atribuindo valores para ponderar uma série de parâmetros avaliados, assim ao soma-los se definem as classes de perigo e vulnerabilidade. Ambos os métodos são comuns, mas variam de local para local, da experiência do profissional e da dificuldade de ponderar os parâmetros de entrada.

#### **b) Métodos Estatísticos**

Os métodos estatísticos são baseados nas relações observadas entre os fatores e a distribuição dos deslizamentos de solo passados. Assim, a suscetibilidade e o perigo são determinados de forma objetiva, pela qual os parâmetros e suas inter-relações são avaliados em uma base estatística. Entre os vários métodos de análises estatísticas estão: as análises bivariadas, análise multivariada, método de regressões e método Bayesiano usando pesos e redes neurais (SOETERS; VAN WESTERN, 1996 *apud* AGS, 2007b). As desvantagens do método incluem a qualidade dos dados, inventários incompletos, erros de mapeamento, além de tais modelos não serem facilmente transferíveis de região a região.

#### **c) Métodos Determinísticos**

Os métodos determinísticos aplicam a teoria de estabilidade de taludes, princípios como taludes infinitos, equilíbrio limite e elementos finitos. Para desenvolver estes métodos, requerem-se os parâmetros dos solos e físicos do local. O mapa resultante detalha o fator de segurança e os limites médios, enquanto as classes de suscetibilidade e perigo podem ser definidas com intervalos. As limitações quanto a utilização destes métodos são as

simplificações dos modelos geológicos e geotécnicos, as dificuldades de prever a poro pressão e sua relação com a precipitação (ROSOLEM, 2014, p44).

Fernandes et al. (2001) dividem as análises de previsão de áreas suscetíveis a deslizamentos em quatro tipos diferentes, sendo estas:

- Análise a partir da distribuição dos deslizamentos em campo: baseia-se na ideia de que cicatrizes dos deslizamentos recentes podem gerar futuros pontos de instabilidade;
- Análises por meio de mapeamentos geomorfológicos e/ou geotécnicos: combinam vários mapas, atribuindo de certa forma notas e pesos para cada fator que indique a instabilidade. Peca pela subjetividade, já que as notas e pesos estão sujeitas a análise do profissional.
- Modelos estatísticos: assumem que fatores que já geraram instabilidades serão os mesmos a gerá-las em ocasiões futuras. Este modelo elimina a subjetividade do modelo citado acima.
- Modelos determinísticos: possuem embasamento físico, que descrevem alguns processos e controlam a estabilidade das encostas.

Neste contexto, Ramos et al. (2002) mencionam a importância do uso de modelos computacionais na identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos e reforça que vários estudos já foram e vêm sendo realizados com o intuito de elaborar modelos cada vez mais representativos e eficazes.

Sendo assim, o mapeamento de áreas de risco à ocorrência movimentos de massa mostra-se de suma importância, e não obstante muitas metodologias vêm sendo desenvolvidas também no âmbito de compreender e investigar a ocorrência desses movimentos, tendo como objetivo principal minimizar os impactos que esses fenômenos causam à sociedade. Neste contexto, são elucidados neste estudo o mapeamento geotécnico e o emprego de modelos computacionais de previsão. Nota-se que ambos empregam um Sistema de Informações Geográficas (SIG) em suas análises, sendo importante mencioná-lo também na revisão bibliográfica.

### **3.2.1 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)**

Atualmente o Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é a ferramenta mais utilizada para a realização de mapeamento geotécnico e mapeamento dos movimentos de massa e mesmo sendo uma tecnologia relativamente nova, já é mundialmente difundida (OLIVEIRA, 2014). O SIG possui vários atributos de uso extremamente pertinente nos mapeamentos, ele permite armazenagem, recuperação e visualização de dados espaciais além de ser capaz de realizar análise e modelagem espacial (GUESSER, 2013).

Segundo Higashi (2002) a implantação de um SIG exige o agrupamento de conhecimentos adquiridos das mais diversas áreas, desde a ciência da computação às disciplinas relacionado aos mais diversos assuntos específicos.

A nomenclatura SIG provém da tradução do termo na língua inglesa *GIS* (*Geographic Information System*) (MAFRA JÚNIOR, 2007). Ainda de acordo com este mesmo autor, um dos principais objetivos dos SIG é possibilitar a interligação entre as feições gráficas e os dados, oferecendo uma iteratividade rápida e inteligente entre eles (MAFRA JÚNIOR, 2007).

De acordo com Silva (1999), SIG é uma tecnologia dotada das ferramentas necessárias para executar análises de dados espaciais, portanto, fornece as opções para compreensão da ocupação e utilização do meio físico. CAMARA et al. (1996 *apud* Rodrigues, 2008) apontam as suas principais funções, sendo estas:

- ➔ Reunir e interligar numa única base de dados, informações espaciais de dados cartográficos, censitários e de cadastramentos, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno.
- ➔ Cruzar dados por meio de algoritmos de manipulação para elaborar mapeamentos derivados.
- ➔ Consultar, recuperar, visualizar e permitir saídas gráficas para o conteúdo da base de dados geocodificados.

Higashi (2006) afirma que para uma melhor compreensão da utilização de um SIG é necessário o conhecimento de alguns conceitos básicos, que serão listados a seguir.

### 3.2.1.1 Mapas Temáticos

Estes mapas ilustram determinada região geográfica dividida em polígonos, que seguem os valores relativos a um determinado tema. Os dados obtidos são usualmente inseridos no sistema por digitalização ou de forma automatizada, com base em uma classificação de imagens. Estes mapas representam normalmente o resultado das análises.

### 3.2.1.2 Topologia

Para Burrough (1994 *apud* Higashi, 2006), topologia representa a forma pelo qual elementos gráficos distintos são relacionados entre si. O autor ainda afirma que qualquer informação geográfica pode ser resumida em três conceitos básicos da topologia: linha, ponto e área. Mafra Júnior (2007) indica que a topologia nada mais é do que a relação espacial entre feições unidas ou adjacentes. Este autor menciona ainda que no SIG a topologia é de suma importância, devido ao fato de que diversas operações não necessitam de coordenadas mas apenas de dados topológicos.

### 3.2.1.3 Atributos

Segundo Burrough (1994 *apud* Higashi 2006), em um SIG os atributos são constituídos de dados não gráficos associados a elementos representados pontos, linhas e áreas.

Bastos (2005) define atributo como a “característica da entidade, normalmente, não-espacial, a que se podem associar valores qualitativos e quantitativos”.

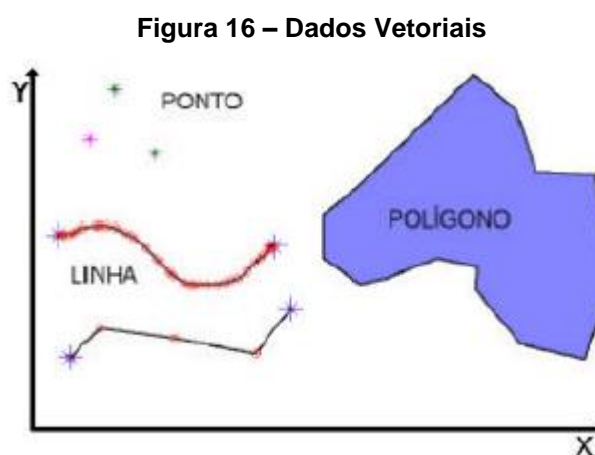
Higashi (2006) utiliza em seus estudos os atributos das unidades geotécnicas para descrever o comportamento dos solos em tabelas de resultados de ensaios geotécnicos.

### 3.2.1.4 Dados Vetoriais

Os formatos vetoriais são aqueles nos quais há coordenadas em suas extremidades, sendo dotados de alta precisão e utilizados não somente nos

ambientes SIGs, mas em qualquer software do tipo *CAD* (*Computer Aided Design*). São empregados ostensivamente por engenheiros e projetistas devido às características que apresentam (IMAI; ROSNIECEK, 2013).

De acordo com Lacruz e Souza Filho (2009), os dados vetoriais são formados por pontos, inseridos em um plano cartesiano. Estes pontos compõem linhas e ou polígonos que ilustram a extensão gráfica do objeto (Figura 16). Nesta abordagem qualquer objeto espacial pode ser representado.



Fonte: Imai; Rosniecek (2013).

Segundo Paredes (1994), a representação vetorial de um elemento é a tentativa de reproduzi-lo o mais fielmente possível. De acordo com Mafrá Júnior (2007), pode-se dizer que o dado vetorial representa graficamente o mundo real por meio de coordenadas. O autor ainda afirma que a unidade fundamental do dado vetorial é o par de coordenadas X e Y.

De acordo com Higashi (2006), estruturas vetoriais são utilizadas para representar as coordenadas das fronteiras de cada entidade geográfica por meio de três formas básicas: pontos, linhas e áreas (ou polígonos).

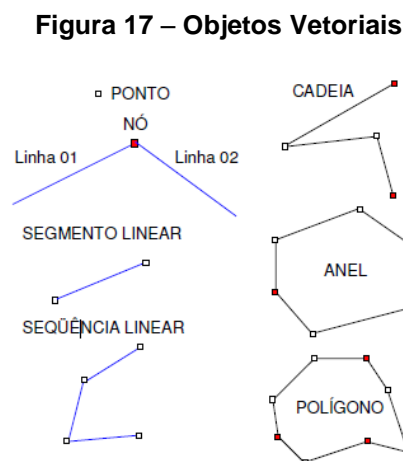
- ➔ *Pontos*: representam um par ordenado  $(x, y)$  de coordenadas espaciais, podendo ser utilizado para identificar as localizações ou as ocorrências no espaço (HIGASHI, 2006). Imai e Rosniecek (2013) acrescentam que o ponto também pode reunir outras informações além de coordenadas para diferenciá-lo de outros elementos, essas informações são chamadas de atributos.
- ➔ *Linhas*: Segundo Imai e Rosniecek (2013), as linhas são um conjunto de pontos conectados e assim como os pontos possuem coordenadas e outros atributos

que a diferenciam. Miranda (2010) menciona que a linha não possui largura verdadeira, a menos que esta seja definida em termos de atributos em anexo. Higashi (2006) afirma que as linhas são utilizadas para armazenar feições unidimensionais e que de uma forma geral estão associadas a uma topologia arco-nó.

- ➔ Área ou Polígono: os polígonos são uma representação homogênea utilizada para elementos geográficos com estrutura fechada (MIRANDA, 2010). Segundo Imai e Rosniecek (2013), polígono é a região do plano limitada por uma ou mais linhas interligadas de tal modo que o último ponto de uma linha contenha as mesmas coordenadas do seu primeiro ponto. Neste caso pode-se atribuir informações para toda a área.

### 3.2.1.5 Objetos Vetoriais

Segundo Higashi (2006), os objetos vetoriais são compostos por pontos, nós, linhas, cadeias, anéis e polígonos (Figura 17), conforme descrito a seguir.



Fonte: Higashi (2006).

- ➔ Ponto (*Point*): objeto adimensional especificando localização geográfica por um conjunto de coordenadas.
- ➔ Nó (*Node*): objeto adimensional que serve como junção topológica a uma linha ou como ponto extremo (inicial ou final).

- Segmento linear (*Line segment*): linha reta entre dois pontos.
- Sequência Linear (*String*): sequência de segmentos lineares sem nós.
- Cadeia (*Chain*): sequência de segmentos lineares com nó inicial e nó final.
- Anel (*Ring*): sequência de cadeias ou sequências lineares que formam uma poligonal fechada.
- Polígono (*Polygon*): anel e sua área interna.

### 3.2.1.6 Dados Matriciais (ou Rasters)

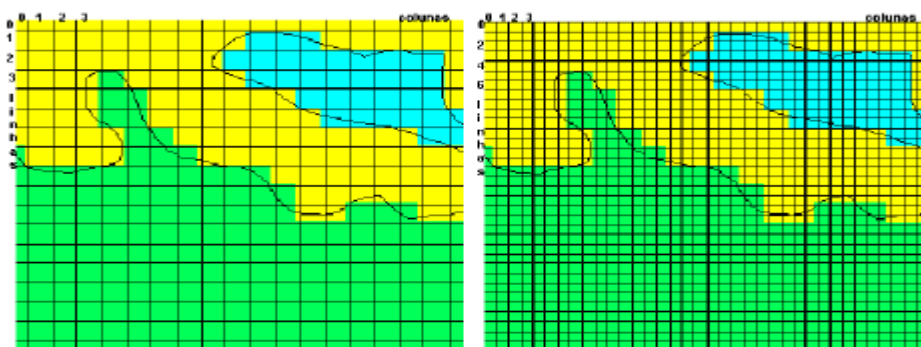
De acordo com Rosolem (2014), os dados representados no formato matricial consistem no uso de uma rede quadriculada, sendo sua dimensão em função do número de linhas e colunas. Assim, nesta representação uma matriz ilustra o espaço onde cada pixel ou célula possui um número determinado de linhas e colunas, além de um valor que corresponde ao atributo em estudo. Imai e Rosniecck (2013) afirmam que neste tipo de formato o espaço pode ser tratado com uma superfície plana, onde cada célula corresponde a uma parte do terreno.

Lacruz e Souza Filho (2009) definem dados *raster* como um conjunto de células que constituem uma matriz de duas dimensões contíguas, cujo atributo geográfico é definido pela localização da matriz. Os autores ainda acrescentam que as células podem estar em formatos diferentes, sendo triangulares, hexagonais e retangulares.

Segundo Mafra Júnior (2007), os dados *raster* tratam de imagem ou figuras digitais, que contém uma estruturação matricial intrínseca e que apresentam como representação a sua imagem.

Na figura 18 pode-se observar um terreno ilustrado por células com tamanhos diferentes.

**Figura 18 – Diferentes representações gráficas para um mesmo mapa**



Fonte: Camara et al. (2001 *apud* OLIVEIRA, 2014).

Oliveira (2014) explica que na Figura 18 o mapa da direita possui células quatro vezes menores em relação as células do mapa da esquerda, o que lhe proporciona uma resolução quatro vezes maior e por consequência uma precisão que lhe permite ser utilizado para análises mais detalhadas. Porém, quanto maior a resolução maior o espaço para armazenamento do mapa, que, neste caso, deverá ser quatro vezes maior para o mapa da direita.

### **3.2.2 Mapeamento Geotécnico**

Segundo Oliveira (2014) é necessário o conhecimento das características do solo e dos impactos das ações antrópicas nas modificações do ambiente e só assim então determinar as áreas cuja a ocupação ou utilização para determinado fim possa ser feita de modo seguro, tomando o cuidado de executar ações que minimizem os impactos ambientais e as alterações no terreno.

Tendo em vista isso, observa-se que o mapeamento geotécnico mostra-se uma ferramenta extremamente útil e eficaz para fazer o gerenciamento da utilização do solo em grandes áreas.

Para a UNESCO (1976 *apud* GUESSER, 2013), o mapeamento geotécnico caracteriza-se como uma espécie de mapa geológico em que se representa todos componentes significativos para o planejamento do uso do solo e para projetos, construções e manutenções quando aplicados à Engenharia Civil. Matula (1976 *apud* Rodrigues, 2008) define que o mapa geotécnico constitui um modelo ilustrativo do ambiente geológico, que atende às necessidades de engenharia a que se propõe o trabalho.

Segundo Oliveira (2014), é necessário o conhecimento das características dos solos, os impactos das ações antrópicas nas modificações do ambiente para então determinar as áreas cuja a ocupação ou utilização para determinado fim possa ser feita de modo seguro, tomando-se o cuidado de executar ações que minimizem os impactos ambientais.

Higashi (2006) define o mapeamento geotécnico como uma metodologia utilizada para prever o comportamento de polígonos de solos chamados de unidades geotécnicas. Além disso, menciona que esta metodologia consiste em representar as principais características do geomecânicas do solo sob a forma de um mapa.



Zuequette e Gandolfi (1990) relacionaram os elementos a serem considerados na elaboração de mapas geotécnicos (Quadro 6).

**Quadro 6 – Elementos a serem considerados na elaboração de mapas geotécnicos**

Características das rochas e dos materiais inconsolidados	Englobam a distribuição dos materiais rochosos e de cobertura, gênese, estrutura, homogeneidade e propriedades físicas e mecânicas.
Condições geodinâmicas internas	Incluem características associadas aos fenômenos sísmicos e vulcânicos.
Condições geodinâmicas externas	Relacionadas aos processos erosivos, e de sedimentação, dinâmica das encostas, os escorregamentos e os desmoronamentos.
Condições hidrogeológicas	Nível piezométrico, direção dos fluxos, pH, teor de sais, corrosividade e resíduos de materiais poluidores.
Condições geomorfológicas	São muito importantes para o planejamento urbano, contribuindo na distribuição dos equipamentos urbanos e na avaliação das áreas para fins de construção civil.
Modificações artificiais do meio físico e materiais de construção	Identificam as ocorrências de materiais utilizados na construção civil e áreas de materiais de empréstimo e respectivas propriedades e um levantamento dos impactos ambientais por ações antrópicas.

Fonte: Adaptado de Zuquette; Gandolfi, 1990.

Zuquette e Gandolfi (1990) ainda apresentam os possíveis fatores que influenciam na qualidade dos mapas geotécnicos, os quais encontram-se elencados no quadro 7.

**Quadro 7 – Fatores que influenciam na qualidade dos mapas geotécnicos**

Grau de complexidade das condições geotécnicas	Refere-se à diversidade de características da área, como estruturas geomorfológica e geológica, além dos diversos tipos de material encontrado, etc.
Escala do mapa:	A escala adotada que limita a investigação para a região.
Número de pontos documentados	É dependente da finalidade do projeto, da precisão desejada e também da escala adotada.
Tipo de carta geotécnica	Depende da finalidade do projeto.
Tamanho e forma da área	Relacionada com tempo, custo, quantidade de profissionais envolvidos e número de ensaios.

Fonte: Adaptado de Zuquette e Gandolfi, 1990.

### 3.2.2.1 Histórico

Segundo Caballero (1973 *apud* Mafra Júnior, 2007), as primeiras cartas geotécnicas foram elaboradas em 1902, na cidade de Nova York, nos Estados Unidos, as quais foram elaboradas para a caracterização geotécnica da cidade e contavam com cerca de 1400 furos de sondagem.

Na Alemanha, em 1913, foram elaborados os primeiros mapas geotécnicos, presentes no plano de construção das cidades, sendo apresentados em Leipzig, na Exposição Técnica da Construção. Nas décadas de 1920 e 1930, na Rússia, surgiram os primeiros mapas geotécnicos regionais (IMAI; ROSNIECEK, 2013).

De acordo com Bastos (2005), o grande solavanco para os estudos geotécnicos se deu logo após a segunda guerra mundial, tendo como objetivo o auxílio na reconstrução das cidades destruídas.

No Brasil, a história do mapeamento geotécnico remete-se a 1907, com o primeiro documento de geologia aplicada as obras de engenharia. Trata-se de um mapa geológico que se referia ao prolongamento da estrada de ferro Nordeste do Brasil (HIGASHI, 2002).

Por meio destes estudos pioneiros realizados ao longo do século passado, vários pesquisadores desenvolveram inúmeras metodologias para tentar mapear, prever e compreender o comportamento dos solos (Quadro 8).

Quadro 8 – Principais metodologias do mapeamento geotécnico

METODOLOGIA	ESCALA	FINALIDADE	UTILIZAÇÃO
IAEG (Internacional)	<1:100.000 >1:10.000	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Francesa	Regional Local <1:100.000 >1:2.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
PUCE (Austrália)	Qualquer <1:2.500.000 >1:2.500	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Britânica (inglesa)	>1:10.000 <1:2.500	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Russa	<1:100.000.000 >1:500.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Hinojosa e Leon	<1:1.000.000 >1:500.000	Específica	Planejamento e projeto de estradas
ZERMOS	>1:50.000	Específica	Movimentos de massa (planejamento)
Espanhola	:1:200.000 <1:2.000	Específica Regional	Planejamento regional e territorial
USA (Kiefer)	Regional e local	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Canadá	Regional e local	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional

Fonte: Quadro adaptado de Kopezinski (2000 *apud* HIGASHI, 2006).

### 3.2.2.2 Metodologias de Mapeamento Geotécnico Nacionais

Apesar de existirem metodologias de mapeamento geotécnico elaboradas em diversos países, neste estudo serão elucidadas, conforme segue, somente aquelas desenvolvidas no Brasil.

a) *Método do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas)*

Este método foi desenvolvido na década de 1980, tem como base trabalhos elaborados nas encostas dos morros de São Vicente e Santos, no litoral de São Paulo, a partir de situações específicas de problemas do meio físico (MAFRA JÚNIOR, 2007).

Segundo Prandini et al. (1995), as cartas geotécnicas expressam o conhecimento aplicado ao enfrentamento dos problemas impostos pelo uso e ocupação do solo, dando a possibilidade de:

- Observar a interação entre o meio físico e a ocupação, além de prever divergências entre as formas de utilização do solo;
- Encontrar modos de prevenir-se quanto a danos materiais e riscos nos empreendimentos de uso do solo.

Os autores supracitado ainda propuseram a divisão das cartas nas seguintes categorias:

- *Cartas geotécnicas*: estabelecem os parâmetros para a ocupação do solo diante da forma com que é utilizado, além de expor os limites e as potencialidades do terreno.
- *Cartas de risco (geológicos)*: analisam os possíveis danos à ocupação, quando esta é submetida a fenômenos naturais devido ao uso do solo.
- *Cartas de atributos*: limitam-se à distribuição espacial de uma ou mais características do terreno.
- *Cartas de suscetibilidade*: determinam o grau de risco quanto ao desencadeamento de fenômenos naturais ou outras características, devido a utilização do solo.

Por sua vez Mafra Júnior (2007) aponta que esta metodologia classifica as cartas em 2 (dois) grupos: cartas geotécnicas propriamente ditas e cartas de risco. A primeira demonstrando as limitações e potencialidades dos terrenos, além de apontar os parâmetros para a ocupação, e a segunda com foco na análise do risco geotécnico do terreno.

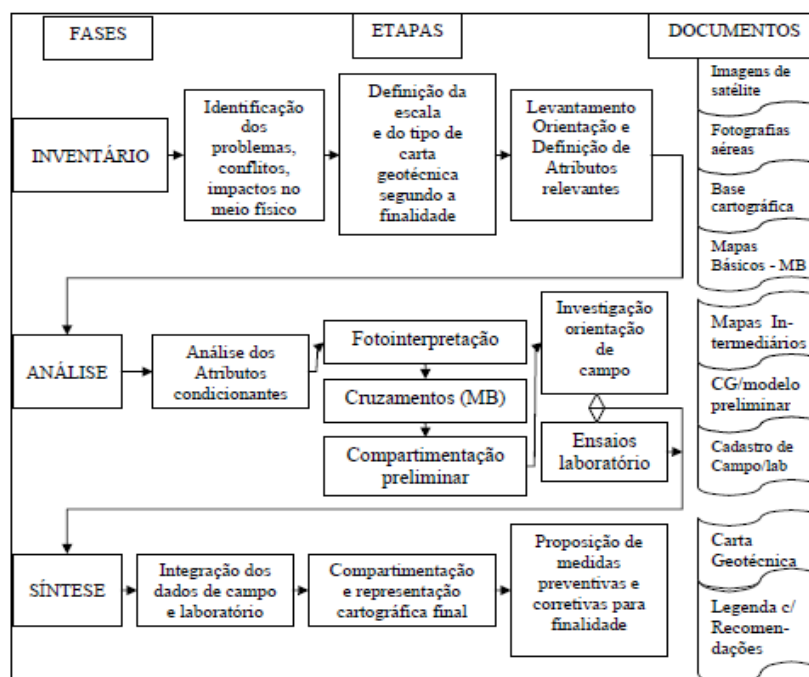
Rodrigues (2008) aponta alguns itens a serem observados na metodologia do IPT, sendo estas:

- ➔ Necessidade de pré-estabelecimento de um modelo que ilustre o conjunto de recursos e problemas.
- ➔ Conhecer motivos e condicionantes, das características e dos fenômenos.
- ➔ Investigação dirigida por meio das evidências acessíveis.
- ➔ Utilização ostensiva de toda gama de dados disponíveis para o trabalho.

Observa-se que a metodologia em questão gera cartas geotécnicas, em SIG, que podem ser modificadas e atualizadas a cada novo estudo, servindo de base para apontar áreas que estão submetidas a riscos de escorregamentos, erosões, etc., sendo utilizadas pelo poder público para prever possíveis desastres gerados pela má ocupação do solo (OLIVEIRA, 2014).

A figura 20 ilustra o funcionamento geral desta metodologia:

**Figura 19 - Fluxograma da metodologia de cartografia geotécnica aplicada no IPT**



Fonte: Rodrigues, (2008).

#### b) Metodologia EESC/USP

De acordo com Rodrigues (2008), Zuquette (1987) determina as principais diretrizes dos trabalhos realizados na EESC/USP (Escola de Engenharia de São

Carlos – Universidade de São Paulo), apresentando uma proposta metodológica de cartografia geotécnica para as condições brasileiras.

Esta metodologia é baseada no princípio da realização de uma análise do meio físico, como base nas diversas formas de ocupação do solo (MAFRA JÚNIOR, 2007). Segundo Higashi (2006), esta metodologia busca a determinação de unidades de solo cada vez menores nas áreas de estudo que apresentem homogeneidade quanto as funções das características do relevo. A determinação das unidades se dá por meio de geoprocessamento, aerofotogrametria e de trabalhos de campo.

Depois de determinadas essas unidades homogêneas elas são associadas aos materiais inconsolidados e à litologia existente. Esta associação é geralmente feita por meio de um SIG, que gera um mapa de *landforms* e outro com as informações das características geotécnicas da área. Por meio da integração destes mapas é viabilizada a interpretação do comportamento geotécnico para fins de planejamento urbano (HIGASHI, 2006).

Segundo Zuquette (1987), a sistemática EESC/USP tem como base a definição de quatro classes de documentos cartográficos de representação dos atributos obtidos e/ou avaliados, sendo estes:

- ➔ Mapas básicos fundamentais (topográfico, geológico e das águas).;
- ➔ Mapas opcionais (pedológico, geofísico, geomorfológico, climático e de ocupação atual ou prevista);
- ➔ Mapas auxiliares (eventuais);
- ➔ Cartas derivadas ou interpretativas: erodibilidade, escavabilidade, de disposição de resíduos, fundação, estabilidade de taludes, vulnerabilidade das águas subterrâneas, etc.

Analisando esta metodologia nota-se que sua finalidade da mesma não visa a solução de problemas já existentes, mas sim busca encontrar características e condições que possam prever o surgimento desses problemas, preenchendo informações desconhecidas sobre os meios físicos desconhecidos. Busca ainda obter uma visão geral da área de estudo, porém pode ser direcionada para um vetor específico a ser analisado (ABREU, 2007).

c) *Metodologia UNESP/Rio Claro*

Esta metodologia foi desenvolvida com base nos trabalhos elaborados por Cerri (1990) e Zaine (2000), e baseia-se no aumento da escala em razão de critérios relacionados a necessidade de uso (RODRIGUES, 2008).

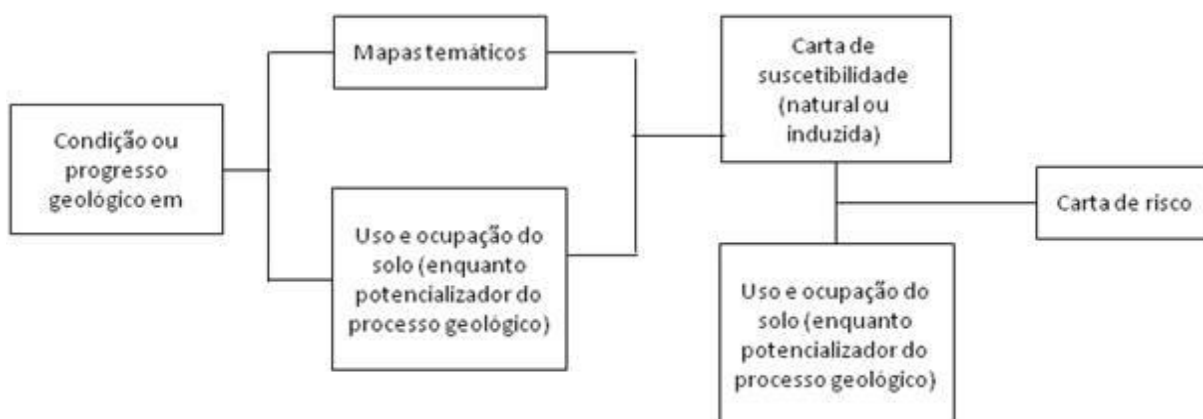
Pode-se comparar esta metodologia com a metodologia PUCE quanto ao grau de detalhamento, mas esta difere-se no que diz respeito a escala. Pode-se perceber a influência da metodologia do IPT, principalmente, no que tange às cartas de risco (RODRIGUES, 2008).

Abreu (2007), aponta que uma das principais características deste método é o detalhamento progressivo, ou seja, avaliações genéricas apontam os locais que realmente necessitam de avaliações mais detalhadas, economizando tempo e esforço. O método consiste em iniciar por uma avaliação regional (com escalas maiores, 1:50.000 ou 1:25.000), avançando para o nível local (1:25.000 ou 1:10.000) e, por fim, para o nível de detalhe (1:5.000 ou maior), de acordo com as necessidades.

Os mapas deste método são classificados com base nas necessidades, aplicações, natureza dos terrenos e nos obstáculos encontrados pela forma de ocupação indicada para o local de estudo. Dividindo, assim, as cartas em quatro classes: geotécnicas dirigidas, geotécnicas convencionais, de suscetibilidade e de riscos (BITTAR et al., 1992).

A Figura 20 apresenta um roteiro de como elaborar cartas de risco na metodologia UNESP/Rio Claro.

**Figura 20 - Roteiro Metodológico para elaboração de cartas de risco.**



Fonte: Bittar et al. (1992).

d) *Metodologia Davison Dias (Metodologia UFRGS)*

Foi desenvolvida principalmente com base nas pesquisas elaboradas nas décadas de 1980 e 1990 pela professora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Regina Davison Dias (GUESSER, 2013).

Um dos objetivos da elaboração desta metodologia foi buscar um método que representasse de maneira mais eficaz a grande variedade de solos encontrados no Brasil, que na grande maioria são solos tropicais e subtropicais (OLIVEIRA, 2014). O referido autor ainda menciona que as metodologias mais tradicionais e utilizadas no mundo são, em sua grande maioria, elaboradas por países do hemisfério Norte, onde os solos tropicais e subtropicais são escassos, não sendo então bem caracterizados.

Segundo Higashi (2006), esta metodologia demonstra ser uma forma abrangente para que se formulem estimativas de unidades geotécnicas com o objetivo de prever o comportamento do solo relacionando-o com a sua gênese. Davison Dias (1995) aponta que a necessidade da determinação de unidades geotécnicas para análise dos solos no território brasileiro surge de sua grande variabilidade dos mesmos.

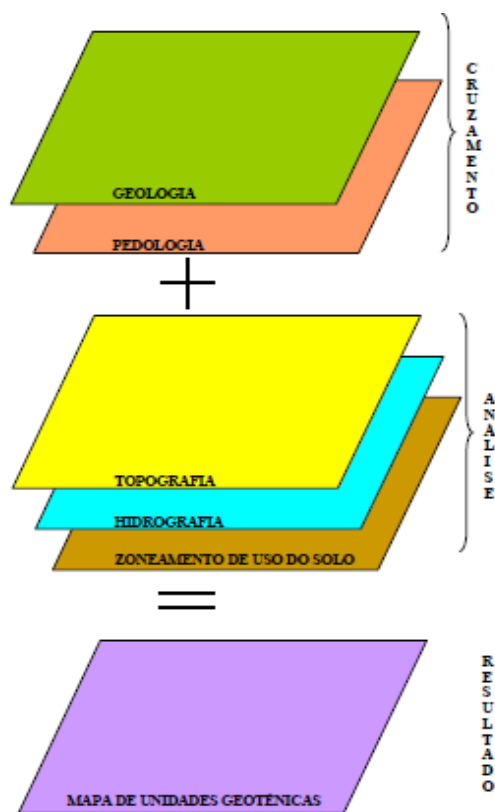
A metodologia Davison Dias (1995) é utilizada para a estimativa de unidades geotécnicas, Esta feita com base em levantamentos geológicos e pedológicos existentes. Os estudos de campos são feitos com intuito de demonstrar a veracidade das estimativas realizadas previamente e se dão por meio da retirada de *amostras in loco* para posterior determinação das propriedades físico-químicas e de outras características do solo (FONTES, 2001).

Mafra Junior (2007) explica que tal metodologia além de ser baseada na pedologia e na geologia, leva outros fatores em consideração, sendo os principais, geomorfologia, hidrografia, zoneamento de uso dos solos, dentre outros. Estes dados, somados as saídas de campo e a obtenção de dados por intermédio de ensaios geotécnicos, formam a base para elaboração de um trabalho de mapeamento geotécnico. Assim como Fontes (2001) e Mafra Junior (2007) explicam que os trabalhos de campo surgem como ferramenta para a verificação das unidades e confirmação nos mapas. A metodologia indica o cruzamento dos mapas pedológico e geológico para a determinação preliminar das unidades geotécnicas, somadas a



uma análise conjunta de outros fatores do meio físico (MAFRA JUNIOR, 2007). A figura 21 ilustra a metodologia.

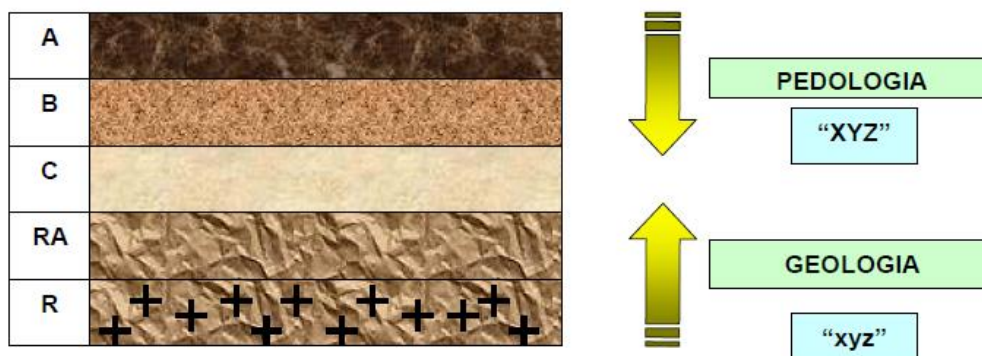
**Figura 21 – Princípios básicos da metodologia Davison Dias**



Fonte: Mafra Junior (2007).

As unidades geotécnicas têm a nomenclatura elaborada da seguinte forma: “ABCxyz”, onde as letras maiúsculas classificam os horizontes B e C (pedológico) e as minúsculas a geologia (DIAS, 1995). Fontes (2001), ainda explica que os horizontes B e C são classificados pela pedologia e os horizontes rocha alterada (RA) e rocha sã R, são caracterizados pela geologia. Na figura 22 observa-se a origem do nome de uma unidade geotécnica (O horizonte A geralmente não é estudado para deslizamentos).

Figura 22 – Simbologia de unidades getécnicas



Fonte: Davison Dias et al. (1987 *apud* HIGASHI, 2002).

Higashi (2002) aponta como critério principal de classificação no mapeamento do solo a diferenciação vertical entre os horizontes de solo que definem o perfil do mesmo. O autor ainda complementa alertando quanto ao fato da variação dos solos de local para local, que um mesmo tipo de solo pode apresentar comportamento diferente quando submetido a outras condicionantes o que explicita o fato de que os resultados obtidos podem ser utilizados apenas como parâmetros estimativos e jamais como valores de projeto.

Imai & Rosniecek (2013) mencionam que a metodologia desenvolvida por Davison Dias na UFRGS foi utilizada em diversos trabalhos posteriores, sendo esta apta para se estabelecer como base para os trabalhos, confirmando a sua aplicabilidade e eficácia.

#### e) Metodologia Higashi

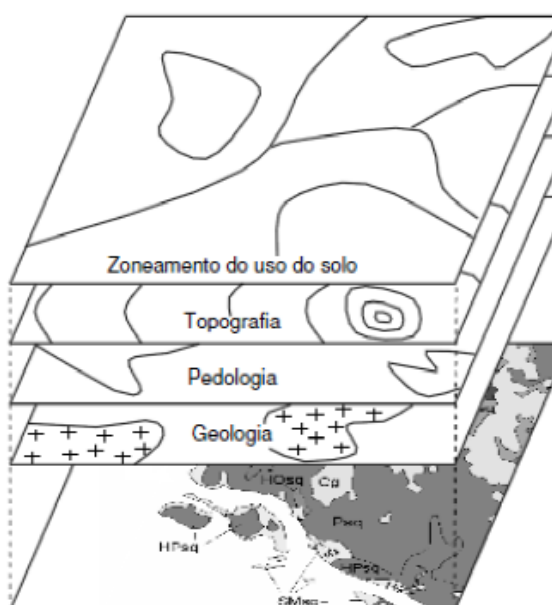
Higashi (2006) desenvolveu a sua metodologia de mapeamento levando em consideração um fator desconsiderado nas metodologias consagradas, ou seja, a ocupação a curto prazo das áreas nos centros urbanos (OLIVEIRA, 2014).

Essa metodologia é voltada para as cidades costeiras, onde predomina o relevo plano, e há normalmente a incidência de solos sedimentares com grandes profundidades, compostos de argilas moles e areias quartzosas. Nos locais onde ocorrem os relevos ondulados, há a predominância de solos residuais pouco evoluídos, provindos de solos sedimentares ou de rochas diversas (IMAI; ROSNIECEK, 2013).

Imai e Rosniecek (2013) explicam que esta metodologia tem como base o planejamento para o avanço das áreas urbanas utilizando-se de dados levantados por meio do mapeamento geotécnico (ensaios de campo e laboratoriais) e dos vetores de expansão urbana.

Segundo Oliveira (2014), esta metodologia inicia com uma análise preliminar da geotecnia do local estudado, seguida da elaboração de um mapa preliminar de estimativas de unidades geotécnicas baseando-se nas curvas de nível da área de estudo e também nos mapas de geologia e pedologia do local. A figura 23 esquematiza a elaboração do mapa geotécnico na metodologia de Higashi (2006), onde são utilizados os mapas citados na metodologia Davison Dias.

**Figura 23 – Cruzamento de mapas pela metodologia Davison Dias e Higashi**



Fonte: Higashi (2002).

Por meio do mapa preliminar realizam-se ensaios específicos em cada uma das unidades geotécnicas com intuito de identificar o comportamento geomecânico dos polígonos gerados. Em seguida, realiza-se uma análise temporal do avanço da mancha urbana com dos vetores de crescimento urbano, os quais apontam a tendência de ocupação e uso do solo por estruturas civis (OLIVEIRA, 2014).

A metodologia segue com a individualização dos universos geotécnicos, onde deve-se diferenciar o tipo do solo (sedimentar ou residual) em toda a área, seguindo

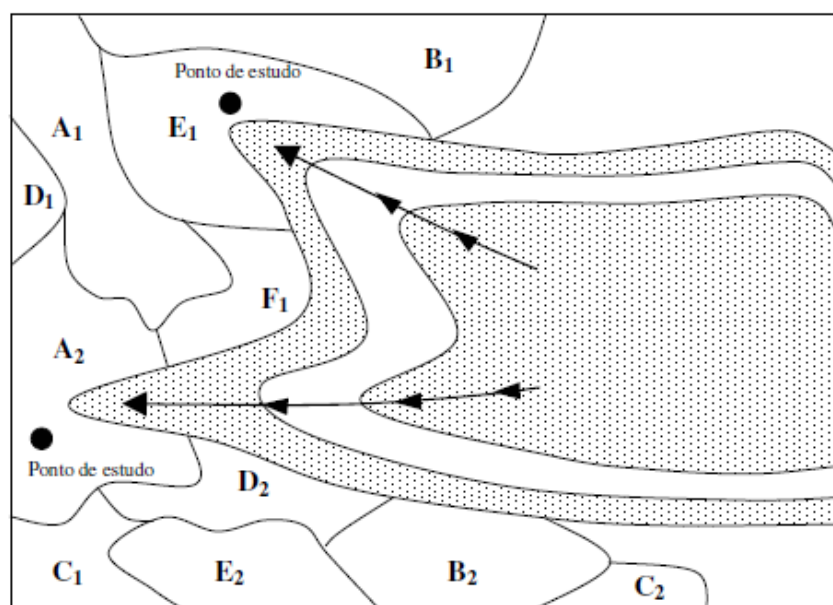
as etapas a seguir neste ponto, deve-se diferenciar o tipo de solo para todas as áreas em três etapas (HIGASHI, 2002):

- Elaboração do modelo digital do terreno (MDT) e o mapa de declividade;
- Construção de um banco de dados de sondagens *SPT*.
- Trabalhos de campo, com sondagens a trado e uso de *GPS*.

Em posse do MDT e do mapa de declividade, pode-se verificar uma diferenciação entre os solos residuais e sedimentares da região costeira. Então, inicia-se o processo de identificação em campo dos universos individualizados nos SIG.

A escolha dos pontos de coleta deve considerar os vetores de crescimento urbano, pois são eles que delimitam as prováveis áreas de ocupação. Deve-se ter o cuidado com as amostras, de modo a mantê-las indeformadas, além de evitar a coleta de material do horizonte A, pois representa uma camada geralmente não utilizada em obras de engenharia (IMAI; ROSNIECEK, 2013). A figura 24 ilustra a identificação de pontos de coleta por meio dos vetores de expansão urbana.

**Figura 24 – Exemplo de definição de ponto de coleta**



Fonte: Higashi (2006).

Na sequência dá-se início aos ensaios de solo, que buscam a determinação das diretrizes do comportamento geomecânico dos solos. Com os resultados obtidos, elabora-se um banco de dados espacial, sem redundância de dados e que proporcione acesso rápido e ainda a possibilidade de atualização das informações por

diversos usuários, sendo que, este banco de dados deve ser realizado em ambiente SIG (OLIVEIRA, 2014).

Por fim, a elaboração da versão final do mapa geotécnico, que tem por base o mapa geotécnico de escala ampliada e os resultados dos ensaios de campo e laboratório obtidos durante o estudo (OLIVEIRA, 2014). Higashi (2002) ainda menciona a necessidade do mapa final ser apresentado de maneira simplificada e classificado por zonas de solo, visando facilitar a compreensão e interpretação dos seus usuários (normalmente órgãos públicos). Quanto as zonas de solos, devem ser constituídas de características que restrinjam ou permitam a sua ocupação.

### **3.2.3 Modelos de Previsão de Movimentos de Massa**

Citam-se dois modelos computacionais que estão sendo utilizados com frequência em análises de escorregamentos: SINMAP (*Stability Index Mapping*), desenvolvido por Pack, e SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*), desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994).

Ambos foram elaborados na década de 90 e integram um modelo hidrológico de estado de equilíbrio permanente a um de estabilidade de encosta baseado na teoria do talude infinito, buscando quantificar a estabilidade de uma localidade quanto aos escorregamentos do tipo translacionais. Contudo, estes modelos são classificados de forma diferente, enquanto que o SINMAP é um modelo probabilístico o SHALSTAB enquadra-se nos modelos determinísticos. Além disso, o SINMAP define o índice de estabilidade do terreno como sendo a probabilidade de uma região ser estável, levando em consideração as distribuições uniformes de parâmetros sobre intervalos de incerteza. Por sua vez, o SHALSTAB quantifica a instabilidade do terreno em termos de chuva crítica, ou seja, chuva necessária para desencadear a instabilidade induzida pela poro-pressão (MEISINA; SCARABELLI, 2007).

Meisina e Scarabelli (2007) mencionam ainda um estudo comparativo entre o SINMAP e o SHALSTAB, executado na Itália, o qual apontou que os modelos identificaram os mesmos locais como os mais suscetível a escorregamentos translacionais e que também apresentaram eficiência na distinção das áreas de alto e baixo risco a esse tipo de fenômeno. Porém, individualmente, enquanto que o SHALSTAB mostrou resultados coerentes com a situação de campo, o SINMAP

superestimou as áreas classificadas como instáveis. Michel (2013), também realizou um estudo comparativo entre os modelos referidos acima, o estudo foi realizado na bacia do Rio Cunha, SC, o autor obteve resultados semelhantes aos obtidos na Itália, observando que o *SHALSTAB* mostrou-se mais aptidão para determinar os pontos de escorregamentos da bacia.

Guimarães (2000) apontou em suas análises, realizadas em duas bacias hidrográficas no Rio de Janeiro, que o modelo *SHALSTAB* compõe uma metodologia promissora na definição de áreas suscetíveis a escorregamentos rasos. Tal argumento foi baseado na aferição das áreas apontadas pelo modelo como instáveis com aquelas onde ocorreram os movimentos de massa. Neste estudo, foi utilizado o *SHALSTAB* para a determinação de áreas sujeitas a escorregamentos translacionais, o qual foi implementado na linguagem AML (*ArclInfo Macro Language*) no ano de 1998, permitindo o seu uso em softwares do tipo ArclInfo (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

De acordo com Dietrich e Montgomery (1998), o modelo *SHALSTAB* calcula o grau de suscetibilidade a escorregamentos translacionais para cada pixel dentro de uma malha (grid), obtida a partir de um MDT, possibilitando uma análise individualizada. Observa-se que é a partir do MDT que são gerados os mapas de declividade e de área de contribuição, utilizados na elaboração do mapa de suscetibilidade.

Segundo Sbroglia (2015), os modelos que compõem o *SHALSTAB* (hidrológico e de estabilidade de encosta) combinam parâmetros topográficos, geotécnicos, geomorfológicos e hidrológicos na estimativa das áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais, sendo que, o hidrológico estima o grau de saturação do terreno e o de estabilidade simula a estabilidade de uma determinada porção de solo. Contudo, Ramos et al. (2002, *apud* GUESSER, 2014) salienta que esse modelo faz uso da topografia como principal fator para a ocorrência dos deslizamentos de encostas.

Reginatto (2013) aponta que o *SHALSTAB* utiliza um SIG como instrumento de elaboração de mapas tornando possível a espacialização dos dados, porém a definição dos locais instáveis é tarefa do modelo matemático

Observa-se que após a automatização do *SHALSTAB* diversos estudos foram desenvolvidos a fim de provar a eficácia do modelo, obtendo-se resultados

satisfatórios. Em Minas Gerais, por exemplo, foi realizado um estudo no qual apontou como satisfatório a utilização do modelo SHALSTAB mesmo com dados em escala 1:50.000, considerada pequena para fins de mapeamentos de suscetibilidade (RAMOS et al., 2002). Gomes (2004) aponta o uso da escala de 1:10.000 como indispensável para verificar a real eficácia do modelo em áreas críticas, e considera como mapeamento preliminar aqueles elaborados com a escala 1:50.000.

Gomes (2004), após verificar a correspondência entre os escorregamentos ocorridos (mapeados a partir de fotos aéreas) e as áreas de instabilidade apontadas pelo modelo SHALSTAB, menciona que a verificação apresenta resultados eficientes. A margem de acerto do modelo, desconsiderando a coesão do solo, atingiu cerca de 97%, ou seja, 97% dos escorregamentos mapeados ocorreram dentro das áreas de instabilidade geradas pelo modelo, e quando inclusa a coesão os resultados se mostraram ainda melhores chegando a uma previsão eficaz de 99% dos escorregamentos.

Para Ramos et al. (2007) a confiabilidade do SHALSTAB depende essencialmente da resolução em que o MDT foi elaborado. Reginatto (2013), enfatiza os parâmetros dos solos como variáveis importantes na modelagem, determinando-os em campo e em laboratório.

Ramos et al. (2007) reafirmam a diferença dos resultados obtidos com o SHALSTAB considerando a variação espacial dos parâmetros dos solos. Guimarães et al. (2013), verificaram uma porcentagem menor de áreas consideradas instáveis quando a variação espacial dos parâmetros dos solos foram levadas em consideração

Destaca-se que, de acordo com Fernandes et al. (2001), os estudos realizados neste âmbito acrescentam confiabilidade ao modelo e somam para a validação desta ferramenta.

### 3.2.3.1 *Modelo de Instabilidade de Encosta Infinita*

Um dos modelos que compõe o *SHALSTAB* é o modelo de estabilidade de encosta infinita, baseado na teoria do talude infinito, que serve para determinação de fatores de segurança de uma encosta (REGINATTO, 2013). Segundo Rosolem (2014), neste modelo a estabilidade é dada pela análise das forças que atuam sobre

a massa de solo, considerando-se que o plano seja paralelo a superfície do relevo e que os efeitos de atrito lateral e bordas possam ser desprezados.

Neste modelo a resistência ao cisalhamento do solo é fornecida de acordo com o critério elaborado por Mohr-Coulomb, e pode ser expressa de acordo com a tensão efetiva pela expressão (1):

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \cdot \text{tg}(\varphi') \quad (1)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento do solo [kPa];

$c'$  = Coesão efetiva [kPa];

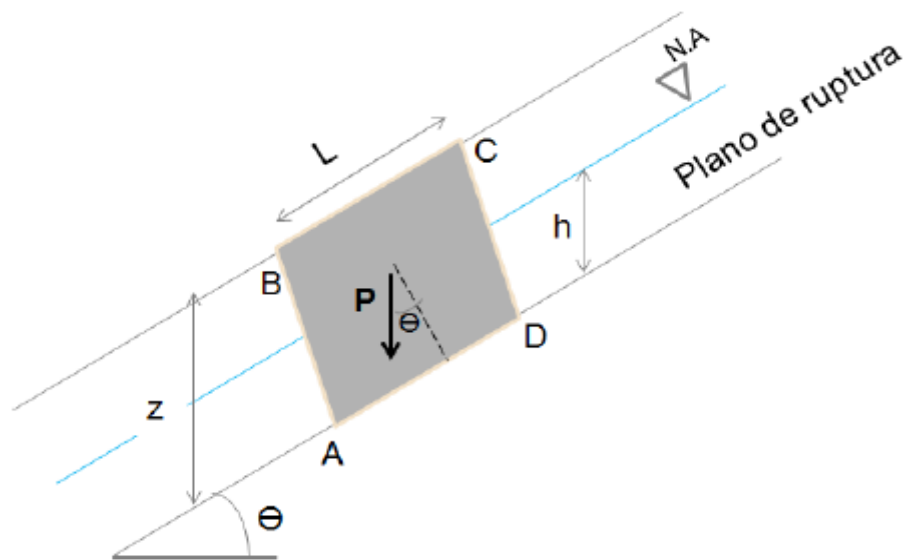
$\sigma$  = Tensão normal do solo no momento de ruptura [kPa];

$\mu$  = Poropressão;

$\varphi'$  = Ângulo de atrito efetivo entre grãos [graus];

As Figuras 40 e 41, ilustram algumas das forças atuantes sobre um talude e demonstram a origem das fórmulas apresentadas a seguir:

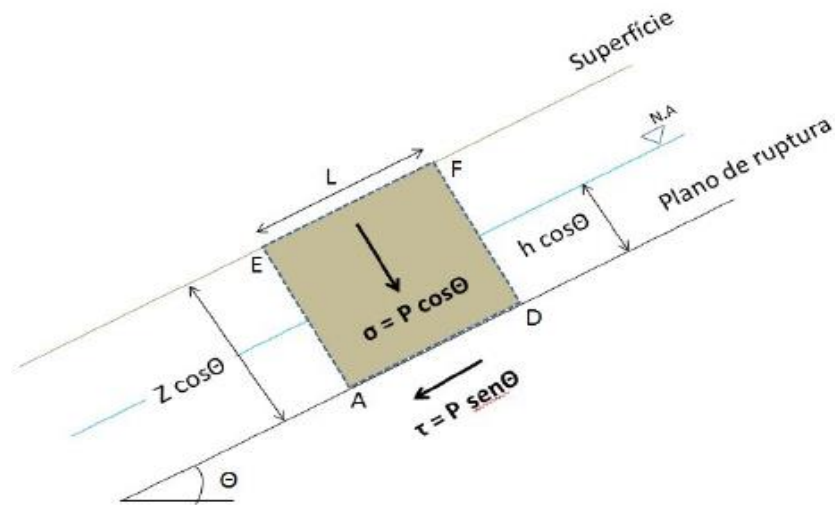
**Figura 25: Análise das forças atuantes em um talude infinito**



Fonte: Rosolem (2014).



Figura 26: Decomposição das forças atuantes no talude infinito



Fonte: Rosolem (2014).

Rosolem (2014) verifica por meio da Figura 40 que o peso do bloco ABCD não é perpendicular à superfície, logo faz-se necessário decompor as dimensões e as forças para que as mesmas apresentem-se perpendiculares a superfície sem alterar área do bloco, resultando no bloco AEFD na figura 41. A equação do peso do bloco de solo, onde “L” é o comprimento do bloco e “γ” a massa específica do solo e “g” a aceleração da gravidade, é dada pela equação (2):

$$P = \gamma \times g \times z \cos\theta \times L \quad (2)$$

A partir da equação (2) a tensão normal ( $\sigma$ ), a poropressão ( $\mu$ ) e a tensão de cisalhamento atuante ( $\tau$ ) são expressas respectivamente pela equação (3), (4) e (5):

$$\sigma = \gamma \times g \times z \cdot \cos^2\theta \quad (3)$$

$$\tau = \gamma \times g \times z \cdot \cos^2\theta \cdot \sin\theta \quad (4)$$

$$\mu = \gamma_w \times g \times h \cdot \cos^2\theta \quad (5)$$

Onde:

z = espessura do solo [m/

g = aceleração da gravidade [ $m \cdot s^{-2}$ ]

γ = massa específica do solo [ $kg \cdot m^{-3}$ ];

γ<sub>w</sub> = massa específica da água [ $kg \cdot m^{-3}$ ];

θ = ângulo de declividade [graus];

h = nível do lençol freático [m].

Substituindo as equações (3), (4) e (5) na equação (1) tem-se a equação (6):

$$\gamma \times g \times z \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta = c + (\gamma \cdot g \times z \cdot \cos^2\theta - \gamma_w \cdot g \times h \cdot \cos^2\theta) \tan\phi \quad (6)$$

Dividindo-se os dois lados da equação pela expressão “ $g \times \cos^2\theta \times \text{tg}\theta$ ” e fazendo a simplificação tem-se a equação (7):

$$\frac{\gamma \times g \times z \cdot \text{sen}\theta}{\cos\theta \times \text{tg}\theta} = \frac{c}{g \times \cos^2\theta \times \text{tg}\theta} + (\gamma \times z - \gamma_w \times h) \quad (7)$$

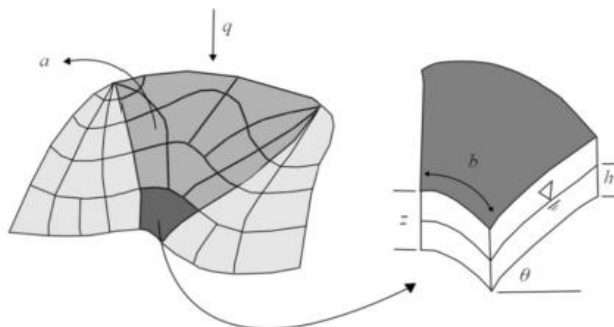
Aplicando a relação trigonométrica  $\frac{\text{sen}\theta}{\cos\theta} = \text{tg}\theta$  e realizando as operações algébricas necessárias chega-se na equação (8) que relaciona a espessura do solo saturado com a espessura total de solo.

$$\frac{h}{z} = \frac{h}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\phi}\right) + \frac{c}{\gamma_w \times z \times g \times \cos^2\theta \times \text{tg}\phi} \quad (8)$$

### 3.2.3.2 Modelo Hidrológico

Segundo Reginatto (2013), o modelo hidrológico baseia-se nos princípios apresentados por Beven e Kirkby (1979), que demonstraram que a saturação de um solo em função da topografia, está relacionada com a área de drenagem ( $a$ ) por unidade de contorno ( $b$ ) dividida pela declividade da encosta ( $\theta$ ) (ilustrado na Figura 42). Foi baseado nesses estudos que O’Loughlin (1986) estabeleceu um índice apresentado em função da permeabilidade do solo, da precipitação, da declividade da encosta e da área de contribuição a montante (ou seja, área drenada por unidade de contorno) que determina a condição de saturação de um solo. O índice aponta locais em que o fluxo de água recebido excede a capacidade do solo em transmiti-lo ocorrendo a saturação do solo.

**Figura 27 - Representação do modelo hidrológico de estado uniforme, sendo “ $q$ ” a taxa de recarga uniforme, “ $a$ ” a área de contribuição a montante, “ $b$ ” o comprimento de contorno unitário, “ $z$ ” a espessura do solo, “ $h$ ” a altura da coluna de água e “ $\theta$ ” a declividade da encosta.**



Fonte: Montgomery; Dietrich (1994).

Guimarães (2014) afirma que de acordo com a Figura 42, pode-se formular as equações a seguir, utilizadas no modelo hidrológico do SHALSTAB e afirma também que a vazão de entrada em um elemento da encosta ( $Q_e$ ) [em  $m^3/dia$ ] é dada pelo produto da taxa de precipitação com recarga uniforme, ( $q$ ) [m/dia] e a área da superfície do relevo ( $a$ ) [em  $m^2$ ], conforme apresentado na equação (9)

$$Q_e = q \times a \quad (9)$$

Segundo Caputo (1988), a vazão do fluxo de saída do elemento é dada pelo produto da velocidade do fluxo pela área de saída, onde a velocidade pode ser escrita de acordo com a Lei de Darcy, expressa na equação (10).

$$v_p = k_p \times i \quad (10)$$

Onde:

$v_p$  = velocidade de percolação no solo [m/dia];

$k_p$  = coeficiente de percolação no solo [m/dia];

$i$  – gradiente hidráulico [m/m]

Rosolem (2014) assume que o coeficiente de percolação é constante e tendo conhecimento que o gradiente hidráulico é a razão entre a perda de carga, pelo comprimento da encosta, tem-se equação (11):

$$v_p = k_p \times \text{sen}\theta \quad (11)$$

Assim:

$$Q_s = k_p \times \text{sen}\theta \times h \times b \cdot \cos\theta \quad (12)$$

Sendo:

$Q_s$  = vazão de saída do fluxo [ $m^2/dia$ ];

$h$  = espessura do solo saturado [m];

$b$  = comprimento do limite inferior do elemento [m].

Sendo regime uniforme, a vazão de entrada e saída são iguais, podendo-se igualar as equações (9) e (12), obtendo-se a equação (13):

$$q \times a = k_p \times \text{sen}\theta \times h \times b \cdot \cos\theta \quad (13)$$

A vazão máxima de saída do elemento acontecerá quando o solo estiver completamente saturado. Assim, reescrevendo a equação (13), tem-se a equação (14):

$$Q_{smax} = (k_p \times \text{sen}\theta \times h \times b \cdot \cos\theta) = b \times T \times \text{sen}\theta \quad (14)$$

Onde:

$T$  = transmissibilidade do solo [ $\text{m}^2/\text{dia}$ ];

$Z$  = espessura total do solo [ $\text{m}$ ];

Adotando a mesma premissa de O'Loughlin (1986), que assumiu a umidade como a parcela do solo em dado estado uniforme de recarga, obtêm-se a saturação do solo ( $W$ ) [ $\text{m}/\text{m}$ ] no elemento analisado por meio da razão entre a vazão de entrada (equação 9) e a vazão máxima de saída (equação 14), conforme apresentado na equação (15).

$$W = \frac{Qe}{Q_{smax}} = \frac{q \times a}{b \times T \times \text{sen}\theta} \quad (15)$$

Fazendo a substituição das equações (13), (14) e (15) tem-se e equação (16):

$$W = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \text{sen}\theta} \quad (16)$$

Sendo:

$W$  = índice de umidade [adimensional];

$Q$  = intensidade da chuva [ $\text{mm}$ ];

$T$  = transmissividade do solo ou permeabilidade [ $\text{m}^2/\text{dia}^{-1}$ ];

$a$  = área de contribuição [ $\text{m}^2$ ];

$b$  = comprimento de contorno [ $\text{m}$ ].

Expressando a equação (16) em função da razão  $h.z^{-1}$ , conforme proposto por Montgomery e Dietrich (1994) tem-se a equação (17).

$$\frac{h}{z} = \frac{Q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \text{sen}\theta} \quad (17)$$

### 3.2.3.3 Combinação entre o modelo de estabilidade de encosta e o modelo hidrológico

A combinação entre os dois modelos é realizada igualando-se as equações (8) e (17), levando em consideração a coesão. Isso resulta na equação (18) representada em função das variáveis  $q$  e  $T$  (parâmetros hidrológicos) como é resolvida pela rotina do *SHALSTAB*.

$$\frac{q}{T} = \frac{a}{b} \cdot \text{sen}\theta \cdot \left[ \frac{c'}{\rho a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \text{tg}\varphi} + \frac{\rho s}{\rho a} \cdot \left( 1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi} \right) \right] \quad (18)$$

Montgomery e Dietrich (1994) recomendam que para o cálculo de  $q/T$  é necessário utilizar os valores em escala logarítmica, sendo representados então pela equação (19).

$$\text{Log} \frac{q}{T} = \frac{a}{b} \cdot \text{sen} \theta \cdot \left[ \frac{c'}{\rho a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \text{tg} \varphi} + \frac{\rho s}{\rho a} \cdot \left( 1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \varphi} \right) \right] \quad (19)$$

Dietrich e Montgomery (1998) baseados na equação (19) estabelecem as classes de estabilidade em função do parâmetro livre  $q/T$ . Estas classes, adotadas neste estudo, são as mesmas adotadas por Sbroglia (2015), sendo agrupadas em uma mesma classe todos os *pixels* considerados incondicionalmente estáveis e em outra os considerados incondicionalmente instáveis. Para os valores intermediários foram dispostas outras quatro classes que, de acordo com os valores a elas atribuídas, podem se aproximar ou não da classe incondicionalmente instável ou também da incondicionalmente estável. Segundo Sbroglia (2015), áreas com valores próximos àquela considerada instável são áreas onde necessita-se pouca quantidade de precipitação para gerar um escorregamento e o contrário para àquelas com valores próximo a classe mais estável.

Tabela 1- Classes de estabilidade geradas pelo SHALSTAB pela razão Log(q/T)

Classes	Condições
Incionalmente estável e saturado	$\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$ $\text{tg}\theta \leq \text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)$
Incionalmente estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$ $\text{tg}\theta \leq \text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)$
Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi'}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$ $\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$ $\text{tg}\varphi' \cdot \left(\frac{1 - \delta_w}{\delta_s}\right) < \text{tg}\theta < \text{tg}\varphi'$
Instável e não saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi'}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$ $\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$ $\text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\delta_w}{\delta_s}\right) < \text{tg}\theta < \text{tg}\varphi'$
Instável e saturado	$\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\varphi'}\right) \cdot \frac{T}{Q} \cdot \text{sen}\theta$ $\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$ $\text{tg}\varphi' \cdot \left(1 - \frac{\delta_w}{\delta_s}\right) < \text{tg}\theta < \text{tg}\varphi'$
Incionalmente instável e não saturado	$\text{tg}\theta > \text{tg}\varphi'$ $\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$
Incionalmente instável e saturado	$\text{tg}\theta > \text{tg}\varphi'$ $\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{Q}\right) \cdot \text{sen}\theta$

Fonte: Reginatto (2013).

## 4 ÁREA DE ESTUDOS

A microbacia do Ribeirão do Baú, área de estudo desta pesquisa, é considerada uma área de interesse científico devido a grande quantidade de desastres relacionados a movimentos de massa ocorridos nesta área e evidenciados, principalmente, no evento pluviométrico extremo de novembro de 2008. Estes desastres afetaram intensamente a infraestrutura da região e também a população

local, sendo registradas doze mortes na comunidade do Alto do Baú e seis na comunidade do Baú Seco (PEREIRA, 2009 *apud* SBROGLIA, 2015). Tendo em conta este aspecto, salienta-se que estudos de movimentos de massa já foram realizados nesta área, como por exemplo, o mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:10.000 realizado por Sbroglia (2015).

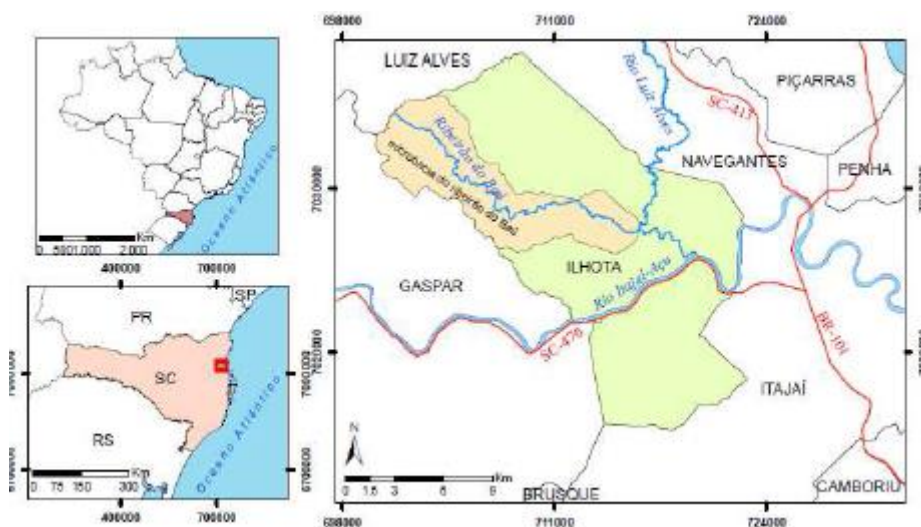
Tomazzoli et al. (2009) apontam que os movimentos de massa identificados na região do complexo do Morro do Baú (complexo no qual faz parte a microbacia em estudo) foram classificados, na maioria, como escorregamentos translacionais. Este autor também menciona que a maioria dos escorregamentos ocorreu no domínio do Complexo Granulítico, devido a presença de uma camada de solo mais espessa, declividade, falhas e fraturas.

Ainda de acordo com Tomazzoli (2009), apesar de alguns escorregamentos apresentarem influência da ação antrópica, grande parte deles ocorreu de forma natural, já que ocorreram em áreas de floresta. Este autor refere-se a ocorrência de escorregamentos em áreas de depósitos coluviais, estes provavelmente formados por outros escorregamentos. Salienta-se, no entanto, que esses depósitos apresentam idade bem mais avançada do que o começo da colonização da região, logo, são também considerados escorregamentos de origem natural.

#### **4.1 Localização e Clima**

A microbacia do Ribeirão do Baú possui 62,7 km<sup>2</sup> e localiza-se na porção noroeste do município de Ilhota, em Santa Catarina, na sub-bacia do Rio Luís Alves e bacia do Rio Itajaí (Figura 25). Além disso, pertence a região do complexo do Morro do Baú.

**Figura 28 – Localização da microbacia do Ribeirão do Baú**



Fonte: Sbroglia (2015)

Segundo a classificação climática de Köppen, esta área pertence a uma região de clima subtropical, com umidade relativa do ar média de 72 a 86% e precipitação média anual de 1500 a 1800 mm (WREGGE et al., 2011).

#### **4.2 Geologia, Geomorfologia e Características Topográficas**

De acordo com o mapa geológico, na escala 1:50.000, a composição geológica e a litologia correspondente da microbacia do Ribeirão do Baú é dada por: Complexo Luiz Alves (equivalente ao Complexo Granulítico de Santa Catarina), cujas litologias presentes são o gnaisse e núcleos máficos-ultramáficos; Grupo Itajaí, onde encontram-se os arenitos arcoseanos, conglomerados e folhelhos; e Sedimentos Quaternários, onde evidenciam-se depósitos aluvionares e coluvionares (SBROGLIA, 2015).

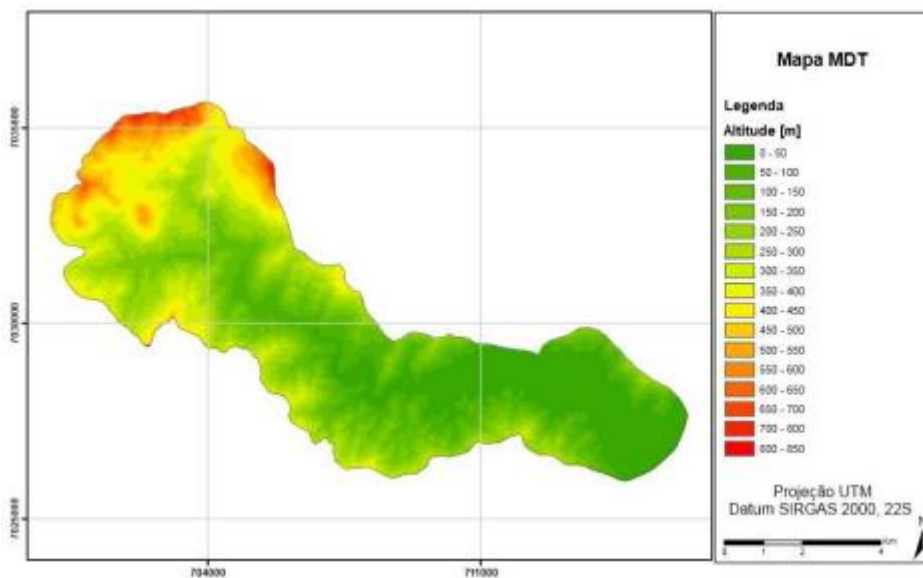
Quanto a geomorfologia da área de estudo, Sbroglia (2015) aponta a ocorrência das seguintes feições: montanhas, morros, colinas associadas a gnaisses e a núcleos máficos-ultramáficos, colinas relacionadas a arenitos, a folhelhos e a conglomerados, além de planícies aluviais e rampas de colúvio.

Em relação as características topográficas, observa-se que a altitude máxima encontrada na microbacia é de 814 m, evidenciada no MDT na escala 1:10.000 apresentado na Figura 26. Em relação a declividade, a partir do MDT foi elaborado o mapa de declividade apresentado na Figura 27, classificado segundo EMBRAPA



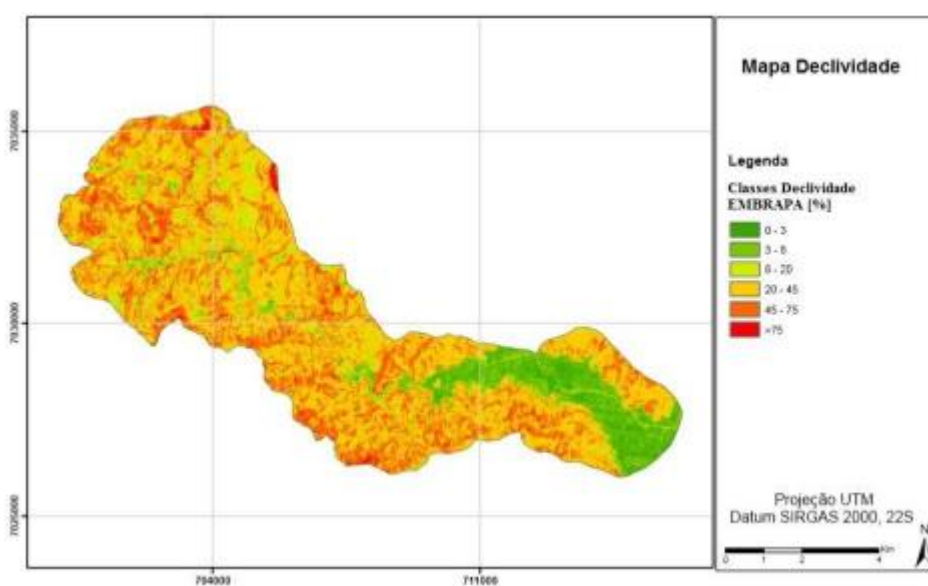
(1999), onde percebe-se que a microbacia apresenta a maior parte de sua área com declividades entre 20% e 45% representando um relevo do tipo forte ondulado. Também evidencia-se a existência de relevo do tipo montanhoso (declividades entre 45% e 75%) e em outras poucas áreas do tipo escarpado (declividades acima de 75 %).

**Figura 29 - MDT com altimetria da microbacia do Ribeirão do Baú**



Fonte: Sbroglia (2015).

**Figura 30: Mapa de declividade em porcentagem da microbacia do Ribeirão do Baú.**



Fonte: Sbroglia, (2015).

### **4.3 Unidades Geotécnicas**

Sbroglia (2015) através da metodologia de mapeamento geotécnico proposta por Davidson Dias (1995) e modificada por Higashi (2006) identificou nove unidades geotécnicas na microbacia em estudo, dentre as quais sete encontram-se descritas na Tabela 1 e as outras duas referem-se as unidades Ra (Litólico com substrato de arenito) e Rc (Litólico com substrato de conglomerado) que, além de representarem uma parcela ínfima da área da bacia, são unidades de afloramentos rochosos que não apresentam escorregamentos.

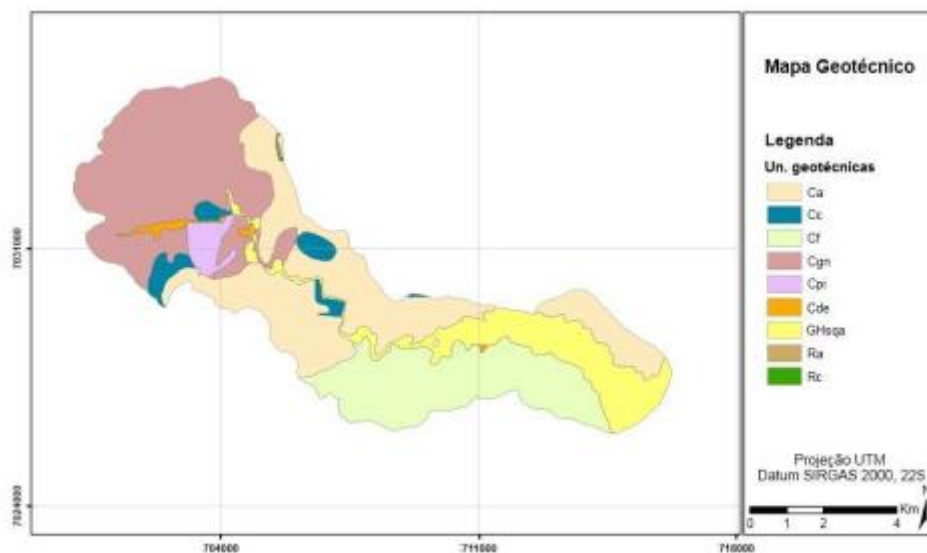
Tabela 2 - Caracterização das unidades geotécnicas na microbacia do Ribeirão do Baú

UNIDADE	NOME	ÁREA	RELEVO	GEOLOGIA	PEDOLOGIA
Cgn	Cambissolo substrato gnaisse	19,3km <sup>2</sup> 30,8%	Encostas com alta declividade - forte ondulado (20 a 45%) a montanhoso (45 a 75%). Ocorrem ainda algumas áreas com superfícies muito íngremes e escarpamentos, com declividades maiores que 75%.	Complexo Luiz Alves	Cambissolo álico e pequenas áreas distrófico, argila de atividade baixa, textura arenosa com horizonte C profundo e horizonte B incipiente, sem lençol freático próximo a superfície.
Cpi	Cambissolo substrato piroxenito	1,35km <sup>2</sup> 2,15%	A maior parte da unidade apresenta relevo forte ondulado e, em menor parte, ondulado (8 a 20%)	Complexo Luiz Alves	Cambissolo álico, atividade da argila baixa, textura argilosa, não hidromórfico com macroestrutura em forma de grumos que confere elevada permeabilidade, de coloração avermelhada.
Ca	Cambissolo com substrato de arenito	18,6km <sup>2</sup> 29,6%	A maior parte do relevo da unidade é forte ondulado e montanhoso e em algumas áreas apresenta relevo ondulado	Grupo Itajaí	Cambissolo álico, atividade da argila baixa, textura arenosa, horizonte C profundo e horizonte B, não hidromórfico de coloração marrom.
Cc	Cambissolo substrato conglomerado	2,12km <sup>2</sup> 3,4%	Forte ondulado e ondulado	Grupo Itajaí	Cambissolo álico, atividade da argila baixa, textura argilosa, horizonte C profundo e horizonte B, não hidromórfico.
Cf	Cambissolo substrato folhelho	12,3km <sup>2</sup> 19,7%	Forte ondulado e montanhoso e, em menor parte, ondulado	Grupo Itajaí	Cambissolos álicos com argila de atividade alta ou baixa, dependendo da presença de minerais expansivos, textura argilosa e presença ou não de seixos na massa do solo.
Cde	Cambissolo substrato depósito de encostas	0,52km <sup>2</sup> 0,82%	A maior parte do relevo da unidade é ondulado, porém, algumas áreas apresentam relevo suave ondulado (3 a 8%)	Depósitos coluviais do período Quaternário	Cambissolo distrófico, argila com atividade baixa, horizonte A moderado, B incipiente e C profundo, textura argilosa e siltosa, não hidromórfico.
GHsqa	Gleissolo substrato sedimentos quaternários aluviais	8,4km <sup>2</sup> 13,4%	A maior parte do relevo é plano, com topografia levemente inclinada ou horizontal. Os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades variáveis de 0 a 3%	Depósitos aluviais do período Quaternário	Solo hidromórficos de atividade da argila alta, distrófico e álico, A moderado e proeminente textura argilosa + Cambissolo distrófico e álico, A moderado e proeminente textura argilosa.

Fonte: Tabela adaptada de Sbroglia, (2015)

A Figura 28 apresenta o mapa geotécnico da microbacia do Ribeirão do Baú, gerado no *software ArcGIS*, cada polígono representa uma das nove unidades geotécnicas identificadas na região por Sbroglia (2015).

**Figura 31: Mapa ilustrando as unidades geotécnicas da microbacia do Ribeirão do Baú**










Fonte: Sbroglia (2015).

Salienta-se que Sbroglia (2015), para caracterização das unidades geotécnicas, realizou vários ensaios em amostras deformadas e indeformadas coletadas em campo, sendo estes: granulometria, densidade, limite de plasticidade, limite de liquidez, método expedito as pastilhas (MCT), ensaio de compressibilidade (para determinar a permeabilidade do solo) e cisalhamento direto (CD). Além de classificar a cor do solo segundo a tabela de Munsell (1971).

A Tabela 2 ilustra os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física dos solos: granulometria, limites de liquidez e de plasticidade e densidade, bem como os resultados do método expedito das pastilhas (MCT) e da classificação de Munsell (1971). Nas Tabelas 3 e 4 estão representados respectivamente os resultados obtidos nos ensaios de CD e compressibilidade, sendo que, estes ensaios foram realizados somente em amostras provindas das unidades geotécnicas que apresentaram escorregamentos. É importante salientar que os resultados obtidos no mapeamento geotécnico representam os dados de entrada para a realização da modelagem de suscetibilidade a escorregamentos translacionais.

Tabela 3- Resultados obtidos através dos ensaios de caracterização física, método expedito das pastilhas e classificação de Munsell (1971)

Ensaio geotécnicos		Unidades Geotécnicas						
		Ca	Cc	Cf	Cgn	Cpi	Cde	GHsqa
		5YR 4/6	10YR 7/4	2.5YR 5/3	7.5YR 7/4	2.5YR 3/6	5YR 6/8	10YR 3/4
Cor (MUNSELL, 1971)								
Granulometria [%]	Argila	23,5	33,4	12,2	5,8	52,7	34,0	8,6
	Silte	29,0	22,9	49,7	16,8	25,2	20,2	24,7
	A.F.	22,8	27,4	36,3	23,4	10,1	19,3	49,4
	A.M.	23,9	11,2	1,7	21,9	6,8	9,1	14,4
	A.G.	0,7	4,5	0,1	22,6	3,4	8,7	2,7
	Pedr.	0,0	0,6	0,0	9,4	1,8	8,7	0,2
Umidade natural [%]		23,3	33,8	25,9	18,3	46,2	50,4	31,1
Massa específica $\delta$		2,76	2,76	2,70	2,87	3,02	3,21	2,70
Limites de consistência	LL [%]	41	52	35	NL	72	50	NL
	LP [%]	30	32	26	NP	60	46	NP
	IP [%]	11	20	9	NP	12	4	NP
Classificação IP x LL		med. plástico	alt. plástico	med. plástico	-	med. plástico	pouco plástico	-
Característica MCT		expansivo	não expansivo	expansivo	expansivo	não expansivo	não expansivo	expansivo
Atividade da Argila		0,47	0,60	0,74	-	0,23	0,12	-
Classificação Atv. Argila		inativa	inativa	inativa	-	inativa	inativa	-
Índice de vazios $e$		0,96	1,20	1,03	0,97	2,04	-	-

Obs: LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade; NL – não líquido; NP – não plástico.

Fonte: Sbroglia (2015).

Tabela 4- Parâmetros obtidos por Sbroglia (2015) no ensaio de cisalhamento direto

Un. Geotécnica	Parâmetros de resistência ao cisalhamento		
	Coesão efetiva [Kpa]	Ângulo de atrito $\phi$ [graus]	Peso específico natural $\gamma_{nat}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Ca</b>	8,42	26,5	1,74
<b>Cc</b>	5,24	29,2	1,68
<b>Cf</b>	2,94	25,3	1,68
<b>Cgn</b>	6,95	31,8	1,73
<b>Cpi</b>	12,96	15,8	1,46

Fonte: Tabela adaptada de Sbroglia, 2015.

Tabela 5- Resultado obtido por Sbroglia (2015) no ensaio de compressão confinada

Un.Geotecnica	Permeabilidade k [cm/s]
<b>Ca</b>	4,30E-04
<b>Cc</b>	1,70E-05
<b>Cf</b>	1,40E-05
<b>Cgn</b>	1,20E-05
<b>Cpi</b>	1,80E-05

Fonte: Tabela adaptada de Sbroglia, 2015.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa realizada neste trabalho, de modo geral, pode ser apresentada em quatro etapas, são elas:

1ª etapa → Pesquisa bibliográfica e coleta dos dados necessários para a realização deste estudo. Dentre estes dados citam-se aqueles cedidos no formato *shapefile* (compatível com o *Software ArcGIS*) por Regiane Sbroglia, os quais fazem parte da sua dissertação de mestrado “Mapeamento geotécnico das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão do Baú, Ilhota/SC”, realizada no programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina no ano de 2015. Sendo estes:

- Dados na escala 1:10.000: polígono da área da microbacia do Ribeirão do Baú, MDT, mapa de declividade e mapas de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais para diferentes profundidades de solo.

- Dados na escala 1:50.000: mapa geotécnico preliminar.
- Cicatrizes dos escorregamentos, fornecidas originalmente pelo projeto “Análise e mapeamento das áreas de risco a movimentos de massa e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luís Alves (Complexo do Morro do Baú), SC”.

Para a elaboração do MDT na escala 1:50.000 foram coletados dados em *shapefile* do site da EPAGRI/CIRAM, sendo estes: curvas de níveis e rede de drenagem, os quais foram editados pelo IBGE no ano de 1981.

2ª etapa → Elaboração dos mapas na escala 1:50.000 necessários para a modelagem com o SHALSTAB: MDT, mapa de declividade, área de contribuição e mapas referentes as propriedades dos solos (coesão, ângulo de atrito, peso específico saturado e profundidade do solo).

3ª etapa → Modelagem com o *SHALSTAB* e obtenção dos mapas de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000, para diferentes profundidades de solo.

4ª etapa → Comparação entre os mapas obtidos em diferentes escalas (1:10.000 e 1:50.000) e análise dos resultados.

Neste estudo, os *softwares* utilizados para o processamento e armazenamento dos dados foram os seguintes:

→ *ArcGIS 9.3*, desenvolvido em 2008 pela *ESRI (Environmental Systems Research Institute)*, Redlands, Califórnia, Estados Unidos da América.

→ *ArcGIS 10.1*, desenvolvido em 2010 pela *ESRI (Environmental Systems Research Institute)*, Redlands, Califórnia, Estados Unidos da América.

→ *SHALSTAB (Shallow Landslide Stability Analysis)*, desenvolvido em 1994 e transportado para a linguagem *AML* em 1998.

→ *TauDEM 5.3*, desenvolvido pelo *Hidrology Research Group* da *UTAH University*, nos Estados Unidos da América.

## 5.1 Modelo Digital do Terreno

O Modelo Digital do Terreno, neste estudo, além de caracterizar a área é utilizado como dado essencial da modelagem com o *SHALSTAB*.

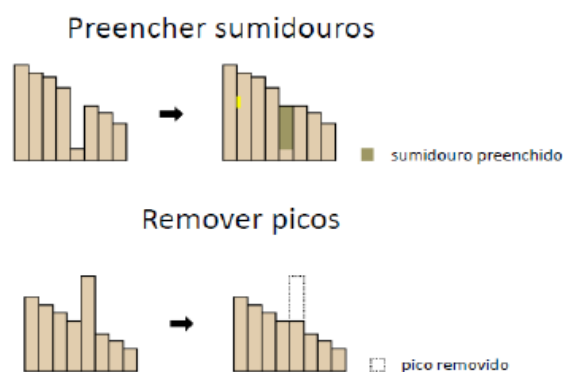
O MDT foi gerado por meio da extensão *Spatial Analyst Tools* do software ArcGIS 10.1, empregando a ferramenta de interpolação *Topo to raster*. Para tanto foram utilizados como dados de entrada as curvas de níveis da microbacia na escala 1:50.000 (curvas de 20 m em 20 m) e os cursos d'água (rede de drenagem) na mesma escala.

Sobre a ferramenta de interpolação, vale ressaltar que a mesma é baseada nos trabalhos desenvolvidos por Hutchinson (1989), os quais tratam sobre o algoritmo *ANUDEM* que objetiva a transformação de dados vetoriais em uma grade regular retangular no formato matricial representando um MDT hidrológicamente correto (ESRI, 2005 *apud* SBROGLIA, 2015).

Ressalta-se que para a elaboração do MDT a área de abrangência utilizada foi maior que a do limite da microbacia, para aumentar a confiabilidade do mapa e simular as mesmas condições de interpolação utilizadas por Sbroglia (2015) e por consequência gerar uma comparação mais adequada. Na extração dos dados referente a área da microbacia, após a confecção do MDT, foi feito uso da ferramenta *Extract by Mask* da extensão *Spatial Analyst Tools*, utilizando o polígono que representa a área em estudo.

Para chegar ao MDT definitivo ainda foi realizada a remoção das falsas depressões (*sinks*). Elas podem decorrer de erros nos dados de entrada ou até mesmo do processo de interpolação, como ilustra a Figura 29, ou seja, são *pixels* com valores muito menores ou muito maiores do que aqueles que os circundam. Estas falsas depressões podem gerar erros na análise de direção dos fluxos de água, devendo ser removidas. A remoção é feita com ferramenta *fill*, que se encontra no menu *hidrology*, da extensão *Spatial Analyst Tools* do ArcGIS 10.1.

**Figura 32 – Correção de discrepâncias do MDT**



Fonte: Bortolotigv (2013).



Após a remoção das falsas depressões enfim tem-se a versão final do MDT na escala 1:50.000, com pixels de 10m x 10m, equivalente a uma área de 100m<sup>2</sup>. No entanto, para ser comparado ao MDT gerado por Sbroglia (2015) na escala 1:10.000 e com pixels de 1m x 1m, a versão final do MDT foi reclassificada em intervalos de altitude de 50m x 50m.

## 5.2 Mapa de Declividade

O mapa de declividade assim como o MDT além de ser utilizado na caracterização da área de estudo também constitui um importante mapa na modelagem com o *SHALSTAB*.

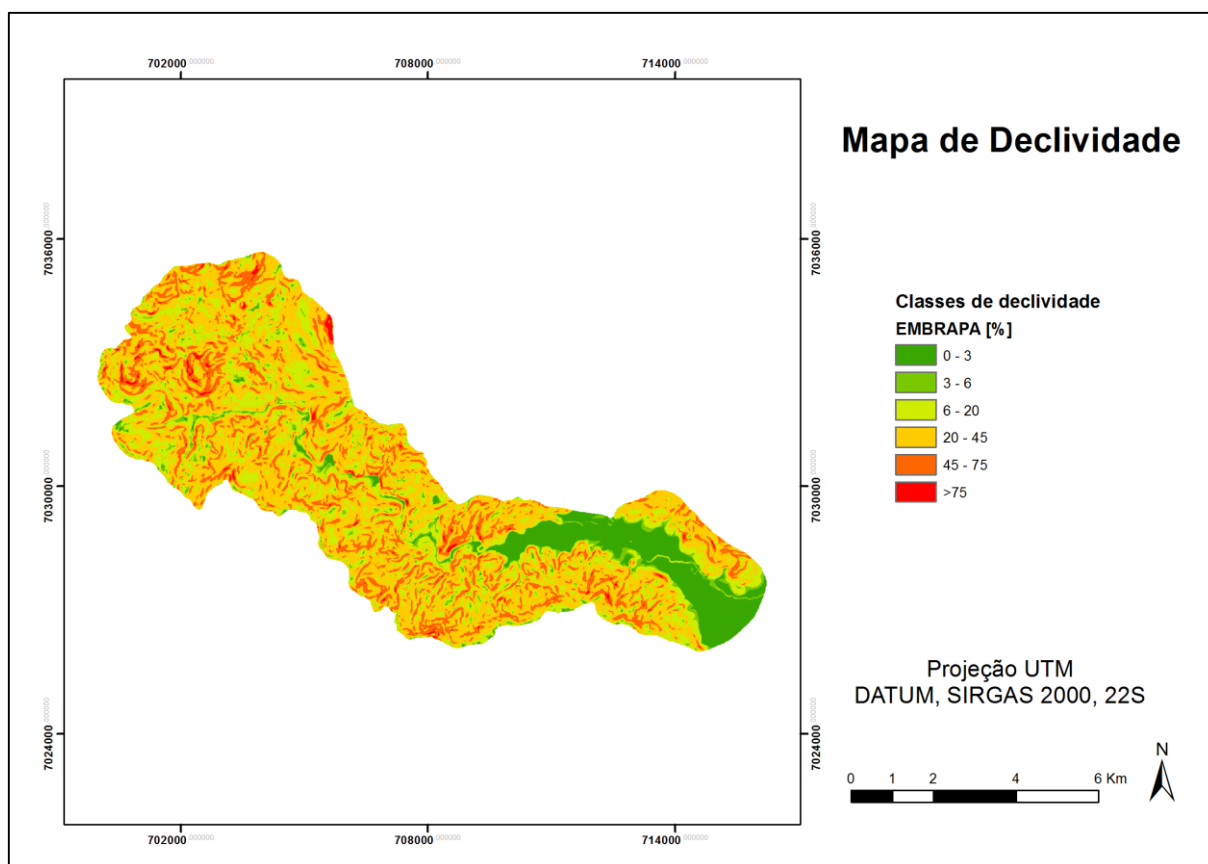
A partir do MDT o mapa de declividades foi obtido diretamente por meio da ferramenta *Slope* no menu *Surface* da extensão *Spatial Analyst Tools*, sendo então classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos da EMBRAPA (1999) (Quadro 9). Este mapa está apresentado na Figura 30 e foi elaborado no âmbito de caracterização da microbacia. No entanto, o mapa de declividade na escala utilizada na modelagem, foi comparado com aquele na escala 1:10.000 foi reclassificado em intervalos de declive de 5 em 5<sup>o</sup> e está apresentado no capítulo 6 deste estudo.

**Quadro 9 – Classes de Relevos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**

<b>Classes de relevo</b>	<b>Intervalos de Declividade (%)</b>
Plano	0 – 3
Suave Ondulado	3 – 6
Ondulado	6 – 20
Forte Ondulado	20 - 45
Montanhoso	45 – 75
Escarpado	> 75

Fonte: Quadro adaptado de EMBRAPA, 1999.

Figura 33 - Mapa de Declividade em porcentagem da microbacia do Ribeirão do Baú.

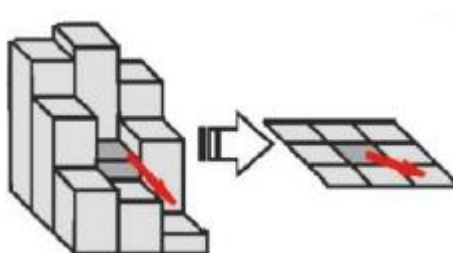


Fonte: Produzido pelo autor

### 5.3 Mapa de Direção de Fluxo

Guessser (2013) aponta que o mapa de direção de fluxo representa a direção do escoamento da água, fazendo-se a análise das células vizinhas do MDT, como ilustra a Figura 31:

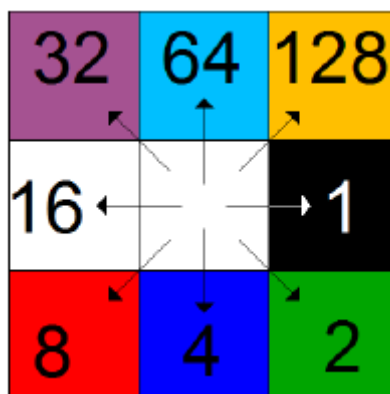
Figura 34 - Representação do fluxo d'água em função das células vizinhas



Fonte: Carvalho et al. (2010).

Este mapa foi elaborado no *ArcGIS 10.1* por meio da ferramenta *flow direction*, localizada no menu *hidrology* da extensão *Spatial Analyst Tools*. Esta ferramenta gera um mapa onde cada cor e valor determinado representam um vetor de direção de fluxo correspondente, como apresentado na Figura 32. O dado de entrada desta ferramenta foi o MDT final, na escala 1:50.000 (gerado após a remoção das falsas depressões com a ferramenta *fill*).

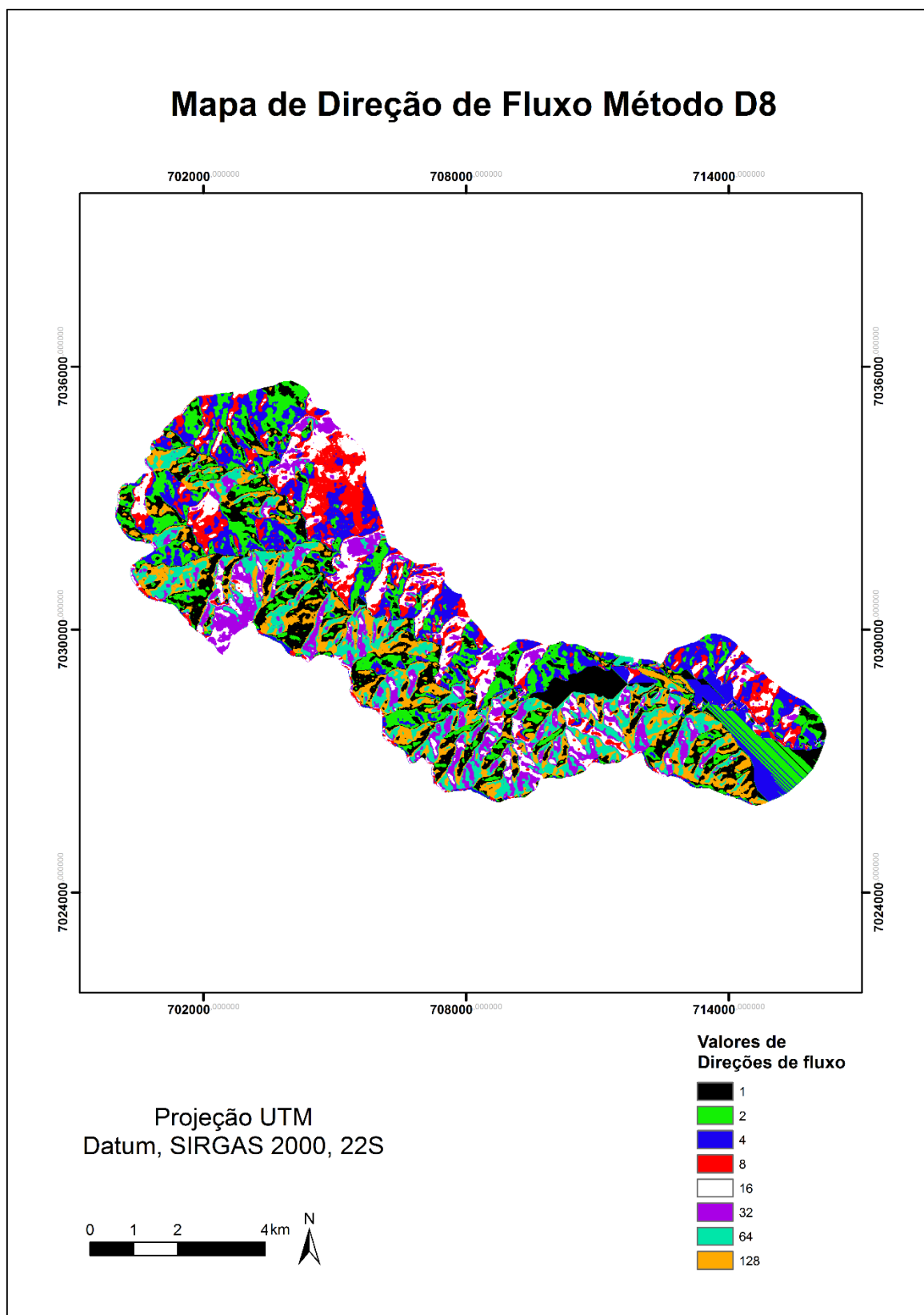
**Figura 35 - Vetores de direção de fluxo**



Fonte: Bortoli (2013).

O mapa de direção de fluxo está representado na Figura 33 e foi gerado na escala 1:50.000.

Figura 36 - Mapa de direção de fluxo na escala 1:50.000 gerado pelo método das oito direções de fluxo

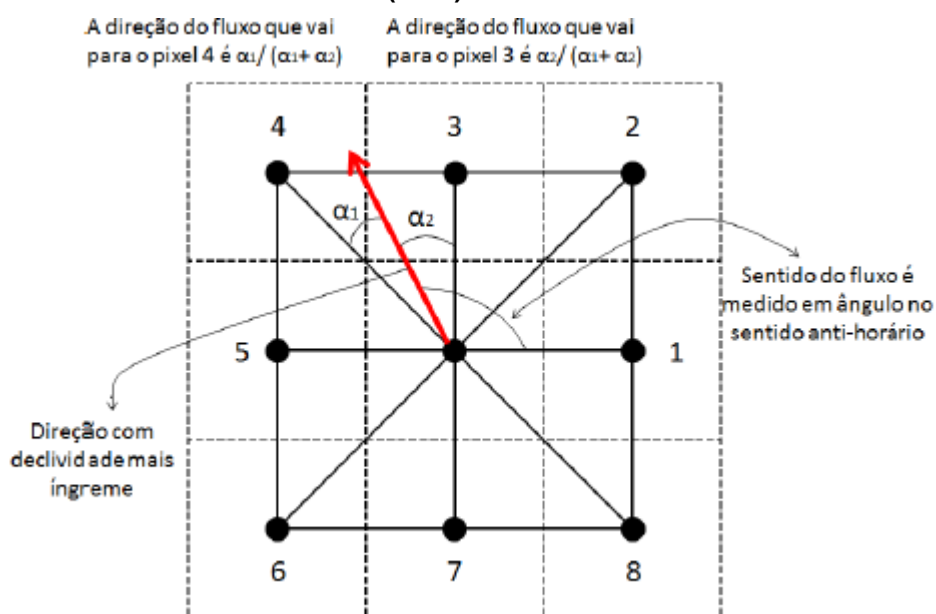


Fonte: Produzido pelo autor.

Contudo, esta ferramenta apresenta certa limitação, ela considera apenas oito direções de fluxo possíveis (Figura 32). Para vencer esta limitação Tarboton (1997) propôs a utilização de um método denominado D-infinito, onde a direção de fluxo é identificada como um ângulo no sentido anti-horário, em radianos, na direção da faceta triangular com declive mais íngreme (Figura 34). Uma matriz de seis *pixels*, onde o *pixel* central é analisado e as suas oito facetas triangulares formadas é quem determina a direção do fluxo, sendo o mesmo interpretado como proporcional aos *pixels* que limitam a faceta triangular de declive mais íngreme (TARBOTON, 1997).

Para implementação deste método fez-se necessário o uso de uma extensão do *software ArcGIS 10.1*, denominada *TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)*, desenvolvida e disponibilizada pela *Utah State University*. Neste trabalho fez-se uso da versão 5.3 desta extensão. Ressalta-se que este método também possui como dado de entrada o MDT gerado após a remoção das falsas depressões. A ferramenta utilizada para a confecção do mapa é nomeada *D-Infinity Flow Direction* localizada no menu *TauDEM Tools*.

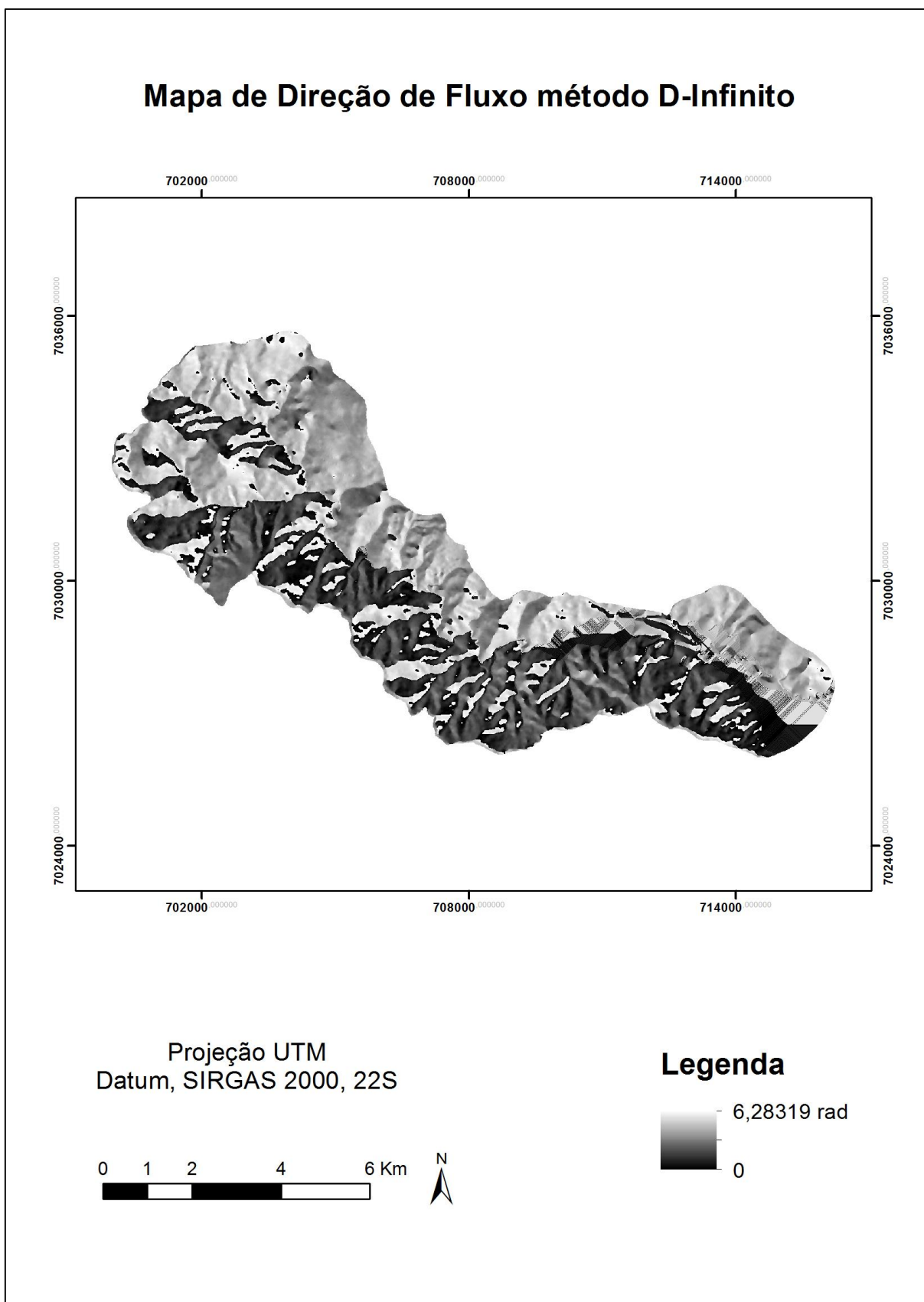
**Figura 37 - Direção de fluxo definida pelo método D-Infinito proposto por Tarboton (1997).**



Fonte: Adaptada de Tarboton (1997).

A figura 35, ilustra o mapa de direção de fluxo, gerado na escala 1:50.000 pelo método do D-infinito.

Figura 38 - Mapa de direção de fluxo gerado pelo método das infinitas direções no TauDEM

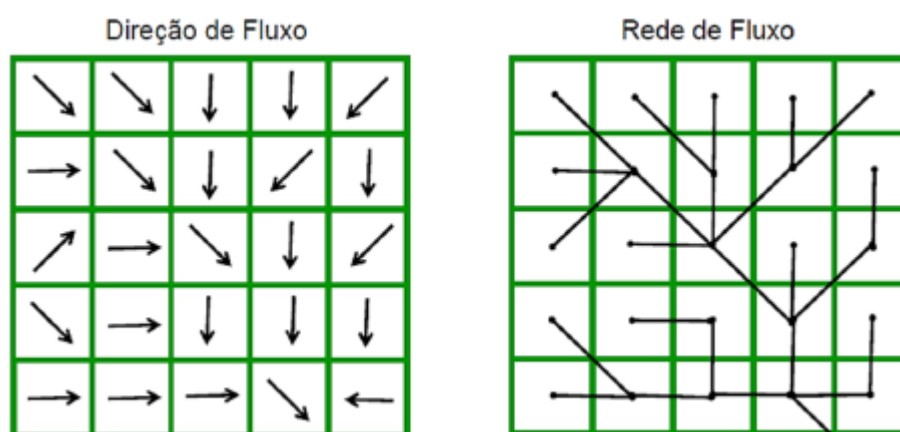


Fonte: Produzido pelo autor

## 5.4 Mapa de Área de Contribuição

Guessser (2013), aponta que o mapa de área de contribuição consiste na criação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir da direção de fluxo. O autor apresenta a Figura 36 para facilitar o entendimento do processo.

**Figura 39 - Processo de formação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir da direção de fluxo.**



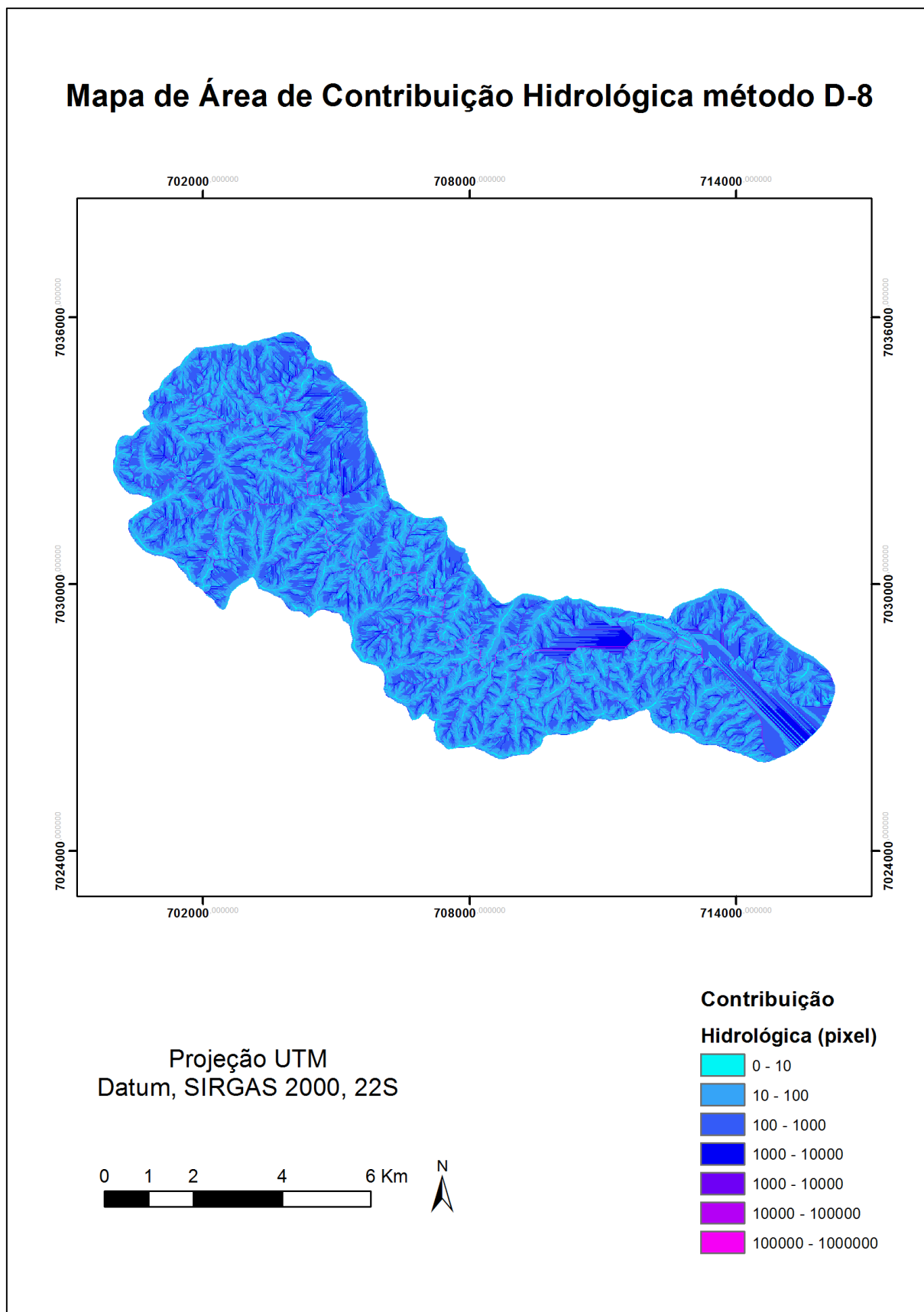
Fonte: Bortoli (2013).

Assim como no mapa de direção de fluxo, há duas maneiras de elaborar o mapa de contribuição, uma baseada no método D-8, que considera apenas oito direções de fluxo e a outra por meio do método do D-Infinito, considerando infinitas direções de fluxo. Serão apresentados os mapas de contribuição gerados pelos dois métodos. Vale ressaltar que o mapa de contribuição é uma das variáveis envolvidas na modelagem do *SHALSTAB*, e para tal uso, será utilizado o mapa gerado pelo método das infinitas direções de fluxo já que representa uma situação que se assemelha mais com a encontrada em campo.

No método do fluxo em oito direções, o mapa foi gerado utilizando a ferramenta *flow accumulation* presente no menu *hidrology* da extensão *Spatial Analyst Tools* do software *ArcGIS* 10.1. Para tal é necessário entrar com o mapa de direção de fluxo (mapa gerado pelo método D-8) em formato *grid* (matricial).

O mapa de área de contribuição ilustrado na Figura 37 se apresenta na escala 1:50.000.

Figura 40 - Mapa de área de contribuição hidrológica gerado pelo método das oito direções



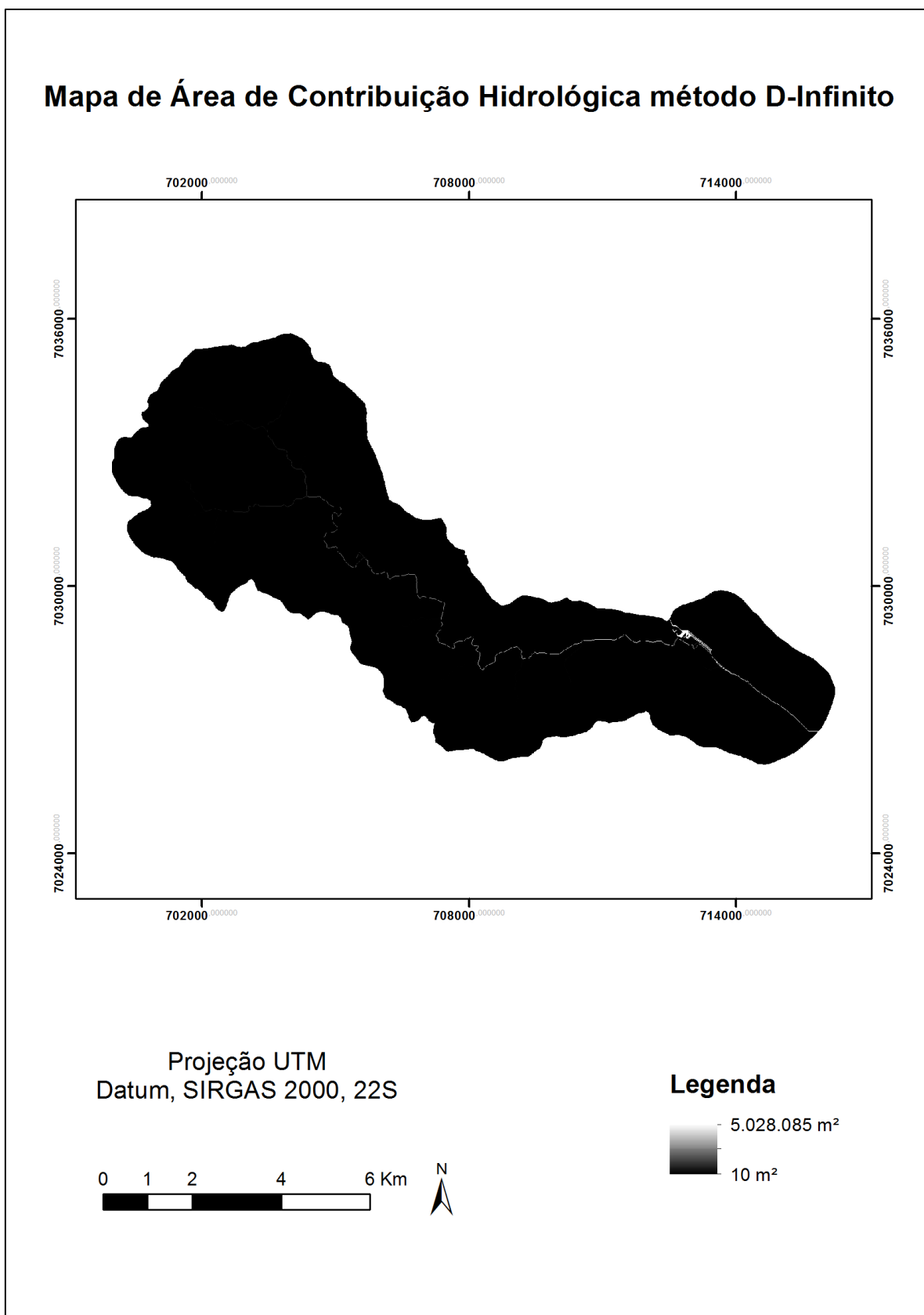
Fonte: Produzido pelo autor



Para o método das direções de fluxos infinitas, a ferramenta utilizada é nomeada *D-Infinity Contributing Area* e está localizada na extensão do *ArcGIS 10.1, TauDEM Tools*. Como dado de entrada, foi inserido o mapa de direção de fluxos gerado pelo método do D-Infinito.

A Figura 38 apresenta o mapa de área de contribuição gerado pelo método das direções de fluxos infinitas na escala 1:50.000.

Figura 41: Mapa de área de contribuição hidrológica pelo método das infinitas direções de fluxos gerado pelo *TauDEM*.



Fonte: Produzido pelo autor

## 5.5 Modelagem com o *SHALSTAB*

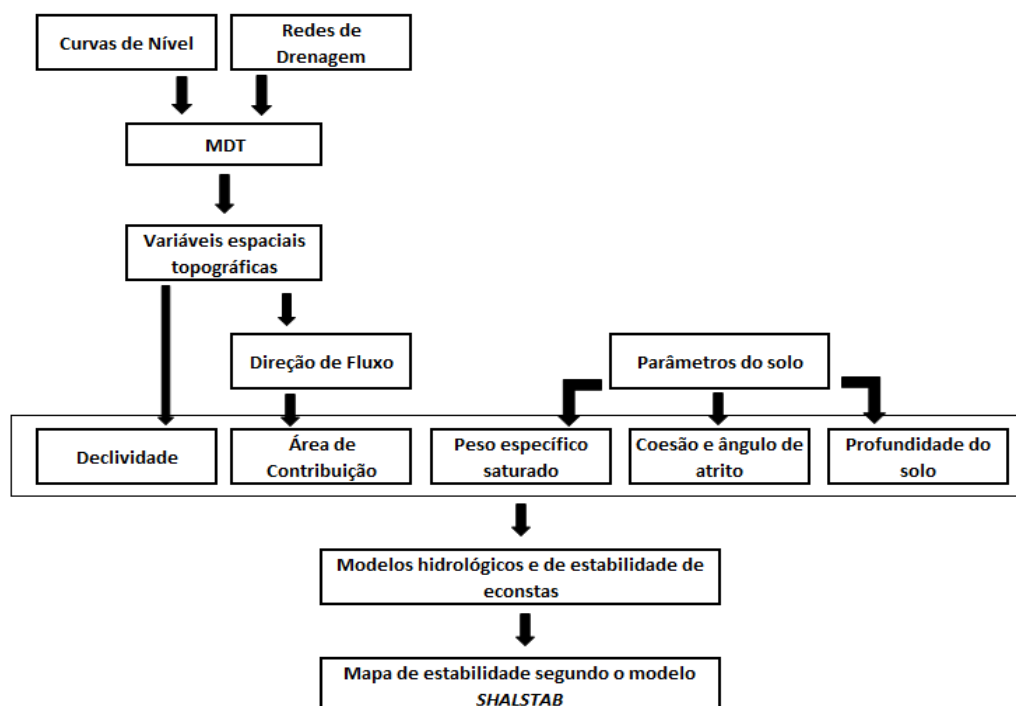
Para o mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais na microbacia do Ribeirão do Baú fez-se uso do modelo *SHALSTAB*, o qual faz a união de dois modelos distintos, um hidrológico e um referente a estabilidade de encostas (talude infinito). Segundo Reginatto (2013), este modelo considera dados hidrológicos e propriedades geotécnicas e físicas do solo, representativos para a área em estudo, buscando determinar a razão entre a quantidade de chuva e a transmissividade do solo necessária para tornar instável uma encosta.

De acordo com Fernandes et al. (2001), os componentes do modelo consistem em parâmetros topográficos (declividade), geotécnicos (coesão, ângulo de atrito, peso específico saturado e profundidade do solo) e hidrológicos (área de contribuição).

Este autor faz ainda a ressalva de que a qualidade e resolução do MDT é um ponto fundamental na consistência dos resultados obtidos pelo modelo.

Na modelagem em questão foi feito o uso de um algoritmo desenvolvido por Michel (2013) aplicado no *software ArcGIS 9.3*. Com esse algoritmo, tem-se a possibilidade de espacializar os parâmetros geotécnicos em função das respectivas unidades geotécnicas caracterizadas por Sbroglia (2015).

Figura 42 - Fluxograma da modelagem do *SHALSTAB*.



Fonte: Adaptado de Reginatto (2013).

### 5.5.1 *Elaboração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais*

Conforme mencionado anteriormente, na elaboração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais da microbacia do Ribeirão do Baú, na escala 1:50.000, foi utilizado o modelo SHALSTAB no *ArgGIS* 9.3 implementado com o algoritmo desenvolvido por Michel (2013).

Porém, antes da execução do algoritmo é necessário a preparação dos dados de entrada, os quais estão listados no Quadro 10 com as respectivas variáveis utilizadas para identificá-los. Observa-se que esses dados de entrada são mapas no formato *raster*.

**Quadro 10 - Dados de entrada do modelo, associados aos seus respectivos símbolos e unidades.**

cr	Coesão das raízes	N/m <sup>2</sup>
cs	Coesão dos solos	N/m <sup>2</sup>
rs	Peso específico saturado do solo	Kg/m <sup>3</sup>
f	Ângulo de Atrito	Graus
w	Carga proeminente da vegetação	Kg/m <sup>2</sup>
z	Espessura do solo	m
ab	Área de contribuição	m <sup>2</sup>
slp	Declividade do terreno	Graus

Sendo assim, a elaboração dos mapas de suscetibilidade seguem conforme o exposto a seguir.

Após a elaboração do MDT (livre das falsas depressões) são gerados os mapas de declividade, identificado no algoritmo como “slp”, e o mapa de direção de fluxo, este por sua vez utilizado para obter o mapa de área de contribuição, identificado no algoritmo como “ab”. Vale ressaltar que para a modelagem em questão foi utilizado o mapa de área de contribuição gerado pelo método do D-infinito, por gerar resultados mais realistas e também por ter sido utilizado por Sbroglia (2015). Também ressalta-se que o modelo *SHASLTAB* emprega em suas análises o mapa de declividade em graus, elaborado conforme descrito no item 5.2, identificado como slp no algoritmo.

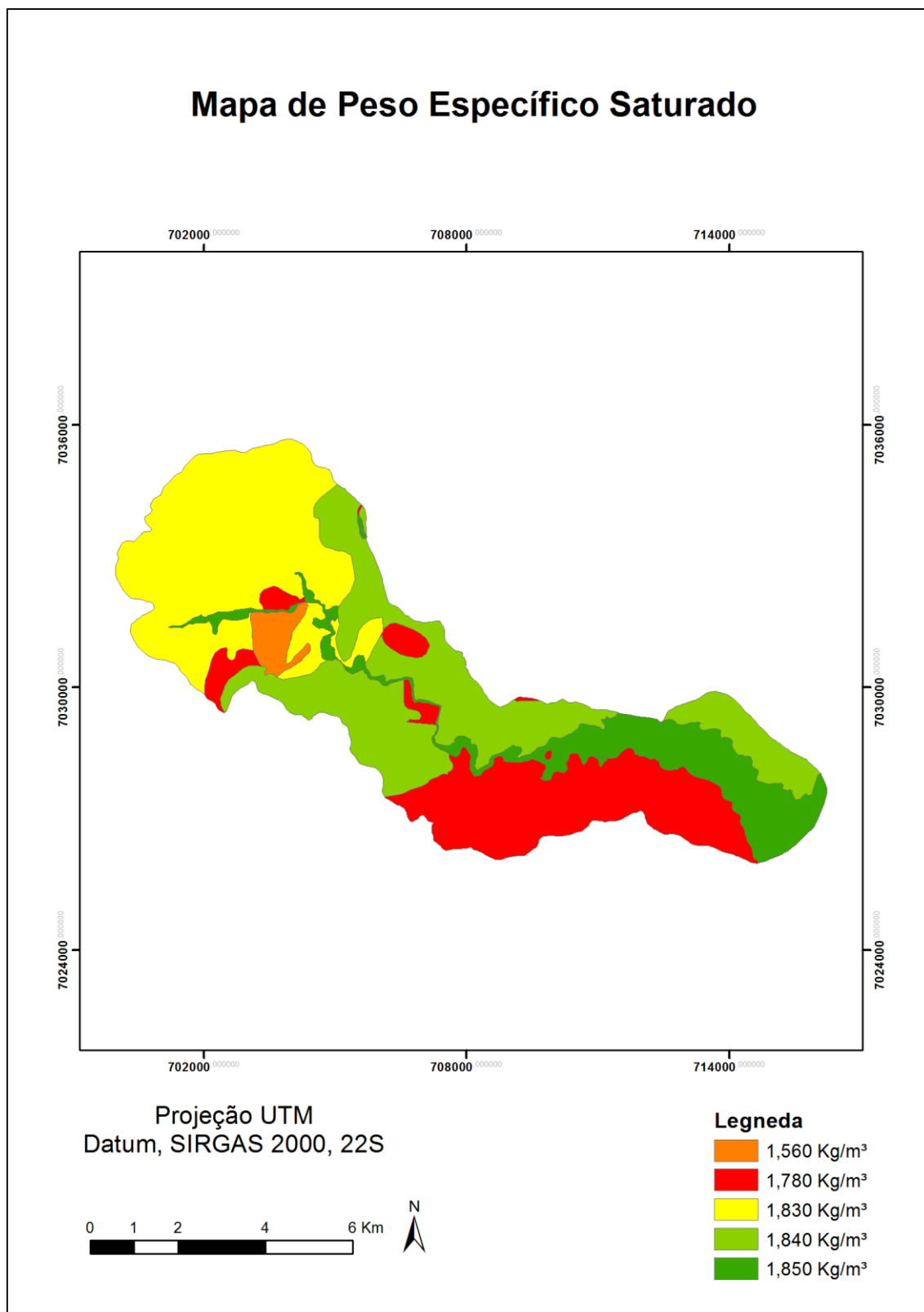
As outras seis variáveis presentes no algoritmo de Michel (2013) são os mapas obtidos a partir do mapa geotécnico fornecido por Sbroglia (2015) no formato *shapefile* (*shp*). Utilizando a ferramenta *symbolology* do software *ArcGIS* 9.3, o mapa geotécnico é reclassificado em função da coesão do solo, do peso específico saturado, do ângulo de atrito e das profundidades de solo (3, 5, 7, 10, 12 e 15 metros). Na sequência, por meio da ferramenta *Feature to raster* localizada na ferramenta *To Raster* na extensão do software *ArcGis* 10.1, *Conversion Tools*, cada mapa é convertido para o formato *raster* que será utilizado pelo algoritmo na elaboração dos mapas de suscetibilidade.

Ressalta-se ainda que, as variáveis da coesão das raízes no solo e também do peso da vegetação foram desconsideradas na modelagem. Porém, para que a execução do algoritmo ocorra de forma adequada há a necessidade de gerá-los no formato *raster* mesmo que possuam um valor constante de zero para todas as suas células (*pixels*), sendo assim, ambos os mapas serão omitidos, assim como os mapas representativos de cada uma das profundidades do solo, já que os mesmos não apresentam alternância visual entre eles.

Os mapas a seguir (Figura 43, 44 e 45) foram gerados pelo autor por meio da ferramenta *Feature to raster* e posteriormente utilizados no algoritmo de Michel (2013) para a geração dos mapas de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais. Faz-se um adendo, os parâmetros representados nos mapas a seguir foram obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto realizados por Sbroglia (2015).

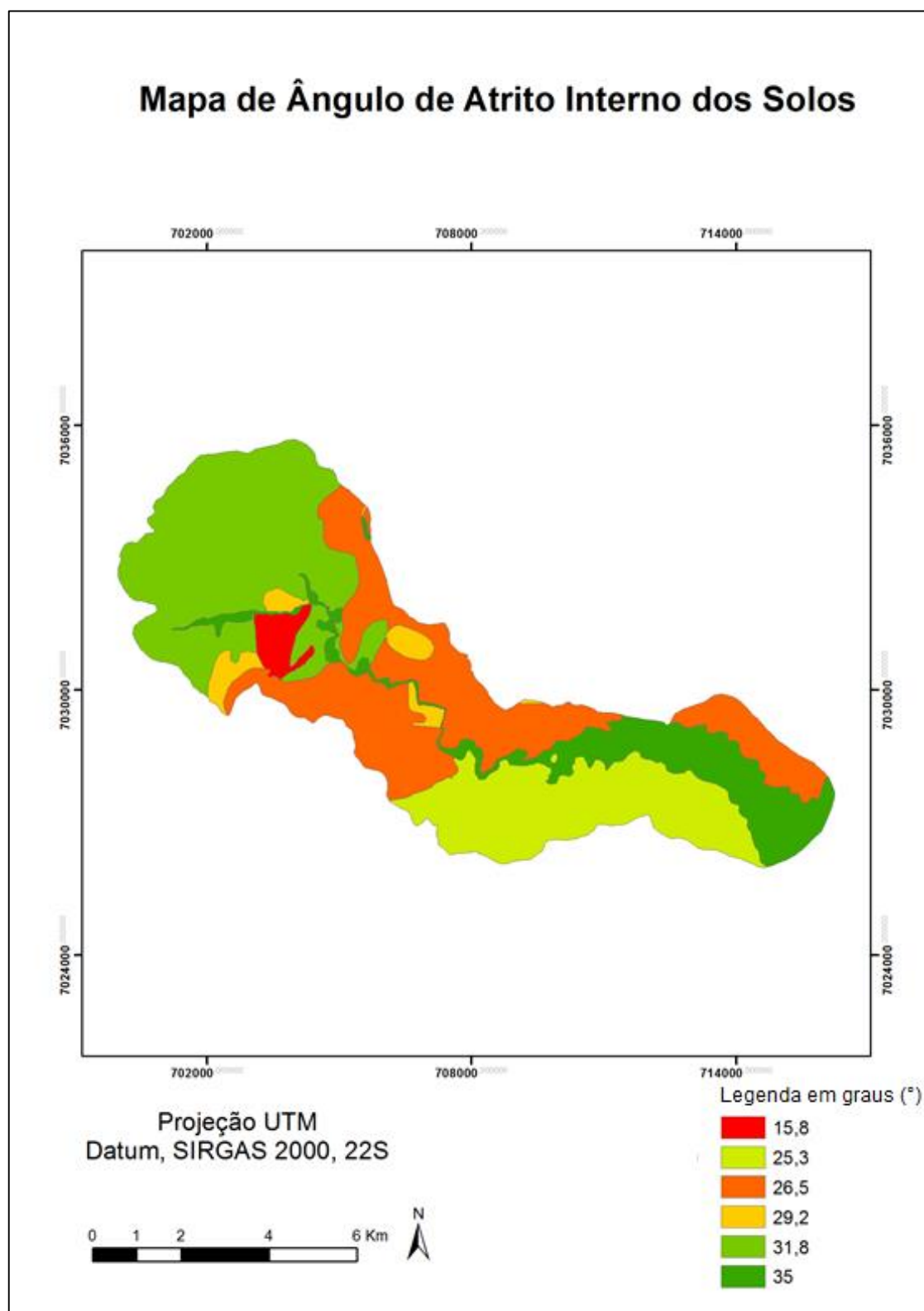
### 5.5.1.1 Mapa de Peso Específico Saturado

Figura 43 - Mapa de peso específico saturado do solo ( $\gamma_{sat}$ ) estimado através dos resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto



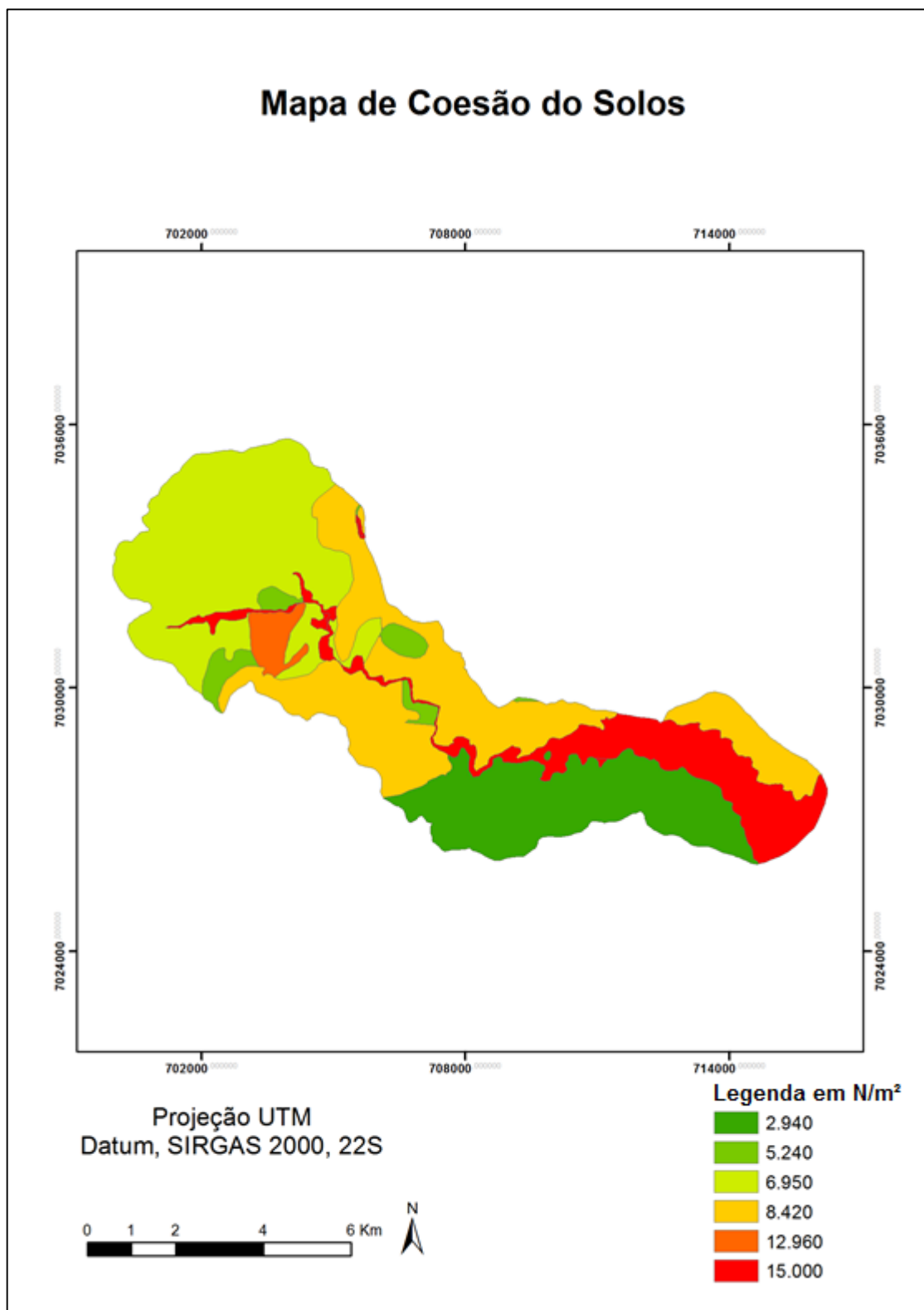
### 5.5.1.2 Mapa de Ângulo de Atrito Interno dos Solos

Figura 44 - Mapa representando os diferentes ângulos de atrito interno encontrados por Sbroglia (2015) para cada unidade geotécnica.



### 5.5.1.3 Mapa de Coesão dos Solos

Figura 45 - Mapa representando a coesão para cada uma das unidades geotécnicas.





Após a elaboração dos mapas no formato *raster*, correspondentes a todos os dados de entrada necessários para a modelagem, fez-se uso da ferramenta *Raster Calculator* do *ArcGIS* 9.3, onde foi introduzido o algoritmo para a então elaboração dos mapas de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais para diferentes profundidades de solo (ou espessura de solo), sendo estas: 3, 5, 7, 10, 12 e 15 metros. Observa-se que foram adotadas as profundidades de solo definidas por Sbroglia (2015). Abaixo encontra-se o algoritmo de Michel (2013).

```

tans] = Tan ( ( [slp] * 3.14159265 ) / 180 )
[sins] = Sin ( ( [slp] * 3.14159265 ) / 180 )
[coss] = Cos ( ( [slp] * 3.14159265 ) / 180 )
[cos2s] = ( [coss] * [coss] )
[tanf] = Tan ( ( [f] * 3.14159265 ) / 180 )
[is] = ( ( 1 - ( 1 / ( ( [rs] / 1000 ) + ( [w] / ( 1000 * 9.81 * [z] * [coss] ) ) ) ) ) * [tanf] ) + ( ( [cr] + [cs] ) / ( [rs] * 9.81 * [z] * [cos2s] * ( 1 + ( [w] / ( [rs] * 9.81 * [z] * [coss] ) ) ) ) ) )
[iu] = [tanf] + ( ( [cr] + [cs] ) / ( [rs] * 9.81 * [z] * [cos2s] * ( 1 + ( [w] / ( [rs] * 9.81 * [z] * [coss] ) ) ) ) ) )
[qt] = ( [sins] / [ab] ) * ( ( ( [cr] + [cs] ) / ( 1000 * 9.81 * [cos2s] * [tanf] * [z] ) ) + ( ( 1 - ( [tans] / [tanf] ) ) * ( ( [w] / ( 9.81 * [z] * [coss] * 1000 ) ) + ( [rs] / 1000 ) ) ) ) )
[st] = con ( [tans] < [is], 10, con ( [tans] > [iu], -10, Log10 ( [qt] ) ) )

```

Por fim, os mapas de suscetibilidade elaborados neste estudo (escala 1:50.000) foram comparados aos mapas de áreas suscetíveis gerados por Sbroglia (2015) (escala 1:10.000), verificando as discrepâncias entre os resultados, decorrentes da diferença das escala dos MDT's. Além disso, foi feita a sobreposição das cicatrizes dos escorregamentos sobre o mapa de suscetibilidade na escala 1:50.000, elaborado a partir da profundidade de solo identificada por Sbroglia (2015) como aquela que gerou os resultados mais representativos da microbacia do Ribeirão do Baú para a escala 1:10.000. Com isso, foi possível verificar se os escorregamentos mapeados encontraram-se nas classes instáveis e comparar estes resultados com aqueles da escala 1:10.000.

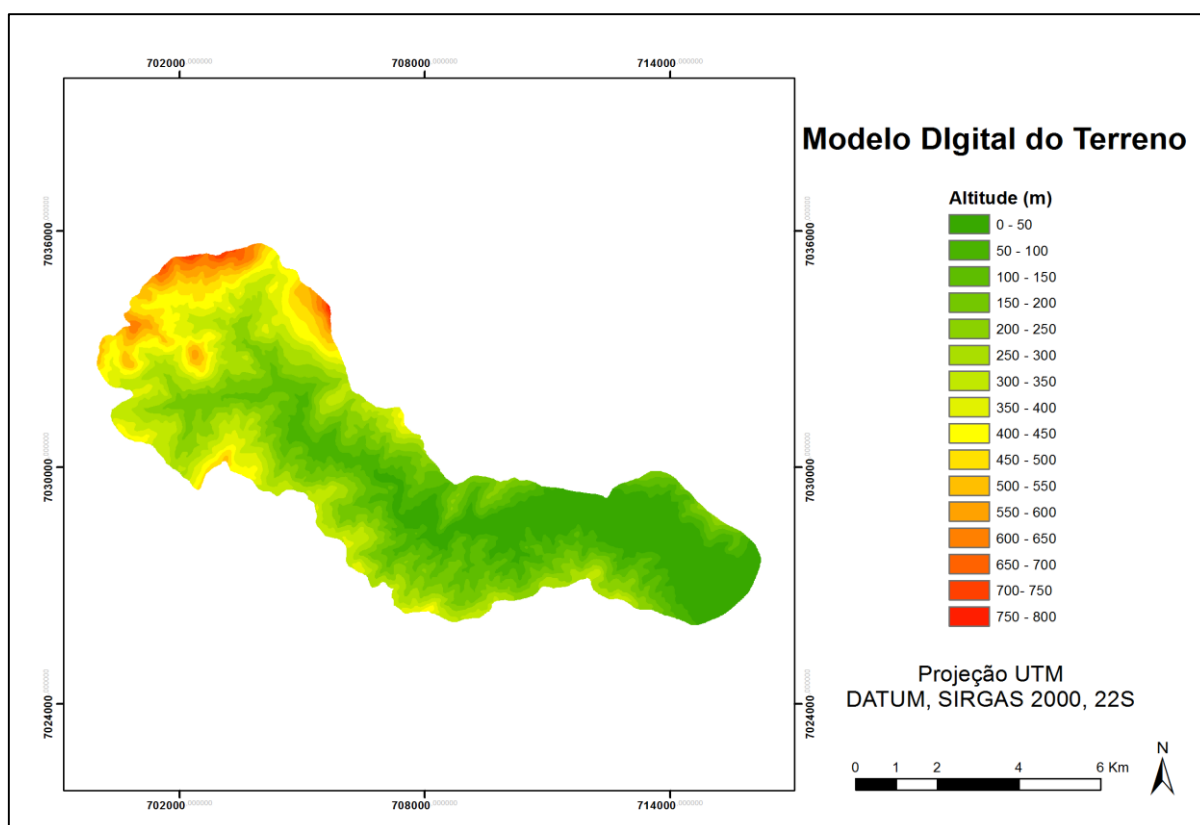
## 6 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio dos mapas elaborados na escala 1:50.000 e ainda a comparação entre estes e aqueles obtidos por Sbroglia (2015) na escala 1:10.000.

### 6.1 Modelo Digital do Terreno

O MDT da microbacia do Ribeirão do Baú, elaborado na escala de 1:50.000 e classificado segundo classes de altitudes de 50m em 50m encontra-se ilustrado na Figura 46. Por sua vez, a porcentagem correspondente a área ocupada por cada uma destas classes é apresentada no Quadro 11, bem como as porcentagens correspondentes às áreas de cada uma das classes do MDT na escala 1:10.000 (Figura 26). Além disso, o Gráfico 1 apresenta de forma ilustrativa a comparação entre os dados de altitude obtidos nas diferentes escalas.

**Figura 46 - Modelo Digital do Terreno gerado com curvas de nível na escala 1:50.000 e com pixel de 10m x 10m**



Fonte: Produzido pelo autor.

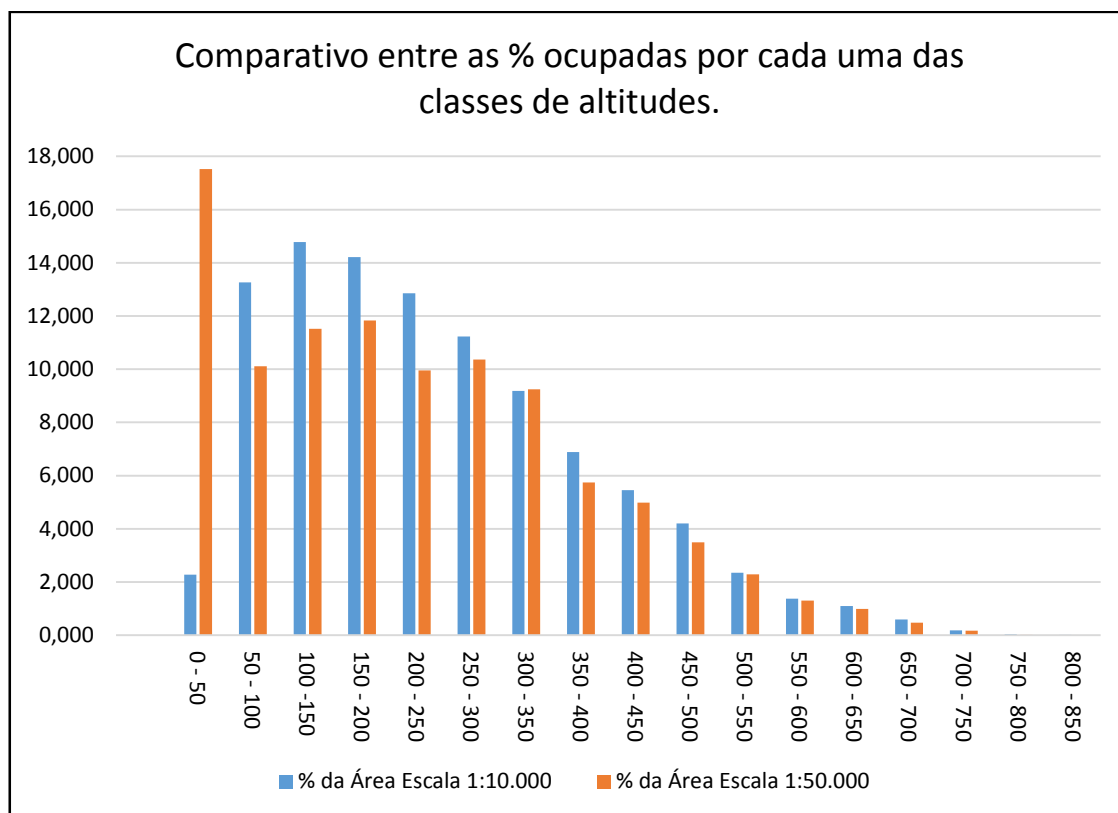
**Quadro 11 - Porcentagem corresponde a área ocupada por cada uma das classes de altitudes**

Classes de Altitudes (m)	% da Área	
	Escala 1:10.000 (Mais detalhada)	Escala 1:50.000 (Menos detalhada)
0 - 50	2,281	17,522
50 - 100	13,262	10,114
100 - 150	14,783	11,519
150 - 200	14,217	11,827
200 - 250	12,859	9,951
250 - 300	11,233	10,361
300 - 350	9,185	9,239
350 - 400	6,881	5,747
400 - 450	5,451	4,990
450 - 500	4,200	3,486
500 - 550	2,354	2,295
550 - 600	1,377	1,297
600 - 650	1,103	0,995
650 - 700	0,587	0,477
700 - 750	0,185	0,166
750 - 800	0,037	0,013
800 - 850	0,004	0,000

Fonte: Produzido pelo autor.

Quanto aos resultados obtidos verifica-se um claro “achatamento” do modelo gerado em escala menor, enquanto a elevação máxima do MDT gerado na escala 1:10.000 por Sbroglia (2015), alcança aproximadamente 814m, o MDT na escala 1:50.000 atinge apenas a altitude de 792,16. Este “achatamento” também pode ser verificado no quadro 11, onde nota-se que a ocorrência de *pixels* classificados na classe “0 – 50” (menor classe de altitude) aumenta em mais de 15% na escala 1:50.000 quando comparado a escala 1:10.000. Nas demais classes de altitude, salvo a classe “300 – 350” onde os resultados são praticamente os mesmos, observa-se uma diminuição no números de *pixels* correspondentes a escala 1:50.000.

**Gráfico 1 – Comparativo entre as porcentagens ocupadas por cada uma das classes de altitudes**



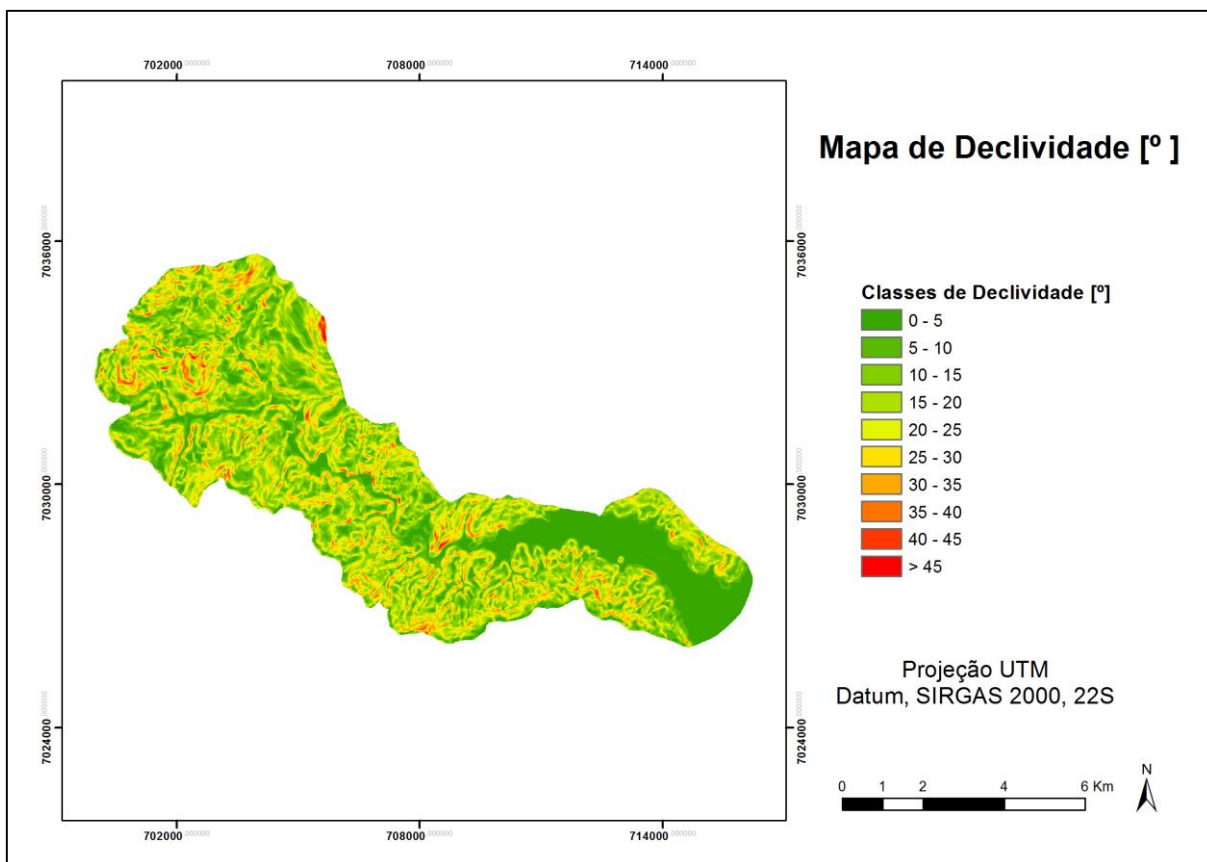
Fonte: Produzido pelo autor

Salienta-se ainda que, a partir do Gráfico 1 é possível notar que nas classes com altitudes mais elevadas, acima de 500m, a variação entre o número de pixels dos MDTs é bem inferior quando comparadas as classes de menores altitudes. Sendo assim, observa-se uma maior influência da escala nas classes de menores altitudes (inferiores a 500m).

## 6.2 Mapa de Declividade

O mapa de declividades da microbacia do Ribeirão do Baú, elaborado na escala 1:50.000 e classificado em classes de 5 em 5 graus, encontra-se apresentado na Figura 47. Este mapa foi analisado com a declividade em graus uma vez que a modelagem com o *SHALSTAB* também o utiliza desta forma.

Figura 47 – Mapa de Declividade em graus da microbacia do Ribeirão do Baú



Fonte: Produzido pelo autor

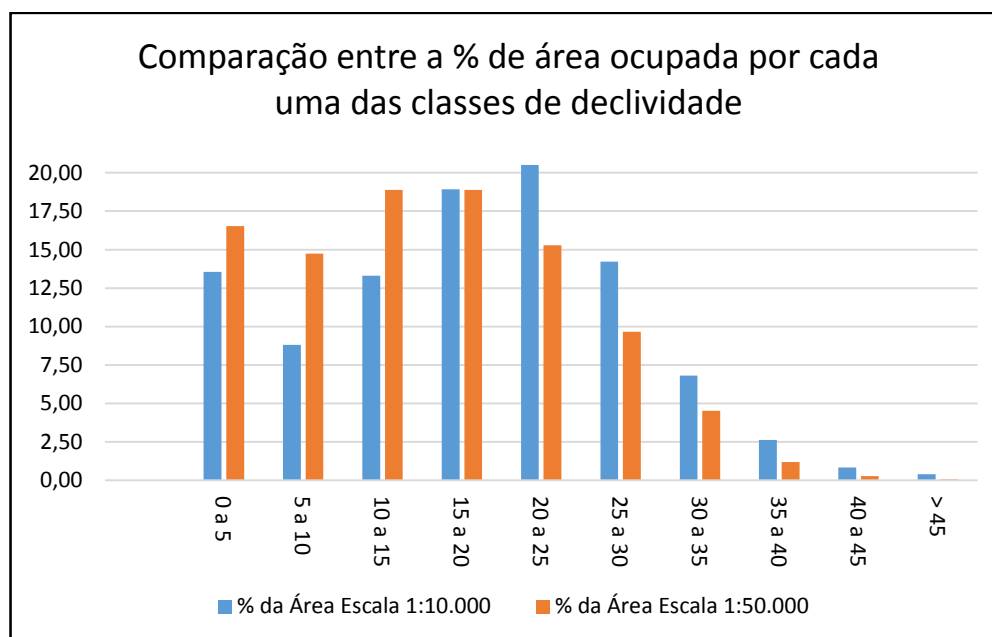
O Quadro 12, mostra a porcentagem da área correspondente a cada uma das classes de declividades tanto para o mapa gerado neste estudo (na escala 1:50.000) quanto para o mapa de declividade gerado na escala 1:10.000 e classificado nas mesmas classes com intervalos de 5°, além da porcentagem acumulada de área para ambas as classes. As porcentagens obtidas na diferentes escalas também estão representadas no Gráfico 2, facilitando a comparação entre os dados.

**Quadro 12 - Porcentagem de área correspondente a cada uma das classes de declividade e Porcentagem acumulada.**

Classes de Declividade (°)	% da Área		% da Área Acumulada	
	Escala 1:10.000	Escala 1:50.000	Escala 1:10.000	Escala 1:50.000
0 a 5	13,546	16,528	13,546	16,528
5 a 10	8,816	14,731	22,362	31,259
10 a 15	13,310	18,875	35,672	50,134
15 a 20	18,927	18,872	54,599	69,006
20 a 25	20,501	15,283	75,100	84,288
25 a 30	14,228	9,657	89,329	93,945
30 a 35	6,821	4,514	96,150	98,459
35 a 40	2,620	1,200	98,770	99,659
40 a 45	0,835	0,274	99,605	99,932
> 45	0,395	0,068	100,000	100,000

Fonte: Produzido pelo autor.

**Gráfico 2 - Comparação entre as % de áreas corresponde às classes de declividade.**



Fonte: Produzido pelo autor.

Verificou-se com base no Quadro 12, que os valores de declividade obtidos pelo mapa de escala 1:50.000 são inferiores aos obtidos na escala 1:10.000 a partir do intervalo de 20 a 25°. Este fato fica bem evidenciado no Quadro referente a área acumulada (Quadro 13), onde foi possível observar um aumento de até 15% das áreas referentes às classes com declividades inferiores a 20° na escala 1:10.000, o que

culmina numa brusca diminuição das áreas de maior declividade, como pode ser melhor observado no Gráfico 2.

Ainda analisando o Quadro 12, nota-se ainda que, 89% da microbacia possui declividades inferiores a 30° na escala 1:10.000, enquanto que, na escala 1:50.000 este valor é de aproximadamente 93%. Por sua vez, nas classes com declives superiores a 45° foi identificado aproximadamente 0,4% na escala 1:10.000 e na escala 1:50.000 esse valor não alcançou nem ao menos 0,1% da área da bacia.

De uma forma geral, observou-se que com o emprego da escala 1:50.000 houve uma redução nas declividades da microbacia, logo espera-se também uma redução nas áreas de instabilidade.

### **6.3 Modelo *SHALSTAB***

Os mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais da microbacia do Ribeirão do Baú, elaborados no *SHALSTAB*, na escala 1:50.000, para as profundidades de solo de 3, 5, 7, 10, 12 e 15m, estão respectivamente apresentados nas Figuras 48, 49, 50, 51, 52 e 53.

Figura 48 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 3m)

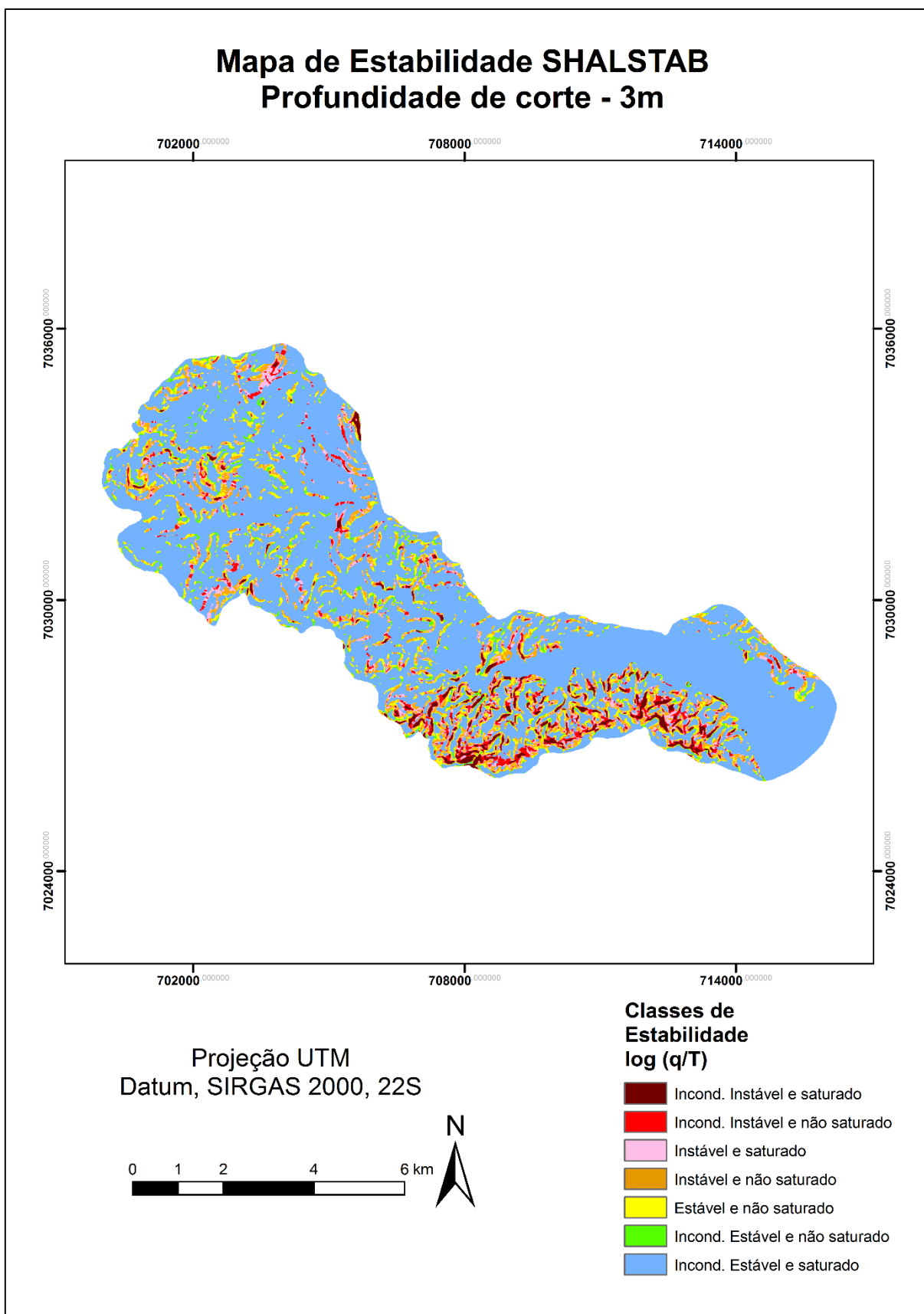




Figura 49 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 5m)

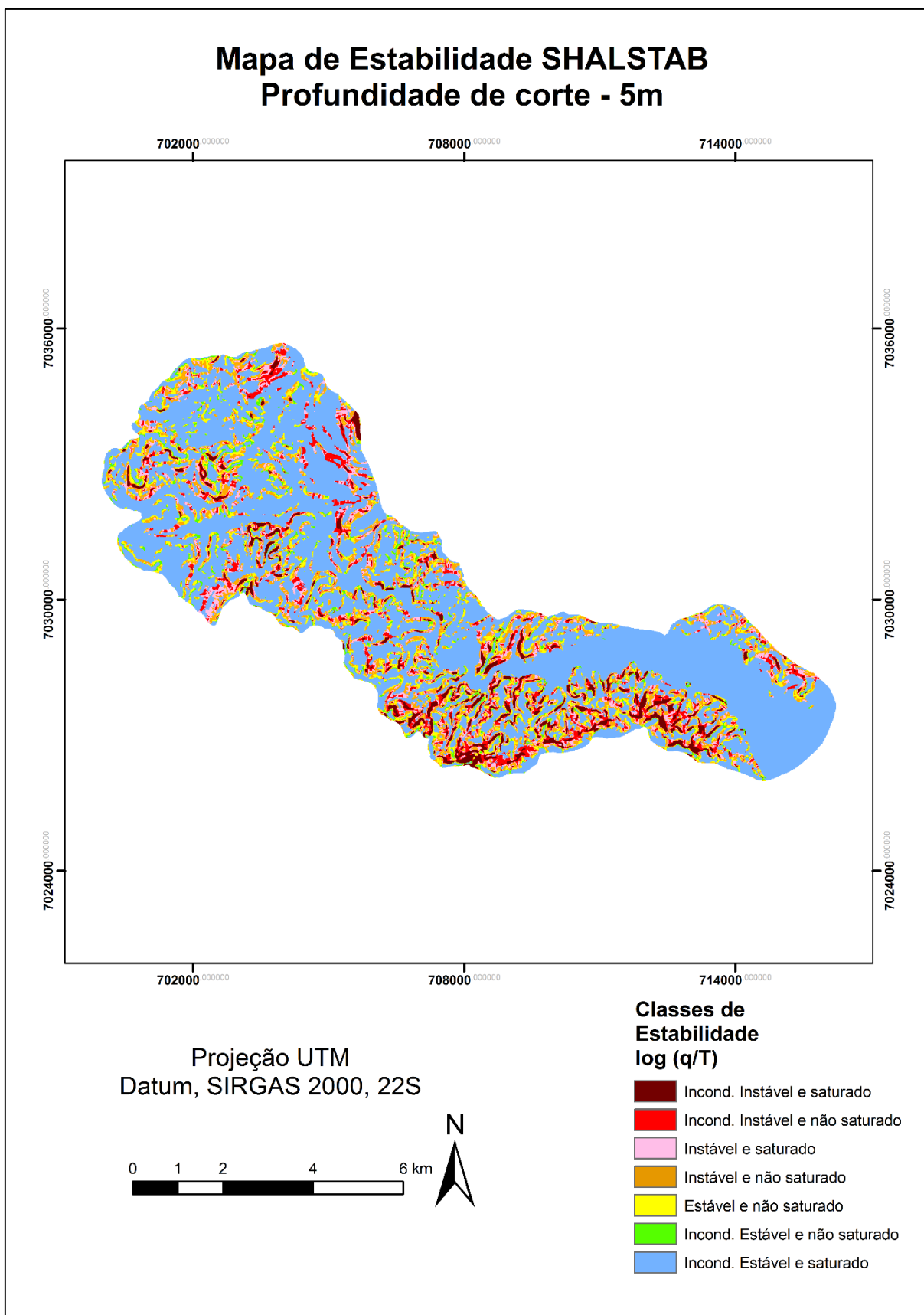


Figura 50 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 7m)

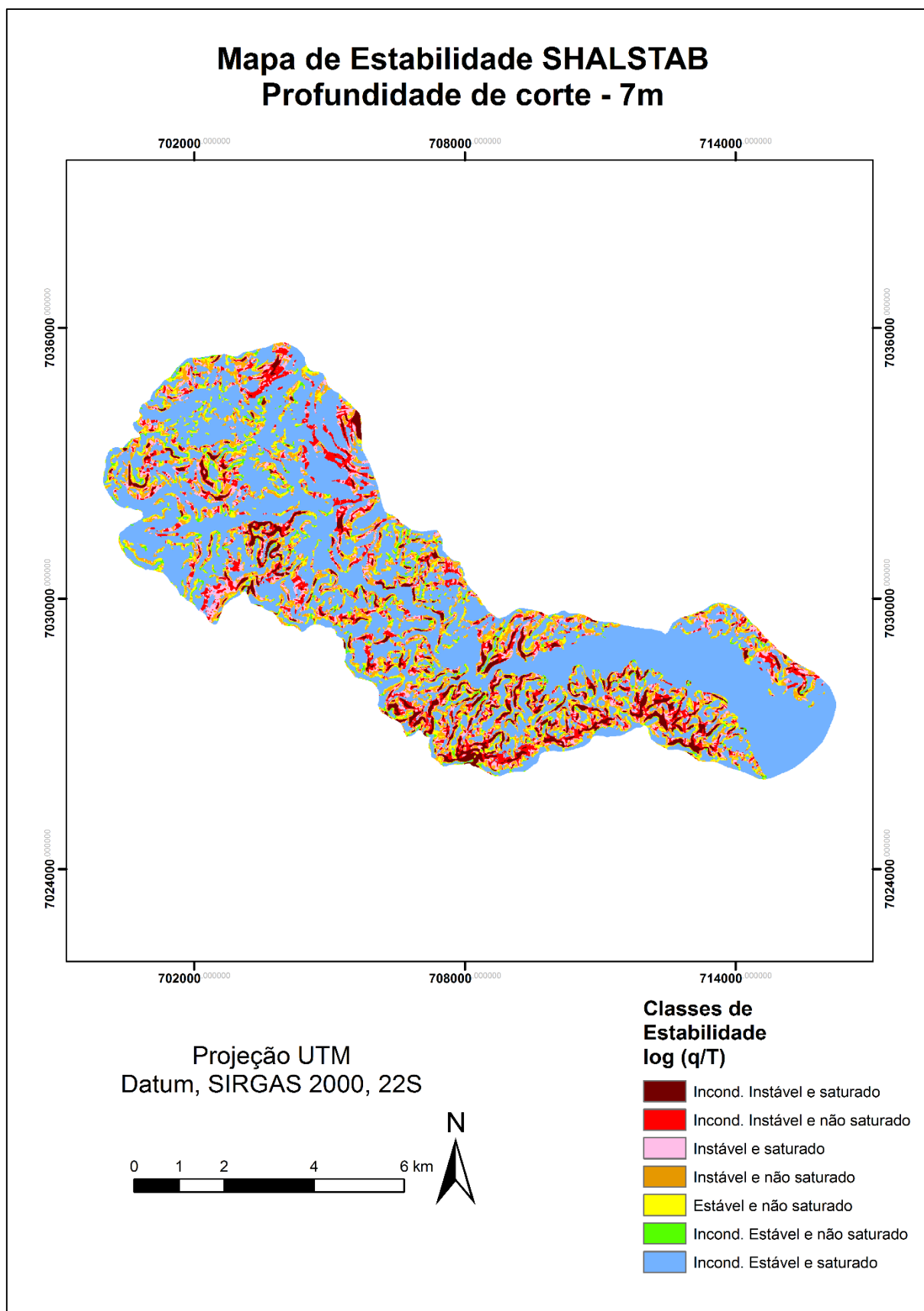


Figura 51 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000  
(Profundidade de solo de 10m)

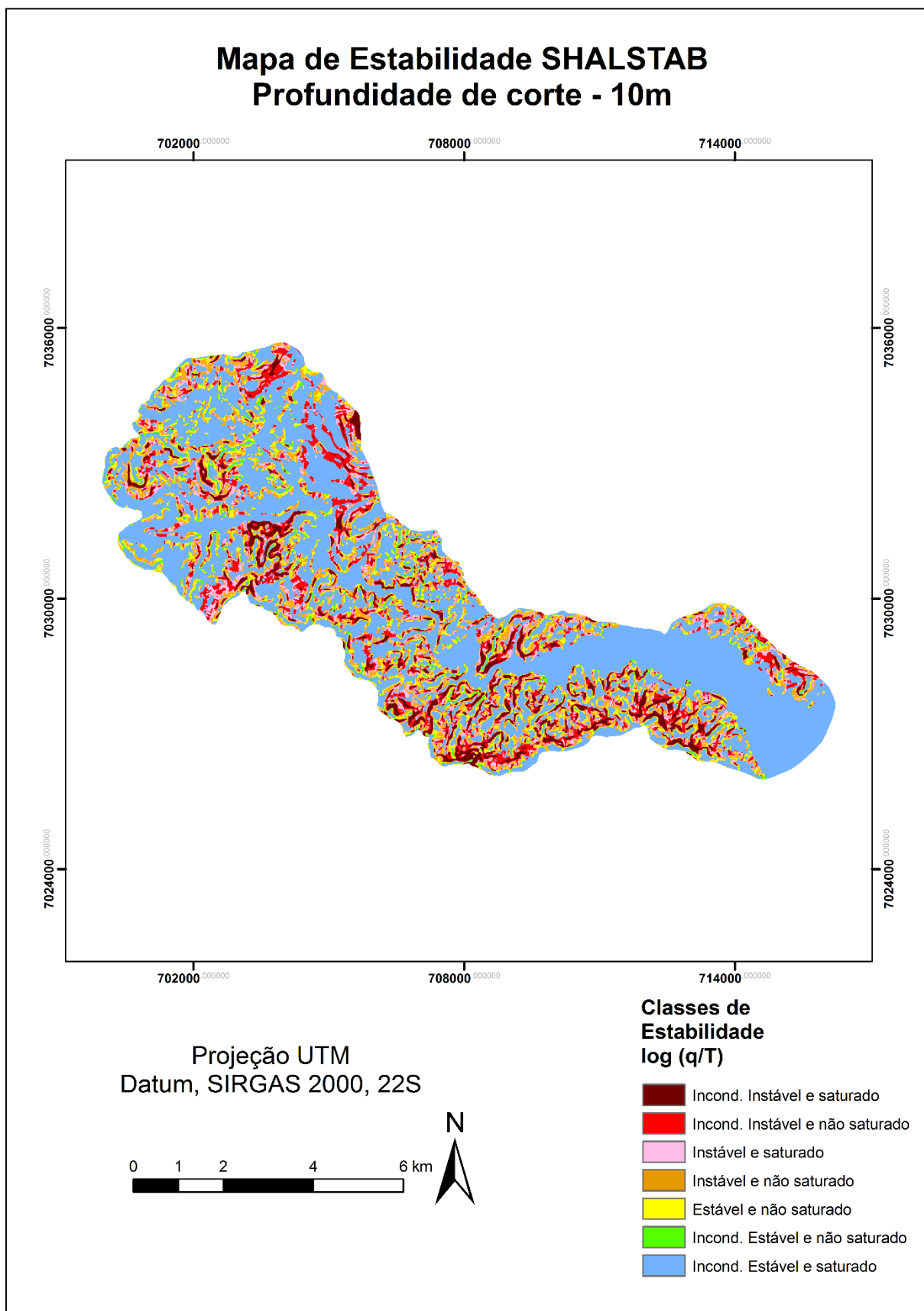


Figura 52 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 12m)

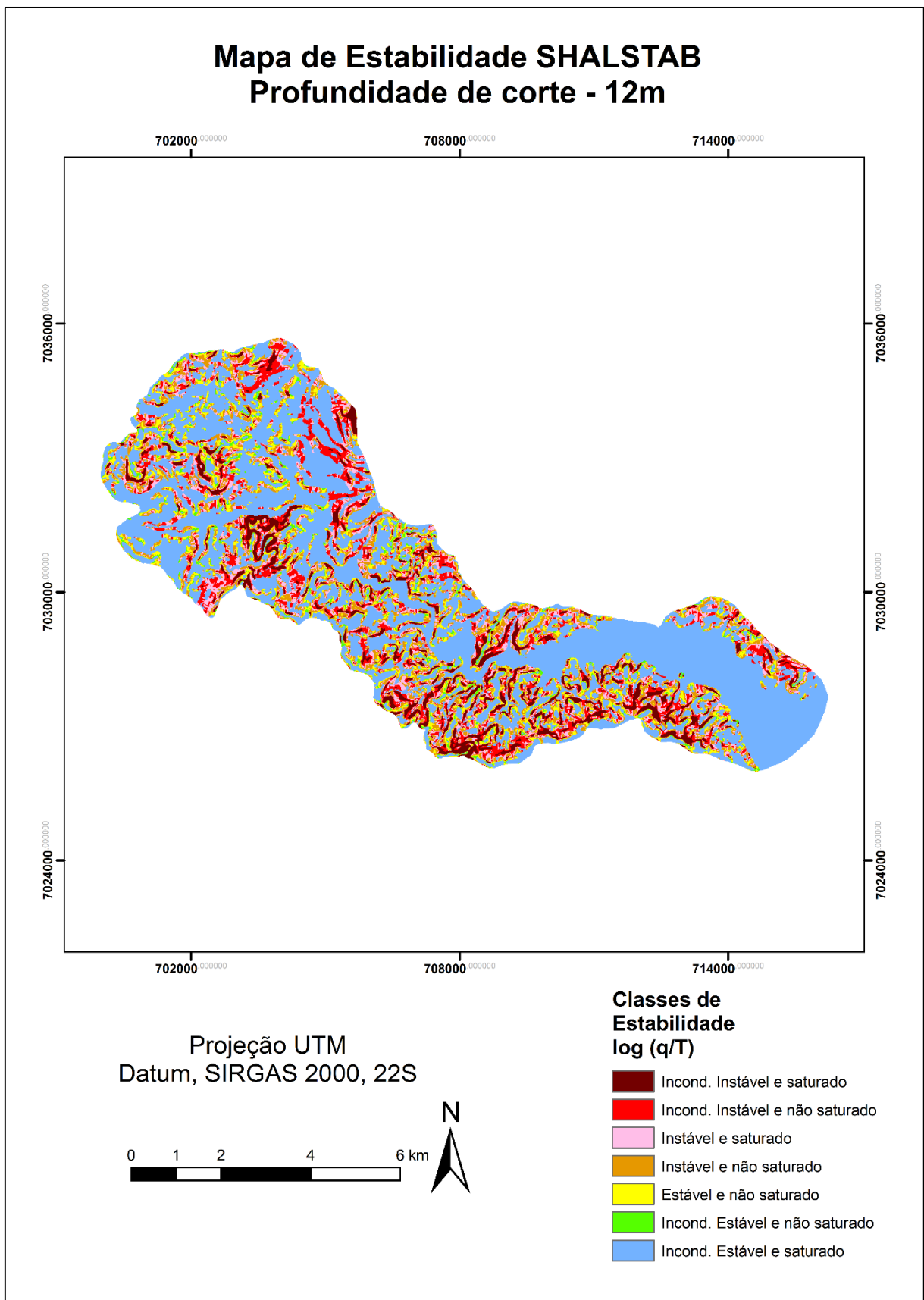
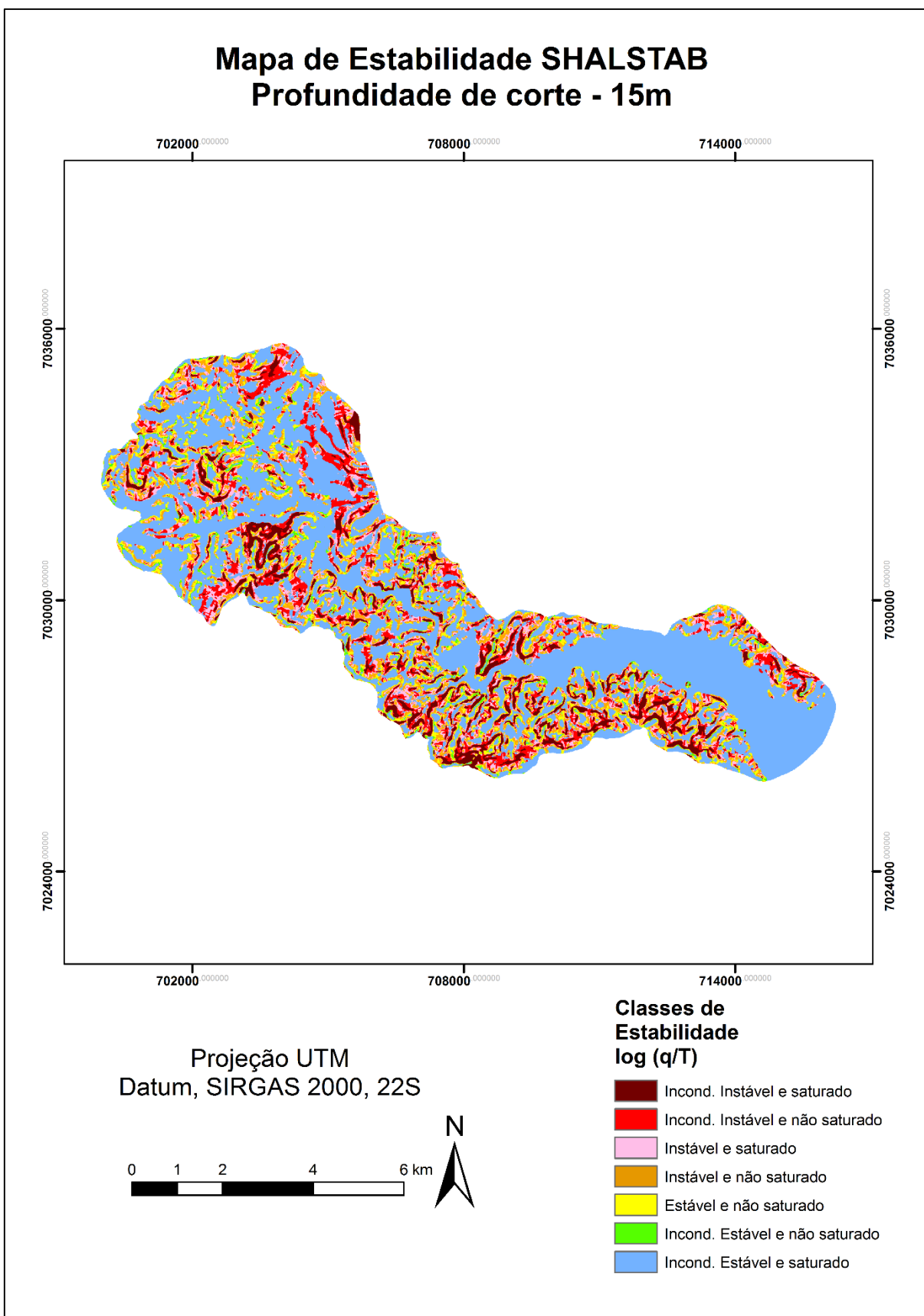
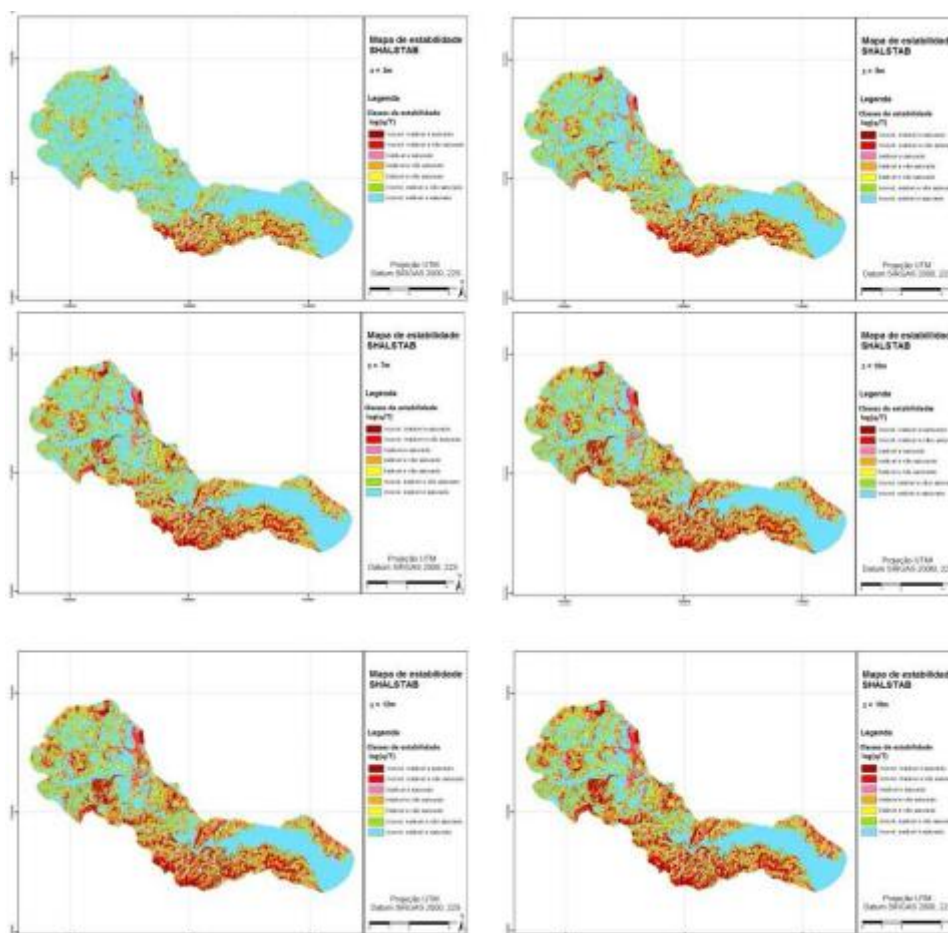


Figura 53 - Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na escala 1:50.000 (Profundidade de solo de 15m)



Os mapas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais obtidos por Sbroglia (2015) na escala 1:10.000, são apresentados de forma reduzida na Figura 54:

**Figura 54: Mapas com as classes de estabilidade do *SHALSTAB* para as profundidades de solo em estudo na microbacia do Ribeirão do Baú.**



Fonte: Sbroglia, 2015.

Os Quadros 13 e 14, apresentam as porcentagens de área da microbacia ocupada por cada uma das classes de estabilidade do modelo *SHALSTAB*, listadas (Tabela 5), em função das diferentes profundidades de solo analisadas. O Quadro 13 ilustra os resultados obtidos por Sbroglia (2015), com sua modelagem na escala 1:10.000 e pixels de 1m x 1m e Quadro 14 traz os resultados obtidos neste estudo, com a escala de 1:50.000 e pixels de 10m x 10m.

**Quadro 13 - Porcentagem da área da bacia pertencente às classes de estabilidade do *SHALSTAB* x Profundidade do solo (análise na escala 1:10.000)**

Classes de estabilidade do modelo <i>SHALSTAB</i>	Profundidade do solo (m)					
	z=3	z=5	z=7	z=10	z=12	z=15
Incond. Instável e saturado	4,5	7,8	9,9	11,9	12,7	13,5
Incond. Instável e não saturado	2,5	4,2	5,3	6,1	6,5	6,8
Instável e saturado	3,3	5,4	6,4	7,0	7,3	7,4
Instável e não saturado	7,1	9,9	10,8	11,2	11,3	11,4
Estável e não saturado	9,7	11,6	11,8	11,7	11,7	11,6
Incond. Estável e não saturado	15,3	16,3	16,0	15,6	15,4	15,2
Incond. Estável e saturado	57,7	44,7	39,8	36,4	35,2	34,1

Fonte: Quadro adaptado de Sbroglia (2015).

**Quadro 14 – Porcentagem da área da bacia pertencente às classes de estabilidade do *SHALSTAB* x Profundidade do solo (análise na escala 1:50.000)**

Classes de estabilidade do modelo <i>SHALSTAB</i>	Profundidade do solo (m)					
	z=3	z=5	z=7	z=10	z=12	z=15
Incond. Instável e saturado	2,5	4,4	5,8	7,0	7,5	8,1
Incond. Instável e não saturado	3,4	6,5	8,2	9,6	10,2	10,9
Instável e saturado	4,8	7,5	8,7	9,5	9,9	10,1
Instável e não saturado	7,9	10,5	11,3	11,6	11,6	11,7
Estável e não saturado	7,0	7,7	7,7	7,6	7,6	7,5
Incond. Estável e não saturado	2,5	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1
Incond. Estável e saturado	71,8	61,0	56,1	52,5	51,0	49,6

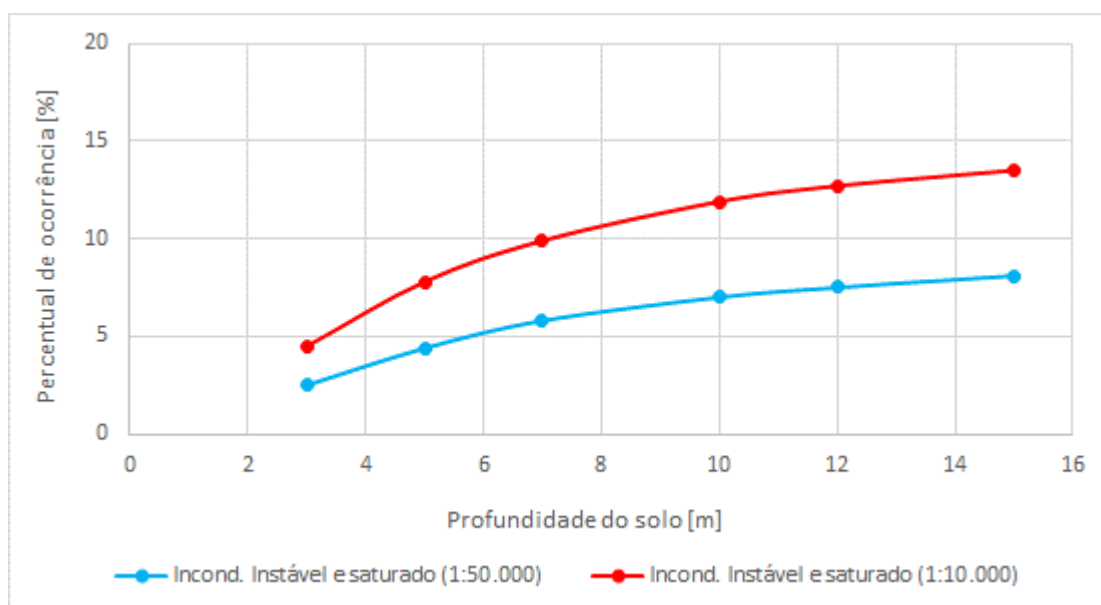
Fonte: Produzido pelo autor.

Observando os Quadros 13 e 14 percebe-se a variação dos resultados obtidos para as diferentes escalas utilizadas na modelagem *SHALSTAB*. Contudo, há alguns pontos a serem ressaltados, dentre eles o fato de que a modelagem na escala 1:50.000 gerou menos áreas consideradas Incondicionalmente instáveis e saturado, ou seja, a classe que representa a “pior” condição de uma encosta perante o risco de escorregamentos translacionais. Este fato ocorreu em todas as profundidades de solo, porém essa variação não é constante sendo cerca de 2% para a profundidade de 3m e de 5,4% para a profundidade de 15m.

Outro ponto a ressaltar é o enorme aumento das áreas consideradas Incondicionalmente estáveis e saturado, a classe de maior segurança quanto ao risco de escorregamentos translacionais, também na modelagem com a escala 1:50.000, quando comparada àquela de 1:10.000. Para uma análise mais clara desses

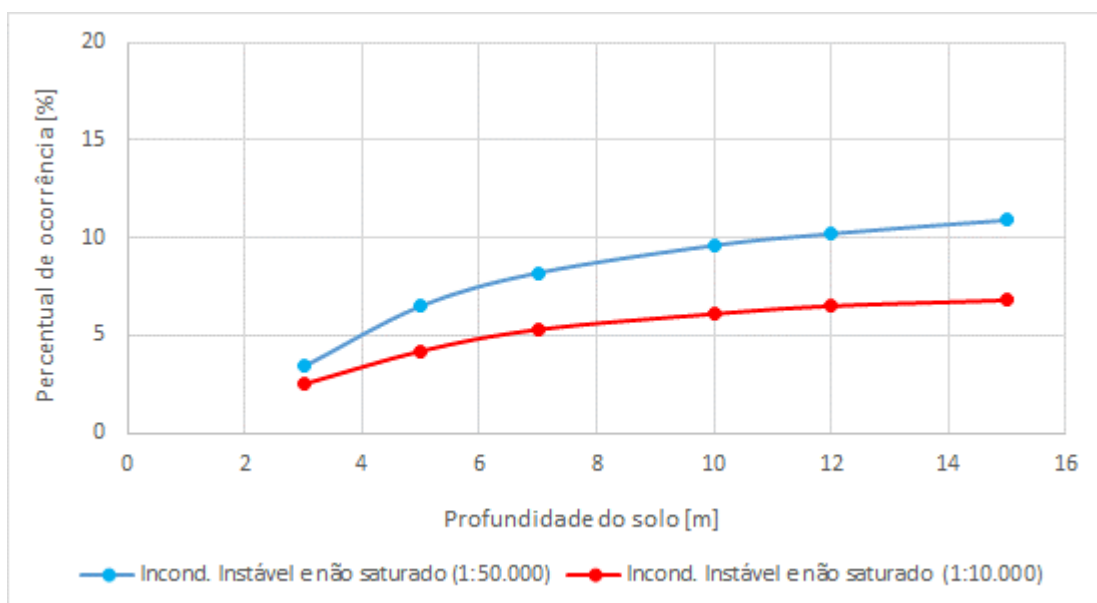
resultados, foram elaborados os Gráficos 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 que relacionam os percentuais de ocorrência de cada classe de estabilidade do *SHALSTAB* com a profundidade para as duas escalas de modelagem.

**Gráfico 3- Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente instável e saturado**



Fonte: Produzido pelo autor.

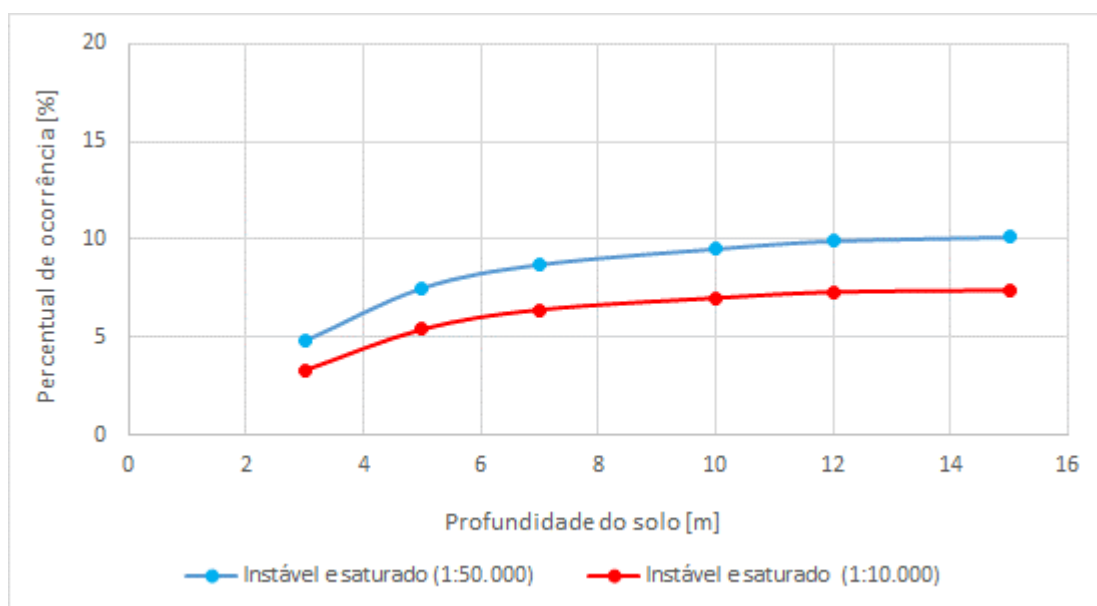
**Gráfico 4 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente instável e não saturado**



Fonte: Produzido pelo autor.

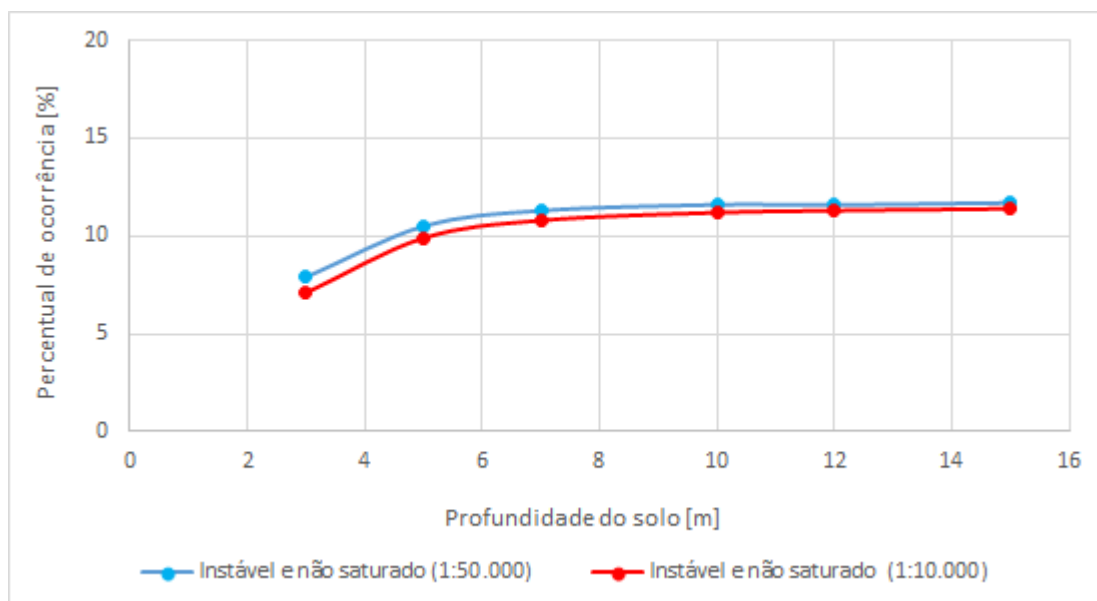


**Gráfico 5 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Instável e saturado**



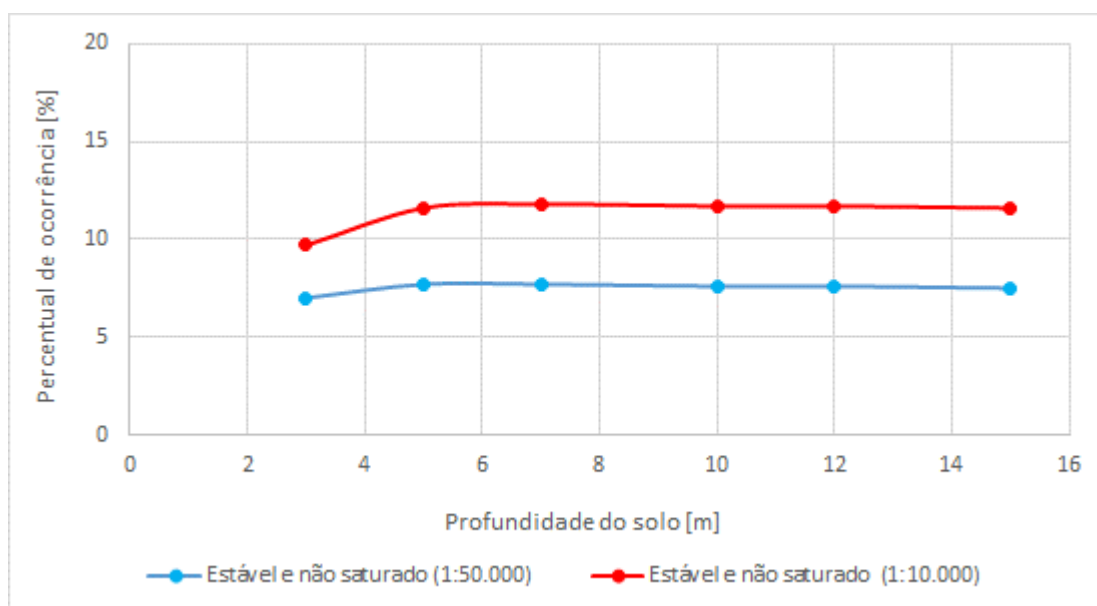
Fonte: Produzido pelo autor.

**Gráfico 6 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Instável e não saturado**



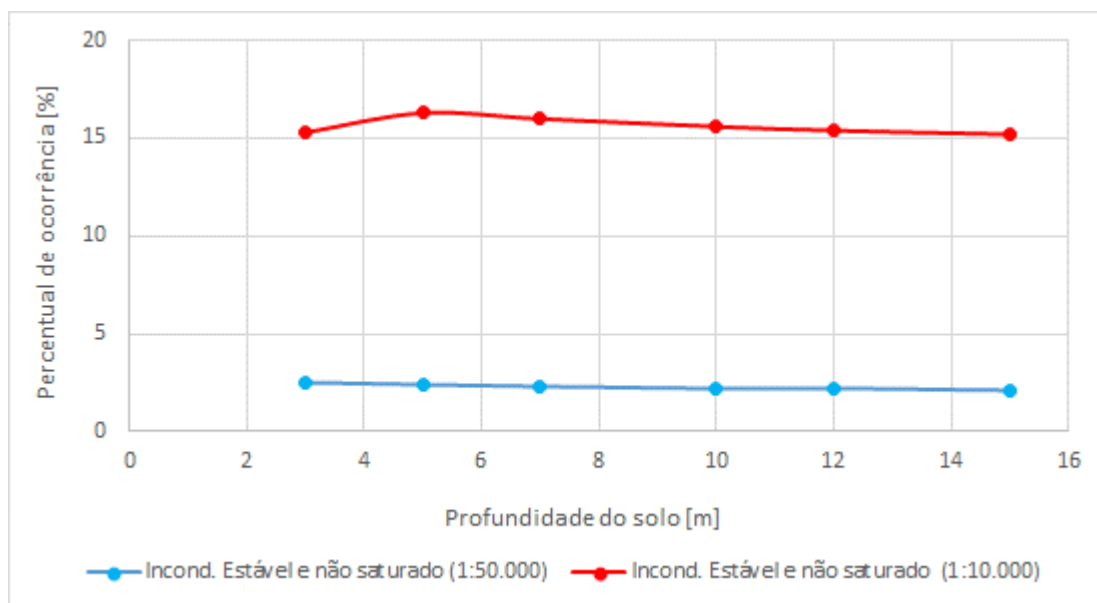
Fonte: Produzido pelo autor.

**Gráfico 7 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Estável e não saturado**



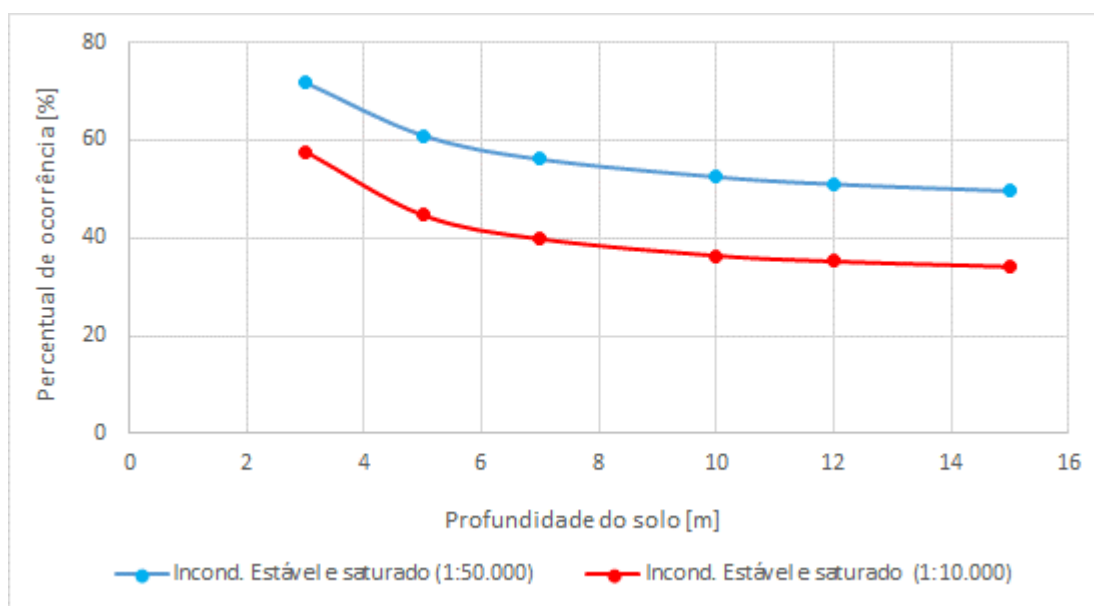
Fonte: Produzido pelo autor.

**Gráfico 8 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente estável e não saturado**



Fonte: Produzido pelo autor.

**Gráfico 9 - Comparativo entre os percentuais de área de cada escala referente a classe Incondicionalmente estável e saturado**



Fonte: Produzido pelo autor.

Conforme citado anteriormente, o aumento das áreas mais seguras e a diminuição da área mais suscetíveis aos escorregamentos translacionais, indica que possivelmente a modelagem com a escala 1:50.000 resulta em um mapa de menor suscetibilidade a escorregamentos quando comparada a modelagem com a escala 1:10.000. Porém, observando os Gráficos 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 percebe-se que este fato não ocorre em todas as classes intermediárias de estabilidade, logo a afirmação acima refere-se somente as classes extremas. Tendo conta este fato e visando uma análise geral dos resultados, foram elaborados os Quadros 15 e 16, os quais agrupam as classes do *SHALSTAB* em dois grandes grupos, instáveis e estáveis. Pede-se que o grupo instável abrange as seguintes classes: Incondicionalmente instável e saturado; Incondicionalmente instável e não saturado; Instável e saturado; Instável e não saturado. Por sua vez, o grupo estável compreende as seguintes classes: Estável e não saturado; Incondicionalmente estável e não saturado; Incondicionalmente estável e saturado. Também foram elaborados os Gráficos 10 e 11 para facilitar a interpretação dos dados.

**Quadros 15 - Porcentagens de área da microbacia correspondentes às classes estabilidade do *SHALSTAB* para a escala 1:50.000**

Classes de estabilidade <i>SHALSTAB</i> Escala 1:50.000	Profundidade do solo (m)					
	z=3	z=5	z=7	z=10	z=12	z=15
Instáveis	18,6	28,9	33,9	37,7	39,2	40,8
Estáveis	81,4	71,1	66,1	62,3	60,8	59,2

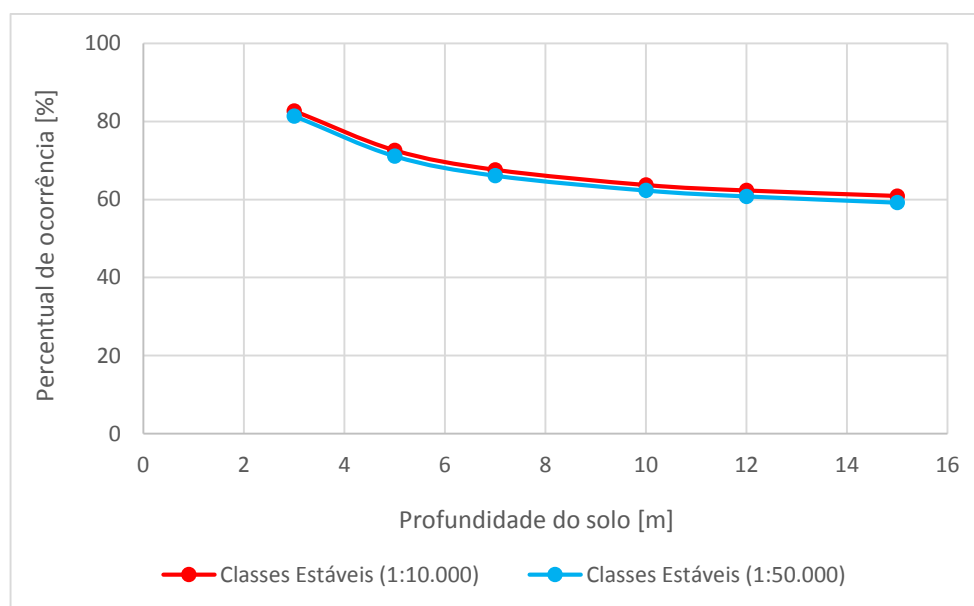
Fonte: Produzido pelo autor.

**Quadros 16 - Porcentagens de área da microbacia correspondentes às classes estabilidade do *SHALSTAB* para a escala 1:10.000**

Classes de estabilidade <i>SHALSTAB</i> Escala 1:10.000	Profundidade do solo (m)					
	z=3	z=5	z=7	z=10	z=12	z=15
Instáveis	17,4	27,3	32,4	36,2	37,8	39,1
Estáveis	82,7	72,6	67,6	63,7	62,3	60,9

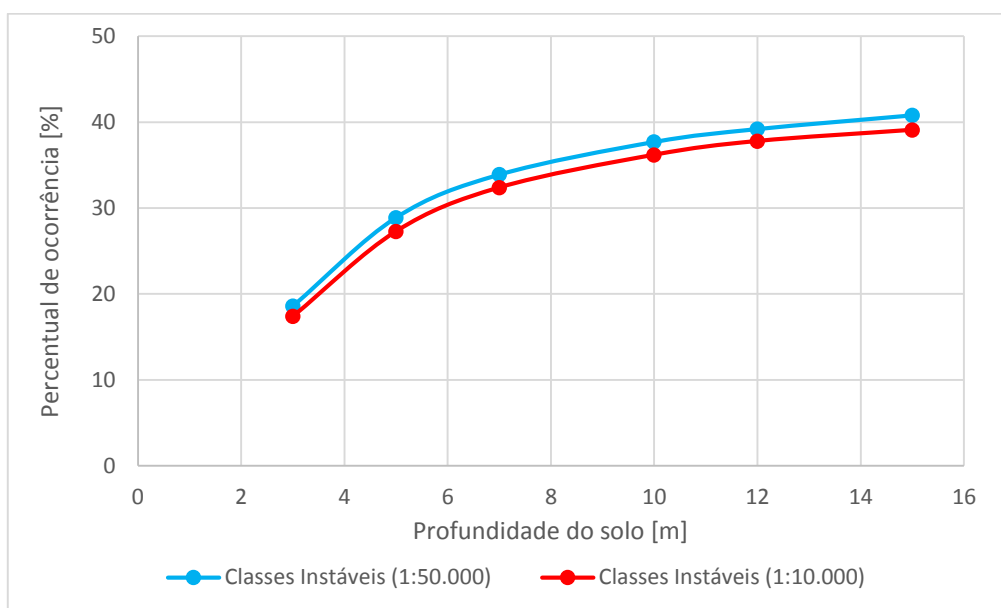
Fonte: Produzido pelo autor.

**Gráfico 10 - Comparativo entre os percentuais de área referente às classes estáveis do *SHALSTAB* para as diferentes escalas**



Fonte: Produzido pelo autor.

**Gráfico 11 - Comparativo entre os percentuais de área referente às classes instáveis do *SHALSTAB* para as diferentes escalas**

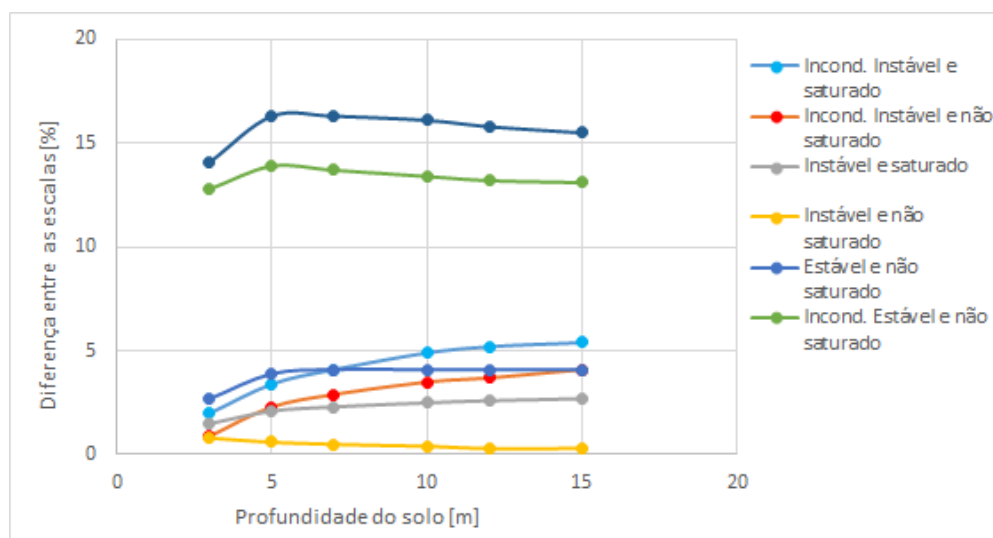


Fonte: Produzido pelo autor.

Analisando os dados expostos nos Quadros 15 e 16 e nos Gráficos 10 e 11 pode-se observar que ao contrário do que a afirmação anterior apontava, a modelagem com os dados na escala 1:50.000 apresentou resultados mais conservadores do que aqueles elaborados na escala 1:10.000, ou seja, resultou em uma microbacia com maior percentual de ocorrência de classes instáveis. Observa-se, no entanto, que a diferença no percentual de ocorrência das classes estáveis e instáveis, comparando as duas escalas, não chegou a 2%.

No âmbito de visualizar a diferença entre os percentuais de ocorrência de cada classe de estabilidade do *SHALSTAB*, comparando as duas escalas em análise (1:10.000 e 1:50.000) foi elaborado o Gráfico 12.

**Gráfico 12 – Diferença entre os percentuais de área referente às classes do *SHALSTAB* para as diferentes escalas**

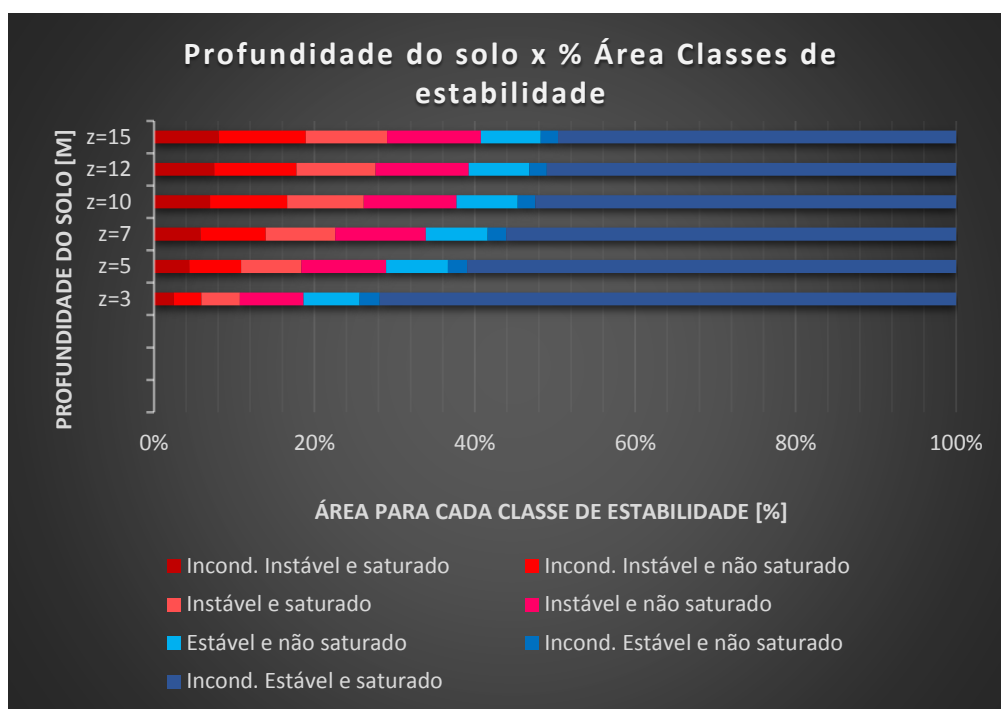


Fonte: Produzido pelo autor.

Observa-se que as maiores diferenças ocorreram na classe Estável e não saturado, seguida da classe Incondicionalmente estável e não saturado, ambas apresentaram alterações nos valores em função da escala superiores a 10%. As demais classes apresentaram alterações praticamente inferiores a 5%. Por sua vez, a classe Instável e não saturado foi a menos afetada pela alteração da escala.

Complementando as análises foi elaborado o Gráfico 13 que relaciona a profundidade do solo com o percentual de ocorrência de cada classe de estabilidade do *SHALSTAB*. Neste gráfico à esquerda, em tons “avermelhados”, estão as classes que indicam instabilidade e a direita, em tons “azulados”, as classes que indicam estabilidade.

**Gráfico 13 - Profundidade do solo x percentual de área ocupada pelas classes de estabilidade**



Fonte: Produzido pelo autor.

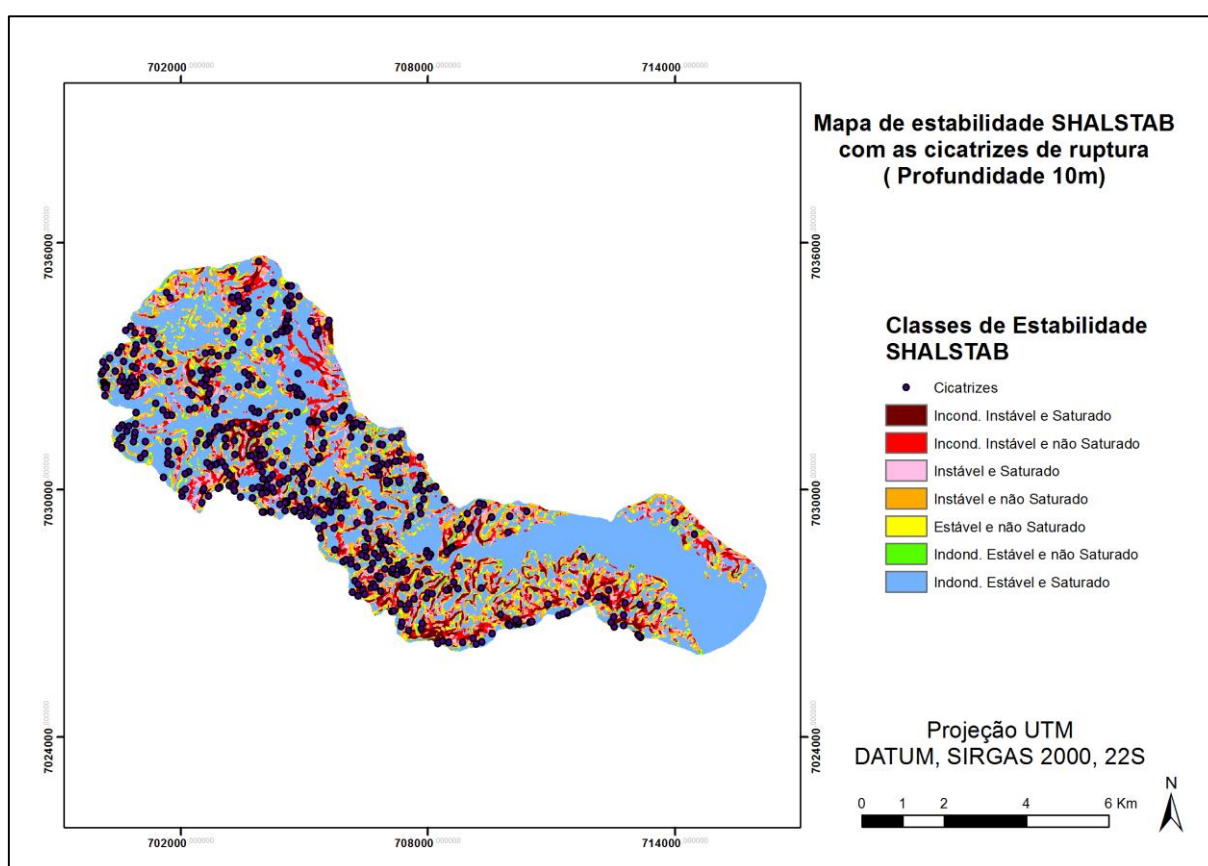
Ressalta-se que o *SHALSTAB* é um modelo que se mostra mais eficaz para profundidades de solos menores, ou seja para escorregamentos rasos, isto fica evidenciado por meio dos valores obtidos neste gráfico (Gráfico 13), onde percebe-se que quando a profundidade do solo ultrapassa os 10m, a variação dos resultados obtidos quanto às classes de estabilidade são muito pequenas.

### **6.3.1 Mapa de suscetibilidade representativo da microbacia do Ribeirão do Baú**

Sbroglia (2015) em seu trabalho fez a escolha dos resultados da modelagem do *SHALSTAB* com a profundidade de 10m para representar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais da microbacia do Ribeirão do Baú. Para a escolha desta, a referida autora partiu da premissa de que o modelo apresenta resultados mais eficazes quando a maioria dos escorregamentos ocorridos em campo (representados pelas cicatrizes dos escorregamentos) encontram-se nas áreas consideradas instáveis pelo modelo e também foi esta a profundidade de solo verificada em campo na maioria dos escorregamentos (10m a 15m).

Na modelagem com os dados na escala 1:50.000 o mapa apresentado na Figura 55 é aquele que representa o cenário de suscetibilidade a escorregamentos translacionais com a profundidade de solo de 10m. Este mapa apresenta as cicatrizes dos escorregamentos mapeados sobrepostas às classes de estabilidade geradas pelo *SHALSTAB*. Ressalta-se que os pontos que representam os escorregamentos correspondem ao início da ruptura (estimado).

**Figura 55 - Mapa de estabilidade *SHALSTAB* para a profundidade de 10m com as cicatrizes de escorregamentos sobrepostas.**



Fonte: Produzido pelo autor

O Quadro 17 apresenta a quantia de escorregamentos contabilizados em cada uma das classes de estabilidade propostas pelo *SHALSTAB* na modelagem com a profundidade de 10m, além de apresentar o número de escorregamentos dividido pela área ocupada pela classe de estabilidade em que se localizam.



**Quadros 17: Análise da eficácia do modelo *SHALSTAB* com 1:50.000 na profundidade de 10m.**

<b>Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB</b>	<b>N° de escorregamentos</b>	<b>%</b>	<b>% acumulada</b>	<b>N° de desliz./área</b>
Incond. Instável e saturado	60	11,41	11,41	8,56
Incond. Instável e não saturado	35	6,65	18,06	3,64
Instável e saturado	56	10,65	28,71	5,87
Instável e não saturado	78	14,83	43,54	6,75
Estável e não saturado	62	11,79	55,32	8,14
Incond. Estável e não saturado	26	4,94	60,27	11,81
Incond. Estável e saturado	209	39,73	100,00	3,98

Fonte: Produzido pelo autor

Observa-se que os resultados obtidos na escala 1:50.000 apresentaram cerca de 55% dos escorregamentos mapeados nas áreas por ele impostas como estáveis, sendo quase 40% na classe considerada a mais segura quanto aos escorregamentos. Outro fator a se ressaltar, é que apenas 18,06% dos escorregamentos aconteceram nas duas classes de maior risco. Quando analisado o número de escorregamentos pela porcentagem de área da microbacia ocupada pela respectiva classe de estabilidade, os resultados mostram-se insatisfatórios, pois apesar da classe de maior risco apresentar um alto índice de deslizamento/área, isso também ocorre nas classes estáveis do modelo.

O Quadro 18 apresenta os resultados da validação da modelagem realizada por Sbroglia (2015) utilizando a escala 1:10.000.

**Quadro 18 - Análise da eficácia do modelo *SHALSTAB* com 1:10.000 na profundidade de 10m**

<b>Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB</b>	<b>N° de deslizamentos</b>	<b>%</b>	<b>% acumulada</b>	<b>N° de desliz./área</b>
Incond. Instável e saturado	148	28,14	28,14	12,44
Incond. Instável e não saturado	56	10,65	38,78	9,18
Instável e saturado	50	9,51	48,29	7,14
Instável e não saturado	65	12,36	60,65	5,80
Estável e não saturado	70	13,31	73,95	5,98
Incond. Estável e não saturado	92	17,49	91,44	5,90
Incond. Estável e saturado	45	8,56	100,00	1,24

Fonte: Adaptada de Sbroglia, 2015.

Comparando os resultados obtidos neste estudo com aqueles de Sbroglia (2015), observa-se que a modelagem na escala 1:50.000 com a profundidade de solo

de 10m apresentou menor compatibilidade com as cicatrizes mapeadas. Enquanto que Sbroglia (2015), obteve 60,65% dos escorregamentos localizados nas classes consideradas instáveis pelo modelo, nos resultados obtidos neste estudo, apenas 43,54% dos escorregamentos se enquadraram nestas mesmas classes, sendo que dos 60,65%, aproximadamente dois terços deste, quase 40% estão localizados nas duas classes de maior risco, contra apenas 18% da modelagem de escala inferior. Sendo assim, sugere-se que as simulações com as demais profundidades de solo também sejam confrontadas com as cicatrizes dos escorregamentos, para então identificar o conjunto das variáveis que melhor representa a microbacia do Ribeirão do Baú com dados na escala 1:50.000.

Para uma análise mais elaborada da eficácia da modelagem na escala de 1:50.000, os quadros 19, 20, 21, 22, 23 e 24 trazem os resultados obtidos por meio da sobreposição das cicatrizes mapeadas sobre os mapas de suscetibilidade da bacia para cada uma das outras 5 profundidades analisadas (3, 5, 7, 12 e 15m).

**Quadro 19 - Análise da eficácia do modelo SHALSTAB com 1:50.000 na profundidade de 3m**

Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB	z3			
	Escorreg	% esc	% acumu	esc/area
Incond. Instável e saturado	21	4,00	4,00	8,48
Incond. Instável e não saturado	12	2,29	6,29	3,50
Instável e saturado	16	3,05	9,33	3,33
Instável e não saturado	36	6,86	16,19	4,54
Estável e não saturado	75	14,29	30,48	10,74
Incond. Estável e não saturado	23	4,38	34,86	9,03
Incond. Estável e saturado	342	65,14	100,00	4,76
			<b>Escorreg/área inst</b>	<b>19,85</b>

**Quadro 20 - Análise da eficácia do modelo SHALSTAB com 1:50.000 na profundidade de 5m**

Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB	z5			
	Escorreg	% esc	% acumu	esc/area
Incond. Instável e saturado	39	7,43	7,43	8,84
Incond. Instável e não saturado	22	4,19	11,62	3,41
Instável e saturado	29	5,52	17,14	3,86
Instável e não saturado	84	16,00	33,14	7,96
Estável e não saturado	60	11,43	44,57	7,76
Incond. Estável e não saturado	31	5,90	50,48	13,00
Incond. Estável e saturado	260	49,52	100,00	4,27
		Escorreg/área inst		24,07

**Quadro 21 - Análise da eficácia do modelo SHALSTAB com 1:50.000 na profundidade de 7m**

Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB	z7			
	Escorreg	% esc	% acumu	esc/area
Incond. Instável e saturado	47	8,95	8,95	8,12
Incond. Instável e não saturado	32	6,10	15,05	3,92
Instável e saturado	44	8,38	23,43	5,08
Instável e não saturado	79	15,05	38,48	6,99
Estável e não saturado	65	12,38	50,86	8,44
Incond. Estável e não saturado	28	5,33	56,19	12,26
Incond. Estável e saturado	230	43,81	100,00	4,10
		Escorreg/área inst		24,11

**Quadro 22 - Análise da eficácia do modelo SHALSTAB com 1:50.000 na profundidade de 12m**

Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB	z12			
	Escorreg	% esc	% acumu	esc/area
Incond. Instável e saturado	62	11,81	11,81	8,24
Incond. Instável e não saturado	40	7,62	19,43	3,90
Instável e saturado	50	9,52	28,95	5,07
Instável e não saturado	85	16,19	45,14	7,32
Estável e não saturado	63	12,00	57,14	8,34
Incond. Estável e não saturado	25	4,76	61,90	11,54
Incond. Estável e saturado	200	38,10	100,00	3,92
		Escorreg/área inst		24,53

**Quadro 23 - Análise da eficácia do modelo *SHALSTAB* com 1:50.000 na profundidade de 15m**

Classes de estabilidade do modelo <i>SHALSTAB</i>	z7			
	Escorreg	% esc	% acumu	esc/area
Incond. Instável e saturado	68	12,95	12,95	8,41
Incond. Instável e não saturado	43	8,19	21,14	3,96
Instável e saturado	52	9,90	31,05	5,13
Instável e não saturado	83	15,81	46,86	7,10
Estável e não saturado	63	12,00	58,86	8,43
Incond. Estável e não saturado	23	4,38	63,24	10,82
Incond. Estável e saturado	193	36,76	100,00	3,89
			<b>Escorreg/área inst</b>	<b>24,60</b>

Como pode observar-se nos quadros acima, em todas as profundidades analisadas com o *SHALSTAB* os resultados obtidos foram de maneira geral insatisfatórios no que tange a eficácia do modelo em prever as áreas suscetíveis a escorregamentos. Ressalta-se porém relativa melhora na qualidade na análise com o aumento da profundidade, comparando os resultados obtidos na profundidade de 3m com aqueles obtidos com profundidade do solo igual a 15m, verificamos um aumento de 4,75% na relação escorregamentos e áreas instáveis.

Porém, como já mencionado anteriormente, o modelo não apresenta variações significativas em seus resultados quando se atingem profundidades maiores, para exemplificar, comparam-se os resultados obtidos na relação escorregamento sobre áreas instáveis do modelo para as profundidades de 10, 12 e 15m, sendo eles 24,58 para a profundidade de 10m, 24,53 para profundidade de 12m e por fim, 24,60 para 15m.

## 7 Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões desse estudo, além de sugestões de temas para trabalhos futuros.

Em relação a influência da escala no MDT, observou-se a diminuição da elevação máxima da bacia de 814m (escala 1:10.000) para 792,16m (escala 1:50.000). Também identificou-se a diminuição do percentual de ocorrência em todos os intervalos de altitude (definidos de 50 em 50m), exceto no intervalo de 0 a 50m, ao utilizar-se os dados na escala 1:50.000. Salienta-se que o intervalo de 0 a 50m foi o

que apresentou maior variação nos resultados com a alteração da escala. De uma forma geral, a utilização de uma escala de menor precisão aumentou em torno de 15% a ocorrência de altitudes de até 50m na microbacia em estudo e diminuiu até no máximo 3% a ocorrência dos demais intervalos, resultando em um MDT com altitudes menos acentuadas.

Por sua vez, o mapa de declividade do terreno apresentou-se menos íngreme a partir da diminuição da precisão da escala. Observou-se, com a utilização da escala 1:50.000, um aumento de aproximadamente 15% das declividades até 20°. Ressalta-se que o intervalo de declividade de 5 a 10° foi aquele que apresentou maior incremento (aproximadamente 6%), enquanto que a classe de 20 a 25° apresentou menor incremento (aproximadamente 5,3%).

Referindo-se a modelagem realizada com o *SHALSTAB*, observou-se que a diminuição da escala na modelagem influenciou de forma diferenciada as classes de estabilidade. Houve, por exemplo, uma diminuição na ocorrência da classe Incondicionalmente instável e saturado (classe de maior instabilidade) de no máximo 5% (na profundidade do solo de 15m), e um aumento da classe Incondicionalmente estável e saturado de no máximo 16,3% (nas profundidades de 5 e 7m). Em relação as classes intermediárias, exceto nas classes Estável e não saturado e Incondicionalmente estável e não saturado, houve um aumento no percentual de ocorrência com a diminuição da escala. É importante salientar que a alteração da escala teve maior influência (alteração nos dados superiores a 10%) nas classes Estável e não saturado e Incondicionalmente estável e não saturado. Nas demais os valores sofreram alterações de no máximo 5%. Além disso, observou-se que a partir da classe Incondicionalmente instável e saturado até a classe Estável e não saturado a influência da escala aumentou com o aumento da profundidade. Analisando, entretanto, os resultados obtidos com o *SHALSTAB* agrupados e divididos em dois grupos: classes instáveis e classes estáveis, notou-se que a modelagem na escala 1:50.000 superestimou as áreas instáveis em 2%.

Considerando a simulação que representa o cenário de suscetibilidade da microbacia do Ribeirão do Baú (simulação realizada com a profundidade de solo de 10m), definida por Sbroglia (2015), ao compará-la com a situação de campo (a partir da sobreposição das cicatrizes) verificou-se que a escala 1:50.000 apresentou resultados insatisfatórios quando comparados aqueles da escala 1:10.000. A

modelagem na escala de menor precisão apresentou apenas 43,54% dos escorregamentos registrados em campo dentro das áreas consideradas como instáveis, contra mais de 60% da escala 1:10.000. A discrepância entre os dados da modelagem na escala 1:50.000 e os dados de campo fica ainda mais evidente quando analisadas somente as duas classes de maior suscetibilidade do modelo. Enquanto que na escala 1:10.000 estas classes representavam 38,78% dos escorregamentos, na escala 1:50.000 elas representam apenas 18,06%. Além disso, tem-se ainda o fato de que quase 40% dos escorregamentos mapeados ocorreram, segundo o mapa de estabilidade na escala 1:50.000, na classe de maior segurança (Incondicionalmente estável e saturado), valor quase cinco vezes maior do que na escala 1:10.000.

Sendo assim, observa-se que a modelagem com a profundidade de 10m na escala 1:50.000 não representa de forma satisfatória o cenário de instabilidade da microbacia em estudo. Realizando-se então a análise das demais profundidades, observasse que as mesmas também apresentam resultados pouco eficazes, e que a profundidade de 15m apresenta o melhor índice de escorregamentos por área instável da bacia, ressalta-se porém que a diferença para os dados obtidos com 10m de profundidade é praticamente inexistente (0,02).

Para uma melhor compreensão da influência da escala nas demais profundidades, seria necessário uma análise com os resultados destas para a modelagem 1:10.000, ficando esta análise comparativa como proposta para trabalho posterior.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Ana Elisa Silva de. **Mapeamento geotécnico para gestão municipal: abordagem combinando três métodos distintos e sua aplicação em Analândia (SP)**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**, In: Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas. Anais... Rio de Janeiro, v.2. p. 721-733, 1992.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco a escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela**. São Paulo, 1994. 167p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1994.

BASTOS, Graciane. **Estruturação de Banco de Dados a partir do Mapeamento Geotécnico Aplicado à Região de Ribeirão Preto (SP)**. Tese de Doutorado em Engenharia – Área Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005, 306 p.

BITAR, O. Y.; CERRI, L. E. S.; NAKAZAWA, V. A. **Carta de risco geotécnico e carta geotécnica: uma diferença a partir de casos em áreas urbanas no Brasil**. In. 2<sup>o</sup> Simpósio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano, Pereira. 1992

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**. v.24, n.1, p.43-69, 1979.

BORTOLOTTI, Frederico Damasceno. **ArcGIS Aplicado a Bacias Hidrográficas**. Laboratório de Topografia e Cartografia – LTC. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 97 slides. Disponível em: <[www.ltc.ufes.br/gisbasins/Aula\\_06.pdf](http://www.ltc.ufes.br/gisbasins/Aula_06.pdf)>.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco**. Brasília, DF, 2006. 122p

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: vol. 2 – Mecânica das rochas**. Rio de Janeiro: LTC, 1987.

CARVALHO, P. R. S. et al. Análise comparativa de métodos para delimitação automática das sub-bacias do alto curso do Rio Preto. **Espaço & Geografia**. Brasília, v. 13, n. 2. P. 227-307, 2010.

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174 p.

CUNHA, M.A. (Org). **Ocupação de encostas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p.234, 1991.

DAVISON DIAS, R. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais**. In: Revista do Instituto Geológico, São Paulo, SP, 1995, p.51-55.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB**: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. National Council for Air and Stream Improvement. 1998. 26p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SOLOS, 2006.

FERNANDES, G. **Caracterização geológico - geotécnica e propostas de estabilização da encosta do morro do curral – centro de artes e convenções de ouro preto**. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000. 154f.

FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 51-71, out. 2001.



FONTES, L. P. T. L.. **Contribuição à investigação geotécnica de vias urbanas não pavimentadas através do emprego do penetrômetro dinâmico de cone.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001. 184f.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 169 p.

GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F. Análise da influência da escala cartográfica no resultado de um modelo de previsão de áreas críticas a deslizamentos. **Ciência e Natura**, UFSM, p.269-286, 2004.

GOMES, R. A. T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa.** Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006. 180p.

GUESSER, Luis Henrique. **Elaboração do mapa geotécnico preliminar e mapa de áreas suscetíveis a movimentos de massa do município de Antônio Carlos-SC.** Trabalho de Conclusão de Curso, 142f. Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

GUIMARAES, R. F. **Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico:** adequação e calibração em duas bacias de drenagem. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000. 150p.

GUIMARAES, R. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia:** conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318p.

HIGASHI, R. R. **Utilização de um SIG no Desenvolvimento de um Banco de Dados Geotécnicos do Norte do Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002, 143p.

HIGASHI, Rafael Augusto dos Reis. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 2006, 486 p.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook** – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008. 129p.

JESUS, A. P. **Caracterização geológica, geomorfológica e geotécnica de um corpo de dunas na cidade de Natal – RN**. Natal, 2002. 214 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Disponível em: <<ftp:ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/AnaPJ.pdf>>. Acesso em: 26 de novembro de 2015.

KOBIYAMA et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba:Organic Trading, 2006.

MAFRA JR, C. S. **Elaboração do mapa preliminar de unidades geotécnicas do município de Brusque associado a um banco de dados geotécnico em ambiente de SIG**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. 136f.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEISINA, C.; SCARABELLI, S. **A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils**. *Geomorphology*, v. 87, n. 3, p. 207-223, 2007.

MICHEL, Gean Paulo; KOBIYAMA, Masato; GOERL, Roberto Fabris. **Análise Comparativa entre Modelos *Shalstab* e *Sinmap* na Identificação de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Translacionais**. X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Foz do Iguaçu-PR, 2012.

MICHEL, G. P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013. 139p.

MIRANDA, José Iguelmar. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. 2. ed., rev. e atual. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 433 p.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **A physically based model for the topographic control on shallow landsliding**. Water Resources Research, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.

OLIVEIRA, F. P. **Mapeamento geotécnico preliminar e aplicação do modelo SHALSTAB na análise de escorregamentos da bacia de Santo Antônio de Lisboa – Florianópolis/SC**. Trabalho de conclusão de curso. 191f. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

O'LOUGHLIN, E. M. **Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis**. Water Resources Research, v.22, n. 5, p. 794-804, 1986.

PAREDES, Evaristo Atencio. **Sistema de informação geográfica-geoprocessamento: princípios e aplicações**. São Paulo: Erica, 1994. 675p.

PRANDINI, F. L.; NAKAZAWA, V. A.; FREIAS, C. G. L.; DINIZ, N. C. **Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais**. Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1995. São Paulo. P. 187-202

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Carlos: RiMa, 2009. 406p.

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. **Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente**

**ArcView, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do Quadrilátero Ferrífero (MG).** Espaço & Geografia, Brasília, v.5, n. 1, p. 49-67, 2002.

RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; REDIVO, A.L.; GOMES, R.A.T.; CARDOSO, F.B.F.; FERNANDES, N.F. Algorithm Development for Incorporating Soil Physical Properties of each Different Soil Class in a Landslide Prediction Model (SHALSTAB). **Soils and Rocks**, v. 30, n. 3, p.139-148, 2007.

REGINATTO, G. M. P. **Aplicacao do modelo Shalstab para identificacao de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais na bacia do rio Cunha, Rio dos Cedros – SC.** Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis. 2013.

RODRIGUES, Valéria Lopes **Mapeamento geotécnico como base para o planejamento urbano e ambiental: Município de Jaú/SP.** 2008. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ROSNIECEK, A.; IMAI, H. I. **Mapeamento geotécnico e análise de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos da bacia do rio Ratoles – aplicação do modelo SHALSTAB.** Trabalho de conclusão de curso. 155f. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

ROSOLEM, G. P. N. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na bacia do rio Forquilhas – São José/SC.** Trabalho de conclusão de curso. 144f. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SELBY, M. **Hillslope Materials and Processes.** Oxford University Press, Oxford, 289p. 1993.

SBROGLIA, REGIANE M. **MAPEAMENTO GEOTECNICO E DAS AREAS SUSCETIVEIS A DESLIZAMENTOS NA MICROBACIA DO RIBEIRAO BAU, ILHOTA/SC.** Dissertação Mestrado em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Georreferenciadas: conceitos e fundamentos.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1999.

TARBOTON, D. G. **A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models.** Water resources research, v. 33, n. 2, p. 309-319,

TOMAZZOLI, E. R.; FLORES, J. A. A.; BAUZYS, F. Movimentos de massa ocorridos no evento de novembro de 2008, no entorno do Morro do Bau, Vale do Itajai (SC): caracterizacao geologico-geomorfologica. In: 5° COBRAE- Conferencia Nacional de Estabilidade de Encostas. **Anais...** Sao Paulo, 2009.

THIVES, Liseane Padilha; TRICHÊS, Glicério. **A sustentabilidade na mobilidade.** 2009, p62-91. Notas de Aula. Impresso.

TOMAZZOLI, E. R.; FLORES, J. A. A.; BAUZYS, F. Movimentos de massa ocorridos no evento de novembro de 2008, no entorno do Morro do Bau, Vale do Itajai (SC): caracterizacao geologico-geomorfologica. In: 5° COBRAE- Conferencia Nacional de Estabilidade de Encostas. **Anais...** Sao Paulo, 2009.

UNESCO – IAEG. **Engineering Geological Maps. A Guide to Their Preparation.** Paris : The Unesc Press, 79p. 1976.

VARNES, D. J. **Landslides, analysis and control.** Special Report 176, National Academy of Sciences, cap. II, 1978.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987, 3v., 657p.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Mapeamento geotécnico: uma proposta metodológica.** Artigo de Periódico. Revista Geociências, v.9, p.55-66, 1990.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JR., C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011.