

**MARCELO TULER DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS NO  
MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE, MG.**

**Tese apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, para  
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.**

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48e  
2009

Oliveira, Marcelo Tuler de, 1971-  
Estudo de movimentos de massa gravitacionais no  
município de Belo Horizonte, MG / Marcelo Tuler de Oliveira  
– Viçosa, MG, 2009.  
xix, 279f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Inclui 1 DVD.

Orientador: Maria Lúcia Calijuri

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 216-235

1. Geologia de engenharia - Belo Horizonte (MG).
  2. Sistemas de informação geográfica. 3. Deslizamentos (Geologia). 4. Geologia ambiental. 5. Mapeamento geológico.
- I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.


CDD 22.ed. 624.151098151

MARCELO TULER DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS NO  
MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE, MG.**

**Tese apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, para  
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.**

**APROVADA: 03 de julho de 2009.**

  
Prof. Eduardo A. G. Marques  
(Co-Orientador)

  
Prof. Carlos A. B. de Carvalho

  
Prof. Lázaro V. Zuquette

  
Prof. Dario C. de Lima

  
Prof. Maria Lúcia Calijuri  
(Orientadora)



*Dedico a Ana Paula, Mariana e Gabriela,  
motivo de minha inspiração, amor e  
felicidade para a vida.*

## AGRADECIMENTOS

Relativo ao campo pessoal, agradeço:

À Deus, pela segurança e força para trilhar o caminho, nos momentos difíceis;

À minha amada esposa, Ana Paula, pelo constante incentivo e apoio incondicional;

Às minhas filhas Mariana e Gabriela, pelo carinho e motivação para “o novo”;

À minha mãe Célia e irmão Danilo, que continuam forjando o meu caráter.

Relativo à concepção da Tese, agradeço:

À professora e orientadora, Maria Lúcia Calijuri, por ter acreditado e confiado em minha capacidade técnica, e na condução e auxílio do trabalho de Tese;

Ao professor e co-orientador, Eduardo Antônio G. Marques, pelo incentivo e franqueza ao compartilhar seus conhecimentos;

Ao professor e co-orientador, Carlos Alexandre B. de Carvalho, pelo respeito e sapiência no tratamento dos problemas;

Aos professores Dario Cardoso de Lima e Lázaro Valentin Zuquette, pelo empréstimo irrestrito de seus conhecimentos e leitura crítica do trabalho;

Ao professor Dalto D. Rodrigues e eng<sup>a</sup>. Ecidinéia P. Soares, pelo incentivo durante o programa de pós-graduação;

Ao professor Edézio T. de Carvalho, pelos ensinamentos compartilhados;

Ao Departamento de Engenharia Civil, e seu Programa de Pós-graduação, da Universidade Federal de Viçosa, e respectivas coordenações, em função do pronto atendimento e organização;

À Prefeitura de Belo Horizonte, especificamente dos órgãos: URBEL, PRODABEL, SMURBE e GIND, pela seção de dados, imprescindíveis à realização da pesquisa;

Ao CEFET-MG, em especial ao Diretor Geral, Flávio A. dos Santos, pelo apoio e incentivo à capacitação institucional;

Ao apoio financeiro, concedido pela CAPES, durante a realização da pesquisa.

## **BIOGRAFIA**

MARCELO TULER DE OLIVEIRA, filho de Osmar Agostinho de Oliveira e Maria Célia Tuler de Oliveira, é natural de Juiz de Fora, Minas Gerais.

Em março de 1989, ingressou no curso de Engenharia de Agrimensura da Universidade Federal de Viçosa. Foi monitor no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa no período de 1990-1994, sob a orientação do Prof. José Claudio Tuler. Em janeiro de 1994, graduou-se Engenheiro Agrimensor pela Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 1995, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Informação – Cartografia Automatizada do Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, graduando-se em 1996 em nível de Mestrado.

Em fevereiro de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Geotecnia Ambiental em nível de Doutorado, submetendo-se à defesa em junho de 2009.

Atualmente é professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (1997-2009).

## SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xiv
LISTA DE SIGLAS .....	xvi
RESUMO .....	xviii
ABSTRACT .....	xix
1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 – OBJETIVOS DO TRABALHO .....	5
1.1.1 – OBJETIVO GERAL .....	5
1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
1.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA .....	6
1.3 – JUSTIFICATIVAS E HIPÓTESE .....	10
1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO .....	12
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1 – INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS NO MEIO AMBIENTE .....	14
2.2 – RISCO GEOLÓGICO .....	22
2.3 – GEOTECNIA E MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS .....	30
2.4 – CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E DE RISCOS .....	53
2.5 – GEOPROCESSAMENTO E GEOINDICADORES .....	71

3 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA .....	78
3.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA MUNICIPAL .....	79
3.1.1 – ATRIBUTOS PREDISPOENTES .....	83
3.1.1.1 – GEOLOGIA .....	83
3.1.1.2 – PEDOLOGIA .....	92
3.1.1.3 – HIDROGRAFIA E DRENAGEM URBANA .....	97
3.1.1.4 – HIDROGEOLOGIA .....	100
3.1.1.5 – GEOMORFOLOGIA .....	102
3.1.2 – ATRIBUTOS MODIFICADOR E DEFLAGRADOR .....	113
3.1.2.1 – MODIFICADOR - OCUPAÇÃO E USO DO SOLO ...	114
3.2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO DE CASO .....	123
4 – MATERIAL E MÉTODOS .....	148
4.1 – MÉTODO HEURÍSTICO .....	149
4.1.1 – CONDICIONANTES GEOLÓGICOS .....	153
4.1.2 - CONDICIONANTES GEOMORFOLÓGICOS .....	155
4.1.3 – COMBINAÇÃO DOS ATRIBUTOS PREDISPOENTES .....	159
4.1.4 – ATRIBUTO MODIFICADOR .....	162
4.2 – MÉTODO DETERMINÍSTICO .....	168
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	170
5.1 – PRODUTOS DO MÉTODO HEURÍSTICO .....	171
5.2 – PRODUTOS DO MÉTODO DETERMINÍSTICO .....	186
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	210
6.1 – CONCLUSÕES .....	211
6.2 – SUGESTÕES .....	214

7 – REFERÊNCIAS .....	216
ANEXOS .....	236
ANEXO I – FORMULAÇÃO DO MODELO SHALSTAB.....	237
I.1 – MODELO DO TALUDE INFINITO .....	238
I.2 – MODELO HIDROLÓGICO .....	246
I.3 – EQUAÇÕES <i>SHALSTAB</i> .....	251
ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS .....	257
II.1 – ENSAIOS DE CISALHAMENTO .....	258
II.2 – ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA .....	274
II.3 – ENSAIOS LIMITES DE ATTERBERG .....	277
ANEXO III – DVD COM IMAGENS EM FORMATOS JPG E PDF .....	279

## FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 – Localização da área pesquisada .....	7
Figura 1.2 – Município de Belo Horizonte e Região Metropolitana .....	8
Figura 1.3 – Bairro Conjunto Taquaril – Região de aplicação do modelo <i>SHALSTAB</i> ...	9
Figura 2.1 – Evento e desastre natural .....	16
Figura 2.2 – Relação entre a pluviosidade e o número de ocorrências de escorregamentos: médias entre os anos de 1991 a 1994, em BH .	19
Figura 2.3 – Distribuição das ocorrências registradas de movimentos de massa e moradias mapeadas como risco “alto” e “muito alto”, por regionais, em BH – Anos de 2006 a 2008 .....	21
Figura 2.4 – Componentes do meio ambiente envolvidos na geração de eventos perigosos .....	26
Figura 2.5 – Classificação dos riscos ambientais .....	27
Figura 2.6 – Processo geológico de escorregamento .....	32
Figura 2.7 – Perfil típico de solo residual .....	35
Figura 2.8 – Perfil esquemático de vertente típica do Complexo Belo Hori- zonte, BH .....	36
Figura 2.9 – Classificação das encostas quanto ao perfil e curvas de nível .....	38
Figura 2.10 – Convergência dos fluxos d’água ( <i>hollows</i> ) .....	39
Figura 2.11 – Carta da área de contribuição da drenagem de BH .....	40
Figura 2.12 – Precipitação média em BH – Período de 1961 a 1990 .....	44
Figura 2.13 – Resultados de produção de sedimentos e escoamento super- ficial com e sem a presença de cobertura vegetal – Simulador de chuvas da UFV .....	47
Figura 2.14 – Possibilidades de escorregamentos induzidas pelo Homem .....	49

Figura 2.15 – Agentes predisponentes e deflagradores aos movimentos de massa ..	50
Figura 2.16 – Geometria dos movimentos de massa .....	51
Figura 2.17 – Dois exemplos de fichas de campo para inventariar eventos de movimentos de massa .....	57
Figura 2.18 – Relações entre os elementos envolvidos na avaliação de risco .....	60
Figura 2.19 – Carta do risco geológico apenas para as vilas e favelas de BH, confeccionada pela URBEL/PBH .....	62
Figura 2.20 – Carta do risco geológico para o bairro Conjunto Taquaril, confeccio- nada pela URBEL e no detalhe a localidade do estudo de caso .....	63
Figura 2.21 – Extratos ou planos de informação num SIG e exemplos de aplicação de <i>softwares</i> no trabalho .....	71
Figura 2.22 – Carta do IQVU relativo ao risco geológico, por UP .....	76
Figura 2.23 – Índice de Salubridade Ambiental, por Bacia .....	77
Figura 3.1 – Carta geológica de BH .....	84
Figura 3.2 – Seções transversais A–A’ e B–B’ .....	85
Figura 3.3 – Complexo Belo Horizonte .....	87
Figura 3.4 – Vista aérea oblíqua da área de ocorrência das rochas da se- quência Metassedimentar (ao fundo, a Serra do Curral) .....	89
Figura 3.5 – Carta da hidrografia de BH .....	99
Figura 3.6 – Carta potenciométrica, linhas de fluxo e localização dos poços amostrados de BH .....	101
Figura 3.7 – Carta do zoneamento hipsométrico de BH .....	104
Figura 3.8 – Carta de declividades de BH .....	107
Figura 3.9 – Queda de blocos e detritos no Quartzito da Formação Cercadinho .....	108
Figura 3.10 – Carta do azimute da inclinação das encostas de BH .....	109
Figura 3.11 – Feições morfológicas extraídas pela rotina <i>toposhape</i> .....	111
Figura 3.12 – Carta de feições morfológicas de BH .....	112
Figura 3.13 – Planta original de Belo Horizonte por Aarão Reis (1897) .....	114



Figura 3.14 – Evolução da mancha urbana de BH .....	115
Figura 3.15 – Carta do zoneamento do solo de BH, segundo Leis 7166/96 e 8137/2000 .....	119
Figura 3.16 – Classes de declividades na área municipal versus Vilas e Favelas ....	121
Figura 3.17 – Carta de declividades apenas nas Vilas e Favelas de BH .....	122
Figura 3.18 – Característica da forma de uso e ocupação de algumas encos- tas do bairro Conjunto Taquaril .....	124
Figura 3.19 – Lançamento frequente de lixo e de solo descartado nas encostas, ocasionado o escorregamento destes materiais inconsolidados .....	125
Figura 3.20 – Ficha de vistoria, sede do CREAM – Taquaril e técnicos da PBH .....	126
Figura 3.21 – Carta de inventários de ocorrências – 2006, 2007 e 2008 .....	128
Figura 3.22 – Planta topográfica, hidrografia e edificações do bairro Conjunto Taquaril .....	130
Figura 3.23 – Carta de declividades do bairro Conjunto Taquaril .....	131
Figura 3.24 – Carta geológica do bairro Conjunto Taquaril .....	132
Figura 3.25 – Algumas iniciativas governamentais de contenção de taludes no Conjunto Taquaril .....	134
Figura 3.26 – Foto aérea da região do estudo de caso (hachura), bairro Con- junto Taquaril .....	135
Figura 3.27 – Planta topográfica e registro fotográfico da região do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril .....	137
Figura 3.28 – Zoneamento hipsométrico da região do estudo de caso, obtido através de MDT hidrológicamente consistente .....	138
Figura 3.29 – Carta de declividades da região do estudo de caso .....	139
Figura 3.30 – Etapas para retirada das amostras de solo indeformado .....	140
Figura 3.31 – Tálus amarelo, bairro Conjunto Taquaril .....	144
Figura 3.32 – Tálus vermelho, bairro Conjunto Taquaril .....	145
Figura 3.33 – Aterros, bairro Conjunto Taquaril .....	145
Figura 3.34 – Ocorrências de movimentos de massa na encosta do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril, em 2004 .....	146

Figura 4.1 – Metodologia heurística adotada para mapear a susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais em BH .....	152
Figura 4.2 – Composição das zonas morfológicas .....	156
Figura 4.3 – Carta das zonas morfológicas .....	158
Figura 4.4 – Carta do padrão de uso e ocupação do solo de BH .....	166
Figura 4.5 – Modelo <i>SHALSTAB</i> para o zoneamento da susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais, adotado numa região de BH ..	168
Figura 4.6 – Esquema do fluxo de dados na rotina <i>SHALSTAB–ArcView</i> .....	169
Figura 5.1 – Carta de zoneamento das susceptibilidades aos escorregamentos de solo de BH . .....	172
Figura 5.2 – Carta de zoneamento das susceptibilidades à queda de blocos e detritos de BH .....	173
Figura 5.3 – Carta de zoneamento das susceptibilidades aos movimentos de massa gravitacionais de BH .....	174
Figura 5.4 – Carta de eventos perigosos associados aos movimentos de massa gravitacionais de BH . .....	175
Figura 5.5 – Possibilidade de escorregamento das paredes de voçorocas, presentes no Complexo Belo Horizonte (quadrícula K8 da Figura 5.3) ...	177
Figura 5.6 – Escorregamento rotacional, no bairro Engenho Nogueira (quadrícula H4 da Figura 5.3) .....	178
Figura 5.7 – Pedreira no bairro Engenho Nogueira, apresentado o sistema de fraturamento e possibilidade de queda de rocha e detritos (quadrícula H4 da Figura 5.3) .....	178
Figura 5.8 – Possibilidade “baixa” a “média” de escorregamento ou queda de rochas nas moradias ao pé de um dos contrafortes da Formação Cauê, na Serra do Curral, com superfície voltada para o quadrante NW .....	179
Figura 5.9 – Possibilidades “baixa” a “média” de ocorrência de movimentos de massa na Formação Gandarela (regiões hachuradas) .....	180

Figura 5.10 – Ocorrência de escorregamento de solo e queda de detritos na av. Raja Gabaglia .....	181
Figura 5.11 – Ocorrências de escorregamentos de solos no bairro Conjunto Taquaril e quedas de blocos e detritos na Av. Nossa Sra. do Carmo, BH .....	182
Figura 5.12 – Comparações entre a modelagem heurística original e modificada .....	184
Figura 5.13 – Carta dos valores de “ $h/Z$ ” da Equação I.9, em que relaciona a densidade natural do solo, ângulo de atrito e declividade e as condições de estabilidade .....	188
Figura 5.14 – Carta da relação “ $a/b$ ”, apresentando a contribuição hidrológica, referente à equação I.17 .....	190
Figura 5.15 – Carta da relação “ $a / (b \cdot \text{sen } i)$ ”, apresentando a contribuição hidrológica, referente à equação I.17 .....	191
Figura 5.16 – Relação “ $h/Z$ ” em função da variação de valores típicos de “ $\log q/T$ ” .....	192
Figura 5.17 – Escorregamento ocorrido em janeiro de 2003, em localidade do estudo de caso – Foto 1 .....	195
Figura 5.18 – Situações de estabilidade para $\rho_{\text{nat}} = 1,6 \text{ g/cm}^3$ , $\phi' = 34^\circ$ e $\log q/T (1/m) = -2,2$ .....	196
Figura 5.19 – Condições de estabilidade, com variação de valores típicos de “ $\log q/T$ ” .....	197
Figura 5.20 – Composição dos cenários para a simulação <i>SHALSTAB</i> .....	199
Figura 5.21 – Carta de eventos dos cenários 1, 2, 3 e 4, pela modelagem <i>SHALSTAB</i> .....	200
Figura 5.22 – Carta de eventos dos cenários 5, 6, 7 e 8, pela modelagem <i>SHALSTAB</i> .....	201
Figura 5.23 – Carta de eventos dos cenários 9, 10, 11 e 12, pela modelagem <i>SHALSTAB</i> .....	202
Figura 5.24 – Carta de eventos dos cenários 13, 14, 15 e 16, pela modelagem <i>SHALSTAB</i> .....	203
Figura 5.25 – Histograma dos vários cenários estabelecidos pela Figura 4.20 ..	205

Figura 5.26 – Cenário 10, a partir de parâmetros de retroanálise .....	207
Figura 5.27 – Escorregamento ocorrido em janeiro de 2003, em localidade do estudo de caso – Foto 2 .....	207
Figura 5.28 – Detalhe da carta de inventários, próximos à área do estudo de caso .....	208
Figura I.1 – Envoltória de resistência <i>Mohr–Coulomb</i> .....	239
Figura I.2 – Forças atuantes no talude, considerando-o seco ( $h = 0$ ) .....	240
Figura I.3 – Forças atuantes no talude, considerando a poro pressão ( $h > 0$ ) ..	241
Figura I.4 – Condições para a estabilidade do talude infinito .....	243
Figura I.5 – Rotina desenvolvida no <i>software</i> Excel para estudo da estabilidade I .....	245
Figura I.6 – Vista em planta e perspectiva do balanço hídrico .....	247
Figura I.7 – Simplificação da Lei de Darcy ao longo da encosta, para aplicação no modelo <i>SHALSTAB</i> .....	248
Figura I.8 – Área da seção saturada .....	248
Figura I.9 – Rotina desenvolvida no <i>software</i> Excel para estudo da estabilidade II .....	250
Figura I.10 – Rotina no desenvolvida <i>software</i> Excel para estudo da estabilidade III .....	254
Figura I.11 – Menus da rotina <i>SHALSTAB</i> , suportadas pelo <i>software</i> ArcView .....	256

## TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 – Atividades antrópicas e relação com o desencadeamento dos movimentos de massa .....	15
Tabela 2.2 – Número de óbitos causados por acidentes associados a escorregamentos no Brasil por ano, de 1989 a 2006 .....	18
Tabela 2.3 – Conceitos básicos de estudos do risco, por Zuquette (1993) .....	24
Tabela 2.4 – Conceitos básicos de estudos do risco, por IUGS–WGL (1997) ....	25
Tabela 2.5 – Ângulos de atrito para algumas rochas (Intacta, junta e residual) .	34
Tabela 2.6 – Efeitos gerais da vegetação sobre o solo .....	48
Tabela 2.7 – Classificação do grau de risco adotada pela URBEL/PBH .....	61
Tabela 2.8 – Tipos de dados, métodos de obtenção dos dados e possibilidade de obtenção dos dados em função da escala no estudo de movimentos de massa .....	69
Tabela 2.9 – Métodos de análise, técnicas, características e escala no estudo de movimentos de massa .....	70
Tabela 2.10 – Principais parâmetros e aplicações obtidos a partir do MDT .....	72
Tabela 3.1 – Unidades estratigráficas locais .....	86
Tabela 3.2 – Valores típicos de condutividade hidráulica para materiais inconsolidados, segundo alguns autores .....	93
Tabela 3.3 – Coeficientes de permeabilidade <i>versus</i> classificação SCS .....	94
Tabela 3.4 – Valores de condutividade hidráulica por Costa (2002) e comparação com a Tabela 3.3 .....	94
Tabela 3.5 – Valores de condutividade hidráulica por Viana (2000) e Parizzi (2004) e comparação com a Tabela 3.3 .....	94
Tabela 3.6 – Condições limites de consistência para um MDT .....	102

Tabela 3.7 – Classes de declividade e respectivas áreas em BH .....	106
Tabela 3.8 – Feições morfológicas, segundo Pellegrini (1995) .....	111
Tabela 3.9 – Zonas estabelecidas segundo as Leis 7166/96 e 8137/2000 .....	118
Tabela 3.10 – Classes de declividades nas Vilas e Favelas de BH .....	121
Tabela 3.11 – Parâmetros geotécnicos da região do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril, obtidos pela coleta de campo .....	142
Tabela 3.12 – Parâmetros geotécnicos da região do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril, obtidos em Parizzi (2004) .....	143
Tabela 3.13 – Parâmetros da retroanálise para a ruptura do talude da Figura 3.34, obtidos em Parizzi (2004), com amostras saturadas .....	147
Tabela 4.1 – Unidades litológicas consideradas, a partir da carta geológica .....	154
Tabela 4.2 – Critérios adotados para definição do grau de probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em BH .....	159
Tabela 4.3 – Intensidades da susceptibilidade adotadas à ocorrência de movimentos de massas – Método heurístico .....	161
Tabela 4.4 – Matriz modificadora padrão de uso e ocupação do solo .....	167
Tabela 5.1 – Valores de chuva “ $q$ ” para valores típicos de “ $\log q/T$ ” e “ $T$ ” fixo ....	193
Tabela 5.2 – Valores de “ $\log q/T$ ” e conversões .....	193
Tabela 5.3 – Valores percentuais das classes segundo os cenários estabelecidos pela Figura 5.20 .....	204
Tabela I.1 – Relação entre ângulos de declive e atrito para o modelo <i>SHALSTAB</i> .....	243
Tabela I.2 – Variação dos parâmetros da Equação I.17 e as situações da estabilidade .....	250
Tabela I.3 – Classes de estabilidade em função dos limites estabelecidos pela relação “ $a/b$ ” versus “ $\tan i$ ”, na estabilidade e saturação .....	253

## SIGLAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia  
ABMS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica  
AGI – *American Geological Institute*  
BH – Belo Horizonte  
CAM – *Computer Aided Mapping*  
CTM – Cadastro Técnico Municipal  
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais  
CODAR – Codificação de Desastres, Ameaças e Riscos  
COMDEC – Coordenadoria Municipal de Defesa Civil  
CONDEC – Conselho Nacional de Defesa Civil  
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
CREAR – Centro de Referência em Área de Risco  
DISME – Distrito de Meteorologia  
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral  
EP – Erro Padrão  
GIND – Gerência de Indicadores da PBH  
IAEG – *International Association for Engineering Geology and the Environment*  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IDH – Índice de Desenvolvimento Humano  
IGA – Instituto de Geociências Aplicada  
IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas  
IGC–UFMG – Instituto de Geociências da UFMG  
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia  
IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo  
IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano  
IQVU – Índice de Qualidade de Vida Urbana  
ISA – Índice de Salubridade Ambiental  
ISRD – *International Strategy for Disaster Reduction*  
ISRM – *International Society for Rock Mechanics*  
ISSMGE – *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*

LL - Limite de Liquidez  
LP - Limite de Plasticidade  
LVA – Latossolo Vermelho Amarelo  
MDT – Modelo Digital de Terreno  
OMM – Organização Meteorológica Mundial  
PBH – Prefeitura Municipal de Belo Horizonte  
PDDBH – Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte  
PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana de Belo Horizonte  
PEAR – Programa Estrutural para Áreas de Risco  
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica  
PIB – Produto Interno Bruto  
PMRR – Plano Municipal de Redução de Risco  
PMS – Plano Municipal de Saneamento  
PROAS – Programa de Assentamento em Função de Obras Públicas e Calamidades  
PRODABEL – Empresa de Informática e Informação do Município de BH  
RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte  
SCS – *Soil Conservation Service*  
SENDEC – Secretaria Nacional de Defesa Civil  
SHALSTAB – *Shallow Stability Model*  
SIAGAS – Sistema de Informação de Águas Subterrâneas  
SIG – Sistema de Informações Geográficas  
SINDEC – Sistema Nacional de Defesa Civil  
SMORPH – *Slope Morphology Model*  
SMURBE – Secretaria Municipal de Políticas Urbanas  
SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos  
SUDECAP – Superintendência de Desenvolvimento da Capital  
TRIGS – *Transient Rainfall Infiltration Grid Based on Regional Slope Stability Analysis*  
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais  
UNDRO – *United Nations Disaster Relief Office*  
UP – Unidade de Planejamento  
URBEL – Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte  
UTM – Universal Transverso de Mercator  
VER – Volume Elementar Representativo



## RESUMO

TULER, Marcelo de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2009.

**Estudo de movimentos de massa gravitacionais no município de Belo Horizonte, MG.** Orientadora: Maria Lúcia Calijuri. Co-Orientadores: Eduardo Antônio Gomes Marques e Ecidinéia P. Soares.

Elaborou-se uma análise dos fatores condicionantes, modificadores e deflagradores aos movimentos de massa gravitacionais, no município de Belo Horizonte (MG). A metodologia baseou-se na avaliação das características geológico-geotécnicas locais, e para tal, confeccionaram-se documentos cartográficos básicos, a citar: geologia, pedologia, hidrografia, hidrogeologia e geomorfologia. As cartas digitais foram obtidas junto à PRODABEL-PBH. As escalas adotadas foram 1:50.000 e 1:2.000. A identificação dos limites superficiais dos materiais inconsolidados e rochas, e a definição das unidades litológicas da carta geológica, foram atualizadas a partir de vários autores. De posse das cartas topográfica e hidrográfica, construiu-se o modelo digital hidrológicamente consistente e gerou-se a carta de declividade e a carta do azimute de inclinação das encostas. Para identificar as relações entre a geomecânica local e os movimentos de massa, utilizaram-se duas metodologias, a heurística e a determinística. Na metodologia heurística, fez-se uma investigação das intensidades de susceptibilidades aos movimentos de massa, com base em experiências de especialistas da URBEL-PBH. Entre os desafios, cita-se a dificuldade em definir variações de propriedades geológico-geotécnicas e comportamentos geomecânicos, para a escala de trabalho. Na modelagem determinística, adotou-se o modelo *SHALSTAB*, para a avaliação de áreas de instabilidade para diversos cenários. O modelo integra dois módulos, de estabilidade de encostas e hidrológico, que foram aplicados a uma encosta de uma região de Belo Horizonte. Para esta análise, foram realizados ensaios geotécnicos locais. A partir de referências, observou-se que o evento em questão sofre alteração de intensidade da susceptibilidade em razão da dinâmica natural das cidades. Desta forma, na escala de 1:50.000 aplicou-se uma matriz modificadora experimental, em função do padrão de uso e ocupação. Os resultados finais das modelagens mostraram boa correlação com a carta de risco já adotada pela URBEL-PBH, para as Vilas e Favelas, concluindo-se que seu uso é viável na identificação das áreas susceptíveis aos movimentos de massa, nas escalas propostas.

## ABSTRACT

TULER, Marcelo de Oliveira, D.Sc., Viçosa Federal University, March, 2008. **Study of gravitational mass movements in the Belo Horizonte County, MG.** Advisor: Maria Lúcia Calijuri. Co-Advisor: Eduardo Antônio Gomes Marques and Ecidinéia P. Soares.

The research presented in this thesis executed an extensive analysis of the conditioning, modifying and deflagrating gravitational mass movements in the Belo Horizonte County (Minas Gerais state). The methodology used was based on the area's geological and geotechnical characteristics, and, for such a task, basic cartographic documents were produced borrowing from geological, pedological, hydrographical, hydro-geological and geo-morphological studies. The digital charts were obtained in collaboration with PRODABEL-PBH. The adopted scales were of 1:50.000 and 1:2.000 respectively. The identification of the limits of unconsolidated materials such as rocks and the definition of lithologic units from the geological chart were updated according to various authors. Once obtaining the topographical and hydrographical charts, it allowed us for the setting up of a digital model which was hydrologically consistent in acquiring other products, such as: slope charts and the inclination bearings of the hillsides. In order to identify the relations between the local geo-mechanics and mass movements, we adopted both investigative and deterministic methods. The investigative methodology made it necessary for an investigation of the intensities and susceptibilities to mass movements, based on experiences of specialists from URBEL-PBH. Among the challenges encountered, one may name the difficulty in defining the changes in geological and geo-technical properties as well as the geo-mechanical behaviors for the scale of the project. On the deterministic methodology however, we adopted the *SHALSTAB* model for the evaluation of areas of instability. This model integrates two key modules: one of stability of hillsides and a hydrological one. The technique was reviewed, and it was concluded that it would bring better results for larger scales as well as in shallow, translational mass movements. This method was utilized for a single region in Belo Horizonte. It was found necessary for a consistent geo-technical databank with geo-references for this analysis. It was noticed from a number of references that the matter at hand suffers alterations in intensity of susceptibility, due to the natural dynamics of cities. Thus, modifying experimental matrixes were applied due to the standards of usage and occupation. The hardest task was identifying how much these intensities could be affected by these factors. The final results of these models demonstrated good correlation according to the risk chart already adopted by URBEL-PBH for Villas and Slums, concluding that the use of charts are viable in the identification of areas which are susceptible to mass movements in the proposed scales.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

1.1 – OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA

1.3 – JUSTIFICATIVAS E HIPÓTESE

1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO

## 1 – INTRODUÇÃO

Conhecer o espaço em que vivemos é o princípio para uma vida saudável. Interferir neste meio é facultado a nós, mesmo que tais iniciativas possam desestabilizar o equilíbrio da natureza.

Segundo Ferrari (1988), “ ... a cidade é o espaço contínuo ocupado por um aglomerado humano, denso e permanente, cuja evolução e estrutura (física, social e econômica) são determinadas pelo meio físico, pelo desenvolvimento tecnológico e pelo modo de produção”.

O meio físico pode ser caracterizado por aspectos geológicos e fisiográficos, que apóiam a superestrutura dos usos e ocupações urbanas. Especificamente o ambiente geológico sofre transformações espaço-temporais de origem natural e/ou antrópica. Estes processos podem estar associados à degradação ou à reabilitação das condições naturais, e nas cidades estas relações podem ser complexas em função de vários agentes no estágio do desenvolvimento urbano e de sua ocupação, resultando em ambientes tecnogênicos (Carvalho, 2001).

Neste contexto, surgem as susceptibilidades aos riscos geológicos e aos impactos ambientais. Para dimensionar tais implicações, sugere-se que as relações da sustentabilidade geológica e morfológica, bem como aspectos do uso e ocupação urbana e da natureza (pluviosidade, por exemplo), sejam verificadas.

Desta forma, na avaliação do risco ambiental urbano devem-se integrar profissionais de caráter multidisciplinar e diferentes fatores como: a geologia urbana local, os aspectos fisiográficos, as características do uso e ocupação humana, as condições climáticas, dentre outras.

Logo, em um zoneamento do território com este enfoque, deve-se distinguir entre o conceito da susceptibilidade e risco. O primeiro refere-se à probabilidade de que certo evento ou processo possa afetar uma área com determinada intensidade, independente de afetar materiais, pessoas ou o meio ambiente; o segundo inclui a possibilidade da existência de danos a esses atores.

A existência de perigo é uma função do ajustamento humano aos eventos naturais extremos. Por exemplo, os movimentos de massa gravitacionais não seriam perigosos se as encostas não fossem intensamente ocupadas em algumas áreas urbanas. Em muitos casos, o próprio Homem pode aumentar a probabilidade de perigo, devido ao uso inadequado da natureza. Exemplo deste fato pode ser o corte verticalizado de taludes para construção de estradas e edifícios, o que pode desestabilizar as encostas.

Neste trabalho tratar-se-á exclusivamente da modalidade de fenômenos e processos associados aos movimentos de massa gravitacionais. Segundo Selby (1990), movimento de massa gravitacional é o movimento de solo ou material rochoso encosta abaixo sob a influência da gravidade, sem a contribuição direta de outros fatores como água ou ar.

As ocorrências dos movimentos de massa se devem à susceptibilidade do terreno segundo fatores predisponentes, associados à ação de atributos deflagradores. Os fatores predisponentes a serem tratados se relacionarão com os fatores deflagradores através de uma composição global, a partir das especificidades locais. Logo, as interações são dinâmicas (temporal e espacial) entre um local susceptível e o seu risco.

Para ilustrar, considere-se a dinamicidade associada ao desenvolvimento da cidade, e relacione esta a uma ocupação dita “*não consolidada*” (infra-estrutura precária) em certo momento, em detrimento a uma ocupação dita “*consolidada*” (boa infra-estrutura), em que a primeira poderia majorar a susceptibilidade ao evento.

Logo, pensar a cidade sem que ela de fato exista e relacioná-la às suas complexas intervenções tecnogênicas é o desafio em zonedar as susceptibilidades, bem como analisar os fatores de possam majorar ou mitigar esse perigo.

Outro fator importante, apoiado em dados meteorológicos e da Defesa Civil, é o acréscimo de incidências de escorregamentos de encostas, provocado pelo aumento da pluviosidade em meses específicos do ano, especificamente por eventos chuvosos extremos ou chuvas prolongadas de intensidade moderada.

Para o zoneamento das áreas susceptíveis aos movimentos de massa gravitacionais, algumas metodologias se apóiam em análises de campo, a partir de episódios ocorridos, a partir de mapeamentos geomorfológicos e/ou geotécnicos, ou em modelos com bases heurísticas, estatísticas e/ou determinísticas.

Neste trabalho, após a caracterização dos fatores predisponentes, especificamente da geomecânica e da geomorfologia de Belo Horizonte (MG), aplicou-se metodologias para explicar o evento em questão, e em seguida atuou-se na modificação de seus parâmetros.

Inicialmente adotou-se a metodologia heurística, apoiada na experiência adquirida pelos técnicos da URBEL/PBH, nos mapeamentos das susceptibilidades aos eventos de movimentos de massa, nas vilas e favelas da capital. Uma vez que este

mapeamento foi construído em escala regional (1:50.000), não fez-se a distinção naquele momento, das várias classes de movimentos de massa.

Também, na busca de descrever alguns dos processos e leis físicas que controlassem a estabilidade das encostas, utilizou-se o modelo *Shallow Stability Model (SHALSTAB)* em uma encosta de uma região de Belo Horizonte, especificamente no bairro denominado Conjunto Taquaril. O modelo *SHALSTAB*, em síntese, combina um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade de talude infinito.

Como será discutido adiante, o modelo *SHALSTAB* se aplica exclusivamente para movimentos de massa translacionais rasos e a definição da localidade para seu uso deu-se a partir da metodologia heurística, comentada acima.

Soma-se ao problema, a dinâmica urbana, no assunto tratado. Logo, deve-se incentivar mecanismos que facilitem a automação e atualização constante dos dados, pelos próprios técnicos de planejamento e habitação. Desta forma, cita-se a técnica de análise espacial multicritérios, dos sistemas de informações geográficas (SIG), na construção dos geoindicadores de risco.

Porém, tem-se em mente que, ao qualificar uma área susceptível a um processo de movimentos de massa gravitacionais, seja por uma inspeção *“in situ”* ou a partir de uma modelagem computacional, um geoíndice gerado possa ser um indicador de quais locais e frequências das ocorrências, as possíveis intervenções para a mitigação de um dano eminente e como os efeitos físicos variam no território ao longo dos anos.

Enfim, o conceito de *“qualidade de vida urbana”*, além dos vários fatores cotidianos como educação, segurança, saúde, cultura, etc., deve ser acompanhado da variável *“risco geológico”*. Inclusive tal fato é mais relevante para as camadas mais pobres da sociedade que convivem com a falta de infra-estrutura, e que ocupam áreas de risco devido às suas precárias condições sócio-econômicas, motivado pela valorização dos lotes urbanos.

Cabe, então, ao poder público ditar as normas de conduta de uso e ocupação do espaço urbano, uma fiscalização permanente e a busca por uma educação ambiental efetiva, de forma a minimizar estes riscos, uma vez que a própria população envolvida em uma área de risco não consegue percebê-la como tal.

## 1.1 – OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.1.1 – OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é caracterizar os fatores predisponentes, modificadores e deflagradores aos movimentos de massa gravitacionais no Município de Belo Horizonte (MG), e retratar os mecanismos desse evento natural recorrendo à análises heurística e determinística.

### 1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Buscar, digitalizar e atualizar as informações necessárias para os métodos de análise (atributos predisponentes, modificadores e deflagradores);
- b) Gerar a carta digital de zoneamento da susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais do município, em função dos atributos predisponentes da instabilização, através de superposição de documentos cartográficos fundamentais (método heurístico), em escala de planejamento (1:50.000);
- c) Relacionar o zoneamento da susceptibilidade aos movimentos de massa à dinâmica do uso e ocupação do solo;
- d) Gerar a carta digital de eventos naturais associados aos movimentos de massa translacionais rasos, de uma localidade do município, aplicando a rotina *SHALSTAB* (método determinístico) e simular as possibilidades para a instabilização da encosta, através de cenários, em escala cadastral (1:2.000), a partir de parâmetros topográficos e geotécnicos amostrados;
- e) Ratificar e aperfeiçoar a metodologia do geoindicador “*risco geológico*”, variável integrante do IQVU, adotado pelo município de BH desde 1995, e aplicada em ações de política urbana.

Enfim, a filosofia da proposta baseia-se nas seguintes premissas:

- Identificação da metodologia mais simplificada para representação do evento natural, considerando a escala de representação;
- Automação dos processos e facilidade na atualização futura;
- Representatividade do zoneamento das susceptibilidades aos movimentos de massa das áreas mapeadas, nas escalas propostas, a partir do geóndice proposto; e
- Possibilidade de incorporação de feições que pudessem aprimorar as modelagens.

## 1.2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA

A área estabelecida para a pesquisa é o município de Belo Horizonte, localizado na região central do estado de Minas Gerais que compõe, juntamente com outros 33 municípios, a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (Figura 1.1).

O município possui divisas ao sul com Nova Lima e Brumadinho, a leste com Sabará e Santa Luzia, a norte com Santa Luzia e Vespasiano, a oeste com Ribeirão das Neves, Contagem e Ibirité (Figura 1.2). Destaque demográfico para os municípios de BH, Contagem, Betim, Ribeirão das Neves e Santa Luzia, que juntos reúnem mais de 80% da população da região metropolitana.

O município possui uma área de, aproximadamente, 331 km<sup>2</sup> dispendo-se em forma alongada segundo a direção Norte-Sul com cerca de 31 km, contra cerca de 17 km de largura máxima na direção Este-Oeste. É cortado pelo ribeirão Arrudas e pelo ribeirão do Onça, afluentes do rio das Velhas, um dos principais formadores do rio São Francisco (Figura 1.2).

A cidade projetada para comportar a capital de um dos mais importantes Estados da União, é habitada por cerca de 2.400.0000 pessoas (IBGE, 2006). Pode-se afirmar que o município possui um conhecimento satisfatório da sua fisiografia e uma legislação consistente para a ocupação urbana, como será constatado no Capítulo 3.

O município convive com o dualismo do desenvolvimento, pois, sendo o principal pólo da economia mineira, se reflete como o centro da degradação ambiental. Entre esses impactos podem-se citar aqueles causados pela mineração; poluição dos cursos d'água por esgotos domésticos e industriais; ocupação desordenada (áreas ribeirinhas e as de alta declividade); desmatamento; erosão e assoreamento; além da poluição visual, atmosférica e sonora.

Apesar dos pequenos incrementos atuais da densidade demográfica no município, observam-se desvios de conduta de uso e ocupação do solo. Soma-se a isto a histórica ocupação do espaço urbano de Belo Horizonte que se iniciou pelas encostas menos íngremes, avançando para as mais íngremes, como poderá ser constatado mais adiante, para o bairro Conjunto Taquaril. Esta região foi utilizada para aplicação de estudo de caso do modelo *SHALSTAB* (Figura 1.3).

Desta forma, em virtude da expansão urbana, as encostas mais declivosas da região sul (Serra do Curral), e atualmente da região nordeste, vêm sendo ocupadas. Soma-se ao fato que muito dessas ocupações são clandestinas e indiscriminadas, implicando em desordenamento urbano com o surgimento de favelas, e ocasionalmente acarretando escorregamentos.



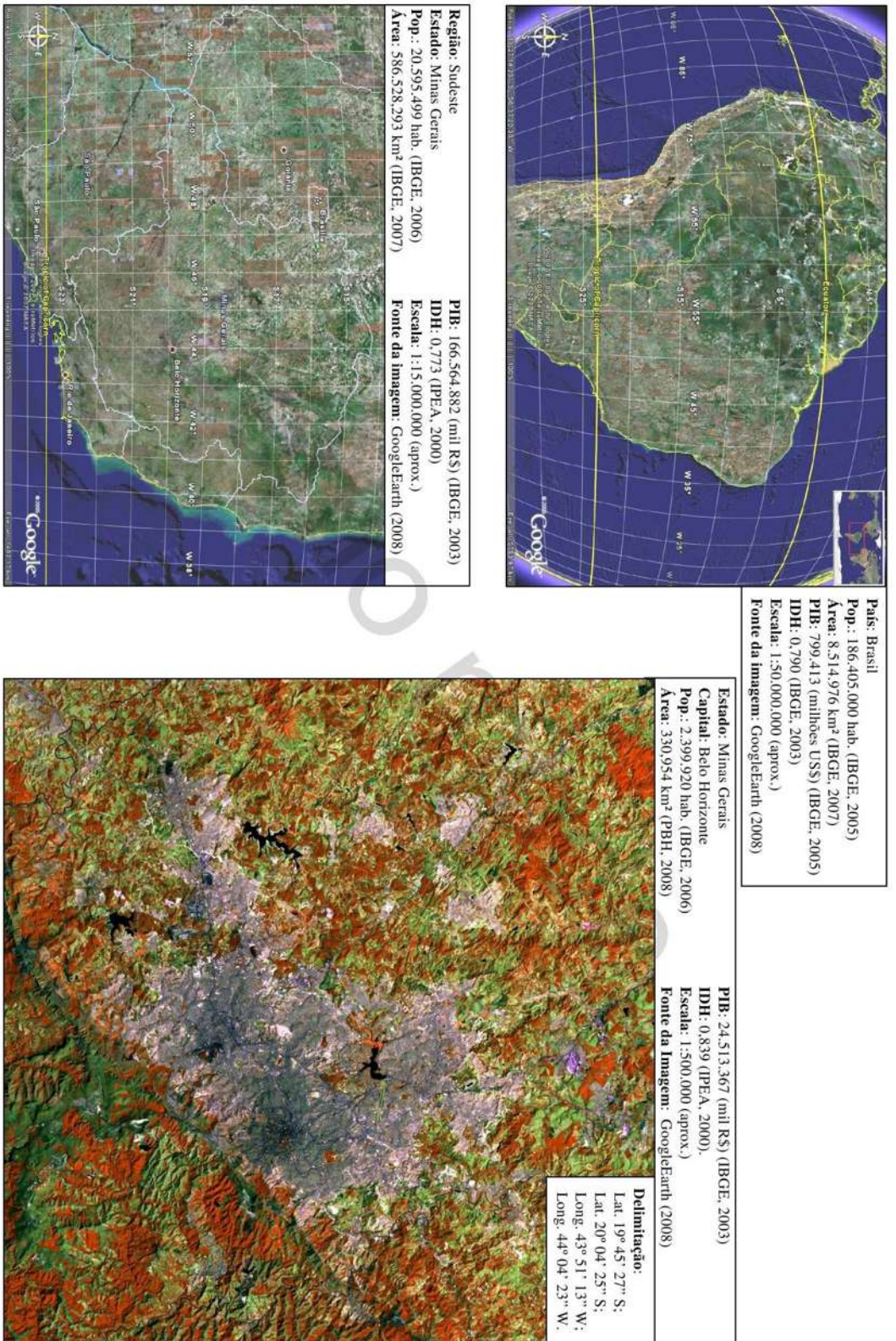


Figura 1.1 – Localização da área pesquisada.

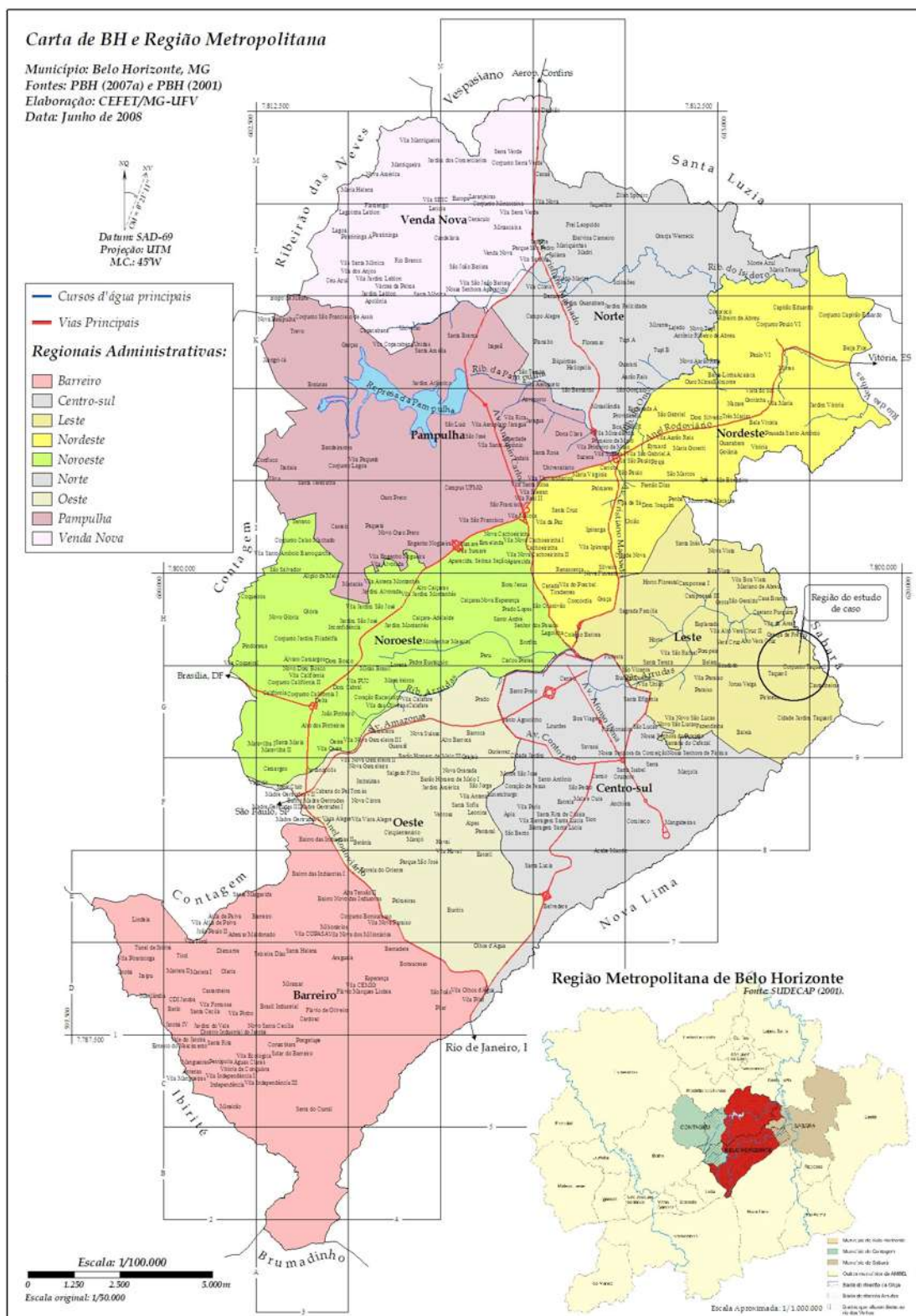


Figura 1.2 - Município de Belo Horizonte e Região Metropolitana.



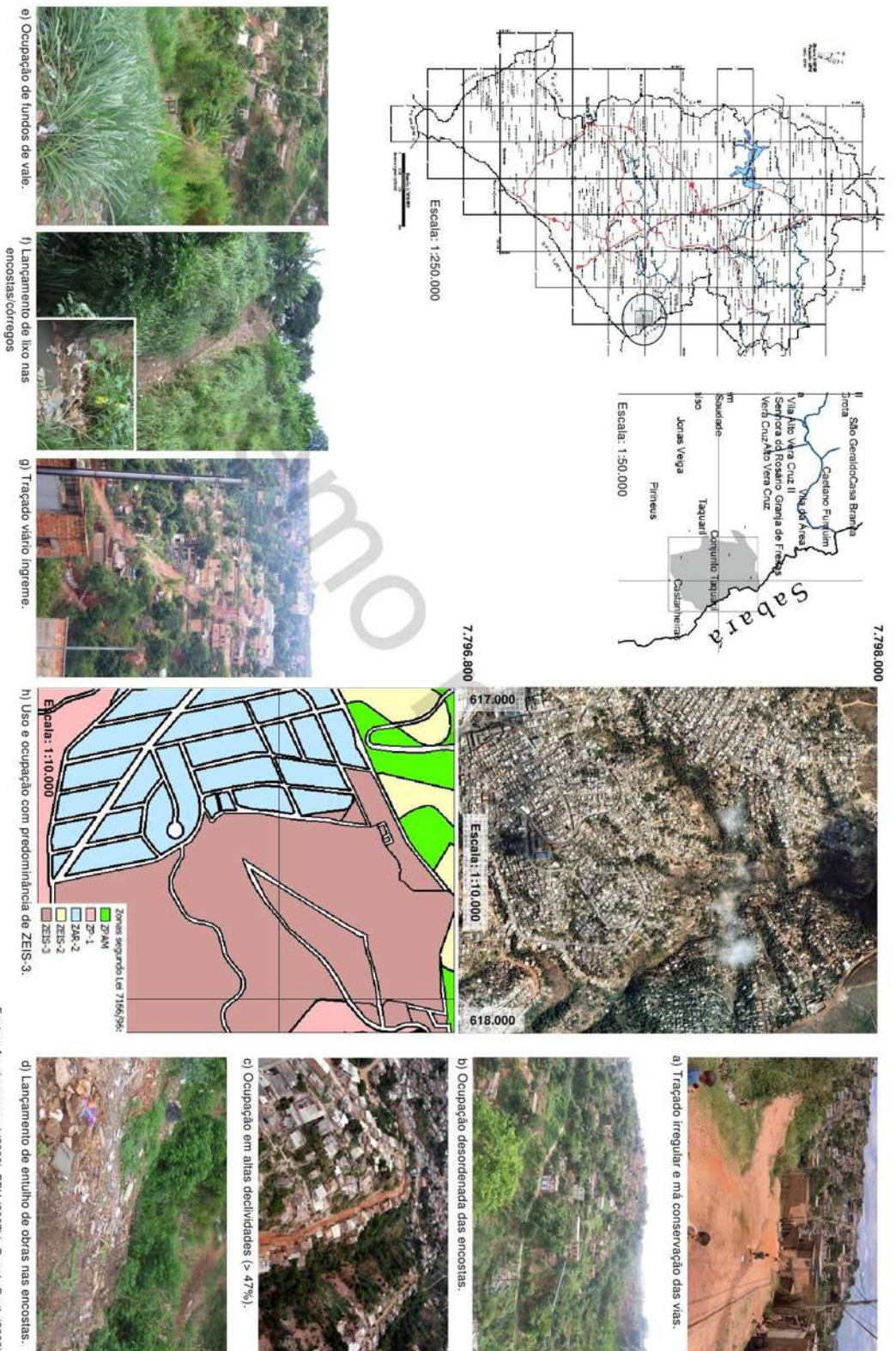


Figura 1.3 – Bairro Conjunto Taquari - Região de aplicação do modelo SHALSTAB.

### 1.3 – JUSTIFICATIVAS E HIPÓTESE

Nas últimas duas décadas, o levantamento de dados para fins de planejamento tiveram papel mais determinístico na gestão da política urbana de BH, impulsionada pela Empresa de Informática e Informação do Município (PRODABEL).

Desta forma, pode-se afirmar que os conhecimentos fisiográfico, do substrato e de sua ocupação estão em parte consolidados, em algumas escalas. Diversos trabalhos referenciados ao longo da Tese, relativos a aspectos ambientais e do planejamento urbano foram realizados em seus mais de 100 anos de urbanização, subsidiando uma legislação urbana consistente da capital.

Apesar deste acervo cartográfico analógico e digital, novos produtos podem ser incorporados para auxiliar no processo de tomada de decisão por parte das secretarias municipais, especificamente àqueles relacionados ao risco geológico.

Cita-se a referência Silva et al. (1995) como a primeira tentativa sistemática de mapear os eventos perigosos (*hazards*) na cidade. Porém, grande parte desse acervo se encontra, ainda em 2009, em formato analógico, sendo talvez este o motivo do pouco uso pelas secretarias municipais.

Também, foi constatado durante a pesquisa que as secretarias municipais envolvidas no processo de investigação das causas e mitigação dos riscos possuem boa estruturação técnica, principalmente em função da experiência adquirida ao longo dos anos. Citação se faz à consistente base digital da URBEL, especificamente do zoneamento de risco das vilas e favelas de BH (PBH, 2007b), e de seus projetos associados, a citar o PEAR e o CREAM.

Apesar da constante perícia em campo e empenho para acertos das intervenções propostas por parte da PBH, uma metodologia determinística poderia auxiliar ou ratificar a tomada de decisão. Logo, a investigação de duas metodologias (heurística e determinística), para mapear a susceptibilidade ao risco geológico associado aos movimentos de massa contribuem para maior confiabilidade, e possibilita análises qualitativa e quantitativa do evento.

Ainda, estando as metodologias automatizadas e considerando a dinâmica urbana, a atualização destas cartas se torna viável. Dessa forma, o trabalho gera

informações e estabelece proposições e critérios para futuros assentamentos e ocupação urbana.

Neste contexto, a sistematização e integralização digital dos estudos atinentes à susceptibilidade aos movimentos de massa a partir de metodologias próprias, permitindo simulações, e também sua constante atualização, constituem um estudo inédito no Município de BH.

Por estas razões, considera-se assim plenamente justificada o “ *Estudo de Movimentos de Massa Gravitacionais no Município de Belo Horizonte, MG* ”, como tema da presente Tese.

A hipótese defendida nesta Tese é que as metodologias propostas são eficientes na avaliação da susceptibilidade aos movimentos de massa em nível de planejamento regional e cadastral, com uso de ferramentas de análise espacial, associando os aspectos geomecânicos e geomorfológicos com as interações antrópicas, especificamente do uso e ocupação do solo urbano.

## 1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos, a saber:

O Capítulo 1 (Introdução) apresenta os objetivos geral e específicos, localização da área, justificativas e hipótese.

O Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) aborda cinco temas: as intervenções antrópicas no meio ambiente, o risco geológico, a geotecnia e os movimentos de massa gravitacionais, a cartografia geotécnica e a de riscos e o geoprocessamento e geoindicadores.

No Capítulo 3 (Caracterização da Área) caracteriza-se o Município de Belo Horizonte e a área do estudo de caso, a partir dos atributos predisponentes (geologia, morfologia, etc.), modificadores e deflagradores, que subsidiam as metodologias.

O Capítulo 4 (Material e Métodos) decreve as metodologias heurística e determinística, aplicadas ao zoneamento proposto.

O Capítulo 5 (Resultados e Discussão) apresenta as cartas de susceptibilidade aos movimentos de massa segundo as metodologias e escalas propostas. Nessa etapa, aplica-se a metodologia heurística para todo o município de BH, e a determinística para uma localidade do município. Para a metodologia determinística, apresenta-se uma simulação a partir de vários cenários.

O Capítulo 6 (Conclusões e Sugestões) discute as iniciativas e desafios para atingir os objetivos traçados, especificamente no que se refere à representatividade e uso das cartas obtidas. Apresentam-se as conclusões e sugestões de outras pesquisas.

O Capítulo 7 (Referências) contem as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

Os anexos (Anexos I, II e III) trazem a formulação do modelo *SHALSTAB*, os resultados de ensaios geotécnicos realizados na localidade do estudo de caso e DVD com imagens.

## CAPÍTULO 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

2.1 – INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS NO MEIO AMBIENTE

2.2 – RISCO GEOLÓGICO

2.3 – GEOTECNIA E MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS

2.4 – CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E DE RISCOS

2.5 – GEOPROCESSAMENTO E GEOINDICADORES

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS NO MEIO AMBIENTE

Uma das preocupações mais recentes da civilização (final do século 20 e início do 21) é o polêmico efeito do aquecimento global. Trata-se de um fenômeno climático em larga escala, com aumento da temperatura média da superfície da Terra nos últimos 150 anos. Discutida sob vários aspectos e cenários entre os ambientalistas e céticos, e com base em algumas constatações científicas (derretimento de geleiras continentais, observações em várias estações meteorológicas espalhadas no planeta, etc.), existem aqueles que acreditam nas causas antropogênicas para a aceleração das mudanças nas condições naturais do planeta, contrapondo à natural evolução geológica da Terra.

Tais mudanças ocorrem em escala global, geralmente à margem da percepção do cidadão comum. Porém, é em seu entorno que se constata as principais mudanças de seu hábitat, acelerando ou retardando processos na dinâmica ambiental.

Alguns exemplos destas intervenções antrópicas nas cidades podem ser observados no desmatamento, exposição do solo, terraplenagem e escavações do terreno para a ocupação, nos aterros de terrenos rebaixados e alagadiços para a urbanização, drenagem retificadas e/ou represadas para o abastecimento e/ou construção de usinas hidrelétricas, retaludamento de encostas para construção de vias, ocupação de áreas de declividade acentuada, dentre outras.

Citando Xavier (1996), “ ... o Homem moderno vem causando modificações diversificadas para atender a suas necessidades do momento, nem sempre com preocupações quanto ao futuro. Frequentemente, a natureza vem sendo vista como simples referência espacial, ou palco para o desenvolvimento econômico.”

Carvalho (2001), em momento de inspiração, recita:

“ ... Passe na área de risco geológico e social, /E contemple com horror aquela coisa anormal (infelizmente, normal !),/ De casas amontoadas, todas elas sem quintal,/ Umas noutras apoiadas, porque lhes falta terreno/ Onde sejam fundadas em seguro terraplano/ Que tremem desamparadas ao chegar o vendaval,/ E estalam todas coitadas, prevendo-se logo engolfadas/ No vórtice do lamaçal.”



Dentre as principais interferências indutoras aos movimentos de massa, Parizzi (2004) sugere algumas ações antrópicas e implicações, resumidas e apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Atividades antrópicas e relação com o desencadeamento dos movimentos de massa.

Ações Antrópicas	Implicações
Desmatamento.	Aumento da velocidade de escoamento e eliminação da proteção do impacto de chuva nos terrenos.
Árvores de grande porte no topo das encostas.	Redução da resistência devido a ação das raízes e do vento.
Construções em encostas sujeitas a processos evolutivos naturais.	Modificações do fluxo de água superficial, escorregamentos, aceleração da erosão, <i>piping</i> .
Execução de cortes e escavações.	Exposição de camadas de solo/rocha antes confinados e mudança na geometria do talude.
Execuções de aterros sem compactação adequada.	Sobrecarga e criação de material de baixa resistência.
Abertura não planejada de estradas.	Desconfinamento de discontinuidades e eliminação de suportes naturais dos maciços rochosos e de solo e diminuição da resistência.
Lançamento de detritos e lixo nas encostas.	Formação de depósitos tecnogênicos.
Obstrução de cursos de água naturais ou linhas de drenagem.	Aumento das poropressões.
Lançamento de esgoto e água servida nas encostas.	Aumento de poropressões e fluxo subsuperficial.
Execução de drenagem não planejada e instalação de sistemas de saneamento sem planejamento ou devidos cuidados.	Vazamentos, saturação do solo, formação de redes de fluxo e aumento de poropressões e <i>piping</i> .
Fragmentação de maciços para a extração mineral e exploração de material para construção civil.	Criação de zonas de fraqueza e estímulo da aceleração do intemperismo físico/químico e diminuição da resistência mecânica.

Fonte: Adaptado de Parizzi (2004).

A Figura 2.1 apresenta um esquema para a ocorrência de um desastre natural. Observe que na natureza vários fenômenos fazem parte da geodinâmica terrestre, porém, se estes se deslocarem para um sistema social, pode gerar uma situação potencial de perigo a pessoas e bens, ocasionando o desastre natural. Se não gerar danos, o fenômeno volta a ser considerado como evento natural.



Figura 2.1 – Evento e desastre natural.

No mundo, a distribuição dos desastres naturais tem relação com a localização, magnitude e frequência de certos eventos e principalmente pela vulnerabilidade social das nações envolvidas (UNDRO, 2008).

Segundo Marcelino (2007), com base nos dados de desastres do banco global EM-DAT (*Emergency Events Database*) (EM-DAT, 2007), para um período de 1900-2006, o continente que apresentou o maior número de registros foi o asiático (3.699 registros), seguido pelo americano (2.416 registros). Destes, aproximadamente 66% estavam vinculados às instabilidades atmosféricas severas (35% inundações e 31% tempestades). Ainda, neste mesmo estudo, observou-se que a grande maioria (mais de 70%) ocorreu em países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos.

Segundo Simões (2007), esta situação refere-se à explosão demográfica descontrolada em países economicamente “deprimidos” do continente africano, sul-americano e sudeste asiático, onde suas populações se concentram em gigantescas cidades sem o devido planejamento urbano.

Alcántara-Ayala (2002) comenta que os dados de desastres naturais globais refletem as condições sócio-econômicas desses países, como a falta de planejamento urbano e o elevado adensamento populacional nas áreas de risco.

Segundo o IBGE (2007), até a década de 50 (século passado), menos de 40% da população brasileira concentrava-se nas cidades. A partir dos anos 60 e 70 a urbanização foi acelerada e atualmente as cidades abrigam mais de 70% da

população brasileira. Tal constatação também se refletiu, por exemplo, na cidade de Belo Horizonte (MG) (Fabiano, 2005).

Segundo Marcelino (2007), conforme dados do EM-DAT (2007), ocorreram 150 registros de desastres no Brasil (período 1900-2006), sendo 84% a partir da década de 70. Destes, 54% referem-se às inundações e 14%, aos escorregamentos. Com relação à distribuição espacial, 60% ocorrem nas regiões sudeste e sul.

Em Zuquette e Pejon (2004) tem-se um inventário de eventos perigosos naturais para os diferentes estados do Brasil, com detalhe para o estado de São Paulo. Observa-se através do estudo uma diversidade de eventos com distribuição espacial irregular. Estes autores citam que, em termos de extensão, os solos colapsíveis e os processos erosivos são os que mais se destacam, principalmente, nas zonas constituídas de materiais inconsolidados e residuais, recoberto rochas sedimentares e metamórficas.

Segundo Cerri (2006), a modalidade dos escorregamentos é um dos principais fenômenos relacionados a desastres naturais no Brasil, e que estão associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados, repetindo-se a cada período chuvoso mais severo, associado às predisposições geológico-geotécnicas.

Monteiro (1991) menciona que as enchentes e os escorregamentos não seriam danosos se nas cidades parte de seus habitantes não fosse induzida a formas de urbanização espontânea e precária em sítios perigosos. Augusto Filho (1994) cita que mais de 90% dos escorregamentos ocorridos em 1988 no município de Petrópolis (RJ) foram influenciados pela ocupação desordenada de encostas.

Como pode ser amplamente observado nas médias e grandes cidades brasileiras, esta desigualdade levou a população menos favorecida a ocupar áreas nas encostas íngremes e margens de rios, oferecendo riscos à vida. Na Tabela 2.2 observa-se o número de mortes relativo a escorregamentos de encostas no Brasil (IPT, 2006).

Conforme observado pela Tabela 2.2, apesar da relação de vítimas fatais ser pequena quando comparada à população brasileira ( $180 \times 10^6$  habitantes), soma-se a este irreparável dano, as perdas indiretas, como os desabrigados ou desalojados e as perdas materiais, em virtude da ocorrência do escorregamento.

Tabela 2.2 – Número de óbitos causados por acidentes associados a escorregamentos no Brasil por ano, de 1989 a 2006.

Ano	Óbitos	Ano	Óbitos
1989	90	1998	23
1990	34	1999	48
1991	26	2000	85
1992	99	2001	58
1993	28	2002	68
1994	64	2003	102
1995	166	2004	57
1996	228	2005	51

Fonte: Adaptado do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2006).

Olshansky e Rogers, 1987 e Wold JR. e Jochim, 1989, descrevem como perdas indiretas, os seguintes problemas:

- interrupção de funcionamento dos transportes, dos serviços públicos e dos meios de informação;
- impactos relacionados à imagem desfavorável de um local, propriedade ou empreendimento sujeitos a escorregamentos, como a desvalorização de bens, a redução dos impostos arrecadados pela desvalorização de propriedades ameaçadas ou atingidas por escorregamentos e a desmotivação de investimentos;
- alteração nas atividades do comércio e da indústria como consequência da queda de produção;
- geração de gastos de reabilitação e reconstrução; com remoção, em caráter provisório ou definitivo dos moradores dos locais afetados para alojamentos provisórios e/ou obtenção e construção de novas moradias para relocações definitivas; execução, nas áreas afetadas, de obras emergenciais para impedir novas ocorrências de escorregamentos; execução de obras de remediação, etc; e
- custos referentes à mobilização de organizações de defesa civil; dentre outros.

Esta situação de acidente associado à exclusão territorial e degradação ambiental se agrava, por exemplo, por ocasião de períodos chuvosos mais intensos, como pode ser constatado pela análise da Figura 2.2, em que se relacionam os totais pluviométricos e as ocorrências de escorregamentos, especificamente em BH (Xavier, 1996).

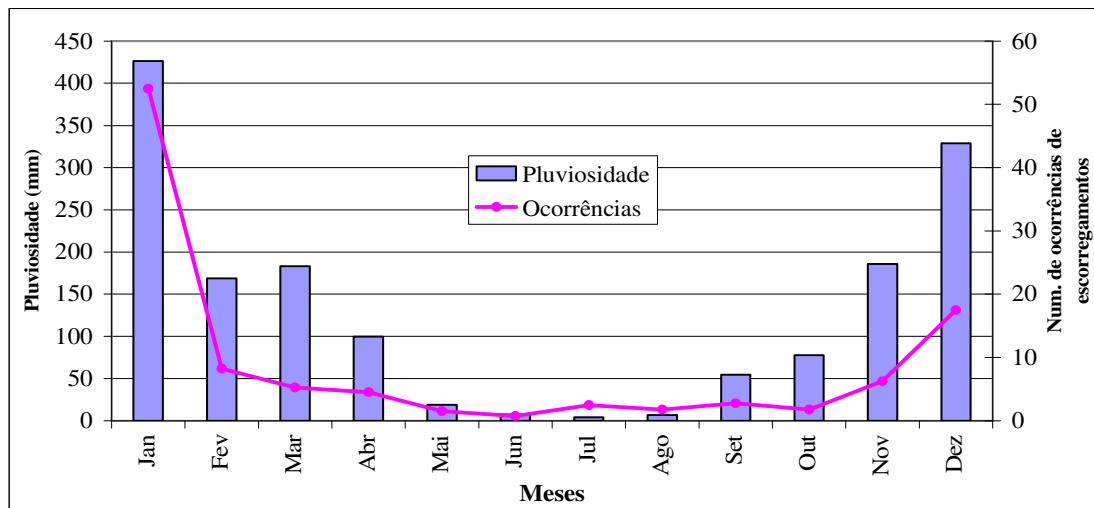


Figura 2.2 – Relação entre a pluviosidade e o número de ocorrências de escorregamento: médias entre os anos de 1991 a 1994, em BH.

Fonte: Adaptado de Xavier (1996).

Conforme discutido por Xavier (1996), e verificado pelos dados da Figura 2.2, a média anual de ocorrências foi de 105,3, sendo excedida nos anos de 1991 e 1992 (168 e 174, respectivamente) e coincidentes com os maiores totais pluviométricos (1705,9 e 1649,9 mm). Pode-se observar, também, que as maiores e menores médias mensais de ocorrências estão relacionadas às maiores e menores alturas pluviométricas mensais.

Cajazeiro et al. (2007) buscaram relacionar chuva e escorregamento em BH. Com base em dados da URBEL analisaram 434 escorregamentos registrados na cidade, no período 2006-2007 (PBH, 2007b).

A situação mostrada na Figura 2.2 geralmente se repete em outros municípios brasileiros e, segundo dados da Secretaria Nacional de Defesa Civil (2008), a distribuição geográfica de escorregamentos vem afetando mais os Estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais.

A citar a recente (novembro de 2008) tragédia ocorrida no Vale do Itajaí (SC), em que morreram mais de uma centena de pessoas e mais de setenta mil desalojados e desabrigados (vítimas de desmoronamentos e enchentes). Entre as principais causas destes movimentos de massa tem-se o volume elevado de chuva e sua concentração (588mm em 5 dias), geologia local (solos argilosos, intemperizados e profundos) e relevo local acidentado; somado ao desmatamento e ao uso e ocupação inadequados (Defesa Civil/SC, 2008).

Em Minas Gerais, no período de agosto de 2002 a dezembro de 2002, ocorreram 15 escorregamentos de maiores proporções que resultaram em 275 residências destruídas, 224 desabrigados e 10 vítimas fatais. Entretanto, só no mês de janeiro de 2003, em virtude de fortes chuvas, o número de escorregamentos aumentou assustadoramente, danificando 3.312 casas e 155 pontes, deixando 2.367 desabrigados, 14.398 desalojados e vitimando fatalmente 45 pessoas (Defesa Civil/MG, 2008).

Ainda em Minas Gerais, especificamente em Vilas e Favelas de BH, segundo Parizzi et al. (2004), e dados da Secretaria de Habitação e da Coordenadoria de Defesa Civil de MG, revelaram uma média anual de 400 ocorrências de escorregamentos para os anos de 1994 a 2000.

Na Figura 2.3a têm-se as ocorrências de movimentos de massa registradas pela URBEL-PBH, para o período de 2006 a 2008, apenas para as Vilas e Favelas. Observa-se que, do total de 642 ocorrências, 186 localizaram-se na regional Leste e 203 da Centro-Sul (29% e 32% respectivamente).

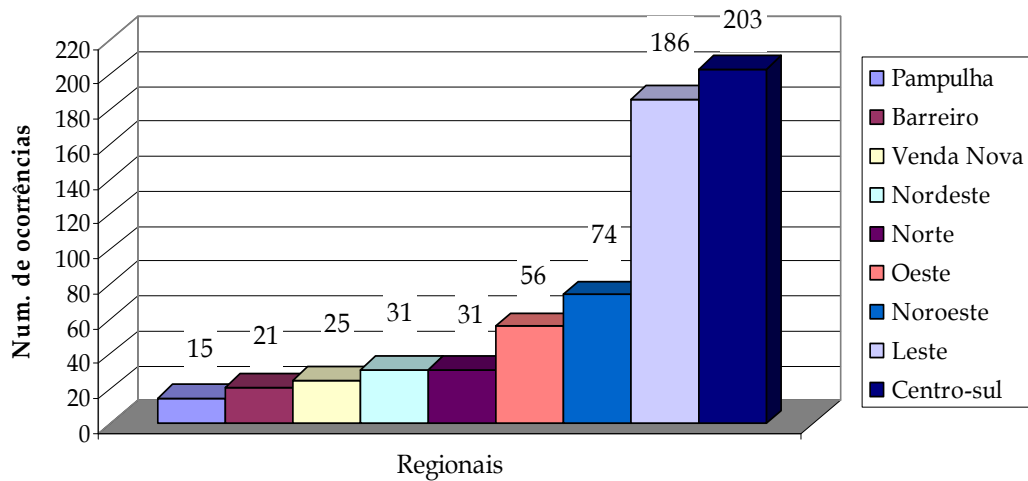
Na Figura 2.3b apresentam-se o número de moradias classificadas como risco alto e muito alto nas Vilas e Favelas, a partir de reconhecimento das características físicas da área.

Os resultados apresentados nas Figuras 2.3a e 2.3b demonstram a vulnerabilidade das regionais Centro-Sul e Leste, sendo que ambas apresentam litologia (xistos e filitos bem alterados) e relevo semelhantes.

Especificamente da regional Leste, a partir de dados da URBEL (PBH, 2007b), entre todos os bairros, o Conjunto Taquaril destaca-se como o mais vulnerável, tendo 47% e 31%, das moradias classificadas como risco alto e muito alto, respectivamente.

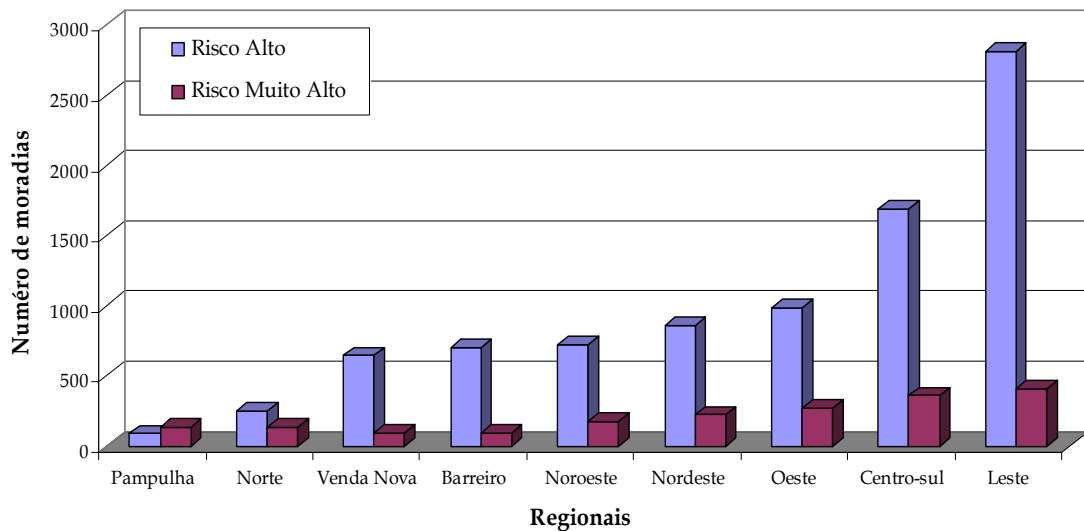
Estes dados incitaram a construção do mapa de inventários das ocorrências verificadas entre os anos de 2006 a 2008, para o bairro Conjunto Taquaril, localizado na regional Leste, a ser apresentado no Capítulo 3. Neste mesmo bairro foi aplicado o modelo *SHALSTAB*, e simulações de vários cenários para verificar-se a estabilidade das encostas (Capítulo 4).

Ocorrências registradas entre 2006 e 2008



( a )

Número de moradias classificadas com risco alto e muito alto, por regional



( b )

Figura 2.3 – Distribuição das ocorrências registradas de movimentos de massa e moradias mapeadas como risco “alto” e “muito alto”, por regionais, em BH - Anos de 2006 a 2008.

Fonte: PBH (2007b).

## 2.2 – RISCO GEOLÓGICO

Termos em inglês, como *natural disaster*, *danger*, *natural hazard*, *susceptibility*, *vulnerability* e *risk* são usados no campo de estudos dos riscos geológicos.

Carvalho (1998), a respeito da expressão *natural disaster* e *natural hazard*, menciona as definições propostas pela UNDRO (*United Nations Disaster Relief Office*) e pelo AGI (*American Geological Institute*).

Segundo a UNDRO (2008), *natural disaster*:

“ ... is the naturally occurring or man-made geologic condition or phenomenon that presents a risk or is a potential danger to life and property. ”

[ ... é uma condição ou fenômeno geológico natural ou induzido pelo homem que apresenta um risco ou é um perigo potencial para a vida e o patrimônio. ]

De acordo com a AGI (2008), *natural hazard*:

“ ... is the probability of occurrence within a specified period of time and within a given area of a potentially damaging phenomenon. ”

[ ... é a probabilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente prejudicial em um determinado período de tempo e numa dada área. ]

Ainda com relação ao termo *natural hazard* (tradução: evento perigoso), autores como Xavier (1996), Degg (1992), Faugères (1990) e Godard (1990) afirmam que o termo resume-se a duas realidades indissociáveis:

- a origem e pesquisa sobre os mecanismos permanentes ou responsáveis por sua ocorrência e evolução, a análise sobre a frequência e possibilidade de recorrência. Destacam-se a descrição dos agentes predisponentes e agentes deflagradores para os movimentos de massa em BH, apresentados no Capítulo 3; e
- a manifestação, ao atingir a população, caracterizada pelas modalidades dos eventos considerados e, podendo ser qualificada e quantificada segundo a severidade.

Varnes et al. (1984), Scheidegger (1994) e ISRD (2008) também definem *natural hazard* como a probabilidade que uma condição razoavelmente estável possa mudar abruptamente, ou como a probabilidade de ocorrência de certo fenômeno danificar potencialmente uma determinada área e em um determinado período de tempo.



Segundo Guzzetti (1999) a definição de *natural hazard* incorpora os conceitos de magnitude, local geográfico e retorno do evento em relação ao tempo. O primeiro recorre à intensidade do fenômeno natural, condicionando seu comportamento e poder destrutivo; o segundo refere-se à possibilidade em identificar o lugar onde o fenômeno possa acontecer; o terceiro recorre à frequência temporal do evento.

Albala-Bertrand (1993) detalha e sugere que sete parâmetros físicos sejam estabelecidos na caracterização de eventos perigosos:

- magnitude: máxima energia liberada por um evento particular em uma dada localidade;
- frequência: incidência média que um evento de uma dada magnitude ocorre em uma área;
- duração: espaço de tempo no qual um evento perigoso persiste;
- extensão da área: área geográfica coberta por um evento;
- velocidade de avanço: período de tempo entre o surgimento de um evento e seu pico;
- padrão de dispersão espacial: padrão de distribuição de um evento sobre uma área geográfica afetada.

Zuquette e Gandolfi (2004) utilizam o termo *safety threshold* (limite crítico), como o limite entre um evento comum e um perigoso. Ainda, estes autores afirmam que “... a probabilidade é condicionada por atributos que predisõem (relativos ao espaço) e deflagradores (relativos ao tempo), associados aos atributos modificadores, que afetam a probabilidade, tanto em relação ao tempo quanto ao espaço.”

A respeito do conceito do termo *risk* (tradução: risco), Varnes (1974) assim o define:

“... means the expected degree of loss due to a particular phenomenon.”

[ ... significa o grau de prejuízo esperado devido a um fenômeno particular. ]

Varnes (1984) reforça que o *landslide risk* (risco de deslizamento de terra) é definido como o número esperado de vidas perdidas, as pessoas prejudicadas, danos à propriedade e rompimento de atividade econômica devido a um particular *landslide hazard* (perigo de deslizamento de terra), para uma determinada área e período de referência.

Chancón et al. (2006) e ISRD (2008) fazem uma ratificação dos conceitos *hazard* e *risk*, apresentando vários artigos e respectivos autores, associados a mapeamento

de eventos perigosos e de risco. Ainda, estes autores propõem uma uniformização de conceitos.

Observa-se portanto que os termos *hazard* e *risk*, relativo a eventos naturais extremos, não são sinônimos. O termo *hazard* trata especificamente da probabilidade da ocorrência de um fenômeno prejudicial. O termo *risk* refere-se somente aos prejuízos provocados por tal fenômeno (Chancón et al., 2006; ISRD, 2008).

Na Tabela 2.3, apresentam-se conceitos básicos de estudos atinentes ao risco, por Zuquette (1993).

Tabela 2.3 – Conceitos básicos de estudos do risco, por Zuquette (1993).

<b>Termo</b>	<b>Conceito</b>
Evento	Fenômeno com características, dimensões e localização geográfica registrada no tempo.
Evento perigoso ( <i>hazard</i> )	Representa um perigo (latente) que se associa a um fenômeno de origem natural ou provocado pelo homem, que se manifesta em um lugar específico, em tempo determinado, produzindo efeitos adversos nas pessoas, nos bens e/ou no meio ambiente.
Processo perigoso	Conjunto de fenômenos que antecedem o evento perigoso puro ( <i>hazard</i> ) e que é tomado erroneamente como sinônimo de evento perigoso ( <i>hazard</i> ) que conceitualmente são diferentes.
Vulnerabilidade	Característica intrínseca de um sujeito, sistema ou elemento que estão expostos a um evento perigoso ( <i>hazard</i> ), correspondendo à predisposição destes em serem afetados ou suscetíveis a perdas. É expressa em uma escala que varia de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais).
Risco	É a probabilidade de que ocorram perdas (econômicas, sociais e ambientais), além de um valor considerado normal ou aceitável para um lugar específico durante um período de tempo determinado. É considerado o resultado da relação entre um <i>hazard</i> e vulnerabilidade dos elementos (seres humanos, residências entre outros) expostos.

Fonte: Adaptado de Zuquette (1993).

Ainda, a União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS-WGL, 1997), sugere as seguintes definições, resumidas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Conceitos básicos de estudos do risco, por IUGS-WGL (1997).

<b>Termo</b>	<b>Conceito</b>
Risco ( <i>risk</i> )	Medida da probabilidade e intensidade de um efeito adverso para a saúde, propriedade ou ambiente. Geralmente, é o produto da probabilidade pelas conseqüências.
Perigo ( <i>danger</i> )	Fenômeno natural (movimento de massa gravitacional) geometricamente e mecanicamente caracterizado.
Ameaça ( <i>hazard</i> )	Uma condição com potencial para causar conseqüências indesejáveis. Ameaças de escorregamento devem ser descritas por zonas e magnitudes.
Elemento sob risco ( <i>Element at risk</i> )	População, edificações, infra-estrutura e componentes ambientais existentes na área potencialmente afetada pelos movimentos de massa.
Vulnerabilidade ( <i>vulnerability</i> )	Grau de perda potencial para um dado elemento ou grupo de elementos dentro da área afetada por um evento.
Risco Individual ( <i>individual risk</i> )	Risco de perda de vida ou perdas materiais para um indivíduo que vive ou desenvolve atividades nos domínios da zona exposta aos movimentos de massa.
Risco social ( <i>societal risk</i> )	Risco de múltiplas perdas (ou mortes) para a sociedade como um todo, causado pelos movimentos de massa.

Fonte: Adaptado de IUGS-WGL (1997).

Nesse trabalho aplica-se o termo “susceptibilidade” como a probabilidade da ocorrência de um evento, no caso específico, para os movimentos de massa gravitacionais.

Existe relação direta entre os eventos naturais extremos e as atividades humanas, alterando a sensibilidade ao perigo. A citar, os movimentos de massa não seriam perigosos se as encostas não fossem ocupadas. Ainda, a probabilidade de perigo poderia ser intensificada por um corte inapropriado ou uma chuva extrema.

Zuquette e Pejon (2004) apresentam fluxograma que relaciona componentes do meio ambiente envolvidos na geração de eventos perigosos (Figura 2.4).

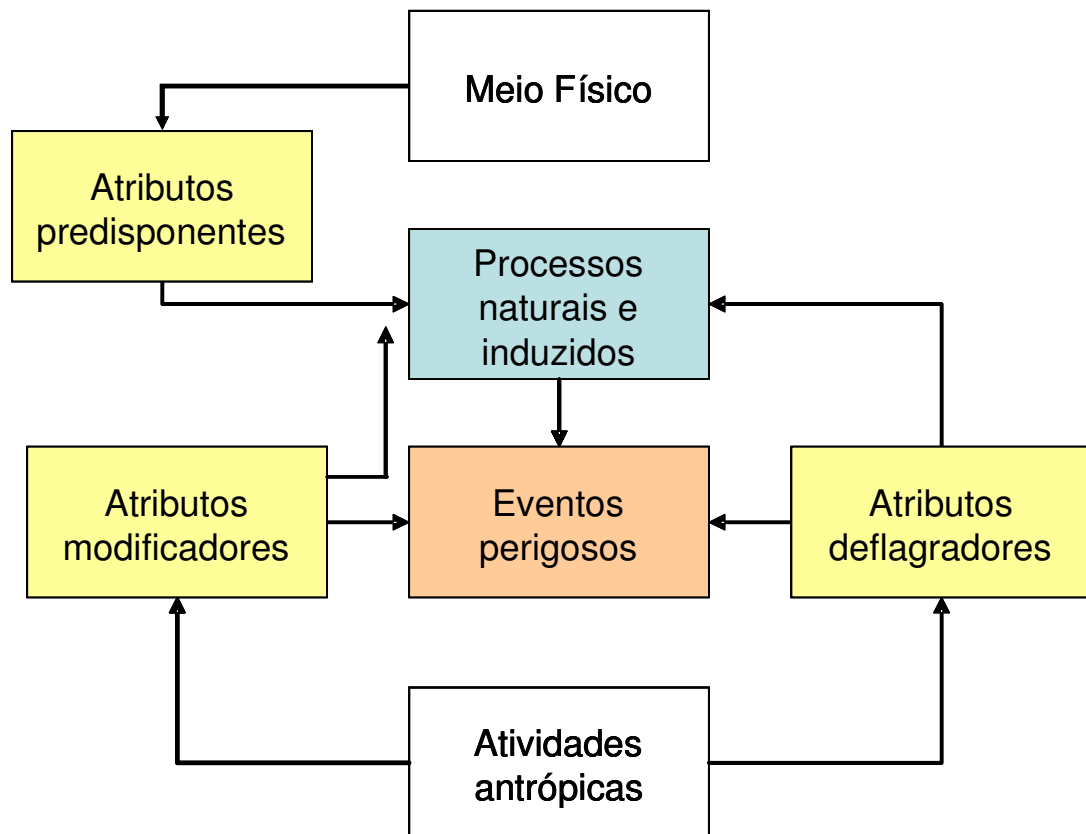


Figura 2.4 – Componentes do meio ambiente envolvidos na geração de eventos perigosos.

Fonte: Adaptado de Zuquette e Pejon (2004).

Já com relação ao risco geológico, segundo Carvalho (2001), é o que envolve eventos ou processos geológicos, naturais ou induzidos por ação antrópica. Sabe-se que os processos geológicos fazem parte da dinâmica do planeta (independem da presença do Homem), porém se intensificam e são mais freqüentes pelas alterações decorrentes do uso e ocupação do solo, como discutido anteriormente.

Especificamente, contemplam-se neste trabalho os riscos geológicos exógenos (da geodinâmica externa). Alguns autores como Carvalho (2001) e Silva et al. (1995) classificam os riscos de enchentes e inundações diretamente na categoria dos riscos geológicos.

Na Figura 2.5 apresenta-se uma classificação didática dos riscos (Cerri e Amaral, 1998). Esta pesquisa abordou os riscos classificados como físicos.

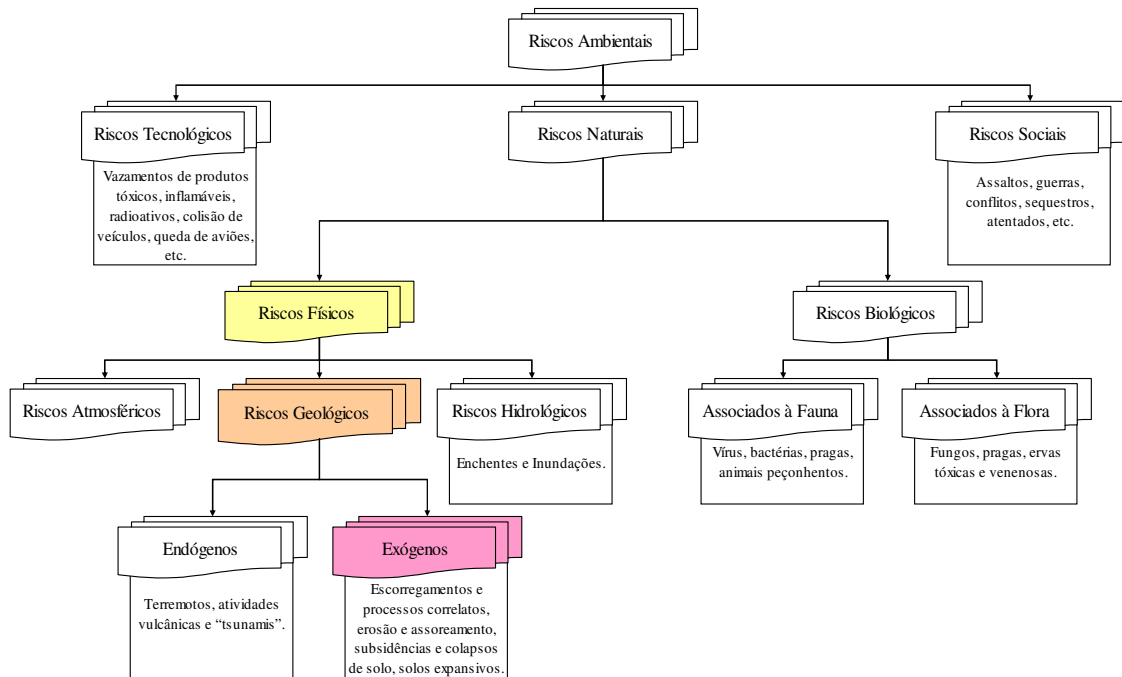


Figura 2.5 – Classificação dos riscos ambientais.

Fonte: Cerri e Amaral (1998).

Na literatura (Hays, 1991; Silva et al., 1995; Xavier, 1996; Cerri e Amaral, 1998; Ministério das Cidades, 2006), encontra-se com frequência a forma simples e didática de conceituar o risco ( $R$ ) por meio da Equação 2.1:

$$R = P \times C \quad (\text{Equação 2.1})$$

ou seja, produto da possibilidade de ocorrência de um determinado evento ( $P$ ), pelo conjunto de seus danos, efeitos ou conseqüências potenciais e econômicas, a pessoas, materiais ou meio ambiente ( $C$ ).

Esta equação é similar à proposta por Varnes (1974) (Equação 2.2) para estudo do risco ( $R$ ):

$$R = H \times V \quad (\text{Equação 2.2})$$

ou seja, produto da probabilidade de ocorrência de um fenômeno ou evento, no tempo e espaço conhecido ( $H$ ), pela vulnerabilidade ou grau de perda de um dado elemento de risco ( $V$ ).

Segundo Varnes (1984), para qualquer estudo de zoneamento de eventos perigosos, três princípios básicos devem ser considerados numa modelagem de movimento de massa:

- as ocorrências presentes e passadas, para retratar possíveis reincidências de um certo evento;
- as principais condições e predisponentes que possam causar as instabilidades;
- a estimativa do grau de perigo intrínseca.

Segundo Cerri e Amaral (1998), o evento (  $H$  ) pode ser entendido como um fato já ocorrido, onde não foram registradas conseqüências sociais e econômicas relacionadas diretamente a ele. Logo, o valor de (  $H$  ) é a probabilidade de ocorrência de um evento, por exemplo, de um escorregamento de uma encosta em determinado local em função da combinação de fatores como geomecânica, declividade, cobertura vegetal e tipo de solo, independente do uso e padrão de ocupação da localidade.

Relativo à vulnerabilidade (*vulnerability*), refere-se ao conjunto dos danos e efeitos (  $V$  ), e significa estar vulnerável a alguma condição ou evento. Segundo a ISRD (*International Strategy for Disaster Reduction*) (2004), a vulnerabilidade é uma condição determinada por fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais que indica a suscetibilidade de uma comunidade ao impacto de um evento perigoso.

Van Westen (2004) sugere que a equação sugerida por Varnes (1984), contemple além da probabilidade de ocorrência do evento (  $H$  ) e o grau de perda de um dado elemento de risco (  $V$  ), um valor relativo à quantia ou custo dos elementos envolvidos ao risco (  $A$  ):

$$R = \sum (H \times \sum (V \times A)) \quad \text{(Equação 2.3)}$$

Esta fórmula buscaria relacionar todos os eventos, com suas respectivas probabilidades, e perdas correspondentes.

Considerando os fatores mencionados nas equações 2.2 ou 2.3, para avaliação do risco, segundo Van Westen (2004), o componente associado à probabilidade de ocorrência do evento (  $H$  ) é sem dúvida o mais difícil de avaliar, devido à dificuldade em estabelecer a relação de magnitude-frequência em um local particular, embora este autor avalie que possam ser feitas tais relações em áreas maiores.

Além disso, a estimativa da probabilidade de ocorrência de movimentos de massa, por exemplo, requer dados sobre os seguintes aspectos:

- condicionantes geológico-geotécnicos;
- topografia;
- estratigrafia;
- variações do nível d'água superficial e subsuperficial, ao longo do tempo;
- tensões que os materiais possam resistir; e
- intensidades e recorrência dos fatores deflagradores, que possam aumentar a probabilidade, como da pluviosidade extrema ou de terremotos.

As análises comentadas sucintamente referiram-se especificamente a escorregamentos. Considere como as diversas modalidades de processos e eventos geológicos poderiam se comportar isoladamente e/ou em conjunto, nas variadas possibilidades dos danos provocados a materiais e pessoas, sob o aspecto do risco. Reitera-se, então, a preocupação da dinâmica e da multidisciplinaridade do problema.

### 2.3 – GEOTECNIA E MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS

É fato que projetos de Engenharia, relativos aos condicionantes geológicos, são viáveis e bem conduzidos quando ocorre uma definição do meio físico (Geologia), e sobre este, ajusta-se a concepção dos projetos (Engenharia).

Logo, busca-se apoio nos conhecimentos dos profissionais citados, quando objetiva-se a melhoria ou manutenção das condições ambientais, equacionando adequadamente as questões de ocupação e urbanização, recuperação de áreas degradadas, estudos de impacto ambiental, etc.

Movimentos de massa gravitacionais é o termo usado para descrever os processos relacionados a movimentos descendentes de solos e rochas nas encostas, induzidos pelo campo de tensão gravitacional (Patton e Hendron Jr., 1974; Selby, 1993).

A análise da estabilidade de encostas, de seus fatores predisponentes e deflagradores ao escorregamento e dos métodos de investigação constam em Terzaghi (1950), Varnes (1978), Selby (1993), Xavier (1995), Cruden e Varnes (1996), Augusto Filho e Virgili (1998), Fernandes (2001), Fiori e Carmignani (2001), Parizzi (2004), Zuquette e Gandolfi (2004), Carvalho e Galvão (2006), Yoshikawa (2006) e Cerri (2006), dentre outros.

Segundo Zaruba e Mencl (1981), do ponto de vista geológico, os movimentos de massa são resultados de processos exógenos de desnudação, ou seja, a partir de fatores que atuam na geodinâmica externa. Ainda, preocupam-se com suas origens, com seus processos e com as formas superficiais deles provenientes. O trabalho de Parizzi (2004), considera estes fatores, para a região metropolitana de Belo Horizonte, MG.

Uma visão geográfica do problema, preocuparia-se apenas com sua distribuição espacial e temporal, associando-os aos possíveis danos causados, e quanto à sua percepção pela população envolvida. Neste contexto, cita-se o trabalho de Xavier (1995), que espacializou algumas ocorrências de escorregamentos de encostas em BH.



Nesse trabalho, as encostas naturais, aqui também denominadas taludes, são definidas como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos (solo e rocha), podendo ser originadas de processos geológicos e geomorfológicos. As análises de estabilidade envolvem procedimentos para quantificar o quão próximo da ruptura se encontram.

Os taludes (artificiais) de corte ou aterro originam-se por intervenções antrópicas e geralmente exibem uma homogeneidade mais acentuada, adequando-se melhor às teorias de estabilidade.

Os métodos tratados na literatura para análise de estabilidade empregam os conceitos do equilíbrio limite, no qual se considera a ruptura incipiente quando as tensões atuantes igualam-se à resistência do solo, desconsiderando as deformações envolvidas.

Na busca de automação das análises de estabilidades citam-se alguns métodos como *SHALSTAB*, *SINMAP*, *TRIGS* e *SMORPH*. Para o tratamento de dados da atitude de estrutura de maciços rochosos, estabelecendo a direção e o mergulho de camadas como fundamentos, utilizam-se, por exemplo, os *softwares DIPS*, da Universidade de Toronto, Canadá e o *GESAP* da Universidade de Bochum, Alemanha (Celestino e Diniz, 1998).

Com relação ao estudo da estabilidade das encostas, Fiori (1995) cita que a força da gravidade origina tensões cisalhantes no interior do manto de alteração ao longo das vertentes. Estas tensões, responsáveis pela ocorrência dos movimentos de massa, aumentam com a inclinação e a altura das encostas, com o peso específico do solo e com a quantidade de água que se infiltra e acumula no mesmo.

Neste processo, a água desempenha papel fundamental alojando-se nos planos potenciais de ruptura, diminuindo a resistência mecânica do solo, pelo efeito da poropressão e em função da lubrificação destes planos.

Logo, pode-se dizer que, em uma escala de tempo geológica (milhares de anos), é certo que algum escorregamento vai ocorrer em todas as encostas. No entanto, a remoção da vegetação original e a ocupação urbana, por exemplo, tendem a tornar

mais frágil o equilíbrio natural talvez já precário, e faz com que os escorregamentos passem a ocorrer em escala humana de tempo (dezenas de anos ou mesmo anualmente).

Cerri e Amaral (1998) apresentam uma síntese dos processos geológicos causadores de risco mais freqüentes no Brasil, destacando-se na Figura 2.6 apenas os escorregamentos.

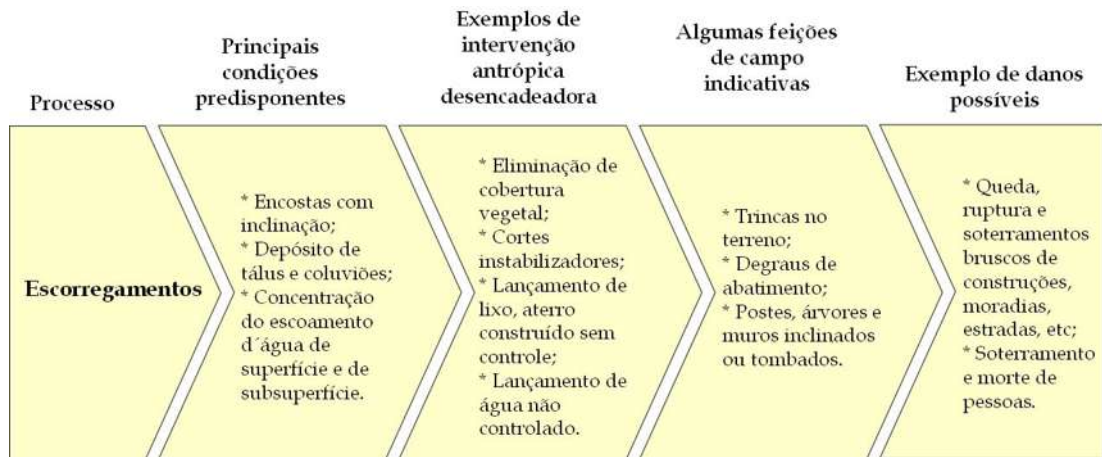


Figura 2.6 – Processo geológico de escorregamento.

Fonte: Adaptado de Cerri e Amaral (1998).

De acordo com Terzaghi (1950), duas causas (ou ações) desencadeiam movimentos de massa em encostas:

#### a) Causas externas

Resultam no crescimento das tensões de cisalhamento. Estas tensões crescem ao longo da superfície de ruptura até o momento de sua ocorrência.

#### b) Causas internas

Resultam na diminuição da resistência do material.

Dessa forma, os principais atributos predisponentes aos escorregamentos podem ser agrupadas, em quatro grandes fatores geoambientais (Prandini et al., 1976; Augusto Filho, 1994; Silva et al., 1995; Fiori, 1995; Cerri, 1998; Augusto Filho e Virgili, 1998; Carvalho, 2001; Fiori, 2001; Parizzi, 2004; Ahrendt, 2005; Yoshikawa, 2006; Highland, 2008):

- a) Condicionantes geológicos: maciços de rocha, solos residuais e depósitos de colúvio e tálus;
- b) Processos geomorfológicos: morfologia das encostas e dinâmica superficial;
- c) Processos físicos: chuvas e influências do intemperismo e cobertura vegetal;
- d) Intervenções antrópicas: atividades humanas comuns em encostas urbanas.

### **a) Condicionantes geológicos**

#### **– Maciços de rocha**

Segundo Fiori (1995) e Yoshikawa (2006), os principais fatores predisponentes estão intimamente vinculados à caracterização do tipo rochoso e grupo litológico (IAEG, 1981), grau de alteração dos minerais e às características estruturais (descontinuidades), tais como as falhas, fraturas, bandamentos, foliações e inclinação das camadas (ISRD, 1981).

Segundo Selby (1993), Augusto Filho e Virgili (1998), Marques (2007), nos taludes rochosos, os mecanismos de instabilização são controlados pelo grau de alteração e pelas anisotropias. As relações com os mecanismos de instabilização são regidos pelos fatores:

- distribuição espacial das descontinuidades, atitudes e da geometria dos taludes e encostas;
- presença e natureza dos materiais nas descontinuidades;
- irregularidades nas superfícies das descontinuidades; e
- cisalhamentos e movimentações anteriores.

Hoek e Bray (1981) citam os seguintes fatores para a estabilidade de maciços rochosos:

- a relação geométrica entre as descontinuidades e a face do talude (orientação, altura e inclinação);
- a resistência ao cisalhamento da superfície potencial de ruptura, que pode se apresentar por um, ou um conjunto, de descontinuidades.

A partir de testes de cisalhamento direto em rochas, Hoek e Bray (1981) apresentam a relação entre ângulos de atrito e sua influência ao cisalhamento, para diversos tipos litológicos (apresenta-se aqui apenas alguns litotipos) (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Ângulos de atrito para algumas rochas (Intacta, junta e residual).

Tipo de rocha Quedas	Ângulo de atrito (°)		
	Intacta	Junta	Residual
Granito	50 – 64	–	31 – 33
Quartzito	64	44	26 – 34
Arenito	45 – 50	27 – 38	25 – 34
Xisto	26 – 70	–	–

Fonte: Adaptado de Hoek e Bray (1981).

Algumas destas características serão discutidas adiante, especificamente da interação da litologia e inclinação das camadas, a fim de modelar possíveis ocorrência de quedas de blocos em localidades de BH.

Autores como Silva et al. (1995), Carvalho (2001), Pinheiro (2002), Parizzi (2004), PBH (2007b) citam algumas das características dos maciços do Quadrilátero Ferrífero que podem desencadear movimentos de massa por queda de blocos e detritos.

#### – Solos residuais e depósitos de colúvio e tálus

Os solos podem sofrer a ação dos processos erosivos, podendo culminar em escorregamentos, em virtude da sua textura, estrutura, permeabilidade e densidade (Augusto Filho e Virgili, 1998; Viana, 2000; Fiori, 2001; Parizzi, 2004; Parizzi et al., 2004; Pruski, 2006).

Segundo Pruski (2006), quanto menor a coesão do solo, associada a uma baixa capacidade de infiltração, mais susceptível é o solo à erosão laminar. Ainda, solos ricos em silte e areia e com pouco material cimentante, como aqueles compostos por matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio são muito propensos ao processo erosivo em razão da pequena resistência que oferecem ao desprendimento de partículas durante uma precipitação.

Para a região Sudeste do Brasil, Guidicine e Nieble (1983) observaram nas encostas, um perfil composto de rocha nas camadas mais profundas até o solo residual na superfície (Figura 2.7) e; em muitas situações, verifica-se a presença de colúvio e tálus (Figura 2.8).

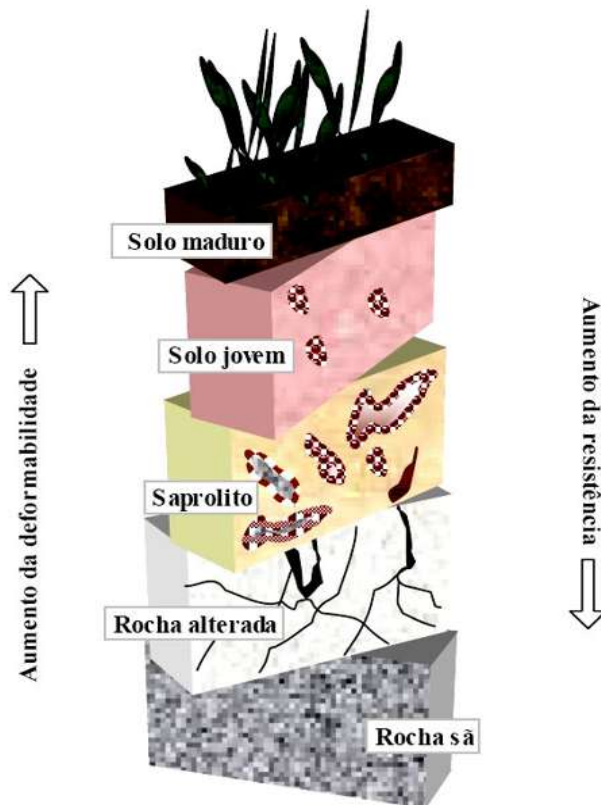


Figura 2.7 – Perfil típico de solo residual.

Fonte: Saraiva (2008).

Vale comentar que a resistência mecânica ilustrada pela Figura 2.7, pode ser divergente, por exemplo, para perfis de solos arenosos finos com espessuras que ultrapassam, frequentemente, 5m, e que podem ser residuais ou transportados. Comumente, estes materiais apresentam resistência mecânica bastante elevada, e que são superiores do que aqueles solos subjacentes (laterização).

Lambe (1996) relata que a espessura do perfil do solo residual e propriedades dependem da rocha matriz e suas discontinuidades, topografia e clima. O número de horizontes tem influência direta pelo clima local. A rocha matriz determina a composição mineralógica e conseqüentemente a granulometria, plasticidade, etc., definindo assim o seu comportamento geomecânico.

Turner (1996) relata que os colúvios são depósitos de materiais inconsolidados, normalmente encobrindo encostas íngremes, formados pela ação da água e da gravidade, variando de acordo com as características da rocha matriz, consistindo de uma mistura heterogênea de solo e fragmentos de rocha. Já o tálus tem predominância de blocos de rocha e elevada heterogeneidade.

Observa-se na Figura 2.8, um perfil típico do Complexo Belo Horizonte, BH. O segmento 2 ilustra a faixa de transição da planície aluvial para a encosta e a

ocorrência de solos coluvionares. As coberturas coluviais foram resultantes da erosão laminar da encosta e especificamente nesta situação, a cobertura coluvial tem caráter argilo-arenoso e coloração predominante avermelhada.

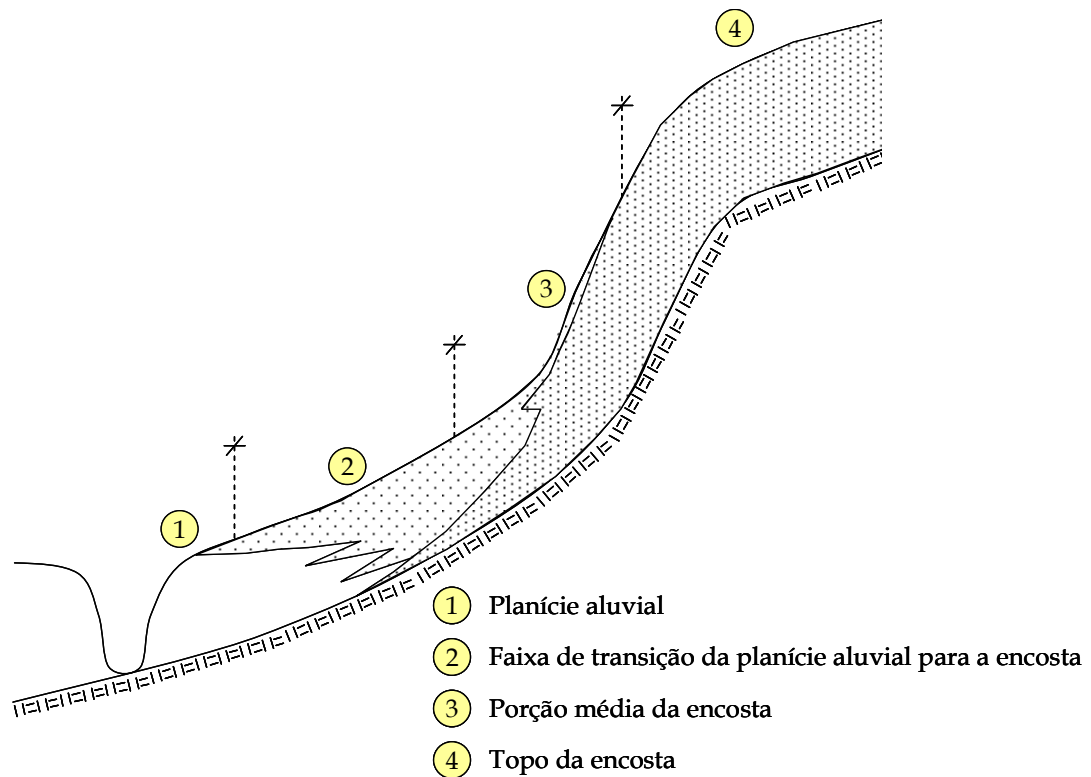


Figura 2.8 – Perfil esquemático de vertente típica do Complexo Belo Horizonte, BH.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (1995).

A caracterização geológico-geotécnica se faz importante para verificar os comportamentos de estabilidade para os solos residuais ou coluviais. Na maioria dos casos envolvendo escorregamentos de encostas em solos residuais, a ruptura ocorre de forma brusca, sendo que muitas vezes, nenhum indício físico foi observado antes do acidente (Vargas, 1999; Parizzi, 2004; Aguiar et al., 2005).

Em conseqüência disso, os acidentes registrados no Brasil em encostas de solos residuais estão relacionados ao seu comportamento tensão *versus* deformação, ou seja, para condições de tensões no campo, estes materiais alcançam a resistência máxima para pequenas deformações, com súbita redução após este pico (Wolle e Hachich; 1989, Peloggia, 1997; Peloggia, 1998; Cunha e Pereira, 2001; Parizzi, 2004).

Nos solos coluvionares, segundo Souza Neto et al. (2001), a condição de ruptura é alcançada após grandes deformações, o que explica os grandes movimentos que se observa nos colúvios antes de ocorrer um escorregamento de grandes

proporções (Rodrigues, 1999; Vargas, 1999; Fernandes e Amaral, 2000; Parizzi et al., 2004).

Deve-se atentar também para o fato que, para a mesma inclinação das encostas, sejam formadas por solos residuais ou colúviais, a coesão aparente, que é uma parcela relacionada à capilaridade e que varia com o grau de saturação do solo e independe (às vezes) da formação mineralógica, pode influenciar bastante na estabilização da encosta.

### **b) Processos geomorfológicos**

A geomorfologia, caracterizada para as áreas de estudo no Capítulo 3, será um dos principais predisponentes avaliados. A geomorfologia condiciona a ocorrência de escorregamentos em função dos parâmetros morfométricos, com destaque para a forma e a orientação das encostas, a declividade e a altimetria (Christofolletti, 1980; Augusto Filho e Virgili, 1998).

Silva et al. (1995) afirmam que tanto os processos naturais de evolução de vertentes, quanto solidariamente os problemas de estabilidade de taludes mantêm íntima relação de dependência com a compartimentação geomorfológica da vertente. Esta compartimentação pode incorporar expectativas gerais de comportamento geotécnicos. Na Figura 2.8, o segmento 3, localizado na porção média da encosta concentra os fenômenos destrutivos de vertente: fator gravitacional (declividades moderadas a altas) e o hidrológico (volume de água envolvido no escoamento torrencial).

Young (1971) sugere uma técnica de análise das encostas através da forma característica: retilínea, convexa e côncava. Ainda, estas unidades se retratam pelo segmento e elemento. O segmento refere-se à porção da encosta com inclinação constante; o elemento, a porção da encosta com curvatura constante. As curvaturas, em mapeamentos específicos, adotam o sinal positivo para convexo e negativo para côncavo.

Segundo Dietrich e Dunne (1993) e Fernandes et al. (2001), as feições morfológicas, como as seções côncavas (*hollows*), por serem zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, são as mais favoráveis para a ocorrência de escorregamentos. Isto acontece devido à concentração de água, tanto em superfície quanto em subsuperfície.

Na análise da área de contribuição de drenagem, inicialmente deve-se avaliar as formas das encostas, sua amplitude e grau de curvatura. Segundo Moreira e Pires Neto (1998), o arranjo espacial dos perfis transversais e longitudinais das vertentes (ou encostas) permite definir quatro tipos básicos relacionados à área de contribuição da drenagem, ilustrado na Figura 2.9.

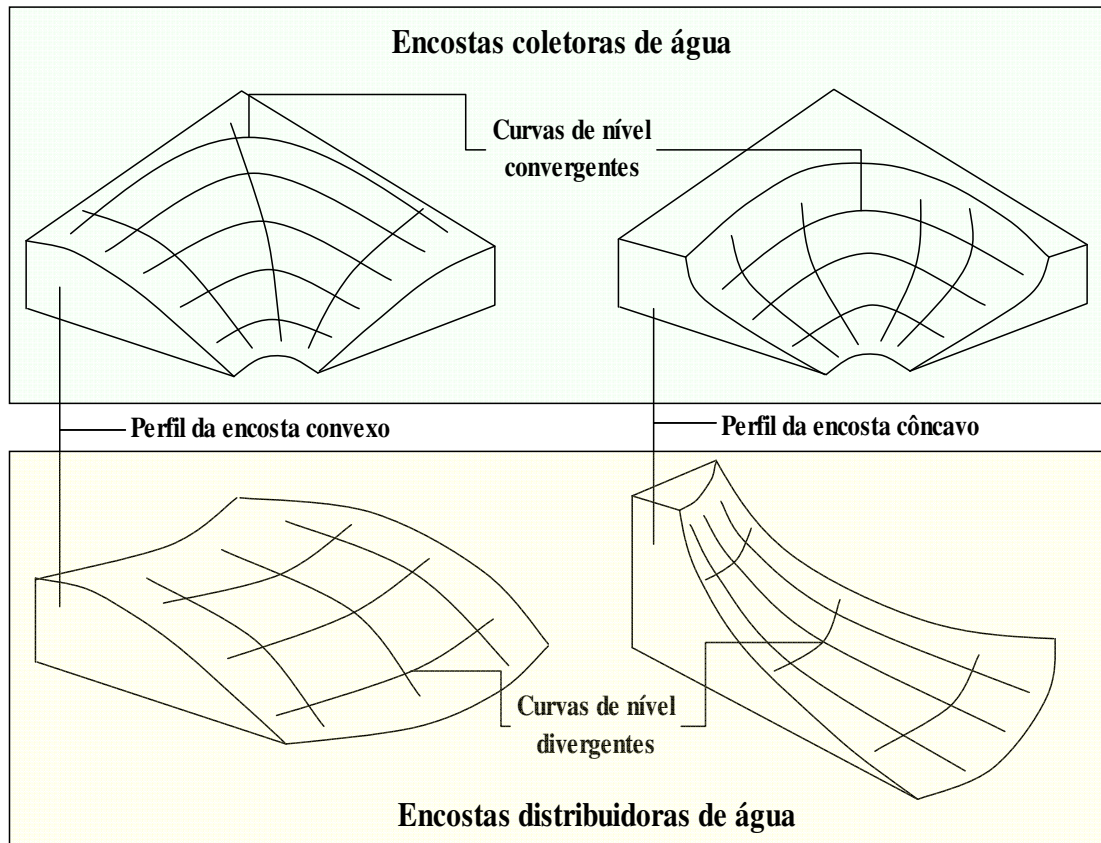


Figura 2.9 – Classificação das encostas quanto ao perfil e curvas de nível.

Fonte: Adaptado de Moreira e Pires Neto (1998).

Dessas quatro possibilidades, salienta-se as porções côncavas do relevo (*hollows*), ou seja, perfis côncavos e curvas de nível convergentes.

As situações de *hollows*, mostrada na Figura 2.10, têm características marcantes na convergência dos fluxos d'água tanto em superfície quanto em subsuperfície, favorecendo o desenvolvimento de condições de saturação nos solos e, em última análise, a ocorrência de movimentos de massa das encostas (Fernandes et al., 2001).



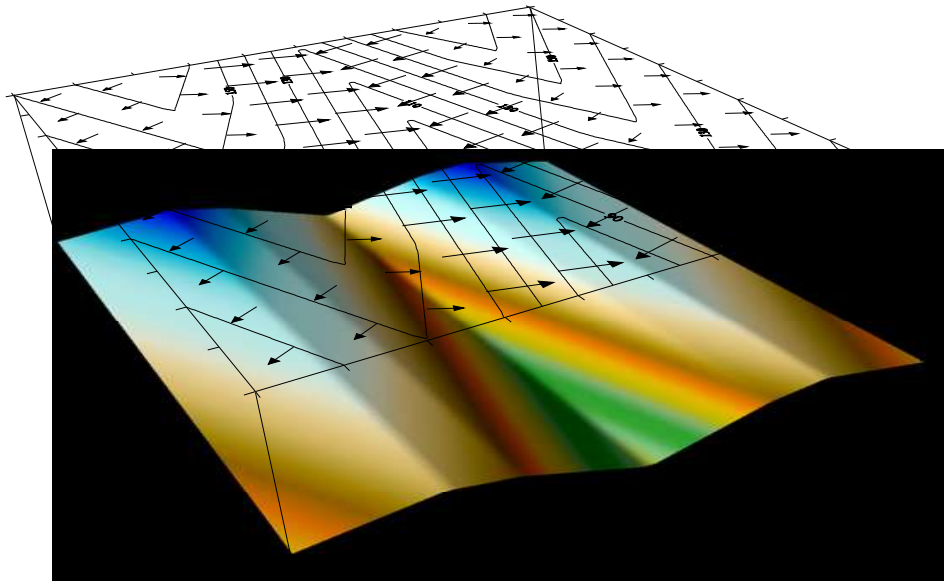


Figura 2.10 – Convergência dos fluxos d'água (*hollows*).

O'Callaghan e Mark (1984) e Cabral e Borges (1994) desenvolveram metodologias para a determinação de áreas de contribuição, com destaque para Quinn et al. (1991), que efetua o cálculo distribuindo o fluxo de forma proporcional entre as células localizadas à jusante, de acordo com a declividade local.

A rotina *runnoff* do *software* IDRISI Andes calcula a área de contribuição de drenagem a partir de dados de chuva para cada *pixel* de um MDT. Numa análise simplificada, este algoritmo acumula a drenagem "*pixel a pixel*" como se a pluviosidade sobre um local fosse uniforme. Também existe a possibilidade de introduzir arquivos relativos à taxa de precipitação, taxa de infiltração, duração de precipitação, capacidade de infiltração e quantias da absorção inicial.

Na Figura 2.11 apresenta-se a carta da área de contribuição da drenagem para a área do município de BH. Aplicou-se um Ln (logaritmo) para realçar os valores da área de contribuição, que variaram de 1 (Ln = 0) a 148.067 células (Ln = 11,905), tendo 5 classes. Uma rotina similar é utilizada pelo modelo *SHALSTAB* (Capítulo 4) para determinação da relação entre as áreas de contribuição à montante e o vertedouro (Figuras 5.15 e 5.16).

Comparando esta carta (Figura 2.11) com a carta da hidrografia (Figura 3.5), observa-se a relação dos cursos d'água existentes com as áreas de contribuição. Apesar do produto apresentado na Figura 2.11 proporcionar aplicações referentes ao escoamento superficial e subsuperficial, esta carta deve ser empregada com ressalvas para o meio urbano, em virtude das canalizações já impostas pelo sistema de drenagem formal e pela impermeabilização do espaço urbano.

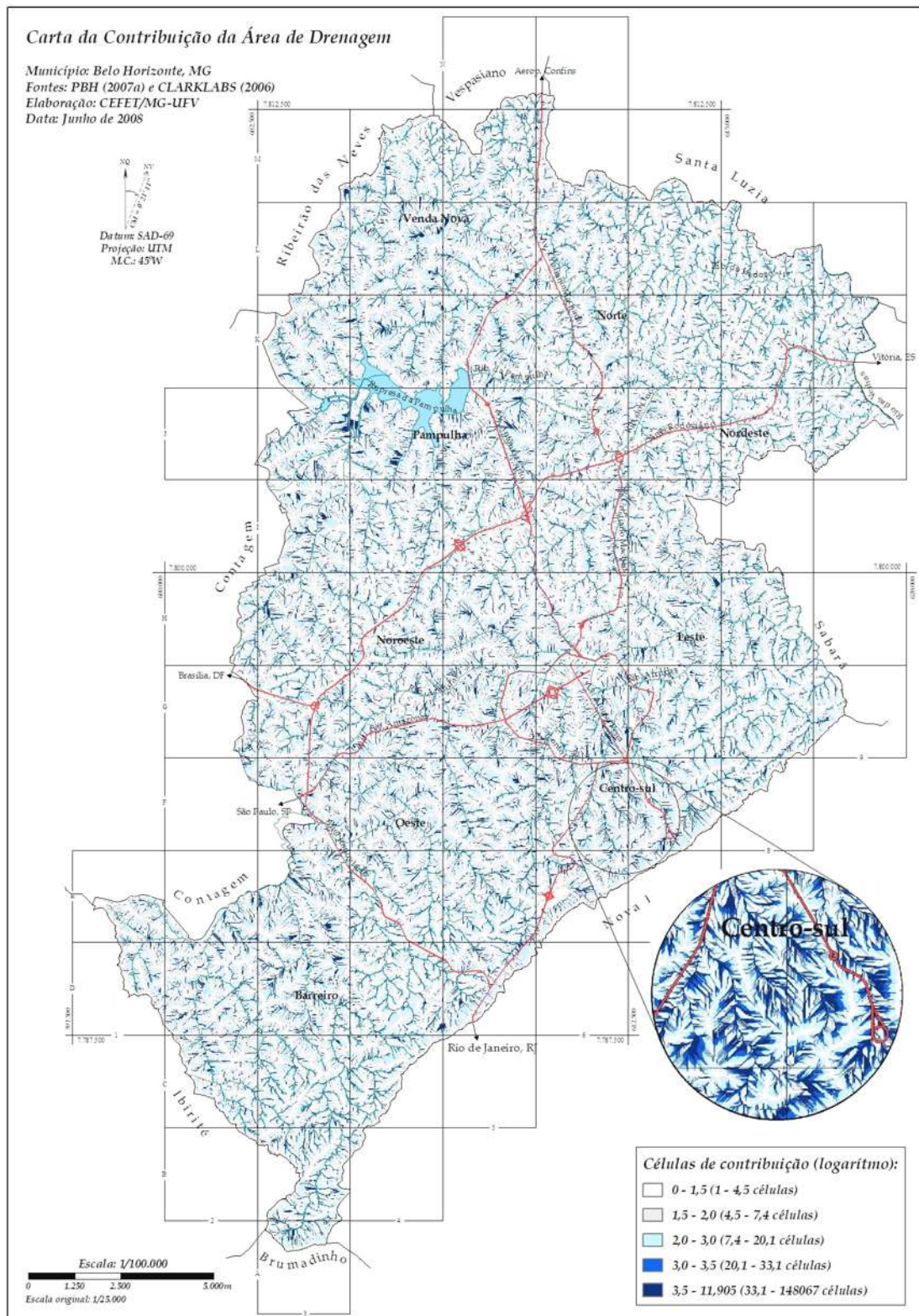


Figura 2.11 - Carta da área de contribuição da drenagem de BH.

Dietrich e Dunne (1993) e Fernandes et al. (2001) destacam também as encostas retilíneas como áreas onde predominam processos erosivos de grande velocidade, como os fluxos rasos de detritos (*shallow debris flows*). Essa característica será explorada no método *SHALSTAB*.

Outro parâmetro importante explorado por Beven e Kirkby (1979), O'Loughlin (1986), Dietrich et al. (1995), Dietrich et al. (2000), e também incorporado ao modelo *SHALSTAB*, é o parâmetro topográfico denominado por “área de contribuição” (por unidade de contorno), para cada ponto dentro de uma bacia hidrográfica. Este relaciona a concentração dos fluxos de água, e conseqüente saturação do solo, à maior susceptibilidade de movimentos de massa.

### **c) Processos físicos: Chuvas, influências do intemperismo e cobertura vegetal**

Geralmente, os principais mecanismos de atuação das águas de subsuperfície no desencadeamento de movimentos de massa são pela:

- diminuição da coesão aparente, ou seja, em maciços terrosos, tendem a formar linhas de fluxo subverticais, que aumentam o grau de saturação e diminuem os efeitos da coesão aparente, com o avanço em profundidade da frente de umedecimento; e
- variação do nível piezométrico em massas homogêneas, ou seja, a elevação do nível d'água nestas condições, aumenta as poropressões, reduzindo as tensões normais efetivas e a resistência ao cisalhamento, podendo levar os taludes à ruptura.

O estudo das características climáticas geralmente buscam explicar as frequências e intensidades de precipitações, taxas de evapotranspiração, umidade do ar, insolação, etc., sendo que estes parâmetros são definidos para uma distribuição espaço-temporal.

A influência do clima está relacionada basicamente com o regime pluviométrico e suas conseqüências sobre os processos morfogenéticos. Tanto as precipitações anômalas quanto as contínuas podem contribuir para deflagrar os escorregamentos, ou seja, ambas produzem o encharcamento do solo. As chuvas são reconhecidamente um dos principais agentes na deflagração de movimentos de massa.

O encharcamento produz saturação do solo, podendo diminuir a coesão no contato rocha-solo ao se alojar nos planos potenciais de ruptura. Nesta situação, pelo efeito da poropressão e lubrificação de possíveis planos de ruptura, ocorre diminuição à resistência mecânica do solo (Tatizana, 1987; Fernandes et al., 2001; Fiori, 2001).

Em se tratando da erosão hídrica, Pruski (2006) relata que os totais anuais têm pouca relevância neste processo, importando o conjunto das características da chuva, como intensidade, duração e frequência.

Augusto Filho e Virgili (1998) esclarecem as relações das águas, principalmente as pluviais, na dinâmica em superfície e subsuperfície e como estas atuam na deflagração dos processos de instabilização de encostas, tanto no aumento das solicitações, como na redução da resistência dos terrenos. Em síntese, podem-se elencar os principais mecanismos:

- diminuição da coesão aparente;
- elevação do nível d'água, aumentando as poropressões e reduzindo as tensões normais efetivas e a resistência ao cisalhamento; e
- elevação da coluna d'água em descontinuidades.

Logo em síntese, com relação à estabilidade de taludes, a influência da água no solo pode ser atribuída a:

- mudança nas poropressões, alterando a tensão efetiva e, conseqüentemente, a resistência do solo;
- variando o peso da massa, em função de mudanças no peso específico;
- desenvolvimento de fluxo, gerando erosões internas e/ou externas; e
- atuando como agente no processo de intemperismo, promovendo alterações nos minerais constituintes.

Guidicini e Iwasa (1976) afirmam que episódios de uma chuva intensa superior a, aproximadamente, 12% da pluviosidade média anual tendem a provocar escorregamentos, para períodos de 24 horas. Para que tais episódios atinjam o caráter de catástrofe é preciso que superem 20% da pluviosidade média anual, para períodos de 72 horas. Segundo esses autores, quando os níveis de pluviosidade são elevados, podem deflagrar escorregamentos tanto em áreas ocupadas ou alteradas quanto em áreas virgens, ou seja, os demais fatores que atuam nas encostas assumem papel secundário nos episódios de chuvas extremas.

Logo, os índices pluviométricos críticos para deflagração dos escorregamentos variam com o regime de infiltração no terreno. Segundo Augusto Filho e Virgili (1998), os escorregamentos em rocha tendem a ser mais susceptíveis a chuvas

concentradas, enquanto processos em solo dependem dos índices pluviométricos acumulados nos dias anteriores, porém as especificidades locais devem ser observadas.

Estes dois fatores (intensidade e frequência) traduzem a dinamicidade que pode ser estabelecida nas modelagens do risco aos movimentos de massa gravitacionais com base na pluviosidade local e temporal.

O estabelecimento de tais parâmetros e seus limites para a deflagração podem ser calibrados a partir da ocorrência dos eventos em questão. Por exemplo, uma carta de inventário das cicatrizes de escorregamentos, ocorridos numa determinada localidade, correlacionadas com as condições pluviométricas da época do evento, poderia gerar bancos de dados para análise estatísticas e/ou determinísticas.

Apesar da possibilidade de desenvolver relações entre chuvas e escorregamentos, Ahrendt (2005) alerta para os seguintes problemas em seu uso:

- o desconhecimento da umidade precedente local;
- ineficiência dos sistemas de drenagem;
- negligência da topografia local ou regional; e
- falta de credibilidade dos dados meteorológicos.

Outro fator a ser considerado é que as relações de causa e efeito geralmente são pontuais e restritas a uma área de estudo. Desta forma, deve-se destacar que é necessário um vasto banco de dados para definir o padrão de chuva relativo à ocorrência de escorregamento, a fim de simular a sua deflagração.

Mesmo considerando os problemas citados por Ahrendt (2005) e Fell (1994), justifica-se o uso dessa relação, mesmo quando subjetiva e aproximada. Outros estudos, como Guidicini e Iwasa (1976), Keefer et al. (1987), Tatizana (1987), também relatam esses problemas.

Em 1996, cita-se a referência D’Orsi et al. (1997), em que se implantou, no Rio de Janeiro, o “Rio-Alerta”. O sistema consiste de uma rede de 30 pluviômetros ligados a um sistema de aquisição automática de dados. Para obtenção dos valores críticos de acionamento do alerta, apoiou-se em trabalhos de Tatizana (1987), tendo sido obtidos os seguintes valores: chuva acumulada de 24 horas, utilizando o limite de 100 mm como decisão para “possível alerta”; e de 175 mm como de “alerta”, além de precipitações intensas acima de 70 mm/h.

Ferreira (1996) também estabeleceu uma correlação entre a pluviosidade acumulada em 24, 48, 72 e 96 horas e as ocorrências de escorregamentos de

encostas atendidas pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Belo Horizonte (COMDEC), durante 1991 a 1995. Este autor concluiu que as chuvas extremas para a deflagração de escorregamentos situavam-se em 40, 60, 80 e 120 mm, respectivamente.

Lúcio et al. (1998) citam que Belo Horizonte, por sua localização geográfica, sofre a influência de fenômenos meteorológicos de latitudes médias e tropicais. O período úmido (verão), devido ao aquecimento continental, caracteriza-se por um período chuvoso com temperaturas elevadas.

Na Figura 2.12 apresentam-se os totais pluviométricos mensais para os meses do ano, no período de 1961 a 1990, da estação do 5º DISME. Essa estação se encontra na região central do município e segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM) é representativa para uma área de até 50 km<sup>2</sup>.

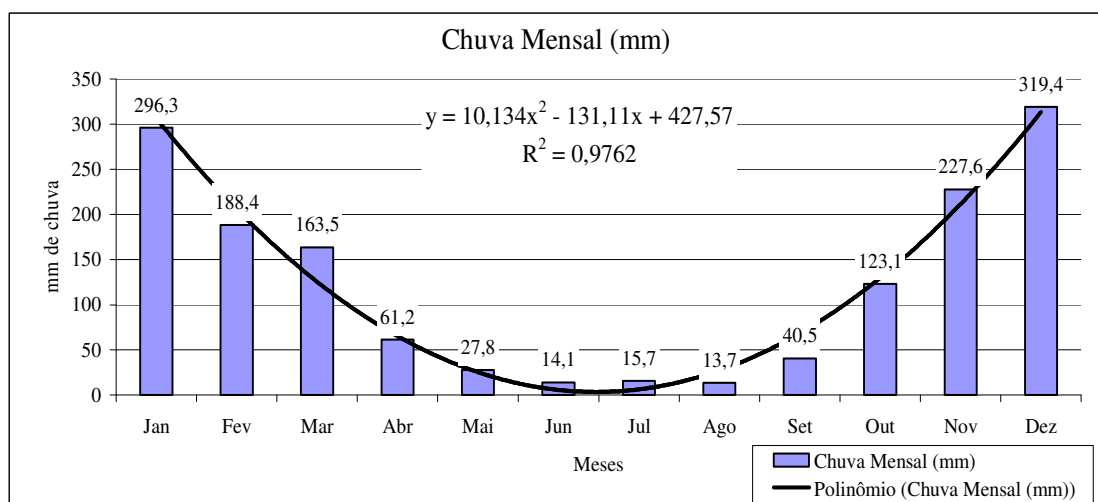


Figura 2.12 – Precipitação média em BH – Período de 1961 a 1990.

Fonte: 5º DISME – INMET (2007).

Observa-se pela Figura 2.12, que os maiores totais pluviométricos em BH começam no mês de outubro com uma média de 123,1 mm, configurando o início do período chuvoso. Nos meses subsequentes verificam-se totais pluviométricos mais elevados, atingindo um máximo nos meses de dezembro e janeiro.

Reis et al. (2004) e Coelho (2006) procuraram identificar o comportamento das chuvas em termos temporais e espaciais em Belo Horizonte, além de relacioná-las com a topografia local e fatores meteorológicos, tanto em escala local como em escala global e as possíveis relações com os eventos de escorregamentos de encostas como nos estudos de Xavier (1996), Ferreira (1996) e Parizzi et al. (2004).

Parizzi et al. (2004) relacionaram a pluviosidade aos escorregamentos de encostas naturais em Belo Horizonte, em duas localidades: de litologia metassedimentar, formada por três tipos de materiais: depósito de tálus (originados do filito), colúvio avermelhado e aterro; e de litologia gnáissica, composta por solos residuais de gnaisses de granulação grossa e miloníticos. Ambas estavam localizadas em áreas de risco, com altas declividades (média superior a 40º de inclinação) e segundo os autores, os escorregamentos foram desencadeados por excesso da precipitação e/ou por fatores antrópicos.

Estes autores observaram que os diferentes materiais geológicos reagiram de modo variado aos efeitos das águas pluviais e, em consequência, foram identificados diferentes tipos de mecanismos de ruptura (planar, rotacionais ou em cunha) em função do grau de saturação. Apesar das constatações, ressaltaram que a alta declividade em ambos os casos, foi um fator importante.

Em estudos mais recentes, relativo ao desenvolvimento de sistema de alerta aos escorregamentos durante as estações chuvosas em BH, cita-se Pereira (2007), em que se apresenta a aquisição e instalação dos 12 pluviógrafos, com o sistema de telemetria dos dados, e com o alerta atual de 50 mm, acumulado em 2 dias; e 70 mm, em 3 dias.

Cita-se também Cajazeiro et al. (2007), em que os autores buscam estabelecer os parâmetros de correlação entre pluviosidade e escorregamentos de encosta, para subsidiar as verificações de Pereira (2007).

Em Nogueira et al. (2007), além dos pluviógrafos citados em Cajazeiro et al. (2007), incorporaram-se tensiômetros instalados em duas localidades em BH (solos residuais de gnaiss e os filitos e xistos) para a medida das intensidades e das quantidades de chuva e a variação da sucção dos solos após as precipitações. A hipótese considerada é que a diminuição dos valores de sucção durante dias chuvosos, implicaria em menor resistência coesiva dos solos, e maior possibilidade de ocorrência de escorregamentos.

Como observado anteriormente, uma vez que existe a associação entre a deflagração dos movimentos de massa e os índices pluviométricos, vários trabalhos buscam estabelecer esta relação (empírica, probabilísticas ou determinísticas), a citar Wieczorek (1996), Anagnostopoulos e Georgiadis (1997), Tatizana (1987), Parizzi et al. (2004), Cajazeiro et al. (2007), dentre outros.



### – Influências do Intemperismo e cobertura vegetal

O intemperismo altera os materiais próximos à superfície, produzindo materiais equilibrados às condições físico-químicas locais. O intemperismo age por dois princípios: físico, quebrando as rochas em fragmentos menores; e químico, alterando os minerais das rochas (Ollier e Pain, 1995).

Desta forma, os efeitos do intemperismo alteram a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade dos materiais das encostas, diminuindo a estabilidade.

Segundo Thomas (1994), geralmente o intemperismo químico prevalece, e ocorre ao longo do tempo geológico. Este ocorre em razão das rochas e minerais raramente estarem em equilíbrio com a água, principalmente em condições de temperatura e pressão da superfície. Desta forma, com um possível preenchimento das discontinuidades dos maciços rochosos pela água, as suas propriedades de resistências serão afetadas.

Com relação à cobertura vegetal, Augusto Filho e Virgili (1998) atribuem como efeitos favoráveis à redistribuição da água da chuva e o acréscimo da resistência do solo devido à presença das raízes (reforço mecânico e escoramento).

Segundo Prandini et al. (1976) e Pruski (2006), o seu efeito frenador e dissipador de energia do material em deslocamento circunscrevem a área afetada, minimizando os danos em terrenos situados à jusante do escorregamento. Além de aumentar a quantidade de água interceptada, a vegetação amortece a energia de impacto das gotas de chuva, como observa-se na Figura 2.13.

Ao leitor se esclarece que algumas comparações acerca do processo erosivo com os movimentos de massa são aplicáveis, por ambos se tratarem de processos de desprendimento e arraste das partículas do solo (erosão) ou de planos de deslocamentos de solo e/ou rocha.

Por outro lado, como fatores desfavoráveis da vegetação têm-se: o efeito alavanca (ação dos ventos), o efeito cunha (penetração das raízes em fendas) e a sobrecarga vertical (peso da vegetação) (Prandini et al. 1976).

Citando Gray e Schor (2007) e Greenway (1989), os efeitos gerais da vegetação sobre o solo podem ser classificados em efeitos hidrológicos e mecânicos, apresentados pela Tabela 2.6.



**Simulação sem  
cobertura vegetal**



**Salpicamento**



**Tempo de empoçamento**



**Produção de sedimentos**



**Escoamento superficial**

**Simulação com  
cobertura vegetal (Bidim)**



**Ausência de salpicamento**



**Solo protegido**



**Produção de sedimentos**



**Escoamento superficial**

Figura 2.13 – Resultados de produção de sedimentos e escoamento superficial com e sem a presença de cobertura vegetal – Simulador de chuvas da UFV.

Fonte: Arquivo Pessoal (2008).

Tabela 2.6 – Efeitos gerais da vegetação sobre o solo.

<b>Efeito Hidrológico</b>		<b>Influência</b>
Interceptação das chuvas pelas folhas	Absorção e evaporação reduzindo a água disponível para a infiltração.	B
	Redução da energia das gotas de chuva e consequentemente da erosão.	B
	Aumento no tamanho das gotas que caem, aumentando assim a chuva localizada.	A
Caulos e folhas interagindo com o fluxo de superfície	Maior armazenamento e maior volume de água armazenada.	A/B
	Grande irregularidade no fluxo de água, reduzindo a sua velocidade.	B
Raízes	Aberturas na superfície permitindo a infiltração.	A
	Retirada de umidade, a qual é perdida na atmosfera por transpiração.	B
	Redução da porosidade e aumento da sucção e consequentemente da resistência do solo.	B
	Aumento da quantidade de canalículos no solo, resultando em aumento da permeabilidade.	A
<b>Efeitos Mecânicos</b>		<b>Influência</b>
Raízes agregam as partículas de solos	Restrição de movimento de solo, reduzindo a erodibilidade.	B
	Aumento da resistência ao cisalhamento através da formação de uma matriz de raízes.	B
Raízes que penetram em grandes profundidades	Ancoragem em um estrato firme.	B
	Suporte da camada de solo acima das árvores no talude, por arqueamento e contraventamento.	B
Crescimento de árvores altas	O peso pode tornar-se uma sobrecarga no talude e aumentar a força normal e a força de instabilização do talude.	A/B
	Quando expostas ao vento, forças dinâmicas são transmitidas ao solo.	A
Caulos e folhas cobrem a superfície do solo	O impacto do trânsito é absorvido, protegendo a superfície contra danos.	B
	As folhas caem no solo, cobrindo-o e protegendo contra a erosão.	B

A = efeito adverso da vegetação; B = efeito benéfico da vegetação.

Fonte: Adaptado Greenway (1989) e Gray e Schor (2007).



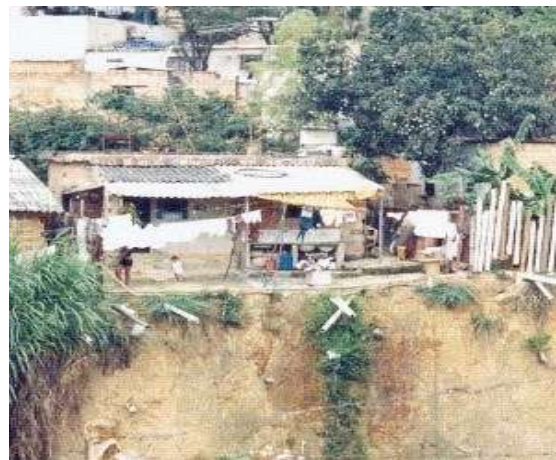
**d) Intervenções antrópicas**

Conforme discutido no item 2.1 e apresentado pela Tabela 2.1, o Homem é um agente modificador da dinâmica das encostas (Augusto Filho e Virgili, 1998).

Exemplos destas características podem ser verificados no município de BH e outras cidades, principalmente em locais de aterros lançados sem compactação, às vezes ocupados por lixo e entulho de construção (Figura 2.14a), em virtude da remoção de cobertura vegetal (Figura 2.14b), de cortes de pequena altura, porém muito inclinados (Figura 2.14c), ou pela drenagem pluvial ineficiente (Figura 2.14d).



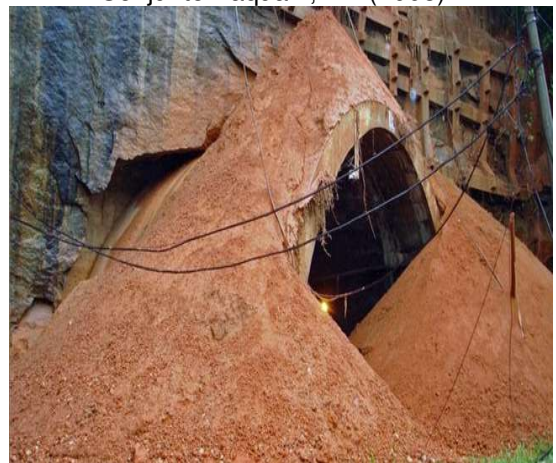
a) Entulho lançado, no bairro Conjunto Taquaril, BH (2008).



b) Remoção de cobertura vegetal, no bairro Conjunto Taquaril, BH (2008).



c) Corte com geometria inadequada, observada no Conjunto Taquaril, BH (2008).



d) Lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas – possível causa no deslizamento de terra no túnel Rebouças (RJ) (2007).

Figura 2.14 – Possibilidades de escorregamentos induzidos pelo Homem.

Fonte: Arquivo Pessoal (2008).

Dentre os trabalhos que enfatizam a importância do antropismo na deflagração de movimentos de massa citam-se Silva et al. (1995), Xavier (1996), Demchyshyn

(1997), Augusto Filho e Virgili (1998), Viana (2000), Carvalho (2001), Parizzi (2004), Carvalho (2006), dentre outros.

Enfim, na Figura 2.15 resumem-se os principais agentes predisponentes e mecanismos de deflagração dos escorregamentos discutidos anteriormente, citando os fenômenos que aumentam as solicitações e/ou os que diminuem a resistência dos terrenos (Terzaghi, 1950; Augusto Filho e Virgili, 1998).

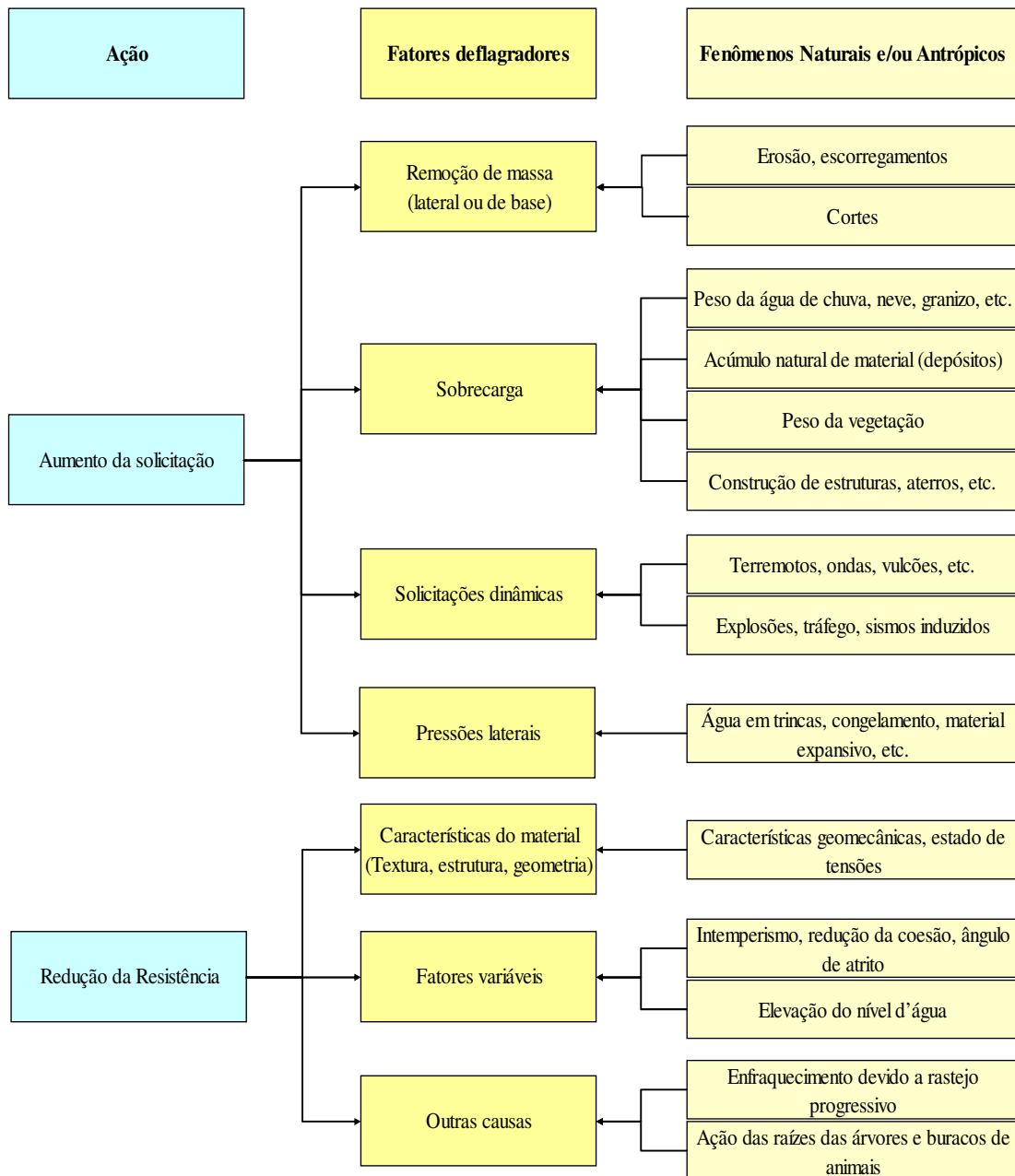


Figura 2.15 – Agentes predisponentes e deflagradores aos movimentos de massa.

Fonte: Adaptado de Augusto Filho e Virgili (1998).

Como visto na Figura 2.15, vários são os agentes que provocam a instabilização de uma encosta. Porém, aumentos na altura, na inclinação, bem como a ação da água

situam-se entre as causas mais comuns. Logo, a encosta, seja natural ou artificial, pode estar sujeita a algum tipo de movimento de massa, em função dos agentes deflagradores e se caracterizam por um movimento gravitacional de massa, sem agente transportante e com frente livre de deslocamento. Relativo à geometria, as seguintes características são (Figura 2.16):

#### a) Translacionais ou Planares

Solos pouco espessos, geralmente com um plano de fraqueza e rochas com descontinuidades subparalelas à superfície. Os materiais mobilizados em escorregamentos planares de solo, em geral, apresentam-se fluidos, com o fluxo de lama deslocando-se com grande velocidade, por dezenas de metros nos trechos de maior declividade.

#### b) Rotacional

Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas. Escorregamentos rotacionais (circular ou não-circular) de solo, por sua vez, são típicos de áreas de solos homogêneos espessos, como os aterros.

#### c) Em cunha

Solos e rochas com dois ou mais planos de fraqueza.

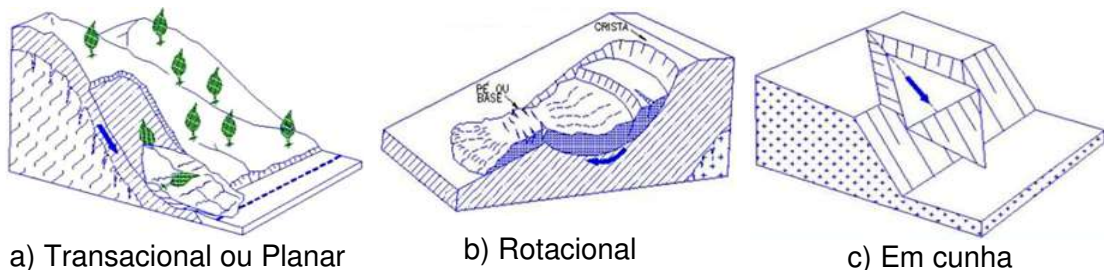


Figura 2.16 – Geometria dos movimentos de massa.

Fonte: Adaptado de Cerri (1998).

Como será observado adiante, na área de estudo do bairro Conjunto Taquaril, BH (localizada na unidade estratigráfica denominada “Grupo Sabará”), nas baixas encostas, esta apresenta adversidades como: um estado de alteração mais intenso, maior teor de umidade, frequente ocorrência de coberturas coluvionares. Nestas condições, a geometria dos movimentos de massa são, predominantemente, dos tipos translacionais e em cunha.

As características gerais mais comuns destes escorregamentos são (Cerri, 1998):

- poucos planos de deslocamento;
- velocidades médias a altas ( $10^{-4}$  m/s a 1 m/s); e
- médios a grandes volumes de material.

O material mobilizado pelo efeito gravitacional pode ser composto de rocha, solo ou ambos (detritos). Na classificação dos movimentos de massa citam-se Varnes (1978) (adotada pela *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG)), Hutchinson (1988), Cruden e Varnes (1996), Ahrendt (2004) e Highland (2008).

Rodrigues (1998) apresenta comparações, vantagens e desvantagens das classificações por vários autores sobre os movimentos de massa gravitacionais. Lacerda (2003) apresenta uma relação entre “classes de velocidade de escorregamento x provável poder destrutivo”, variando da classe 7 – catástrofe de grandes proporções a classe 1 – movimentos imperceptíveis.

Dentre os tipos de movimentos de massa, Hutchinson (1988) caracteriza os escorregamentos translacionais. Cerri (1998) afirma que este é um dos processos mais frequentes nas encostas serranas brasileiras, o qual ocorre predominantemente em solos pouco desenvolvidos em vertentes com altas declividades, e em altas velocidades.

Especificamente do modelo *SHALSTAB*, observa-se que a sua metodologia foi construída para caracterizar os escorregamentos translacionais rasos. Este tipo de escorregamento ocorre especialmente em áreas de encosta retilíneas, com inclinação acima de 30°, muitas vezes induzido por cortes no terreno, concentração de águas superficiais, desmatamento, sobrepesos de aterros e lixo. Nestas situações, geralmente têm-se solos poucos espessos e solos e rochas com a presença de descontinuidades e planos de fraqueza.

Os demais tipos e mecanismos de movimentos e materiais envolvidos são detalhados em literaturas específicas como Varnes (1978), Cerri (1998), Hutchinson (1998), Fiori e Carmignani (2001), IPT (2004), Ojeda-Moncayo (2004), Parizzi (2004), Ahrendt (2005), Carvalho (2006), Yoshikawa (2006), Highland (2008), dentre outros.

Ao longo desta breve revisão pôde-se observar que algumas áreas podem até estar isentas de escorregamentos, porém a probabilidade dessa ocorrência é majorada e se condiciona diretamente às encostas íngremes, de embasamento frágil ou de instabilidade do material alterado, ou ainda, associado à ausência da vegetação e motivado pelo acúmulo pluviométrico. Logo, tais fatores foram alvo de estudo mais adiante na caracterização dos processos de movimentos de massa gravitacionais em Belo Horizonte e na área de estudo de aplicação do modelo *SHALSTAB*.

## **2.4 – CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E DE RISCOS**

O mapeamento geotécnico, segundo Zuquette e Gandolfi (2004), caracteriza-se como o processo destinado à investigação e avaliação geológico-geotécnica de

uma localidade. Pode ser descrito, ainda segundo os mesmos autores, “... *como o processo que busca avaliar e retratar as características dos componentes do meio físico, bem como os possíveis comportamentos frente às diferentes formas de uso do solo, processos naturais e induzidos.*”

Como principal objetivo, o mapeamento (ou zoneamento) geotécnico promove uma classificação do território em termos das expectativas gerais de comportamento do terreno em face de solicitações relacionadas, por exemplo, à implantação de uma obra de engenharia, ou a um tipo específico de ocupação.

Pelas definições acima, observa-se que a carta geotécnica de um meio urbano deveria ser o documento a ser respeitado para minimizar os acidentes relacionados aos escorregamentos (e outros processos), uma vez que dita as regras de suporte às construções. Infelizmente tal produto não é uma realidade nas cidades brasileiras.

Trabalhos de Zuquette (1987) e Zuquette e Gandolfi (2004) destacam as diversas metodologias aplicadas em alguns países e localidades, das mais variadas diferenças morfológicas, litológicas e climáticas, e enfatizam que muitas destas não são aplicáveis em países de clima tropical, devendo ocorrer adaptações às condições brasileiras.

No município de Belo Horizonte, os estudos de Silva et al. (1995) (baseados em IAEG, 1976; Churinov et al., 1970; Varnes, 1974 e Coelho, 1980), conceberam dentre vários documentos, a Carta de Zoneamento Geotécnico de Belo Horizonte.

No caso de BH, em que os estudos do zoneamento geotécnico estavam voltados à gestão territorial e urbana, recobrando áreas territoriais expressivas, Silva et al. (1995) trabalharam esse mapeamento, considerando a diversidade das intervenções próprias da urbanização, critérios de classificação naturais, independentes do tipo de intervenção, associando o produto a uma carta geotécnica de uso geral (*general purpose geotechnical chart*).

Logo, no zoneamento geotécnico proposto por Silva et al. (1995) e apoiados em IAEG (1976), têm-se como fatores básicos de classificação:

- condições de solos e rochas;
- condições hidrológicas;
- condições geomorfológicas; e
- processos geodinâmicos.

Com relação às recomendações ao uso das cartas, tem-se:

- as cartas sintetizam o significado geotécnico apenas para fins de planejamento (escala 1:25.000), ou seja, não é de instrução pormenorizada para intervenções locais; e
- as áreas homogêneas são caracterizadas por certa dispersão dos aspectos do comportamento em face das intervenções previsíveis.

Na adoção de uma escala para fins de planejamento, neste trabalho concorda-se com alguns autores (Varnes, 1974; Silva et al., 1995; Zuquette e Gandolfi, 2004; dentre outros) que frisam o conceito de homogeneidade, ou seja, não se deve estender as análises além do aspecto qualitativo.

A busca de retratar a natureza dos mecanismos fenomenológicos que representam o comportamento, inclusive a intensidade do evento, só é possível em escalas maiores (1:10.000, 1:5.000, etc.).

Zuquette e Gandolfi (2004) sugerem o conceito do Volume Elementar Representativo (VER), que busca condicionar a variabilidade do meio físico ao fim a que se destina.

O VER pode ser associado à escala de trabalho e às informações a serem obtidas das componentes do meio ambiente e, para sua definição, deve-se levar em conta a heterogeneidade e descontinuidade dos dados.

Ainda, uma adequada delimitação do VER possibilita obter resultados que representem satisfatoriamente a variabilidade das informações em termos naturais, respeitando os erros de obtenção destas medidas.

Exemplificando, considere a dificuldade em definir um VER extremamente detalhado para um objetivo qualquer, tendo as cartas numa pequena escala de trabalho ou uma grande heterogeneidade do atributo.

Explicitando, cita-se a visão errônea de sugerir e conceber um Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), ou seja, um planejamento local de mitigação dos riscos, tendo informações topográficas, por exemplo, apenas na escala de 1:100.000.

Os produtos de Silva et al. (1995) proporcionaram análises espaciais como:

- conhecer os atributos, como por exemplo, a expectativa do comportamento geotécnico para uma determinada área; e
- conhecer as áreas dotadas de determinado atributo, como por exemplo, localizar áreas para residências unifamiliares, de possíveis usos por fundações diretas.



É fato que uma atualização periódica dessas cartas é fundamental e estando em formato digital as tarefas de edição, armazenamento, análise, entre outras, podem ser otimizadas. Em Tuler et al. (2007b) essas cartas foram digitalizadas e parcialmente atualizadas.

Desta forma, em virtude do desrespeito ao suporte geológico-geotécnico das ocupações e da necessidade de informações sobre a estabilidade das encostas existe sempre a necessidade em gerar dados passíveis de análise visando à prevenção de escorregamentos, considerando inclusive, várias escalas de trabalho.

Fernandes et al. (2001) e Carvalho e Galvão (2006) reforçam que estas cartas deveriam ser usadas por planejadores para amenizar os impactos socioeconômicos ocasionados por estes fenômenos, bem como servir de base à modelagem dos processos, facilitando o entendimento da tipologia, magnitude e frequência dos movimentos de massa.

Em trabalho recente (ano de 2006) da comissão “*Engineering Geological Maps*”, da IAEG (Chancón et al., 2006), desenvolveu-se um manual de conceitos e práticas relativo à mapeamentos de eventos perigosos, onde participaram cientistas de 17 países.

Nesse documento, perfaz-se a revisão de técnicas de mapeamento associados aos movimentos de massa gravitacionais em SIG’s e conceitos básicos para esses mapeamentos. Entre os tipos de análise para esse mapeamento destacam-se: mapa de incidências de escorregamentos (inventário), carta de incidências espaço-temporais e com a possibilidade de previsão de escorregamentos e carta de avaliação das conseqüências dos escorregamentos.

O estudo incentivado pela IAEG (Chancón et al., 2006) justifica-se pelo fato da proliferação e vulgarização do uso de computadores nas análises de movimentos de massa, e da impossibilidade de estudos comparativos aos conceitos propostos por autores como: Varnes (1984), Fell (1992) e Fell (1994).

Ainda, espera-se com tal documento, permitir que essas cartas sejam instrumentos para a prevenção dos escorregamento e/ou sua mitigação. Ao final da referência (Chancón et al., 2006), são relacionados ainda, seiscentos e sessenta artigos revisados relacionados ao tema.

Logo, buscando responder a necessidade de informações sobre a instabilidade das encostas, apresentam-se na literatura (Hays, 1991; Cerri e Amaral, 1998; Ruiz, 1998; Clerice et al., 2002; Zuquette e Gandolfi, 2004; Ahrendt, 2005; PBH, 2007b; Chancón et al., 2006), três tipos de cartas associadas aos movimentos de massa: (a) de inventário, (b) de susceptibilidade (ou predisposição) (c) de eventos perigosos e (d) de risco:

**a) Carta de Inventários**

Representa a distribuição espacial dos movimentos de massa, podendo incluir informações como tipo, tamanho, forma e estado de atividade. Esta carta normalmente é construída com informações obtidas em campo, fotografias aéreas e imagens de satélite, onde são identificadas as cicatrizes deixadas nas encostas pelos escorregamentos.

O mapa de inventário de movimentos de massa gravitacionais, segundo Chancón et al. (2006), é o primeiro passo para qualquer programa de mitigação de riscos, e fornece a distribuição espacial dos movimentos de massa, representados no mapa através de áreas afetadas, pontos ou símbolos.

Segundo Fernandes et al. (2001), a hipótese geral que dá sustentação a estas metodologias é que a distribuição das cicatrizes e depósitos de escorregamentos recentes podem sugerir futuros padrões de comportamento das instabilidades.

Geralmente essas cartas restringem-se a localização do evento, na data da imagem de satélite, da foto aérea ou dos trabalhos de campo. Logo, para maior aplicabilidade deveria aplicar uma fotointerpretação multi-temporal, esbarrando muitas vezes nas limitações dos dados.

A busca em inventariar e zonestar tais áreas, vêm da aplicação de medidas corretivas ou apenas para conhecer os fatores que causaram a instabilidade desse local, podendo talvez ser possível prever que ali poderão ocorrer futuros escorregamentos.

Na Figura 2.17a, tem-se uma ficha de campo para coleta de dados sugerida por Hach-Hach (1998) para avaliação dos processos de movimentos de massa e na Figura 2.17b, tem-se a ficha de vistoria utilizada pela URBEL (PBH, 2007b).

Algumas metodologias na concepção de cartas de inventários, bem como exemplos práticos, são apresentadas em Zuquette et al. (1995), Xavier (1996), Hach-Hach (1998), Ruiz (1998), Viana (2000), Spiker e Gori (2000), Spiker e Gori (2003a e 2003b) e Zuquette e Gandolfi (2004), Zuquette e Pejon (2004), Ahrendt (2005), dentre outros.

Ficha de campo para coleta de dados		
Pesquisador:	Local:	Data: / /
Clima:	Ponto de afloramento mais próximo:	
Foto aérea:	Rua mais próxima:	Foto terrestre nº:
Bairro/Município:	Nº da feição:	
1 - Unidade de análise: (B) Baixada; (E) Encosta; (T) Topo		Tipo de evento segundo Varnes (1978):
Empreendimento mais próximo:		
2 - Processo principal:		
( ) 1 - Escorregamento em aterro		( ) 2 - Escorregamento em meia encosta
( ) 3 - Escorregamento em talus		( ) 4 - Escorregamento em solo
Processo associado:		
( ) 5 - Erosão		
( ) 6 - Escorregamento em saprólito/rocha		
( ) 7 - Queda de blocos		
3 - Características geométricas da feição:		Litologia afetada:
Rumo da feição:		Drenagem mais próxima:
Comprimento do eixo principal (em metros):		Estação pluviométrica mais próxima:
Ângulo do eixo da feição:		Data do primeiro registro:
Evento inicial:		Tipo de monitoramento:
Croquis no verso:		

(a)

Programa Estrutural em Áreas de Risco - PEAR		
Ficha de vistoria - CÓPIA		
<b>Identificação</b>		
Data: / /	Captação: _____	Solicitante: _____
Motivo: _____		
<b>Moradores/Contato</b>		
Nome: _____	Nasc.: ____/____/____	Ident. Tipo: _____ Número: _____
Mãe: _____	CPF: _____	Telefone: _____ Celular: _____
Contato: _____		
<b>Endereço para vistoria</b>		
Código: _____	Tipo log.: _____	Nome: _____
Bairro: _____	CEP: _____	Regional: _____
Tempo-moradia: ____/____/____	Total de moradores: _____	
<b>Caracterização local</b>		
Morfologia: <input type="checkbox"/> Encosta <input type="checkbox"/> Planície aluvial <input type="checkbox"/> Área aplainada <input type="checkbox"/> Fundo de vale <input type="checkbox"/> Área totalmente ocupada		
Talude: <input type="checkbox"/> De córrego <input type="checkbox"/> Natural <input type="checkbox"/> De aterro <input type="checkbox"/> De corte		
Montante: Altura: _____ m	Afastamento base: _____ m	Inclinação: _____ °
Jusante: Altura: _____ m	Afastamento base: _____ m	Inclinação: _____ °
Litologia: _____	Grau de alteração: _____	Estrutura: _____
Cobertura superficial: _____		Vegetação: _____
<b>Característica visuais da edificação</b>		
Tipologia: <input type="checkbox"/> Laje <input type="checkbox"/> Insalubre <input type="checkbox"/> Lona <input type="checkbox"/> Precária <input type="checkbox"/> Madeira		
Estruturas: _____		Tipo de fundação: _____
Esgoto: _____		Patologia aparente: _____
Água: _____		Pavimentos: _____
Drenagem: _____		
<b>Predisposição a processos geodinâmicos</b>		
<input type="checkbox"/> Solapamento		<input type="checkbox"/> Inundação
<input type="checkbox"/> Rolamento/tombamento/queda de blocos		<input type="checkbox"/> Escorregamento em cunha
<input type="checkbox"/> Erosão		<input type="checkbox"/> Escorregamento planar
		<input type="checkbox"/> Escorregamento circular
		<input type="checkbox"/> Não se aplica
<b>Indicativos de processos geodinâmicos/agentes potencializadores</b>		
<input type="checkbox"/> Trinca moradia		<input type="checkbox"/> Trinca terreno
<input type="checkbox"/> Cicatriz escorregamento		<input type="checkbox"/> Degraus de abatimento
<input type="checkbox"/> Vazamento/rupturas redes (infiltrações)		<input type="checkbox"/> Estrutura deformada
<input type="checkbox"/> Surgência		<input type="checkbox"/> Feições erosivas
<input type="checkbox"/> Bananeira		<input type="checkbox"/> Concentração de água pluvial
		<input type="checkbox"/> Lançamento água/esgoto
		<input type="checkbox"/> Fossas
		<input type="checkbox"/> Lixo/entulho
<b>Nível de susceptibilidade do processo geodinâmico</b>		
<input type="checkbox"/> Muito alto <input type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Baixo <input type="checkbox"/> Sem processo deflagrado		
<b>Ocorrência atual</b>		
Data: ____/____/____		Tipo de processo: _____
<input type="checkbox"/> Atingimento parcial		Material: _____
<input type="checkbox"/> Atingimento total		Volume estimado: _____ m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Perda parcial		<input type="checkbox"/> Perda total
<input type="checkbox"/> Perda total		<input type="checkbox"/> Não atingido
<input type="checkbox"/> Sem processo deflagrado		Altura inundação _____ m
<b>Parecer</b>		
<input type="checkbox"/> Remoção temporária com obra		<input type="checkbox"/> Remoção temporária sem obra
<input type="checkbox"/> Monitoramento pelo morador		<input type="checkbox"/> Remoção definitiva
<input type="checkbox"/> Fora critérios - Favor		<input type="checkbox"/> Fora critérios - Madeirite/lona
<input type="checkbox"/> Fora critérios - Obra de grande porte		<input type="checkbox"/> Fora critérios - Aluguel
<input type="checkbox"/> Sem processo deflagrado		<input type="checkbox"/> Fora critérios - Invasão
		<input type="checkbox"/> Fora critérios - Tempo
		<input type="checkbox"/> Fora critérios - Melhoria habitacional
		<input type="checkbox"/> Fora critérios - Risco constr.
		<input type="checkbox"/> Indicação de obra
		<input type="checkbox"/> Fora critérios - Cidade formal
<b>Orientações</b>		
<input type="checkbox"/> Não expandir edificação		<input type="checkbox"/> Monitoramento pelo morador
<input type="checkbox"/> Remoção de entulho		<input type="checkbox"/> Solicitar nova vistoria se modificar quadro
<input type="checkbox"/> Intervenção do morador		<input type="checkbox"/> Inversão de cômodo
<input type="checkbox"/> Cortes de lona		<input type="checkbox"/> Remoção de bananeira
<input type="checkbox"/> Não permanecer em caso de chuvas		<input type="checkbox"/> Isolamento cômodo
<b>Considerações finais</b>		
<input type="checkbox"/> Vistoria concluída		
Motivo: _____		
Obs.: Croqui de localização e de situação no verso.		
<b>Execução da vistoria</b>		
Data: ____/____/____		Responsáveis técnicos: _____
Órgão: _____		Equipe complementar: _____
Ciente da vistoria: _____		

(b)

Figura 2.17 – Dois exemplos de fichas de campo para inventariar eventos de movimentos de massa.

Fonte: Adaptado de Hach-Hach (1998) e PBH (2007b).

## **b) Carta de Susceptibilidade**

Estes mapeamentos fornecem informações que, Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), são utilizadas para definir níveis potenciais de ocorrência de escorregamentos para uma determinada área.

O mapeamento dos fatores relacionados aos processos de instabilidade, segundo Brabb (1972), com objetivo de identificar as áreas susceptíveis aos movimentos de massa, pode ser realizado sem qualquer análise temporal. Esta aproximação se torna útil quando não se possui um histórico de eventos de movimentos de massa ou escassez de dados meteorológicos (pluviosidade, por exemplo).

Spieker e Gori (2000) apresentam metodologia para construção de um mapa de susceptibilidade, pela relação entre a declividade local e a estabilidade do talude, explicitando categorias de estável à instável e para tal, aplicaram uma legenda de “sinais”, de cores mais fortes (vermelho, laranja, amarelo) a mais fracas (azul e verde).

Clerici et al. (2002) mencionam que estas cartas apresentam um modelo conceitual comum, que consiste de:

- mapeamento de escorregamentos (inventário);
- mapeamento dos fatores geoambientais, que influenciam direta ou indiretamente a estabilidade das encostas;
- estabelecimento da correlação entre os fatores geoambientais (litologia, forma das encostas, declividade, etc.) e os escorregamentos antigos e recentes; e
- classificação das unidades de paisagem em diferentes graus de susceptibilidade, com base nas relações identificadas.

Ainda, as cartas de susceptibilidades podem ser modificadas em suas intensidades, em função da dinâmica inerente ao evento em estudo.

Uma vez que este trabalho refere-se aos fatores predisponentes e deflagradores para uma escala regional de planejamento (1:50.000), e buscando a consolidação para a ocupação urbana, os processos geotécnicos da dinâmica superficial para instabilizar uma encosta, bem como análises conclusivas e localizadas desta instabilidade, deverão ser tomadas com bastante precaução.

Os mapeamentos na escala 1:50.000 e menores, segundo Chancón et al. (2006), podem ser considerados aceitáveis até mesmo quando são analisados vários tipos de movimentos de massa, com uso à predição destes eventos; em detrimento de mapeamentos em escalas maiores, em que são necessários um detalhado estudo das variáveis predisponentes aos movimentos de massa.

Algumas metodologias na concepção de cartas de susceptibilidades e exemplos práticos, são apresentados em Brabb et al. (1972), Silva et al. (1995), Irigaray et al. (1999), Nagarajan et al. (2000), Clerici et al. (2002), Zuquette e Gandolfi (2004), Chancón et al. (2006), dentre outros.

### **c) Cartas de Eventos Perigosos**

Segundo proposta e hierarquização de Zuquette e Gandolfi (2004), as cartas que se preocupam com os eventos perigosos (*hazards*) ocupam um nível IV, ou seja, são elaboradas com base num conjunto de informações sobre os componentes básicos do meio, normalmente relacionados à avaliação da probabilidade de ocorrência de um ou mais processos naturais.

Dentre os mapeamentos de eventos naturais extremos mais estudados, destacam-se os movimentos de massas gravitacionais, erosões, inundações, poluição da águas superficiais e subterrâneas.

Na carta de eventos perigosos, a intensidade, probabilidade temporal e espacial e os materiais geológicos envolvidos devem ser mapeados. Dentre os métodos de elaboração da carta de eventos, geralmente tem-se a seleção de grupos de atributos associados por análises estatísticas, através de técnicas estatísticas multi e bivariadas, análises probabilísticas, análises multicriteriais e multiatributos (Zuquette, 2001).

Uma carta ideal de eventos perigosos, conforme Spieker e Gori (2000), deve indicar não apenas a probabilidade de certo evento, ou tipo de movimento de massa, em determinado local, mas as intensidades e áreas de influências afetadas.

Em Spieker e Gori (2003a e 2003b), Zuquette e Gandolfi (2004), Chancón et al. (2006) são apresentados exemplos da concepção destas cartas, bem como da discussão da possível baixa potencialidade de uso destas cartas ao qual se destinam, em função da característica qualitativa em sua análise.

### **d) Cartas de Riscos**

Cartas de Risco Geológico, segundo Cerri e Amaral (1998), são os instrumentos cartográficos que apresentam a distribuição, o tipo e o grau dos riscos geológicos, visando definição de medidas de prevenção de acidentes.

Estas são obtidas através de dados fisiográficos, além de classes como meio biológico e antrópico, que constituem os elementos vulneráveis ao evento perigoso em estudo.

Hays (1991) apresenta uma simplificação para elaboração de cartas de riscos, tomando-se por base documentos relacionados a eventos perigosos, elementos de ocupação e às vulnerabilidades diante deste evento perigoso (Figura 2.18).

<b>Evento perigoso</b>		<b>Exposição</b>
	<b>Riscos</b>	
<b>Vulnerabilidade</b>		<b>Localização</b>

Figura 2.18 – Relações entre os elementos envolvidos na avaliação de risco.

Fonte: Adaptado de Hays (1991).

Quanto ao ordenamento do território urbano e o planejamento ambiental, necessita-se o conhecimento detalhado de todos os aspectos que influenciam as atividades humanas ou que possam ser afetadas ou alteradas por elas.

Simões (2007) destaca a integração de componentes de caráter multidisciplinar a verificar:

- identificação das zonas sujeitas a diferentes tipos de riscos (zoneamento);
- estimativa da intensidade provável das fases críticas;
- determinação da periodicidade provável das fases críticas;
- previsão do momento da ocorrência das fases críticas; e
- minimização e correção dos danos.

O zoneamento é função do objetivo para os quais é elaborado. Se possuir caráter preventivo, que evite a fixação de pessoas, bens ou certas atividades, o mais adequado é um zoneamento dos graus de susceptibilidades ao risco. Porém, se a intenção é aplicar medidas corretivas ou minimizadoras de danos, um zoneamento de riscos será o mais indicado.

O Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR) (Ministério das Cidades, 2006) prevê:

- a realização do diagnóstico geológico nas áreas de ocupação irregular do município, com definição de setores de risco geológico alto e muito alto e quantificação das moradias expostas a esses níveis de risco;
- a definição das intervenções necessárias para erradicação de risco em cada setor mapeado, contemplando o escopo de obras e indicação de remoções e serviços necessários; e
- a estimativa de custos para cada intervenção e a hierarquização das intervenções.

A Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte (URBEL) promoveu em 2004 uma atualização do zoneamento de risco do município (Figura 2.19), especificamente nas Vilas e Favelas (PBH, 2007b), aplicado posteriormente nos trabalhos de Tuler et al. (2007b). A Figura 2.20 apresenta um exemplo deste diagnóstico para o bairro Conjunto Taquaril, na escala 1:2.000.

A metodologia aplicada para estes mapeamentos envolveu (PBH, 2007b):

**a) Aspectos conceituais**

- definições, com base no art. 28 da Lei 7.165 de 27/08/96 – Plano Diretor do Município de Belo Horizonte;
- tipos de eventos considerados: escorregamento de solo, escorregamento de rocha alterada/saprólito, escorregamento de aterro, escorregamento de lixo, erosão, queda e rolamento de bloco de rocha, solapamento e inundação;
- classificação do grau de risco (Tabela 2.7):

Tabela 2.7 – Classificação do grau de risco adotada pela URBEL/PBH.

<b>Classes</b>	<b>Características</b>
IV – Risco Muito Alto	Processo com indícios claros de adiantado estágio evolutivo, com possibilidade de destruição imediata de moradias, não sendo necessária a ocorrência de chuvas intensas ou de longa duração.
III – Risco Alto	Processo destrutivo instalado, com indícios de seu desenvolvimento e possibilidade de destruição de moradias em curto espaço de tempo. É possível o acompanhamento evolutivo do processo, podendo ocorrer evolução rápida com uma chuva mais intensa e/ou de longa duração.
II – Risco Médio	Processos destrutivos encontram condições potenciais de desenvolvimento, constatando-se condicionantes físicos predispostos ao risco e/ou indícios iniciais do desenvolvimento do processo.
I – Risco Baixo	Sem indícios de instabilização aparentes, sendo consideradas áreas com baixa predisposição ao risco.
Áreas sem Risco Geológico	Áreas estáveis no momento da análise, não apresentando qualquer indício ou possibilidade de desenvolvimento de processos destrutivos, mantidas as condições até o momento da análise, ou seja, não havendo nenhuma alteração antrópica significativa.
Áreas com predisposição ao risco	São áreas sem ocupação, mas que possuem alta predisposição à ocorrência de algum tipo de evento geodinâmico.

Fonte: Adaptado de PBH (2007b).

**b) Levantamento dos dados**

Como bases cartográficas foram utilizadas a restituição aerofotogramétrica de 1989, fotografias aéreas de 1999 e 2002 e levantamentos topográficos a partir de 1998, na escala 1:2.000 (PBH, 2007a).

**c) Critérios de mapeamento**

- Reconhecimento das características físicas da área, principalmente a morfologia, declividade da encosta, susceptibilidade à erosão, feições de instabilidade, perfil da encosta, características geológicas (litologia, grau de intemperização, estruturas das rochas, presença de coberturas superficiais), presença de cobertura vegetal;
- identificação dos indícios de movimentação do terreno e inundações;
- identificação dos agentes potencializadores do risco geológico;
- características da ocupação.

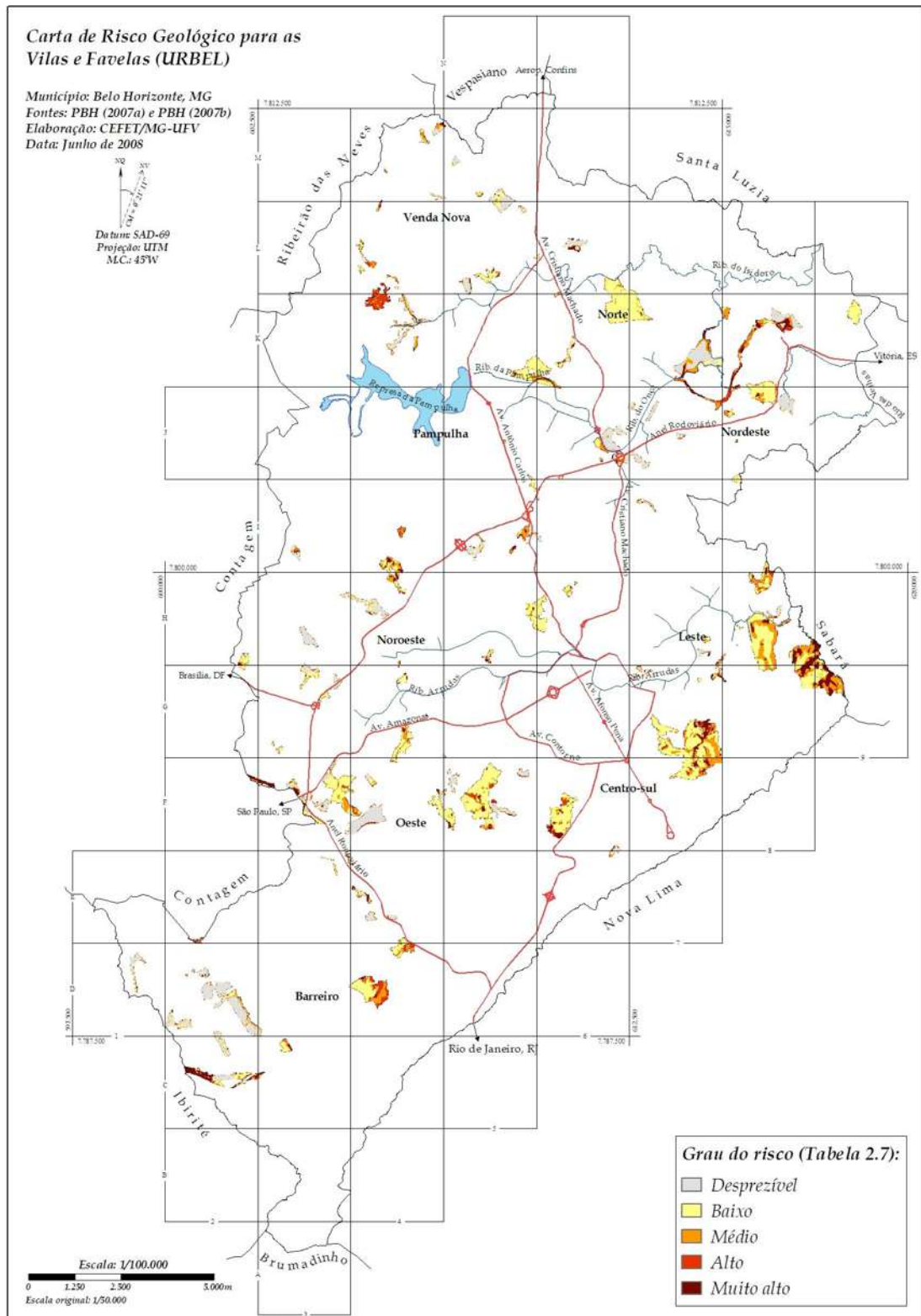


Figura 2.19 – Carta do risco geológico para as vilas e favelas de BH, confeccionada pela URBEL.



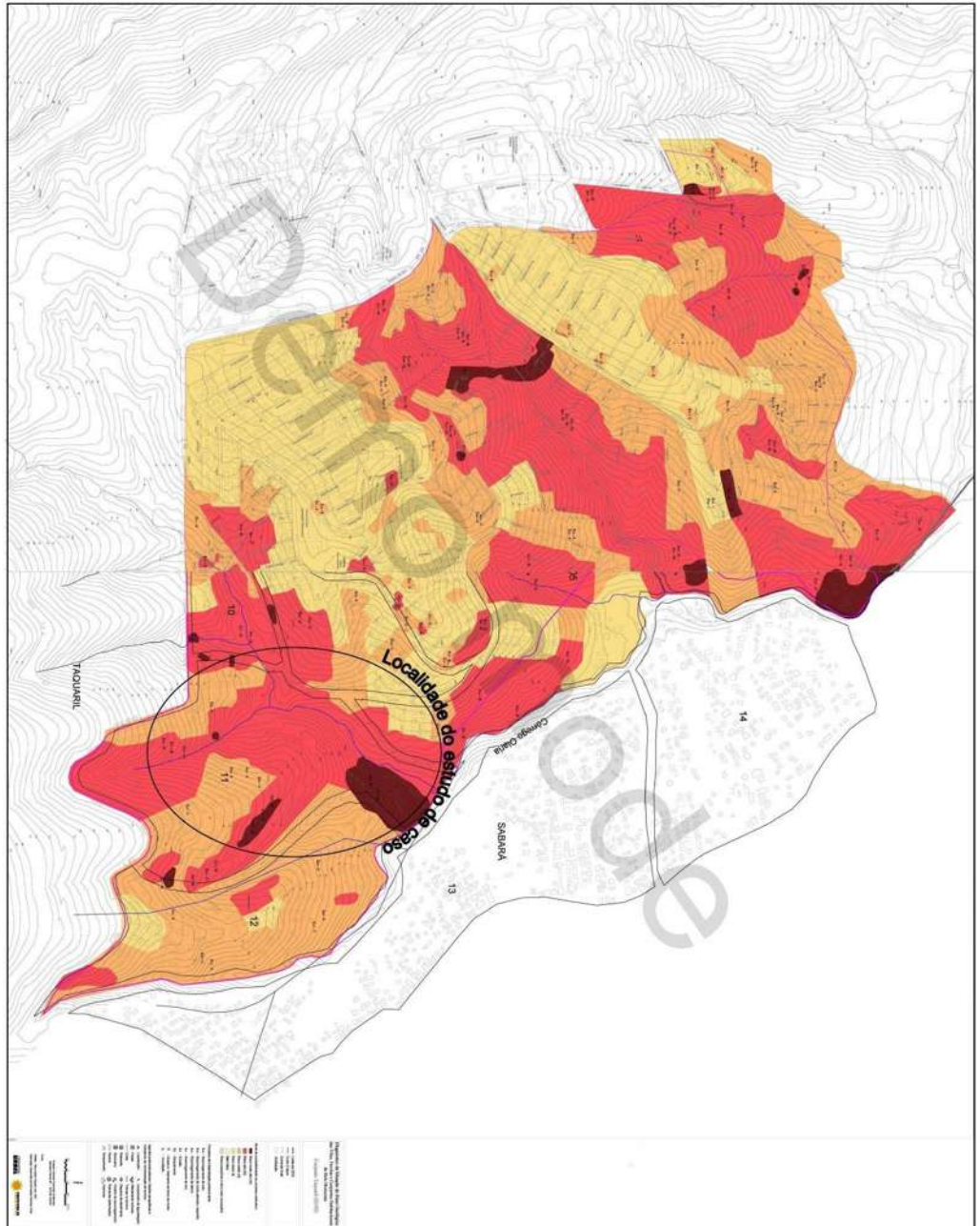


Figura 2.20 – Carta do risco geológico para o bairro Conjunto Taquaril, confeccionada pela URBEL e no detalhe a localidade do estudo de caso.

Quanto aos métodos de análise, técnicas e modelos associados aos movimentos de massa gravitacionais, apresentam-se na literatura várias metodologias, com destaque para os métodos heurístico, determinístico e estatístico (Tabelas 2.8 e 2.9) (Ahrendt, 2005; Chancón et al., 2006).

### **a) Métodos Heurísticos**

Nesta metodologia, tem-se como princípio a existência de relações entre os fatores predisponentes de instabilização (litologia, cobertura vegetal, uso do solo, formas das encostas, declividade, etc.) e a distribuição dos escorregamentos antigos e recentes na paisagem. Segundo Fernandes et al. (2001), caracterizam-se pela grande subjetividade, dependendo diretamente do nível de conhecimento do problema pelo investigador.

Esse método geralmente se apóia numa abordagem geomorfológica ou na combinação qualitativa das cartas. A dificuldade desses métodos está no fato da definição da variabilidade espacial estar diretamente relacionada à experiência da equipe envolvida.

Especificamente na combinação qualitativa das cartas, os profissionais usam o conhecimento especialista para atribuir pesos (valores) para uma série de parâmetros, em geral, distribuídos na carta. Essas condições de estabilidade são agregadas resultando num valor numérico para a ocorrência do evento perigoso.

Conforme observado por Cerri (2006), no Brasil, como em muitos outros países, os mapeamentos de predisposições e de risco são predominantemente realizados por meio de avaliações qualitativas, ou seja, os riscos são identificados com base na opinião técnica da equipe que realiza o mapeamento com o apoio de informações dos moradores da área mapeada.

Esta técnica, dentre outras, foi utilizada por Stervenson (1978), Van Westen e Brand (1988), Terlien (1996), Pezham et al. (1998), Bobrowsky et al. (1998), Rodrigues (2003), Mantovani (1996), dentre outros.

Um método heurístico foi apresentado em Tuler et al. (2007a e 2007b) para construção do IQVU, versão 2008. Este trabalho baseou-se na discussão da equipe de engenheiros, geógrafos e geólogos da PBH (URBEL, SUDECAP, GIND) e em Silva et al. (1995). As diferenças básicas entre Silva et al. (1995) e Tuler et al. (2007a e 2007b) referem-se à revisão e à atualização das classes adotadas, e na digitalização dos processos que compunham as intensidades.

O método heurístico foi aplicado para o município de Belo Horizonte, na escala 1:50.000 e o principal objetivo foi a identificação dos locais com maior susceptibilidade aos movimentos de massa e que justificassem a aplicação do modelo *SHALSTAB*.

### **b) Métodos Determinísticos**

No método determinístico aplicam-se modelos matemáticos com algum fundamento físico, para descrever os processos da estabilidade das encostas (Dietrich e Montgomery, 1993; Dietrich e Montgomery, 1998; Fernandes et al., 2001; Ramos et al., 2003; Dietrich et al., 2000; Guimarães, 2000; Parizzi, 2004; Silva, 2006; dentre outros).

Conforme Fernandes et al. (2001), Ramos et al. (2002) e Ahrendt (2005), têm como base, geralmente, os modelos hidrológicos e de estabilidade, que levam em consideração informações detalhadas das encostas apoiados em princípios da mecânica de solos.

As maiores limitações desses procedimentos estão associadas ao conhecimento incompleto de muitos dos processos envolvidos e à dificuldade de obtenção dos dados requeridos pelos modelos.

Geralmente estes métodos apoiam-se no princípio do equilíbrio-limite e em modelos matemáticos de tensão e deformação. Nestes casos, a estabilidade de um talude ou uma encosta é expressa por um fator de segurança. Este fator considera a resistência do terreno e as forças motoras, ao longo da superfície de movimentação. Uma questão básica destes métodos está na seleção adequada dos parâmetros envolvidos, a citar: poropressão, ângulo de atrito, coesão, peso específico, etc.

O método determinístico, geralmente, produz resultados muito localizados e, conseqüentemente, é aplicado para grandes escalas (1:10.000 e maiores). Ainda, a aplicação e confiança dos métodos determinísticos consideram que as condições geológicas e geomorfológicas são homogêneas e os escorregamentos são de natureza simples e conhecida.

Normalmente os resultados desse método fornecem valores de fatores de segurança e a avaliação da qualidade desse resultado envolve a escala de trabalho e a variabilidade dos atributos considerados.

Apesar do problema para análise em pequenas escalas e falta de dados, tem sido comum o uso de Sistemas de Informações Geográficas na análise de eventos perigosos, a citar: Hammond et al. (1992), Dietrich et al. (1993), Dietrich et al. (2000), Guimarães (2000), Fernandes (2001), Ahrendt (2005), dentre outros.

O método determinístico adotado nesse trabalho se baseia no modelo *SHALSTAB* (*Shallow Stability*), desenvolvido em 1994 por William E. Dietrich e David R. Montgomery. O modelo tem por objetivo a definição dos locais do relevo mais susceptíveis à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos de solos (Fernandes et al., 2001; Ramos et al., 2007).

O modelo *SHALSTAB* adapta-se a um processo segundo a seguinte paisagem: regiões montanhosas, coberto com manto de intemperismo pouco espesso e densidades variáveis. Tipicamente o limite entre o solo e a rocha são é abrupto. O solo é composto por detritos da rocha de origem (tálus e colúvios), falta de coesão quando saturado, rocha subjacente geralmente fraturada, porém com alto coeficiente de atrito entre as partículas do solo. Geralmente estes solos possuem média a baixa condutividade.

O cenário que se adapta ao modelo é aquela em que a topografia tem uma grande contribuição para o local e frequência dos escorregamentos rasos. Porém, o que importa não é só a declividade local, mas a curvatura da encosta e como concentra ou diverge o escoamento superficial e subsuperficial.

Fisicamente, o modelo quantifica a influência da topografia nas poropressões do solo, por meio de um modelo de estabilidade de talude que possa relacionar estes parâmetros.

Observa-se como principal característica do modelo, a ênfase dada à topografia na deflagração dos escorregamentos, englobando a declividade e a áreas de contribuições da drenagem à montante do ponto em estudo, bem como características geomecânicas locais (Fernandes et al., 2001; Dietrich e Montgomery, 2000).

Logo, o método propõe a combinação de um modelo de estabilidade de encostas (método do talude infinito), combinado com um modelo hidrológico. Os principais parâmetros são extraídos de feições topográficas e características geotécnicas

locais, especificamente, do coeficiente de permeabilidade, peso específico do solo e coesão do solo.

No modelo de estabilidade do talude (método do talude infinito), os parâmetros topográficos e geotécnicos são: ângulo de inclinação do talude, peso específico do solo natural e ângulo de atrito do solo. Nesta análise, em alguns trabalhos científicos (Dietrich e Montgomery, 1998; Silva, 2006 e dentre outros), os usuários do método desconsideram a coesão do solo.

O modelo hidrológico tem por base os estudos de O'Loughlin (1986). A partir da Lei da Darcy, combinam-se os seguintes parâmetros: área de contribuição da drenagem, declividade, precipitação e permeabilidade do solo.

Trata-se de uma metodologia já aplicada em alguns trabalhos científicos no Brasil (Ramos et al., 1999; Guimarães, 2000; Fernandes et al., 2001; Ramos et al., 2002; Ramos et al., 2003; Silva, 2006; Ramos et al., 2007), tendo melhores resultados para escalas a nível de detalhe (1:10.000 e maiores).

Para Silva (2006) o modelo apresenta limitações no que tange à predição de áreas com afloramentos rochosos, falésias, precipícios, áreas de lençol freático profundo e regiões que apresentem camadas espessas de solo.

Outra limitação refere-se a consideração de um fluxo subsuperficial raso e de forma unidimensional, incapaz de contabilizar os efeitos causados por pressões laterais de água na encosta.

Como todo método determinístico, as limitações geralmente estão associadas ao desconhecimento do processo da estabilidade da encosta; e por outro lado, à carência de dados para a investigação. Há de considerar-se a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros considerados.

Com tal modelo, através de um modelo digital de terrenos e parâmetros geotécnicos, seria possível a predição das áreas estáveis, fluxos convergentes e divergentes (contribuição hidrológica) e áreas instáveis (em função de uma pluviosidade extrema, por exemplo), em razão de fluxo subsuperficial convergente.

O Anexo I apresenta a formulação detalhada do modelo *SHALSTAB*.

### c) Métodos Estatísticos

Considerando que os métodos heurísticos possuem certo grau de subjetivismo, e as determinísticas possuem incertezas, em função da complexidade e medição dos parâmetros de resistência do solo ou do grau de representatividade da amostra; os métodos probabilísticos têm sido utilizados com freqüência (Varnes, 1984; Chugh, 1984; Hammond et al., 1992; Soares, 1994).

A análise estatística faz uso de dois procedimentos: análise bivariada e análise multivariada (Carrara, 1983; Soeters e Van Westen, 1996). Em síntese, na primeira, atribui-se para cada atributo um peso com base em mapa de distribuição dos escorregamentos. Na segunda, os fatores relevantes ao movimento de massa são amostrados em unidades morfométricas e observa-se, por exemplo, para tais unidades a presença ou ausência de escorregamentos.

Essa análise geralmente se apóia em técnicas indiretas, pela integração de dados, como por exemplo, a técnica de suporte à decisão denominada *Analytical Hierarchy Process* (AHP), onde o analista atribui pesos maiores para as classes e parâmetros mais relevantes (Marcelino, 2003); ou diretamente, através de levantamentos de campo ou de cartas geomorfológicas e comportamento geomecânico onde se definem unidades comuns (polígonos) com base nas prováveis causas e fatores de instabilidade.

Fernandes et al. (2001) citam que os critérios e regras de combinação desse método relacionam os fatos, ou seja, padrões mensurados a partir de observações de campo, ao invés da simples experiência do pesquisador.

No entanto, segundo Carrara et al. (1992), a confiabilidade do método também depende da quantidade e da qualidade dos dados. Outro agravante é a definição errônea das variáveis independentes (parâmetros geoambientais), que pode comprometer a relação custo/benefício da carta de susceptibilidade final.

No que se refere às escalas de trabalho, Mantovani (1996) apresenta as escalas ditas regional (< 1:100.000), média (1:50.000 a 1:25.000) e grande (> 1:10.000), bem como os tipos de dados necessários, o método e a facilidade da obtenção dos mesmos, para a análise dos movimentos de massa gravitacionais (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 – Tipos de dados, métodos de obtenção dos dados e possibilidade de obtenção dos dados em função da escala no estudo de movimentos de massa.

Tipo de dado	Método de obtenção	Escala de análise		
		Regional	Média	Grande
<b>Geomorfologia</b>				
Mapeamento das unidades do terreno	Interpretação de imagem de satélite + visita ao campo	3*	2	1
Sub-unidades geomorfológicas		2	3	3
Escorregamentos recentes		1	3	3
Escorregamentos antigos	Interpretação de fotografia aérea, coleta de registros em revistas, jornais, corpo de bombeiro, etc.	1	3	3
<b>Topografia</b>				
Modelo digital de terreno	Coleta de mapas topográficos já existentes e emprego de fotogrametria em foto aérea ou imagem SPOT	2	3	3
Carta de declividade	Obtido do modelo digital de terreno			
Carta de direção da encosta				
Quebras de relevo	Interpretação de fotografia aérea	1	1	3
Concavidades; convexidades	Obtido do modelo digital de terreno ou interpretação detalhada de fotografia aérea			
<b>Geologia</b>				
Litologias	Busca por mapas geológicos existentes ou realização de mapeamento, utilizando fotos aéreas, imagem de satélite e investigação de campo	2	3	3
Sequência de materiais	Modelagem a partir do mapa litológico, geomorfológico, carta de declividades e descrições de campo e ensaios de laboratório	1	2	3
Pontos de coleta de amostra	Descrição de campo de solos e afloramentos e realização de ensaio em amostras coletadas para caracterização dos tipos de materiais	2	3	3
Geologia estrutural	Imagem de satélite, fotografia aérea e análise de campo	3	3	3
Dados sísmicos (eventos e intensidade)	Análise de registros existentes e questionamentos sobre prejuízos causados	3	3	3
<b>Uso do solo</b>				
Infraestrutura recente	Interpretação de foto aérea e imagem de satélite, e mapa topográfico	2	3	3
Infraestrutura antiga	Interpretação de foto aérea e mapa topográfico	3	3	3
Uso do solo recente	Interpretação de foto aérea, classificação de imagem de satélite e confirmação no campo	2	3	3
Uso do solo antigo	Interpretação de foto aérea	2	3	3
<b>Hidrologia</b>				
Drenagem	Interpretação de foto aérea e mapa topográfico	3	3	3
Área de contribuição	Interpretação de foto aérea, mapa topográfico ou modelagem digital de terreno	2	3	3
Precipitação	Coleta de dados meteorológicos existentes	2	3	3
Temperatura e evapotranspiração		3	3	3
Mapas de nível freático	Medidas de campo e modelagem hidrogeológica	1	1	2

Possibilidade de obtenção dos dados: 1 – Baixa, 2 – Moderada, 3 – Alta\*

Fonte: Adaptado de Mantovani et al. (1996).

Também, relativo às escalas, Soeters e Van Westen (1996), apresenta técnicas aplicadas e características para os tipos de análise de movimentos de massa gravitacionais (Tabela 2.9).

Tabela 2.9 – Métodos de análise, técnicas, características e escala no estudo de movimentos de massa.

Métodos de análise	Técnicas	Características Gerais	Escalas Recomendadas		
			Regional	Média	Grande
Inventário	Análise de distribuição de escorregamentos	Análise de distribuição e classificação dos escorregamentos	Sim <sup>b</sup>	Sim	
	Análise de atividade de escorregamentos	Análise temporal das mudanças nas características do meio	Não	Sim	
	Análise de densidade de escorregamentos	Cálculo da densidade de escorregamentos em unidades de terreno ou a partir de isoetas	Sim <sup>b</sup>	Não	
Análise heurística	Análise geomorfológica	Utilização de opinião de especialista de campo	Sim	Sim <sup>c</sup>	
	Combinação qualitativa de mapas	Utilização de opinião de especialista para atribuição de pesos aos parâmetros analisados	Sim <sup>d</sup>	Sim <sup>c</sup>	Não
Análise estatística	Análise bivariada	Calcula a importância da contribuição de fatores combinados	Não	Sim	Não
	Análise multivariada	Calcula a equação de previsão a partir de uma matriz de dados			
Análise determinística	Análise dos fatores de segurança	Aplicação de modelos hidrológicos e de estabilidade de encostas	Não		Sim <sup>e</sup>

<sup>b</sup> Somente com dados confiáveis de distribuição de escorregamentos pois um mapeamento seria dispendioso;

<sup>c</sup> Somente com forte suporte de outras técnicas quantitativas para obtenção de níveis de objetividade aceitáveis;

<sup>d</sup> Somente se existe uma base de dados confiáveis de distribuição espacial dos fatores controladores dos escorregamentos; e

<sup>e</sup> Somente em condições de terreno homogêneas, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

Fonte: Adaptado de Soeters e Van Westen (1996).



## 2.5 – GEOPROCESSAMENTO E GEOINDICADORES

Dentre as tecnologias do geoprocessamento, três foram aplicadas neste trabalho: Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Modelagem Digital do Terreno (MDT) e rotinas da Geoestatística, e serão descritas a seguir.

### a) Sistema de Informações Geográficas

Segundo Aronoff (1989), o SIG é um sistema projetado para a coleta, armazenamento e análise de objetos e fenômenos, sustentados pela localização geográfica, ou seja, é a manipulação da informação conectada a um banco de dados geográficos, que possui dados espaciais e de atributos.

Entre as possíveis análises espaciais no SIG, destacam-se: avaliações multicritério, ordenamentos, classificações, *overlay*, *buffer*, composição de mapas temáticos, consultas à base de dados georreferenciadas, transformação de data geodésicos, simulações e consulta ao banco de dados (Figura 2.21). Esta última rotina trata-se da mais fundamental de todas as ferramentas do SIG, sendo possível, dentre outras, as seguintes questões:

- Que atributos possui este local? (por localização);
- Identifique todas as localizações que contém determinado atributo (por atributo).

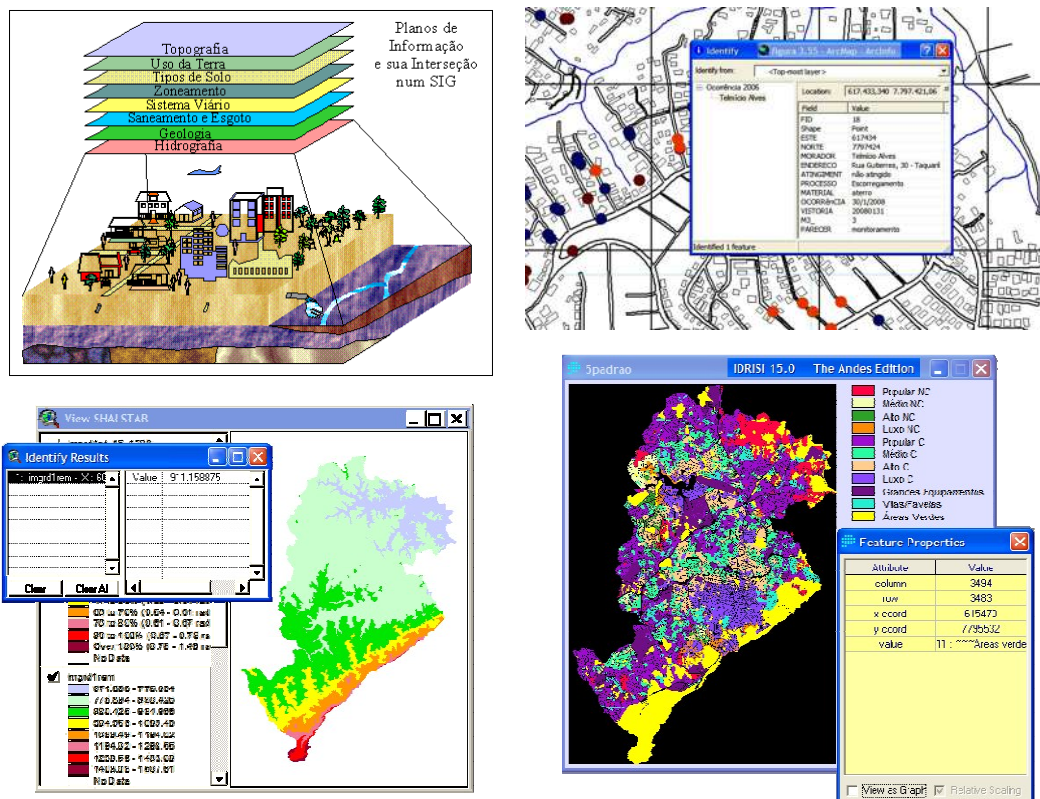


Figura 2.21 – Extratos ou planos de informação num SIG e exemplos de aplicação.

Fonte: Adaptado de ESRI (2006) e Arquivo Pessoal (2009).

## b) Modelagem Digital de Terrenos

Segundo Charif (1992), o MDT teve início nos anos 50, simplesmente como um conjunto de pontos de elevação definindo a superfície da Terra. Além desta aplicação original, o MDT pode gerar uma superfície representativa da distribuição espacial de uma característica, possibilitando sua análise, manipulação e avaliação.

Desta forma, a característica a ser modelada pode ser qualquer grandeza que possua uma variabilidade espacial contínua, ou seja, não necessariamente apenas informações altimétricas. Os dados de entrada para estes modeladores podem ser alguns pontos amostrais relativos ao fenômeno a ser modelado (p.ex. pluviosidade, índices de poluição, profundidade do NA, dentre outros) ou até mesmo parâmetros extraídos da análise de um modelo digital de terreno já existente (Simões, 1993; Tuler, 1994).

A Tabela 2.10 apresenta os principais parâmetros topográficos e geomorfológicos que podem ser extraídos de um MDT. Atualmente, tais produtos já estão modelados nos vários SIG's, facilitando a aplicação.

Tabela 2.10 – Principais parâmetros e aplicações obtidos a partir do MDT.

Parâmetro	Definição	Possíveis aplicações
Hipsometria	Elevação, curvas de nível	Clima, vegetação, energia potencial, etc.
Declividade	Relação entre a diferença de nível e a distância horizontal	Velocidade dos fluxos superficial e subsuperficial, taxa de escoamento, vegetação, geomorfologia, presença de água no solo, definição de áreas de risco
Aspecto	Azimute da inclinação das encostas	Insolação, evapotranspiração, distribuição da flora e da fauna, análise de estabilidade do talude
Curvatura do perfil	Perfil da curvatura do talude	Aceleração do fluxo, taxa de erosão/deposição
Plano de curvatura	Curvatura da região de contorno	Convergência/divergência do fluxo, presença de água no solo
Área de contribuição à montante da encosta	Área de contribuição da região de contorno que capta a água que é conduzida ao local de escoamento à jusante	Volume de escoamento, taxa de escoamento permanente, características do solo, presença de água no solo, geomorfologia
Área de dispersão do talude	Área à jusante da encosta	Áreas inundadas, taxa de drenagem do solo
Extensão da trajetória do fluxo	Distância máxima do fluxo de água em relação ao local de captação	Taxa de erosão, deslocamento de sedimentos, tempo de concentração

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

Nesse trabalho, a metodologia adotada para construção do MDT considera uma coincidência acentuada entre a drenagem e o relevo do terreno, denominada de “*MDT Hidrologicamente Consistente*”. Esta técnica, originalmente definida por O’Callaghan e Mark (1994), em síntese sugere a geração do modelo digital de terreno “*raster*”, preenchimento das depressões espúrias, identificação do caminho descendente do escoamento superficial entre cada célula do MDT e suas células vizinhas (direção de escoamento) e cálculo do fluxo acumulado.

Na concepção dos algoritmos interpoladores por esta técnica, tem-se que os principais métodos desenvolvidos para extração automatizada de feições fisiográficas de interesse hidrológico, passam inicialmente pela identificação da rede de drenagem numérica. Logo, salienta-se a importância de um acurado mapeamento da hidrografia local para construção do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente.

Um detalhe metodológico deste procedimento é que ao condicionar os dados de altimetria com a malha hidrográfica, sugere-se que nessa última, os vetores dos cursos d’água estejam orientados no sentido do escoamento. Esta exigência é um exemplo da importância da forma de aquisição digital dos dados, evitando futuras (e custosas) edições cartográficas.

### **c) Geoestatística**

A geoestatística interage com as tecnologias do geoprocessamento já comentadas, auxiliando numa análise quantitativa dos dados e fornecendo o nível de confiança para o estudo. Landim (2003), assim a define: “ ... a *análise geoestatística preocupa-se com o entendimento da gênese e leis naturais que governam fenômenos interpretados como regionais; da estimativa das variáveis regionais, ou algumas de suas características espaciais, usando informações e relações a partir de um conjunto discreto de amostras, e da avaliação dos erros de estimativa, para estabelecer o grau de segurança em previsões e os padrões ótimos de amostragem, que assegure que um erro máximo de estimativa não seja excedido.* ”

Apesar da geoestatística ser uma técnica recente, com aceitação a partir de meados de 1970, em Hart (1954), já se utilizava este termo num contexto geográfico para denotar métodos estatísticos que enfatizam a localização espacial.

O uso da geoestatística na geotecnia é cada vez mais freqüente, em razão da elevada heterogeneidade das características dos solos e rochas, e suas respectivas classificações. Segundo Landim (2003), técnicas como a geoestatística, fundamentada nos modelos probabilísticos, constituem-se em uma abordagem apropriada para quantificar a aparente aleatoriedade das variáveis geotécnicas, efetuando-se estimativas e avaliando-se incertezas.

Outro assunto importante e campo atual de estudo do geoprocessamento, refere-se à concepção de “indicadores urbanos”, a partir de informações georeferenciadas. Atribuir certo índice de sustentabilidade, seja este social, econômico, ambiental, e acompanhá-lo nas alterações espaço-temporais é um desafio complexo, e importante ao gestor municipal.

Na área de geociências, estes indicadores são denominados de “geoindicadores” (Berger, 1997; Bitar e Ceneviva, 2003; Cunha, 2003; Zuquette e Gandolfi, 2004; Cendrero et al., 2004; Rego Neto e Uceda, 2007). Estes autores ressaltam a importância dos indicadores para avaliar as mudanças dos processos e fenômenos geológicos, que ocorrem na superfície da terra ou perto dela, e que são significativos para o monitoramento ambiental.

Geralmente um geoindicador corresponde a um conjunto de parâmetros selecionados e considerados isoladamente ou combinados entre si. Desta forma, os índices sintéticos podem-se apresentar de uma agregação reducionista, não sendo representativo de determinado fenômeno.

Quanto aos geoíndices associados ao meio ambiente, ou de geoíndices da qualidade de vida, associados aos riscos geológicos, poucas são as referências bibliográficas a serem comparadas, em virtude da heterogeneidade das variáveis envolvidas e especificidades espaciais.

Talvez a explicação desta lacuna seja a falta de padronização dos estudos ambientais, além da difícil vinculação destas questões em pesquisas de opinião. Soma-se a isto às diferenças regionais, falta de profissionais habilitados e ausência de dados básicos para análise.

Carvalho (2001) questiona: “*Qual seria o indicador para qualificar quão apta uma área está, para receber a função de morada permanente ?*” Em sua reflexão, além de colocar em dúvida a qualidade dos parâmetros, bem como do critério para combinação destes parâmetros que conduziram ao valor do geoindicador em análise, associa essa decisão a outros fatores, inclusive da infra-estrutura urbana. Apesar da discussão envolvida, a função de “morada permanente” seria possibilitada em qualquer área, desde que observado os critérios de segurança para tal.

Segundo Rego Neto e Cendrero (2007), os indicadores sociais, econômicos, institucionais e ambientais são muitas vezes inter-relacionáveis, ou seja, a expectativa de vida relaciona-se a locais onde há saúde preventiva, boas condições

de higiene nas residências, água potável e coleta de lixo, o mínimo risco geológico da habitação, etc.; como poderá ser comprovado na apresentação do Índice de Qualidade de Vida Urbana (IQVU).

Geralmente, a unidade no meio urbano para a geração do geoindicador são as UP's (Unidades de Planejamento). Elas são apropriadas para avaliar a gestão do uso territorial urbano e mostrar a conformidade e a eficiência do plano ao uso proposto.

Para ilustrar, a carta dos índices do risco geológico por UP (Figura 2.22), variável integrante do IQVU em 2007, sofreu em uma ampla revisão por parte dos técnicos da prefeitura de BH, que inclusive serviu como motivador deste trabalho (Tuler et al. 2007b; Tuler et al. 2008).

No IQVU, este geoindicador é um instrumento fundamental de monitoramento dos impactos das ações e intervenções públicas, previsto no Plano Diretor do Município de Belo Horizonte, desde 1994 (PBH, 1996).

O IQVU busca avaliar não a qualidade de vida do indivíduo, mas sim, deste enquanto morador da cidade, especificamente da oferta local de serviços públicos, bem como da acessibilidade dos moradores aos serviços de outras localidades. Apesar deste objetivo fundamental, como constatado em Tuler et al. (2007b), a incorporação da abordagem geológico-geotécnica agregou a este índice elementos fundamentais da infra-estrutura do espaço urbano e da segurança da habitação.

Inclusive, em Tuler et al. (2007b) e Tuler et al. (2008), observou-se que o mapeamento das áreas de predisposição aos eventos perigosos (escorregamentos, enchentes e inundações e erosão), traduzindo seus resultados na variável "*qualidade e segurança da habitação*", refletiam nos menores índices associados a outras variáveis, como por exemplo, salubridade ambiental, educação, segurança urbana e assistência social.

Para exemplificar, seja o geoindicador ambiental denominado Índice de Salubridade Ambiental (ISA), utilizado pelo Município de Belo Horizonte e institucionalizado quando da sanção da Lei 8.260 de 03 de dezembro de 2001 (PBH, 2004), que comprovava a informação acima (Figura 2.23).

Porém, para que estes geoindicadores (ISA, IQVU, etc.) sejam fiéis ou representativos à realidade urbana, investigações de campo devem ser conduzidas por técnicos habilitados para sua validação. Após esta verificação, podem-se planejar as possibilidades de intervenção e/ou correção.

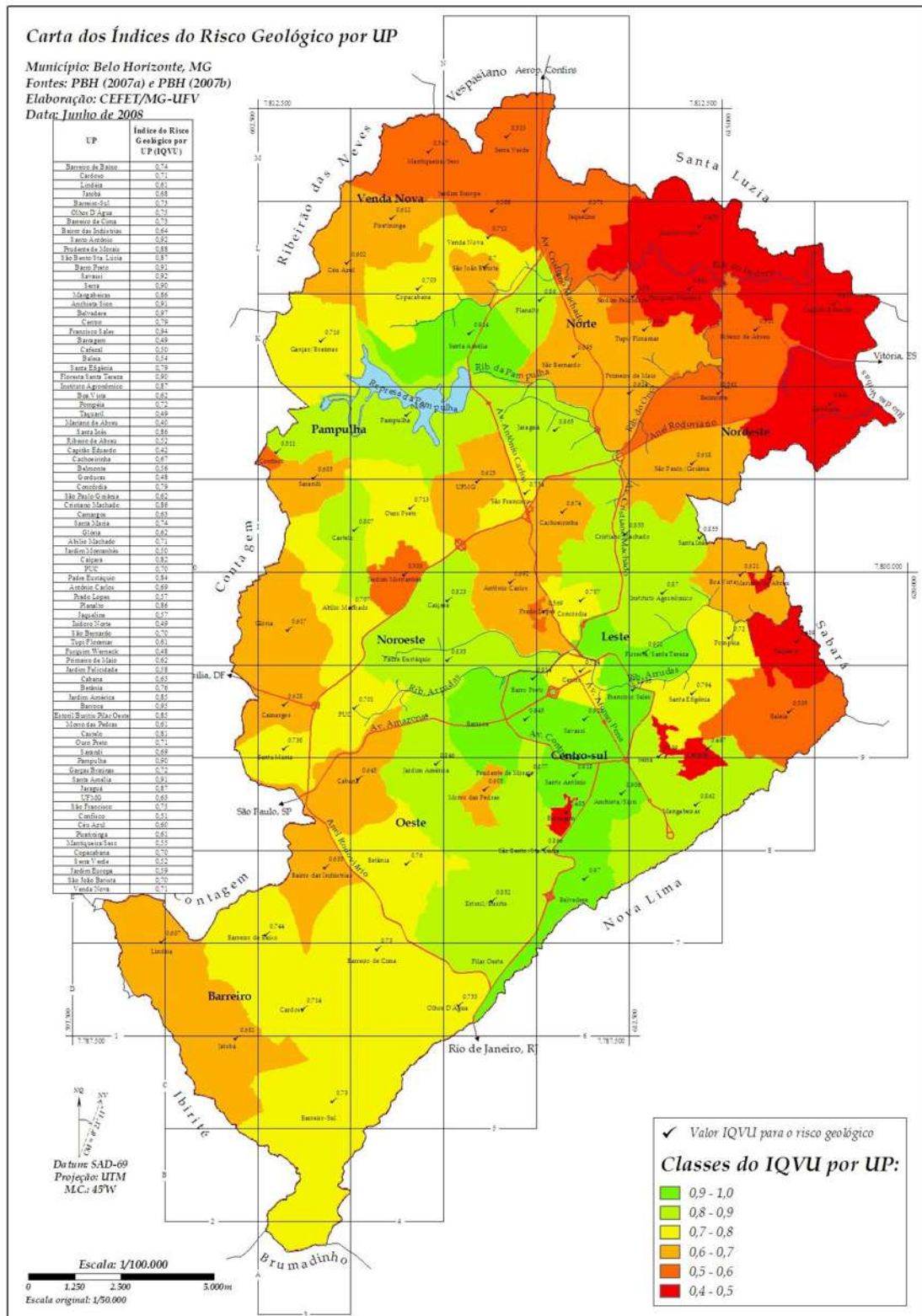


Figura 2.22 – Carta do IQVU relativo ao risco geológico, por UP.



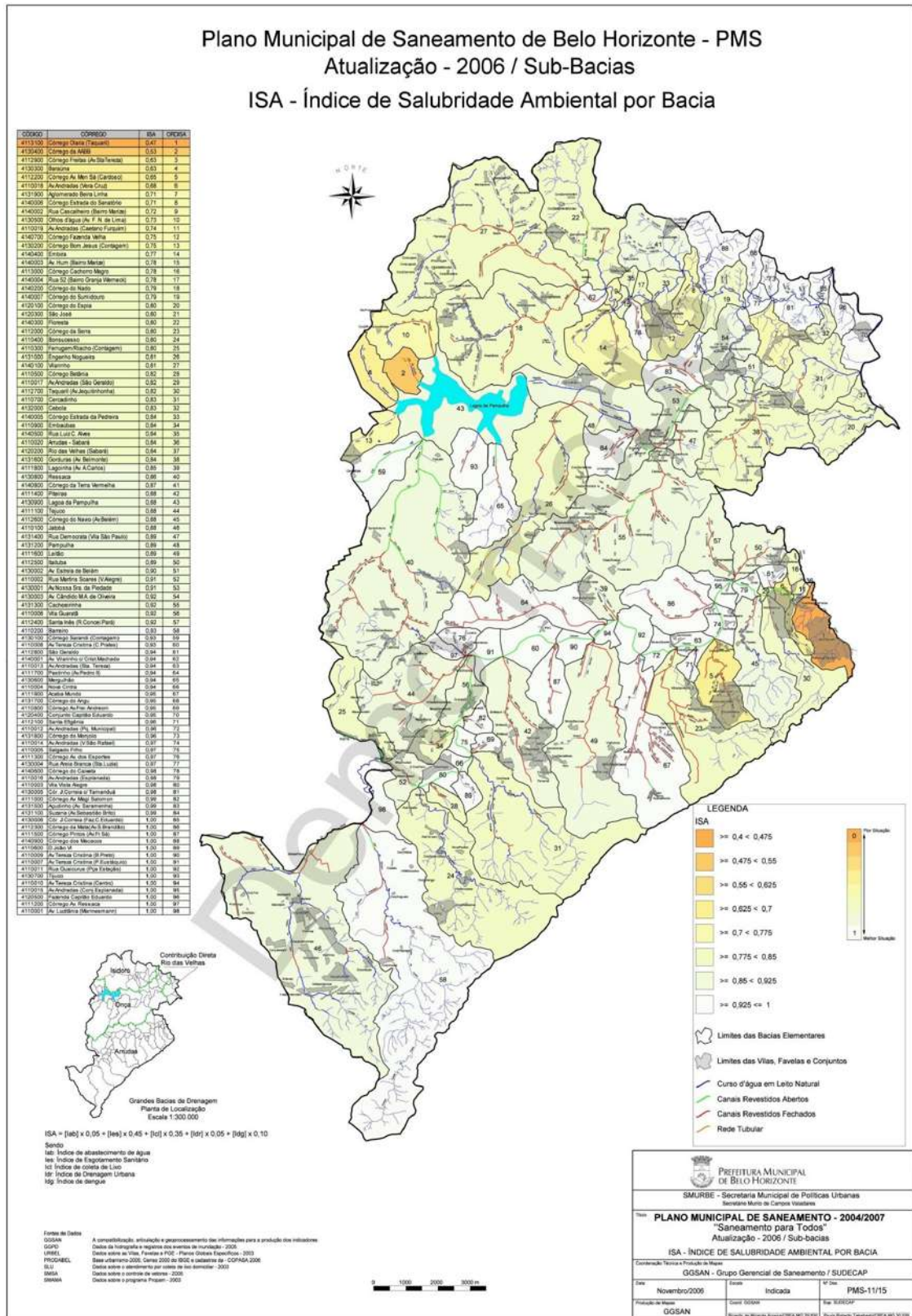


Figura 2.23 – Índice de Salubridade Ambiental, por Bacia.

## CAPÍTULO 3

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

---

3.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA MUNICIPAL

3.2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO DE CASO



### 3 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Para atingir os objetivos traçados, avaliações e estudos aplicados foram conduzidos, a citar sinteticamente:

– caracterização da área do município (escala regional) e da região do estudo de caso (escala local), discriminando os atributos predisponentes, modificadores e deflagradores necessários à atribuição dos graus de intensidade para a modelagem dos movimentos de massa gravitacionais (Itens 3.1 e 3.2).

#### 3.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA MUNICIPAL

Na caracterização da área municipal, foi fundamental a construção de algumas cartas, aqui classificadas como de nível hierárquico I. Buscou-se uma consistência das fontes de informações nas cartas e bancos de dados, e que fossem ao máximo atualizadas a partir de 2004, e de preferência em formato digital. Esta última característica foi uma das “barreiras” à pesquisa científica e aplicada.

Cita-se uma dificuldade superada neste trabalho na busca da referência bibliográfica “*Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte*”, editada por Silva et al. (1995). Cabe destacar assim a experiência: “... considerando um importante convênio firmado entre a UFMG e a PBH, as partes envolvidas portariam cópias daqueles documentos (e seu anexos) em suas respectivas bibliotecas !”

Constatou-se que essa afirmativa acima era em parte verdadeira, porém, na realidade, o acervo se encontrava em formato analógico, em mal estado de conservação e incompleto. Além disso, as mapotecas estabeleciam sistemas burocráticos ao seu manuseio, dificultando inclusive a atualização das mesmos.

Os trabalhos de Silva et al. (1995) citados acima, incitaram e influenciaram diretamente a concepção desse trabalho, principalmente a metodologia adotada pelos autores para construção da carta de eventos perigosos.

Dentre os documentos produzidos por Silva et al. (1995) (textos básicos e explicativos, documentos cartográficos analógicos, etc.), utilizou-se neste trabalho as seguintes cartas:

– Carta Geológica;

- Carta do Zoneamento Geotécnico;
- Carta de Predisposição à Eventos Perigosos;
- Carta do Zoneamento Hipsométrico;
- Carta de Abrangência de Unidades de Proposição e Pareceres Geotécnicos;
- Carta do Zoneamento Hidrogeológico;
- Carta do Modelo Hidrogeológico;
- Carta da Espessura do Aquífero Poroso/Granular no Complexo Belo Horizonte;
- Carta da Superfície Potenciométrica do Aquífero no Complexo Belo Horizonte; e
- Carta de Inventário da Localização de Poços no Município de Belo Horizonte.

Tuler et al. (2007a) iniciaram a parcial conversão analógico-digital de alguns destes documentos cartográficos e para tal preocuparam-se em:

- definir ferramentas computacionais e formatos adequados (*software e hardware*);
- verificar a qualidade (acurácia e consistência) dos originais cartográficos;
- incorporar e atualizar feições;
- gerar outros produtos cartográficos temáticos; e
- enfatizar a necessidade da automação destes acervos cartográficos junto à PBH.

Além das cartas citadas, foram adquiridos junto à PBH os seguintes documentos cartográficos digitais:

- Carta da hidrografia;
- Carta de zoneamento do solo;
- Carta dos limite, regionais e bairros;
- Carta do sistema viário; e
- Planta com curvas de nível.

A respeito das bases cartográficas apresentadas neste trabalho, considera-se que estão atualizadas, sendo em sua maioria concebidas a partir do ano 2000 (com exceção para as de Silva et al. (1995)). Várias são as fontes destes dados, destacando os seguintes órgãos da PBH: PRODABEL, URBEL, SMURBE, SUDECAP e alguns de seus projetos e convênios associados, bem como trabalhos, dissertações e teses defendidas no município de BH.

Para as descrições dos atributos predisponentes, modificadores e deflagradores foram construídas várias cartas, todas na escala original de 1:50.000 e apresentadas

neste trabalho na escala de 1:100.000, no formato A3. Todas as cartas possuem citação e referência de suas fontes, e as composições aqui geradas tornam-se de domínio público a partir dessa publicação.

Essas cartas foram objeto de várias edições, sendo a transformação entre formatos vetoriais e matriciais uma constante.

No manuseio desses dados e na composição das várias cartas, basicamente cinco *softwares*, licenciados, foram aplicados nas análises espaciais:

**a) CartaLinx** (Clarklabs, 2000)

Utilizado na digitalização e edição de alguns originais analógicos, obtidos através de mesa digitalizadora CalComp.

**b) IDRISI 15 Andes** (Clarklabs, 2006)

Utilizado em análises espaciais como: avaliações multicritério, ordenamentos, classificações, *overlay*, *buffer* e outras.

**c) ArcGIS 9.2** (ESRI, 2006)

Utilizados na edição e composição de cartas temáticas, geração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente, extração de variáveis a partir de MDT, seleção por atributos e por localização, dentre outros.

**d) ArcView GIS 3.2** (ESRI, 2006)

Utilizado como suporte às rotinas do modelo *SHALSTAB*, originalmente desenvolvidas por Dietrich et al. (2000). Neste *software*, a extensão denominada *SHALSTAB* foi instalada, permitindo a construção e simulação de cenários das cartas determinísticas de contribuição de fluxo e razão  $\log q/T$ .

**e) MapInfo 8.0** (Mapinfo Corporation, 2005)

Utilizado na visualização e edição de cartas já automatizadas pela PBH (PBH, 2007a, 2007b, 2007c e 2007d), e incorporados para a composição de outras cartas, como do limite do município, hidrografia, curvas de nível, etc., construção do mapa de ocorrências, transformação de data geodésicos e dentre outras.

Na digitalização de Tuler et al. (2007a), as cartas-origem da PBH possuíam a escala de 1:25.000. Logo, os produtos obtidos, por serem oriundos de cartas analógicas nessa escala, apresentaram os mesmos problemas relacionados à limitação dos dados de origem, somados aos dos erros de digitalização.

No processo de digitalização de cartas pelo processo manual (ou vetorial, via mesa digitalizadora), deve-se fazer breve referência à classificação de exatidão de cartas, seja das classes A, B e C, conforme decreto nº 89.817 de 20/06/1984 (Brasil, 1984).

Os originais de Silva et al. (1995) não possuíam informações sobre o Padrão de Exatidão Cartográfica ( *PEC* ) e Erro Padrão ( *EP* ). Dessa forma, adotou-se para os mesmos, a pior situação da norma (decreto nº 89.817), ou seja, a classe C (PEC de 1,0 mm, igual a 25 m em campo, e EP de 0,6 mm igual a 15 m em campo, considerando a escala da carta original de 1:25.000).

Adicionalmente, sejam as distorções da superfície da carta devido à temperatura, umidade, manipulação, etc.; considere-se assumir que os efeitos combinados destes deveriam produzir um “*EP*” da ordem de 0,25 mm após a digitalização. Somam-se a isso ainda outros erros como a espessura das linhas das feições digitalizadas. Quando se trata de linhas com espessuras maiores que 1 mm, por exemplo, o operador da mesa, apesar de buscar o eixo para digitalização, também acarreta um erro posicional.

O erro introduzido pelo processo de digitalização foi razoavelmente discutido e calculado em Tuler et al. (2007a) e estimado pela Equação 3.1 (Clarklabs, 2000):

$$EP_{total} = \sqrt{\sum EP^2_{(contribuições)}}$$

$$EP_{total} = \sqrt{(0,0006 * 25.000)^2 + (0,00025 * 25.000)^2} = 16,25m \quad (\text{Equação 3.1})$$

No processo de digitalização através de mesa digitalizadora, gerou-se uma estrutura de dados tipo “espaguete”, isto é, cada entidade gráfica se tornou um registro lógico no arquivo digital, definido por sua cadeia de coordenadas cartesianas x,y. Isto implicou que, para obter mapas de alta qualidade demandou algum espaço de armazenamento, uma vez que longas cadeias foram necessárias para armazenar coordenadas de alta precisão. Porém, observou-se que os produtos aqui digitalizados eram formados por apenas alguns poucos polígonos e pontos, com exceção apenas para a complexidade da carta geológica.

### 3.1.1 – ATRIBUTOS PREDISPOENTES

Caso a cidade não existisse (*uma simplificação às vezes necessária, porém perigosa* !), os atributos predisponentes associados aos movimentos de massa gravitacionais seriam por si só maestrados pela geologia regional e local, e em segundo plano, pelas características pedológicas, hidrogeológicas, da drenagem e geomorfológicas.

#### 3.1.1.1 – GEOLOGIA

A composição de mapas geológicos representa, em planta, a posição e a extensão dos afloramentos das formações rochosas existentes da área em estudo, sendo que os corpos geológicos muitas vezes apresentam estruturas complexas e relações espaciais diversas.

A carta geológica adotada neste trabalho (Figura 3.1) foi originalmente contruída por Silva et al. (1995), em que realizaram ampla pesquisa bibliográfica sobre o tema, incluindo mapeamentos geológicos anteriores realizados pela Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Instituto de Geociências Aplicada (IGA-MG) e Instituto de Geociências da UFMG (IGC-UFMG), fotointerpretação geológica, análise de relatórios de sondagem e trabalhos de campo com levantamento de perfis geológicos e outros.

Ainda, sobre a carta da Figura 3.1, citam-se Viana (2000), Carvalho (2001), Costa (2002) e Parizzi (2004) que reafirmam o bom conhecimento da geologia da capital mineira, e indiretamente ratificam a qualidade dos dados produzidos por Silva et al. (1995).

Os materiais que ocorrem à superfície e subsuperfície do município de BH são heterogêneos e diversificados em composição, estado de alteração, estrutura e idade, tornando necessário agrupá-los segundo critérios geológicos e adequados à escala da carta. Desta forma, considerando a boa consistência dos dados geológicos analógicos obtidos por Silva et al. (1995), restou a digitalização e revisão deste original cartográfico.

Na Figura 3.1, tem-se a Carta Geológica de Belo Horizonte e na Figura 3.2, têm-se as seções transversais A-A' e B-B', destacadas da Figura 3.1.

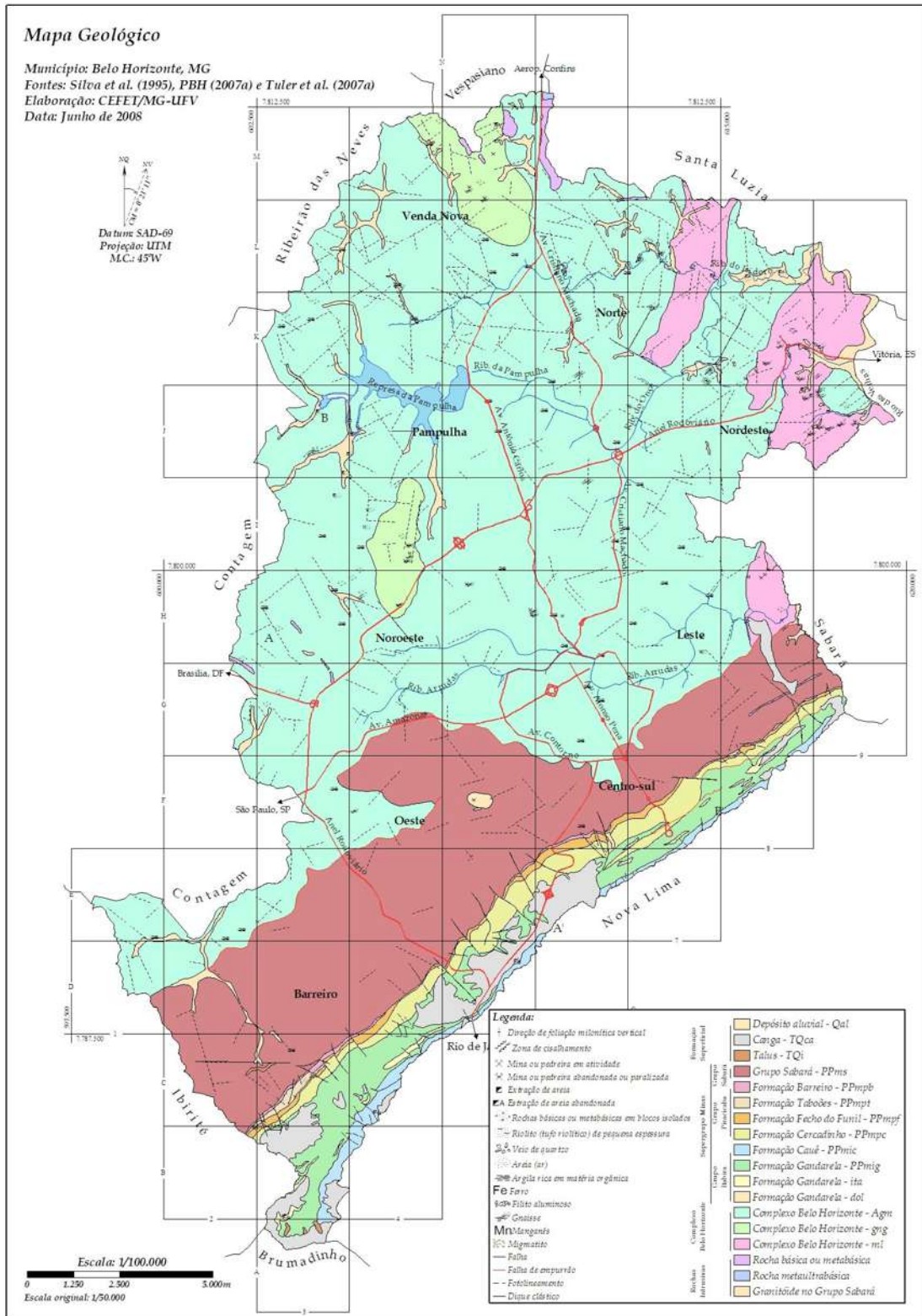


Figura 3.1 - Carta geológica de BH.

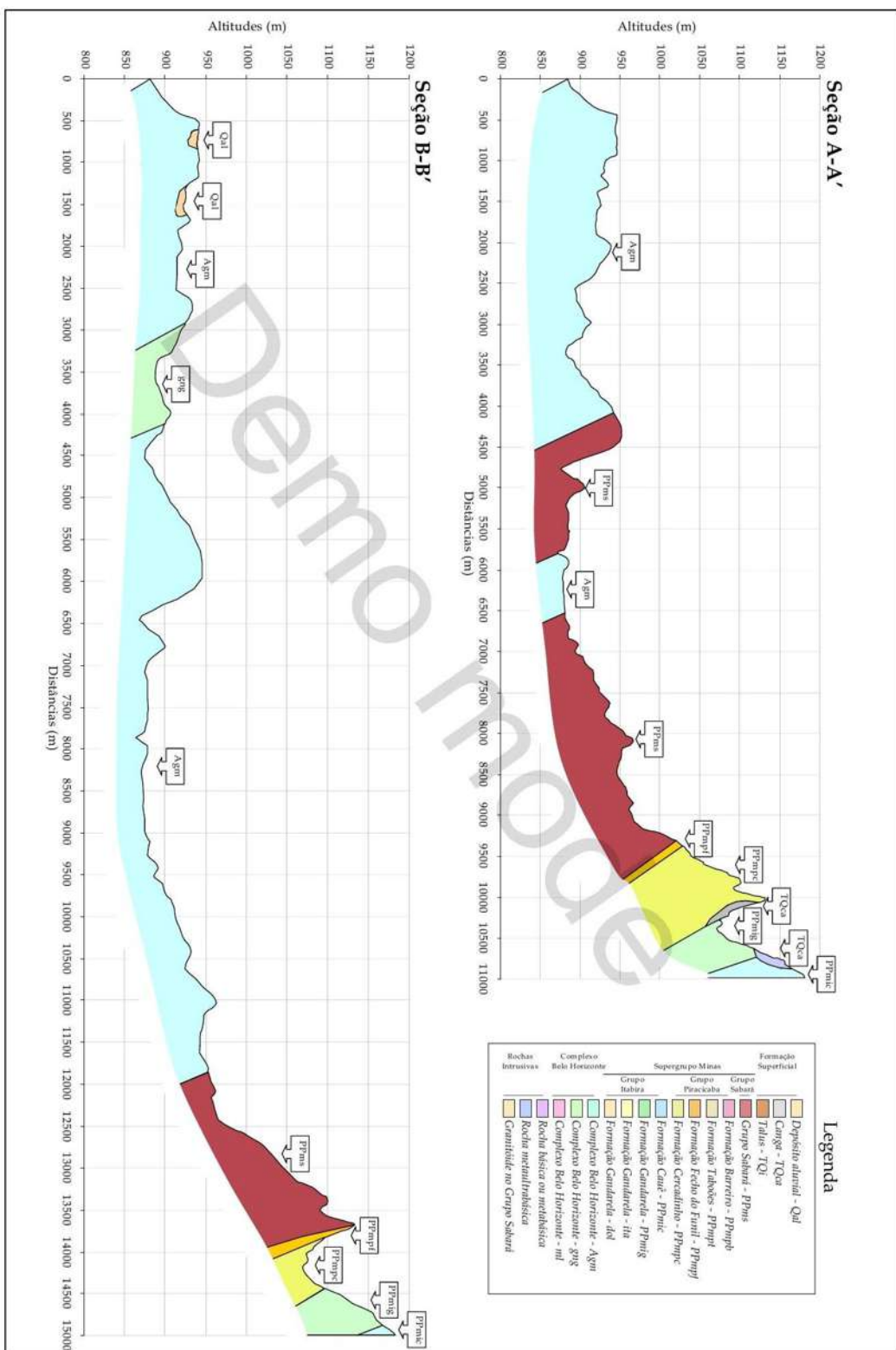


Figura 3.2 – Seções transversais A-A' e B-B'.

Entretanto, destaca-se a atenção para a digitalização das feições de interesse (pontos, linhas e polígonos), considerando que a carta em questão possui simbologias próprias à Cartografia Geológica e de alguma forma, para futuras aplicações em Análises Espaciais no SIG e geração de cartas temáticas em CAM's, os arquivos de dados-fonte gerados devem estar bem estruturados.

Concordando com Marques (2007), preocupou-se na interpretação e composição do mapa geológico do município, uma vez que se devem considerar os conhecimentos geológicos da área, implícitos na carta através dos símbolos das litologias e sedimentos inconsolidados, bem como das informações sobre a presença de estruturas geológicas: discordâncias, dobras, falhas, intrusões, etc.

Com relação à litoestratigrafia de Belo Horizonte, duas unidades se destacam, e se acham presentes (Tabela 3.1):

- a) Domínio do Complexo Belo Horizonte;
- b) Domínio das Sequências Metassedimentares do Supergrupo Minas.

Além destas, em menor proporção, têm-se:

- c) Rochas Intrusivas;
- d) Formações Superficiais.

Tabela 3.1 – Unidades estratigráficas locais.

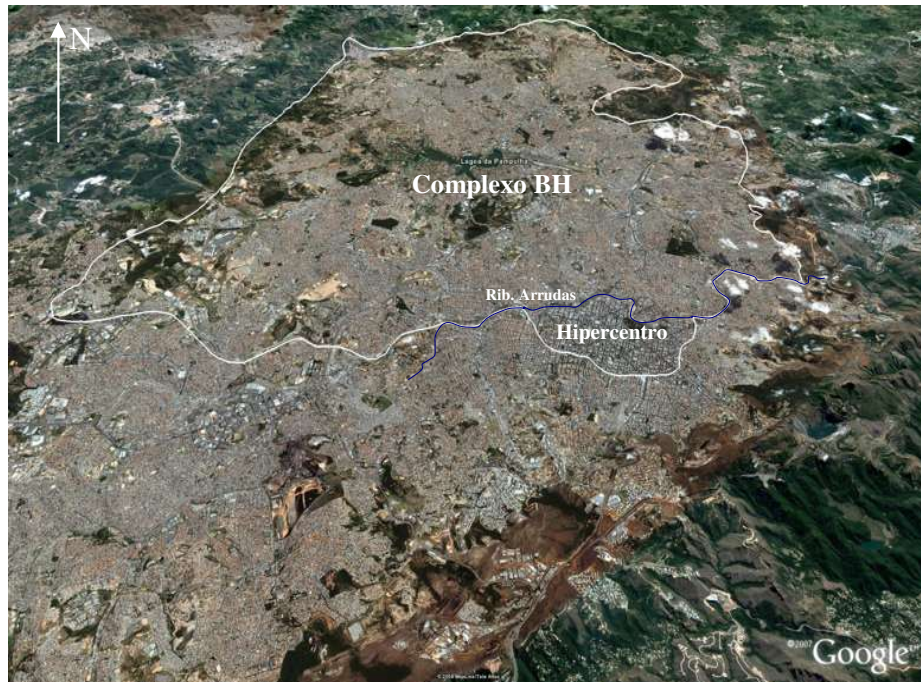
Idade		Supergrupo	Grupo	Formação	Litologia
Cenozóico		Formações Superficiais (Qal, TQca, TQi)			Depósitos aluviais, coluviais, canga
Pré-Cambiano	Proterozóico	Minas	Itabira (PPmi)	Cauê (PPmic)	Itabirito e filito e dolomito subordinado
				Gandarela (PPmig, ita e dol)	Dolomito, filito dolomítico e itabirito dolomítico
			Piracicaba (PPmp)	Cercadinho (PPmpc)	Quartzito ferruginoso, filito ferruginoso
				Fecho do Funil (PPmpf)	Filito
				Taboões (PPmpt)	Quartzito fino
				Barreiro (PPmpb)	Filito carbonoso e filito sericítico
			Sabará (PPms)		
Arqueano	Complexo Belo Horizonte (Agm, gng, ml)			Gnaisses, migmatitos e granitóides	
Rochas intrusivas (idade não determinada)					Rochas metabásicas, básicas, ultramáficas e granitóides diversos

Fonte: Adaptado de Silva et al. (1995).

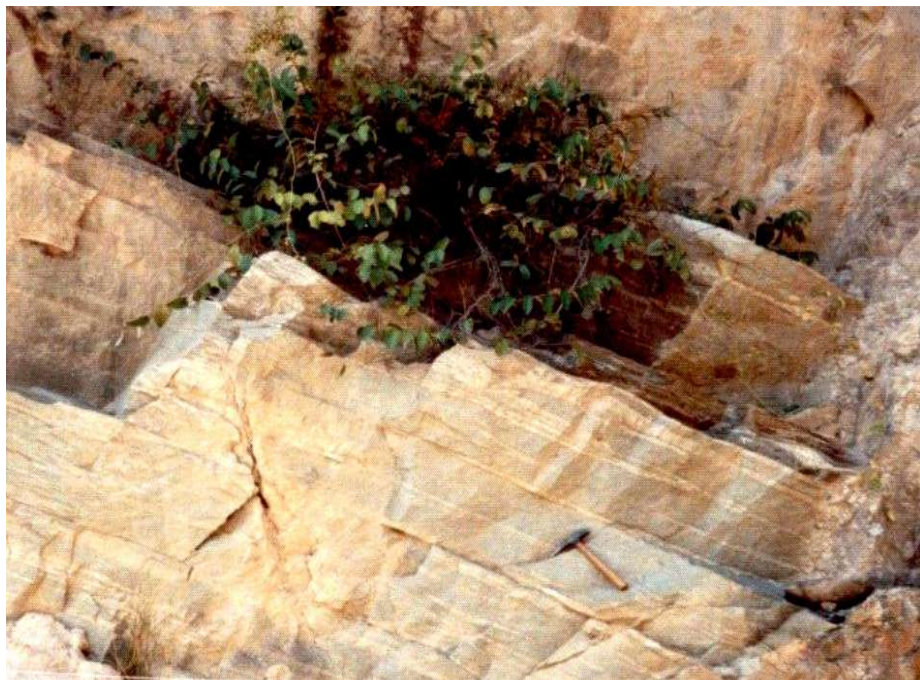


### a) Complexo Belo Horizonte

O Complexo Belo Horizonte representa cerca de 70% da extensão do município e corresponde ao substrato pré-cambriano mais antigo da região. Observe que este se apresenta com maior extensão ao norte do Ribeirão Arrudas (Figuras 3.3.a e 3.3.b). A litologia presente é um gnaisse cinzento com bandamentos composicionais e feições de migmatização e é denominado de Gnaisse Belo Horizonte (Figura 3.3).



a – Vista aérea oblíqua da área do Complexo Belo Horizonte (região ao norte de BH).  
Fonte: Adaptado de Google Earth (2008).



b – Gnaisse do Complexo Belo Horizonte. Fraturas pouco resistentes e foliação bem marcada.  
Fonte: Adaptado de Costa (2002).

Figura 3.3 – Complexo Belo Horizonte.

No mapeamento da Figura 3.1 diferenciou-se, para a escala de 1:25.000, as variações litológicas de granulação grossa a muito grossa (gng) e os gnaisses e migmatitos milonitizados (ml).

Observa-se que essas litologias se diferenciam pela maior resistência à decomposição e erosão, permanecendo como cristas quase desprovidas de solo de cobertura, com elevada declividade e ensejando a abertura de um grande número de pedreiras no passado.

As litologias do Complexo Belo Horizonte se alteram, em geral, com relativa facilidade, originando solos areno-argilosos. Os solos residuais apresentam espessura variada, sendo delgado a ausente nas áreas de exposição dos maciços rochosos (parte das regiões Nordeste e Leste), a espesso, maturo e silto-argiloso nas áreas de relevo suave, que podem alcançar espessuras profundas, superiores a 50 m. As maiores espessuras do manto de intemperismo encontram-se na região da Pampulha, atingindo valores superiores a 100 m.

Em média, esses solos apresentam uma condutividade hidráulica de  $1,1 \times 10^{-4}$  cm/s, que pode ser considerada relativamente elevada para esses tipos de solo (Costa, 2002).

Viana (2000) reafirma que a homogeneidade litológica do Complexo Belo Horizonte é sustentável apenas para observações em escalas médias (1:25.000 ou menores). Ainda, apesar de estudos com certo grau de detalhe mostrarem um domínio de rochas gnáissicas e migmatíticas de composição granítica *latu sensu*, a ocorrência de variações texturais e estruturais são frequentes, constituindo muitas vezes, fatores predisponentes aos processos erosivos.

Segundo Carvalho (2001), apesar da diferença petrográfica deste Complexo, estas podem ser consideradas relativamente homogêneas do ponto de vista geotécnico, podendo-se adotar soluções e análises padronizadas em amplas áreas.

#### **b) Sequência Metassedimentar**

Esta formação ocorre na extremidade sudeste do município ao longo da crista local da Serra do Curral e constitui 30% restante da área do município (Figura 3.1).

As rochas da sequência metassedimentar apresentam comportamentos diferenciados em termos de natureza e espessura do solo, propriedades

hidrogeológicas e características de resistência conforme o arranjo estrutural das rochas.

Segundo Carvalho (2001), a característica geral deste agrupamento é a constituição de rochas de origem sedimentar, submetidas a metamorfismo de grau baixo a moderado. Desta forma, não houve em igual medida o surgimento de minerais novos e a recristalização foi moderada, ocorrendo uma diversidade de comportamentos geotécnicos, inviabilizando a adoção de soluções padronizadas para extensas áreas.

A característica geral deste domínio é a diversidade litoestrutural e morfológica. Este se subdivide em agrupamentos menores, que são, da formação mais antiga para a mais nova: (b.1) Grupo Itabira (PPmi), (b.2) Grupo Piracicaba (PPmp) e (b.3) Grupo Sabará (PPms) (Figuras 3.1 e 3.4).



Figura 3.4 – Vista aérea oblíqua da área de ocorrência das rochas da sequência Metassedimentar (ao fundo, a Serra do Curral).

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2006).

#### **b.1) Grupo Itabira (Ppmi)**

É constituído predominantemente de rochas metassedimentares de origem química e compõem duas formações: Formação Cauê (PPmic) e Formação Gandarela (PPmig, ita e dol) (Figuras 3.1 e 3.2).

A primeira constitui a crista e o terço superior da escarpa da Serra do Curral. Caracteriza-se pelo itabirito e hematita compacta em lâminas, alternadas por lâminas de sílica.



A segunda é constituída de rochas de origem química representadas por dolomito calcítico, dolomito hematítico e itabirito dolomítico. Morfologicamente, a Formação Gandarela aparece deprimida ao longo da encosta da Serra do Curral, sendo responsável pelos patamares de menor declividade. Com relação à decomposição, essas litologias apresentam uma fraca resistência, propiciando a formação de solos espessos, areno-argilosos e com condutividade hidráulica média de  $4,2 \times 10^{-5}$  cm/s no seu trecho mais superior (Costa, 2002).

### **b.2) Grupo Piracicaba (PPmp)**

É subdividido em quatro formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. No conjunto, esse grupo ocupa uma faixa de direção NE–SW com largura variável entre 200 e 1.000 m (Figuras 3.1 e 3.2).

A formação Cercadinho (PPmpc) constitui a base do grupo. É constituída de metassedimentos clásticos depositados em discordância erosiva sobre a Formação Gandarela. Sendo a formação mais representativa desse grupo, chega a atingir a largura de 700 m. Sua litologia característica é o quartzito cinza em estratos de espessura centimétrica a métrica que, quando alterado, forma um solo arenoso, embora pouco espesso.

As outras formações são pouco expressivas no território de BH. A Formação Fecho do Funil (PPmpf), conforme pode ser observado na carta geológica, assume menor largura e é a menos espessa, embora não apresente descontinuidades. É constituída preponderantemente por um filito sericítico, com intercalações de xisto, filito dolomítico e lentes de dolomito. Em razão de reduzida resistência à decomposição e erosão, constituem sempre um relevo deprimido, com baixas declividades, contrastando com os quartzitos Cercadinho e Taboões que lhe fazem contato.

As Formações Taboões (PPmpt) e Barreiro (PPmpb) têm expressão apenas na porção sudoeste do município. O primeiro é constituído de quartzito muito fino e em corpos muito delgados, e o segundo, um filito negro e grafitoso.

### **b.3) Grupo Sabará (PPms)**

Este suporta a maior densidade populacional da capital mineira, além de constituir-se na unidade mais espessa do Supergrupo Minas. Alcança cerca de 3.000 m de extensão e sua largura varia de 800 m até 5.500 m, se estendendo na direção NE–SW e ocupando a maior parte da zona meridional do município (Figuras 3.1 e 3.2).

As principais litologias são xistos e filitos, geralmente de coloração cinza a avermelhada quando são, e amarelada quando alterados (fato que ocorre com muita facilidade), formando solos residuais areno-argilosos.

No Grupo Sabará, destacado por Parizzi (2004), cita-se que as condições locais proporcionam solos rasos (e por vezes inexistentes), e seu substrato é constituído por filito fino intercalado com grauvaça, podendo ser classificado como saprolito.

Na litologia descrita localiza-se a área do estudo de caso identificada pela metodologia heurística, e onde aplicou-se a modelagem *SHALSTAB*. Esta foi detalhada adiante.

### **c) Rochas Intrusivas**

As rochas intrusivas que se apresentam na carta geológica são de origem ígnea, que penetram as rochas pré-existentes por mecanismos de intrusão. Existem pelo menos três subgrupos no município: um de natureza granítica; outro de rochas de composição semelhante à do basalto; e o terceiro composto por veios de quartzo. Tratam-se de formações insignificantes, em área, como pode ser constatado pela Figura 3.1. Geralmente estas rochas são encontradas em avançado estado de alteração, resultando um solo argiloso, coeso, de cor marrom avermelhada que contrasta com o manto de intemperismo dos gnaisses.

### **d) Formações Superficiais**

As formações superficiais recobrem parcialmente as litologias do Complexo Belo Horizonte e do Supergrupo Minas, como pode ser observado na Figura 3.1. Considerando sua origem e características texturais-composicionais, destacam-se: sedimentos aluviais (Qal), canga (TQca) e os depósitos de vertente em diferentes estágios de laterização (TQi).

Na área ao norte do município, os sedimentos aluviais estão representados por areias, cascalhos e argilas depositadas por processos fluviais. Isto se constata ao observar a relação da hidrografia na carta geológica. Observam-se nesta mesma carta, depósitos expressivos nos canais, principalmente na divisa com o município de Sabará, em torno do Rio das Velhas.

Descritos por Viana (2000), os depósitos de vertente são representados por um variado grupo de materiais em diferentes estágios de laterização e de coesão. No domínio do Complexo Belo Horizonte predominam as coberturas colúvias resultantes da erosão laminar das encostas. Na sequência metassedimentar, as formações superficiais compõe-se de canga, depósitos colúvio-aluviais e acumulações por fluxos torrenciais.

### 3.1.1.2 – PEDOLOGIA

No presente trabalho não se buscou um mapeamento detalhado dos tipos de solos, mas apenas destacar a relação destes com a drenagem superficial e subsuperficial (escoamento *versus* infiltração), ou seja, uma classificação dos solos de Belo Horizonte segundo grupos hidrológicos, de forma a auxiliar a atribuição dos graus de intensidade de movimentos de massa para a modelagem heurística.

Para tal, validou-se a classificação através de ensaios do coeficiente de permeabilidade (k), elaborados por vários autores como: Silva et al. (1995), Ramos et al. (1999), Viana (2000), Costa (2002) e Parizzi (2004).

A permeabilidade é uma propriedade do solo que avalia seu comportamento frente a ação da água. Solos muito permeáveis apresentam altas taxas de infiltração, propiciando baixo escoamento superficial, logo, favorecendo a drenagem subsuperficial; em detrimento de solos impermeáveis, que são responsáveis pela geração de grandes volumes de escoamento superficial.

A relação citada acima foi discutida no Capítulo 2 (Item 2.3), em que, entre as várias propriedades dos solos, a permeabilidade possuía correlação direta com a estabilidade dos taludes.

Especificamente, refere-se à coesão aparente do solo, ou seja, à parcela relacionada à permeabilidade e que interfere no grau de saturação do solo. Reforça-se aqui que, para a mesma inclinação de uma encosta, sejam formadas por solos residuais ou coluviais, e independe (às vezes) da formação mineralógica, esta propriedade pode influenciar bastante na estabilização da encosta.

Na Tabela 3.2 são apresentados valores típicos de condutividade, para comparação com os valores encontrados por Costa (2002), Viana (2000) e Parizzi (2004), e também dos amostrados no presente trabalho.

Observe pela Tabela 3.2 que os solos permeáveis apresentam valores de condutividade hidráulica maiores que  $10^{-5}$ cm/s, sendo os demais classificados como solos impermeáveis ou com drenagem impedida. Ainda, solos em torno de  $10^{-4}$ cm/s estão no limiar entre bem e mal drenados por infiltração.

Tabela 3.2 – Valores típicos de condutividade hidráulica para materiais inconsolidados, segundo alguns autores.

Permeabilidade	Tipo de solo	k (cm/s)				
		ABGE (1996)	Ortigão (1995)	CPRM (2000)	Pinto (2000)	
Solos Permeáveis	Pedregulho	> 1	> 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup> – 10 <sup>0</sup>	10 <sup>0</sup>	
	Areia	Grossa	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>0</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-1</sup>	
		Média			10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-3</sup>	
		Fina	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>	
		Siltosa			10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>	
Baixa	Silte	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-4</sup>	
Solos Impermeáveis	Muito baixa	Argila	10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>
	Baixíssima			< 10 <sup>-7</sup>		

Fonte: Adaptado a partir de autores citados.

Apoiado no método desenvolvido pela *Soil Conservation Service* (SCS, 1986) e conforme Ramos et al. (1999), existem quatro grupos hidrológicos de solos:

#### a) Grupo A

Solos que produzem baixo escoamento superficial e apresentam alta taxa de infiltração. Caracterizado por solos arenosos com pouco silte e argila, não havendo rochas ou camadas argilosas até a profundidade de 1 metro.

#### b) Grupo B

Solos com moderada taxa de infiltração. Caracterizados por solos arenosos menos profundos e com maior teor de argila total e ausência de rochas ou camadas argilosas até 1,5 metros de profundidade.

#### c) Grupo C

Solos com baixa taxa de infiltração, consistindo, principalmente, de solos com camadas que impedem o movimento vertical da água. Solos que geram escoamento superficial acima da média.

#### d) Grupo D

Solos que produzem alto escoamento superficial e apresentam taxas de infiltração muito baixas, consistindo, por exemplo, de argilas expansivas, solos com camadas argilosas muito próximas à superfície e solos pouco profundos sobre camadas impermeáveis. Solos argilosos com 30% a 40% de argila total e camada densificada a cerca de 50 centímetros de profundidade.

Desta forma, procedendo a uma generalização e simplificação, baseado na Tabela 3.2 e na classificação do SCS (1986), adotou-se nesse trabalho a seguinte correlação (Tabela 3.3):

Tabela 3.3 – Coeficientes de permeabilidade *versus* classificação SCS.

<b>k (cm/s)</b>	<b>Classificação SCS</b>	<b>Drenagem</b>
$> 10^{-3}$	Grupo A	Boa
$10^{-3}$ a $10^{-4}$	Grupo B e C	Moderada
$< 10^{-4}$	Grupo D	Ruim

Em Costa (2002), obtiveram-se valores médios para Belo Horizonte (Tabela 3.4) de condutividade a partir de 40 ensaios por rebaixamento do nível d'água.

Tabela 3.4 – Valores de condutividade hidráulica por Costa (2002) e comparação com a Tabela 3.3.

<b>Unidades litológicas</b>	<b>Condutividade Média (cm/s)</b>	<b>Coluna Drenagem da Tabela 3.3</b>
Complexo Belo Horizonte (gnaisses e migmatitos)	$1,1 \times 10^{-4}$	Moderada (Grupo B)
Grupo Sabará (filitos)	$6,3 \times 10^{-5}$	Ruim (Grupo D)
Formação Gandarela (dolomitos e filitos)	$4,2 \times 10^{-5}$	Ruim (Grupo D)
Formação Cercadinho (quartzitos)	$6,0 \times 10^{-4}$	Moderada (Grupo B)

Fonte: Adaptado de Costa (2002).

Os valores típicos apresentados na Tabela 3.4 foram confirmados (em parte) por Viana (2000) e Parizzi (2004), conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores de condutividade hidráulica por Viana (2000) e Parizzi (2004) e comparação com a Tabela 3.3.

<b>Litotipos</b>	<b>Solo</b>	<b>Amostras</b>	<b>Condutividade Média (cm/s)</b>	<b>Coluna Drenagem da Tabela 3.3</b>
Complexo Belo Horizonte	Solo residual de gnaisses	Típico	$1,0 \times 10^{-4}$	Moderada (Grupo B)
		Grosso	$9,8 \times 10^{-4}$	
Grupo Sabará	Areia com muito pedregulho		$5,2 \times 10^{-4}$	Moderada (Grupo B)
Formação Gandarela	Silte muito arenoso		$8,9 \times 10^{-5}$	Ruim (Grupo D)

Fonte: Adaptado de Viana (2000) e Parizzi (2004).

Segundo Costa (2002), predomina na região setentrional do município, na proporção de aproximadamente 60%, um solo Argissolo Vermelho Amarelo, textura



areno-argilosa e típico de relevo ondulado a fortemente ondulado. Ainda, caracteriza-se por apresentar boa diferenciação de horizontes, com um horizonte B textural e estrutura bem definida.

Como visto pelas características geológicas e litológicas, o solo nessa região, de forma geral, é resultante da alteração de gnaisses e migmatitos e os solos residuais apresentam espessuras variadas (dezenas de metros ou quase ausentes). Pelos ensaios de Costa (2002), apresentam condutividade hidráulica média de  $1,1 \times 10^{-4}$  cm/s, e drenagem moderada (Tabela 3.3), ou do Grupo B (Ramos et al., 1999).

Na parte meridional do município, ocupando cerca de 30% de sua extensão total, aparece um Argissolo Vermelho Amarelo, com textura argilosa, classificados por Ramos et al. (1999). Apresenta pouca diferenciação entre os horizontes, contendo um horizonte B espesso e avermelhado.

Ainda no Grupo Sabará, o solo é resultante da decomposição de xistos, filitos e dolomitos, sendo em geral, ausente a pouco espesso. Segundo Costa (2002), apresentam uma condutividade hidráulica média de  $5,1 \times 10^{-5}$  cm/s, como drenagem ruim (Tabela 3.3), ou pertencente ao grupo D (Ramos et al., 1999). Parizzi (2004), em seus estudos da área do bairro Conjunto Taquaril (Grupo Sabará), através de ensaios de permeabilidade, encontrou valores na ordem de  $10^{-4}$  cm/s.

Finalmente, ocorre o solo litólico, ocupando aproximadamente 10% da área estudada e relacionado com as litologias mais resistentes formadoras da Serra do Curral. Sua textura é essencialmente arenosa, por derivar geralmente de quartzitos, embora ocorram manchas isoladas e restritas desses solos sobre rochas miloníticas na região setentrional do município. Trata-se de um solo muito raso, onde muitas vezes o horizonte A repousa diretamente sobre a rocha. Segundo Costa (2002), apesar das medições indicarem uma condutividade hidráulica média de  $6,0 \times 10^{-4}$  cm/s, este o caracterizou como drenagem ruim, ou pertencente ao grupo D.

Sintetizando, observa-se que as condutividades hidráulicas ficaram na faixa de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm/s e de forma geral, com base em Ramos et al. (1999), Viana (2000) e Costa (2002), e os solos do Complexo Belo Horizonte enquadraram-se no grupo hidrológico B; e os do Supergrupo Minas, no grupo hidrológico D.

Segundo Ramos et al. (1999) esta classificação em grupos hidrológicos pode ser questionada considerando as zonas urbanas densamente ocupadas, em que grande parte está recoberta por pavimento e construções, acarretando um alto grau

de impermeabilização de algumas regiões e a pouca atuação do tipo de solo no processo de infiltração das águas pluviais.

Soma-se a isto, o fato da cidade de Belo Horizonte ter o seu território quase totalmente urbanizado e impermeabilizado, restando apenas 6% de área não parcelada, incluindo nestas as áreas de preservação permanente, e ainda 5% de áreas parceladas, mas não edificadas (Machado, 2000; PBH, 2003).

Tuler (2007b) apresentou a carta da classificação do solo segundo grupos hidrológicos. Trata-se de uma generalização cartográfica para a escala de 1:50.000, e pode inviabilizar conclusões locais, como por exemplo para estudo de drenagem urbana, em função dos vários “coadjuvantes” do sistema.

Como será modelado adiante (Item 3.2), as características dos solos estão associadas à sua formação, e nesta discussão, à relação hidrológica. Sintetizando, duas litologias em BH (sejam as coberturas residuais ou coluvionais) apresentam maior susceptibilidade aos movimentos de massa, nas seguintes situações:

#### **a) Complexo Belo Horizonte**

Os gnaisses com manto de intemperismo variável ou em perfil bem desenvolvido. As coberturas coluviais foram resultantes da erosão laminar da encosta e especificamente nesta situação, a cobertura coluvial tem caráter argilo-arenoso e coloração predominante avermelhada.

#### **b) Sequência Metassedimentar**

- Nos filitos medianamente alterados a decompostos, ocasionalmente cobertos por depósitos de tálus e colúvios; e
- Nas Intercalações centimétricas a métricas de quartzito e filito, ocasionalmente recobertos por depósitos de vertente e terras descartadas.

A opção por esta investigação forneceu subsídios para apoiar a tomada de decisão, ao atribuir as intensidades de susceptibilidades aos movimentos de massa, a nível regional, na metodologia heurística a ser aplicada mais adiante.

Para aplicação do modelo *SHALSTAB*, uma investigação “*in situ*” foi realizada através de amostras, de forma a obter os parâmetros geotécnicos necessários e definição aproximada da espessura do material inconsolidado. A descrição dos materiais inconsolidados naquela área coincidiram com os trabalhos de Xavier (1996), Costa (2002), Campos (2004) e Parizzi (2004).

### 3.1.1.3 – HIDROGRAFIA E DRENAGEM URBANA

A hidrografia guarda relação direta com a geologia (litoestratigrafia), a citar, o caso do Ribeirão Arrudas, que tem seu curso paralelo à linha da Serra do Curral, se alojando em linha de menor resistência à erosão entre as rochas metassedimentares, do Supergrupo Minas e o gnaiss, do Complexo Belo Horizonte.

O município de Belo Horizonte situa-se na parte superior da Bacia do Rio São Francisco, sendo cortado por dois tributários do Rio das Velhas (Ribeirão Arrudas e Ribeirão da Onça). Essas duas sub-bacias possuem quase todos os seus tributários nascendo no próprio município, porém as cabeceiras localizam-se no município de Contagem (Figura 3.5).

O Rio das Velhas é um dos maiores formadores da Bacia do Rio São Francisco e chega a constituir parte do limite entre os municípios de Belo Horizonte e Santa Luzia, numa extensão de cerca de 7 km na extremidade nordeste. Esse rio nasce nas proximidades da cidade de Ouro Preto, a 70 km acima da confluência com o Ribeirão Arrudas.

A sub-bacia do Ribeirão da Onça, com 211,63 km<sup>2</sup>, recebe toda a contribuição da região setentrional do município, iniciando-se pelos formadores da Lagoa da Pampulha, onde se destacam os Córregos Cabral e Bom Jesus que nascem no município de Contagem. As águas vertidas da Lagoa da Pampulha vão formar o Córrego da Pampulha, que após receber a drenagem da região norte do município, principalmente do Ribeirão do Isidoro, passa a ser denominado de Ribeirão da Onça.

A sub-bacia do Ribeirão Arrudas, com 207,76 km<sup>2</sup>, nasce na extremidade sul do município, na encosta da Serra do Curral, e margeia o município no flanco sudeste por cerca de 4 km e logo se dirige nas direções norte e nordeste para cruzar todo o município numa extensão de quase 20 km.

Os principais tributários desse rio, pela margem direita, nascem na Serra do Curral, e pela margem esquerda, apenas dois nascem no município limítrofe de Contagem (Córregos Ferrugem e Água Branca). Outros dois tributários importantes são os Córregos Jatobá e Barreiro.

Relacionando as cartas de Hipsometria e de Convergência dos Fluxos (Figuras 3.7 e 2.11 respectivamente) observa-se que todo o destino das águas superficiais tem o sentido para os rumos S/SW para N/NE, com exceção da reduzida área correspondente ao interflúvio das duas sub-bacias hidrográficas e no limite norte do município.

Logo, a base de dados mais acurada que dispunha-se para esse trabalho, constava dos anexos do programa DRENURBS (PBH, 2001). Para a obtenção dos dados deste programa, necessários à caracterização física das bacias, foi utilizada na época a base cartográfica em meio digital, disponibilizada pela PRODABEL, que referia-se à restituição aerofotogramétrica de vôo realizado em 1999.

No decorrer do Programa DRENURBS, essa base foi complementada pela restituição referente ao vôo realizado em 2002, numa faixa com largura média de 150 metros ao longo dos fundos de vale. Consta na referência PBH (2001), também a investigação de campo por levantamentos topográficos, de locais que apresentavam inconsistências da fotointerpretação.

Com relação à drenagem urbana, deve-se buscar a condução racional da águas, que em parte minimiza os problemas associados aos movimentos de massa gravitacionais, especificamente dos desbarrancamentos ao longo dos cursos d'água e dos fundos de vale.

Nos projetos do urbanista Aarão Reis em 1897, o sítio urbano de Belo Horizonte foi planejado sem que houvesse preocupação com a hidrografia da região, caracterizado por um traçado em forma de tabuleiro de xadrez (PBH, 2008), mostrado na Figura 3.13. A maior parte da rede de drenagem do município de BH é perene, graças à descarga de base garantida pela elevada precipitação e reduzida evapotranspiração, conseqüente da destruição da vegetação na área urbana.

Desta forma, os córregos e ribeirões foram canalizados segundo o traçado das vias, tendo a razão de meros receptores de despejos sanitários. Estas canalizações permitiram a ocupação dos fundos de vales da região central. O sistema de drenagem natural do município de Belo Horizonte é composto, principalmente, pelos Ribeirões da Onça e Arrudas (Figura 3.5).

A sub-bacia do Ribeirão da Onça pode ser dividida em duas áreas distintas devido à existência da Lagoa da Pampulha, que amortece as enchentes urbanas e retém os sedimentos da porção à montante da sub-bacia. O Ribeirão Isidoro é o principal afluente pela margem esquerda, que ainda não se encontra canalizado.

Na sub-bacia do Ribeirão Arrudas destaca-se o próprio Ribeirão Arrudas, que foi motivo de grande preocupação no passado, citando as enchentes de 1908 e 1916. Em 1928, boa parte foi canalizada e obras recentes do “*Projeto Linha Verde*” (GOV.MG, 2008) cobriu parte dos cerca de 20 km de sua extensão.

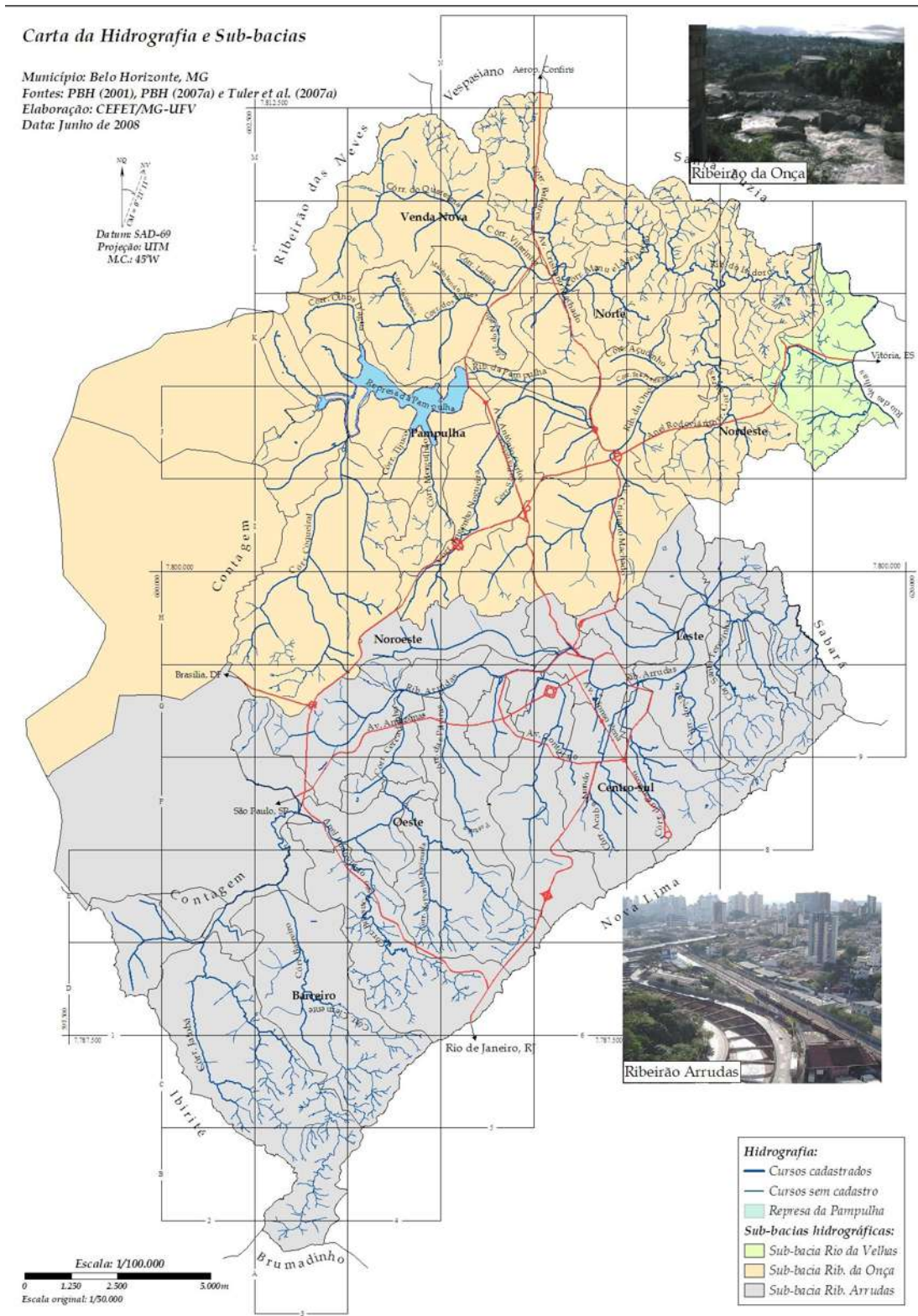


Figura 3.5 - Carta da hidrografia de BH.

#### 3.1.1.4 – HIDROGEOLOGIA

A hidrogeologia de BH também guarda relação direta com a geologia (litoestratigrafia) local. O fluxo das águas pluviais infiltradas no solo constitui parte do mecanismo que integra todo o ciclo hidrológico. Saber de onde vem e para onde vai a água, e a sua altura (profundidade) em relação à superfície (NA – Nível d'água) também é de interesse para análises de riscos associadas aos movimentos de massa, especificamente, na atribuição nos graus de intensidade de susceptibilidades para a modelagem heurística.

Os trabalhos de Silva et al. (1995) perfizeram um dos primeiros estudos hidrogeológicos da capital mineira, onde são apresentados textos básicos relativos ao inventário de pontos d'água, características dos poços tubulares, qualidade química das águas amostradas, aspectos do zoneamento e do modelo hidrogeológico. Destacam-se ainda, os itens temáticos relativos às reservas de água subterrânea no município de BH e a preocupação quanto à poluição e exploração destes aquíferos, aprimorado nos trabalhos de Costa (2002).

Porém, percebem-se nas cartas, tanto de Silva et al. (1995), quanto Costa (2002), algumas áreas em que não haviam informações ou elas não eram estatisticamente representativas e que os autores optaram por deixá-las em branco.

Com base no banco de dados dos poços de Silva et al. (1995), de Costa (2002), do projeto Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e da CPRM (2007) (num total de 330 amostras), foi possível a confecção da carta potenciométrica para o município (Figura 3.6).

Conforme se observa na Figura 3.6, existe uma carência de poços nas regiões norte e nordeste do município, além de uma má distribuição espacial. Se considerarmos a proposta de Zuquette e Gandolfi (2004), de 05 a 10 amostras por km<sup>2</sup> para um mapeamento geotécnico, observar-se que existe um campo para exploração científica.

Segundo CPRM (2000), é importante observar que a prática tradicional de que “*as linhas de fluxo são perpendiculares às linhas equipotenciais*” só é válida em um meio poroso e isotrópico, onde as escalas nas duas direções forem iguais. Logo, na carta apresentada pela Figura 3.6 esta simplificação foi considerada também para os aquíferos metassedimentares, logo, cabendo ressalvas e novas avaliações.

Observando ainda a Figura 3.6 e conforme constatado por Silva et al. (1995) e Costa (2002), o fluxo das águas subterrâneas de BH não é muito diferente do fluxo superficial, já que o nível de base dessas bacias é o Rio das Velhas e constitui também o principal exutório das águas subterrâneas nessa região.



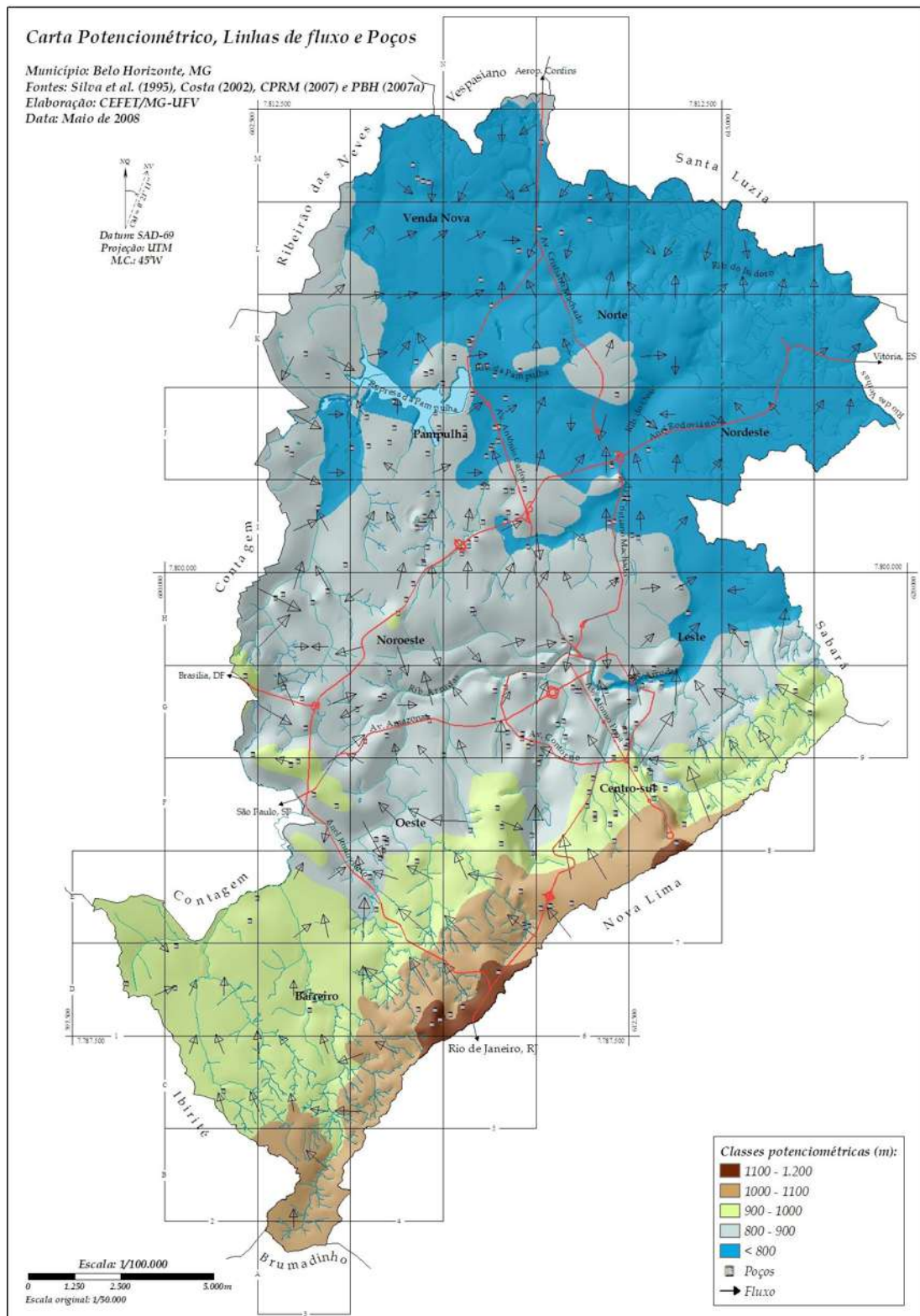


Figura 3.6 - Carta potenciométrica, linhas de fluxo e localização dos poços amostrados de BH.

### 3.1.1.5 – GEOMORFOLOGIA

A morfologia refere-se às saliências e reentrâncias da superfície da Terra que podem ser descritas e caracterizadas em diferentes escalas. A geomorfologia local é um dos elementos básicos utilizados na análise de susceptibilidade a eventos perigosos, pois fornece os subsídios que condicionam a maior ou menor intensidade dos agentes associados, por exemplo, aos movimentos de massa gravitacionais.

Geralmente uma das limitações de cartas básicas das cidades está relacionada àquelas que constem do relevo do terreno, especificamente com equidistância vertical compatível com a escala de interesse. Às vezes, quando possuem tal informação, esta se encontra desatualizada e em formato analógico.

Neste trabalho, a caracterização do relevo foi analisada a partir da concepção de um MDT e seus produtos.

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), as condições limites das cartas topográficas para elaboração de um MDT seguem as especificações apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Condições limites de consistência para um MDT.

Escala	Amplitude de relevo (m)	Dist. hor. entre curvas de nível (mm)	Equid. das curvas de nível (m)	Nº de curvas de nível que podem ser agrupadas	Recomendações
1:50.000	> 500	> 0,5	20	2	Controle com procedimentos de fotointerpretação e trabalhos de campo (fotos aéreas 1:60.000)
> 1:5.000	< 100	< 1	1	2	Controle com procedimentos de fotointerpretação, trabalhos de campo e fotogrametria terrestre.

Fonte: Adaptado de Zuquette e Gandolfi (2004).

Superando as expectativas da Tabela 3.6, o município de BH possuía uma base digital de curvas de nível com equidistância vertical de 5 m, atualizada em 2001, que se refere à restituição aerofotogramétrica do vôo realizado em 1999 (PBH, 2001; PBH, 2007a). Para a área do estudo de caso, a equidistância vertical foi de 1m, realizado em 2004.



De posse também da hidrografia atualizada e digital (Item 3.1.1.3), a partir da restituição de vôo de 2002 (PBH, 2001), obteve-se o modelo digital de terreno hidrologicamente consistente. Conforme discutido no Item 2.5, tais modelos são isentos de depressões espúrias, assegurando que o escoamento superficial de qualquer ponto da bacia direciona-se para a foz.

O método digital aplicado para a interpolação foi a rotina “*Topogrid*”, do *software* ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006), e o tamanho final do *pixel* adotado foi de 25 m, conforme discutido no Item 3.1. A carta do zoneamento hipsométrico gerada possui escala original de 1:50.000 e o resultado é apresentado na escala de 1:100.000, através da Figura 3.7.

Na capital mineira observa-se uma fisiografia diversificada e vinculada às propriedades geológicas, litológicas e hidrogeológicas. Neste contexto, o município apresenta também duas unidades morfológicas distintas em gênese e características, reforçando a subdivisão geológica e hidrogeológica (Figuras 3.1 e 3.2):

- Depressão Sanfranciscana (ou Depressão de Belo Horizonte); e
- Supergrupo Minas.

Observa-se pela Figura 3.7 que o município atinge suas maiores elevações na região SE, delimitado pela Serra do Curral.

As camadas de itabirito (Formação Cauê), protegidas da erosão pelas couraças ferruginosas, constituem a linha de crista e o terço superior da escarpa sub-vertical da Serra do Curral. As altitudes variam entre 1.100 m e 1.500 m, no pico Rola Moça, aumentando ao longo de sua crista de NE para SW.

Estas encostas são responsáveis pela variação das altitudes na faixa entre 950 m e 1.200 m. Nestas, apresentam-se, conforme observado na Carta Geológica (Figura 3.1), rochas pouco resistentes ao intemperismo, como por exemplo, os dolomitos da Formação Gandarela, dando origem a áreas aplainadas com espessa cobertura laterítica como ocorrem nos bairros Lagoa Seca, Olhos d’Água, Mangabeiras e Belvedere.

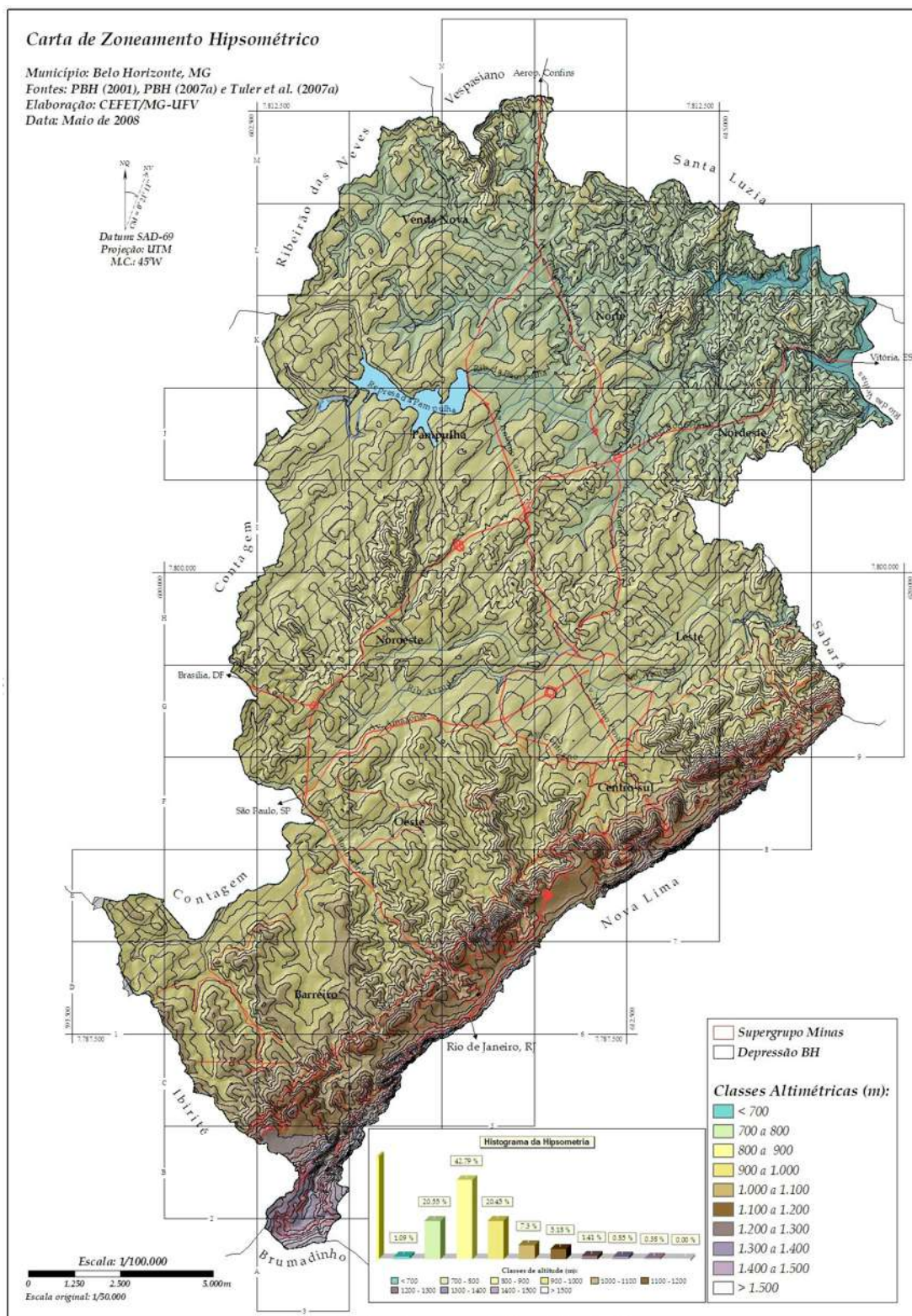


Figura 3.7 - Carta do zoneamento hipsométrico de BH.

Seguindo ao norte, verificam-se duas áreas: a sub-bacia do Ribeirão Arrudas e a sub-bacia do Ribeirão da Onça (Figura 3.5). Na primeira observam-se altitudes entre 750 m a 950 m, predominando as superiores a 850 m, e na segunda variando de 650 m a 950 m, predominando as inferiores a 800 m.

Nos divisores destas sub-bacias, notam-se espigões alongados sentido N-S, nos bairros Engenho Nogueira e Nova York, e E-W no bairro Padre Eustáquio, que se destacam na paisagem, porém com altitude inferiores as do Domínio Metassedimentar. Geralmente os espigões, em função de encostas de média a alta declividade, podem ser vulneráveis ao escoamento torrencial e movimentos de massa.

Pode-se observar, ainda, que as cotas mais baixas (entre 670 m a 690 m) desse município correspondem às proximidades da confluência do Ribeirão da Onça com o Rio das Velhas, que constitui o nível de base geral para a drenagem local.

Conforme Tabela 2.10, a partir do MDT, obteve-se:

- a) Carta de declividades (Figura 3.8);
- b) Carta do azimute da inclinação das encostas (Figura 3.10);
- c) Carta de feições morfológicas (Figura 3.12); e
- d) Carta da área de contribuição da drenagem (Figura 2.11).

Estes produtos também foram concebidos através do *software* IDRISI 15 Andes (Clarklabs, 2006) e editadas no *software* ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006). Destaque à carta de declividades, em função de sua aplicação nos modelos de estabilidade das encostas.

#### **a) Carta de Declividades**

A geração de uma carta de declividades classifica a área segundo a relação entre a diferença de nível e a distância entre os pontos, neste caso, em percentagem ou m/m, ou ainda dadas pelo ângulo de inclinação das encostas.

Na literatura observam-se variadas classificações para as declividades, em função de sua aplicação (Bonuccelli, 1999; Pejon, 1999; Marcelino, 2003; Zuquette e Gandolfi, 2004; Ministério das Cidades, 2006; Chancón et al., 2006 e outros).

De acordo com as leis municipais de BH (n.º 7.166 de 27 de agosto de 1996 e n.º 8.137 de 21 de dezembro de 2000), em que “*Estabelece normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo urbano no município*”, citando o seu Capítulo

3, “Do Parcelamento do Solo”, tem-se que norteia o parcelamento do solo e as classes de declividades:

“Art. 16 - Não é permitido o parcelamento do solo em terrenos:

*III - naturais com declividade superior a 47% (quarenta e sete por cento);*

*§ 1º - No caso de parcelamento de glebas com declividade de 30% (trinta por cento) a 47% (quarenta e sete por cento), o projeto respectivo deve ser acompanhado de declaração do responsável técnico de que é viável edificar-se no local.”*

Desta forma, compondo as classes de declividades de acordo com a legislação citada, têm-se os seguintes valores apresentados na Tabela 3.7 e Figura 3.8.

Tabela 3.7 – Classes de declividade e respectivas áreas em BH.

Declividade (% e graus)			% (da área)	Área (km <sup>2</sup> )
%	Graus	Denominação (Classe)		
0 – 5	0 – 2,9	Muito Baixa	11,5	38,1
5 – 10	2,9 – 5,7	Baixa	25,9	85,8
10 – 20	5,7 – 11,3	Média	35,2	116,5
20 – 30	11,3 – 16,7	Média a alta	15,3	50,8
30 – 47	16,7 – 25,2	Alta	8,8	29,0
> 47	> 25,2	Muito Alta	2,6	8,4
Lagoa da Pampulha			0,7	2,3
<b>Totais</b>			<b>100,0</b>	<b>331,0</b>

Constata-se, pela Tabela 3.7, que 72,6% da área apresentam declividades inferiores a 20%, sendo que a Lagoa da Pampulha foi excluída nesse cálculo.

Observe pela Figura 3.8 que esta faixa de declividades coincide com a Depressão Franciscana. A evolução do relevo nessa unidade geomorfológica é resultante da combinação da erosão fluvial comandada pelas duas principais drenagens locais, Ribeirão Arrudas e Ribeirão da Onça, com as características litológicas e estruturais reinantes nessa área.

Com relação às áreas com maiores declividades (> 20% – média a muito alta), remete-se a unidade geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero, localizado na faixa de direção NE–SW, na extremidade sul do município, onde se localiza a Serra do Curral. Nestas condições, o escoamento superficial é altamente favorável em detrimento da infiltração.

Essa carta é fundamental para análise da susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais, tanto para os métodos heurístico quanto para o determinístico, e será utilizada mais adiante.



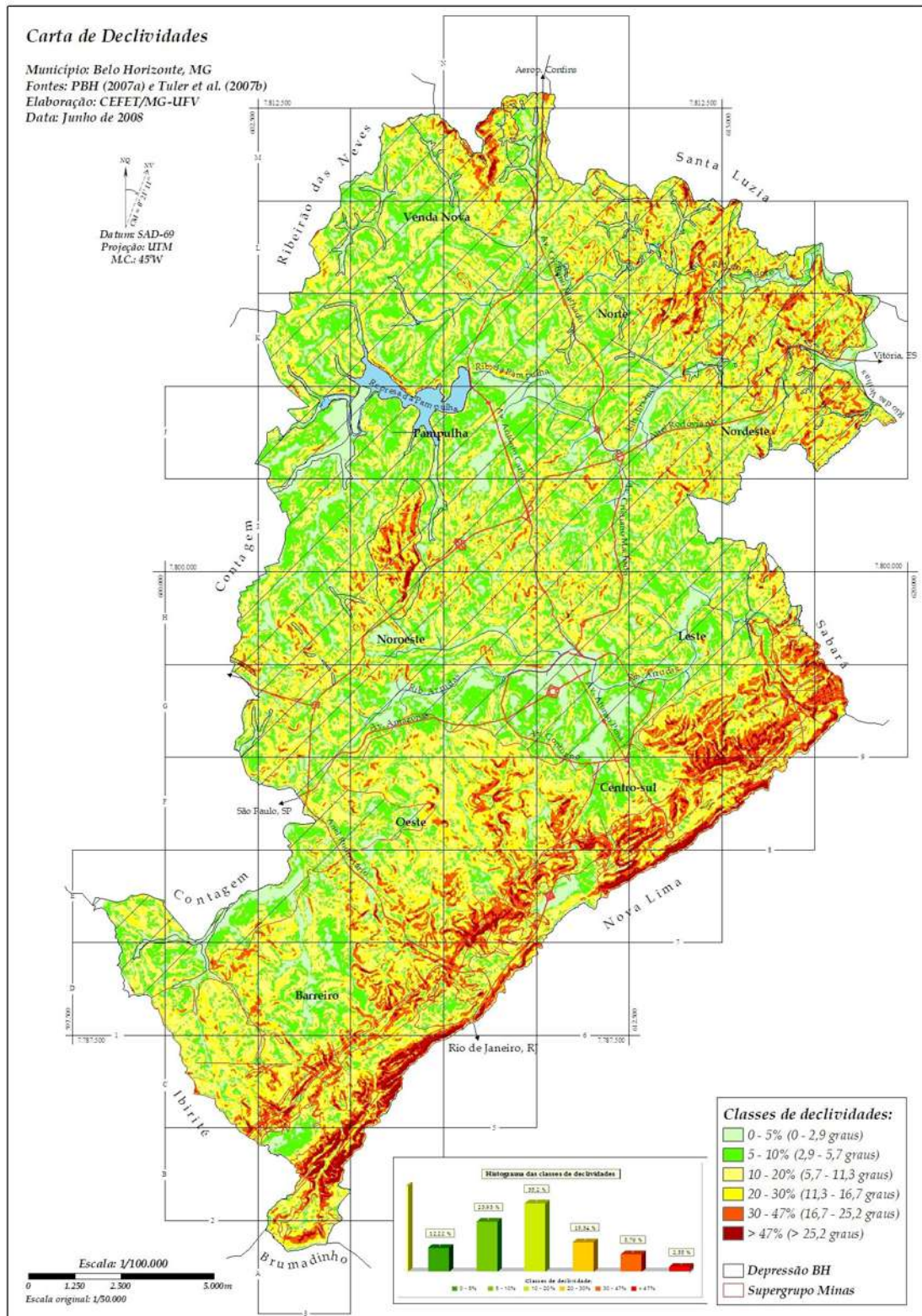


Figura 3.8 - Carta de declividades de BH.

### b) Carta do Azimute da Inclinação da Encosta

A carta do azimute da inclinação da encosta apresenta os sentidos naturais do escoamento superficial, caso não houvesse as intervenções das canalizações da drenagem urbana.

Através desta carta, pode-se quantificar as áreas de influências para o escoamento superficial de uma sub-bacia hidrográfica, ou ainda, inferir e relacionar a direção e o mergulho de discontinuidades geológicas, etc. Desta forma podem-se identificar locais da ocupação urbana que poderiam ser afetados pelo acúmulo de um escoamento torrencial ou mesmo, relacioná-las com as discontinuidades geológicas e as possíveis quedas de blocos e detritos.

Como exemplo de queda de blocos e detritos, citam-se as intercalações centimétricas a métricas de quartzito e filito da Formação Cercadinho. Em virtude do mergulho de suas camadas coincidirem com o quadrante SE, em caso de cortes nesta direção, ocorrerá uma maior susceptibilidade de ruptura (queda de blocos por tombamento) (Figuras 3.9 e 3.10).

Na metodologia para a modelagem heurística a ser construída adiante, são verificadas outras possibilidades de instabilidades das encostas, através da caracterização litológica e estrutural.



Figura 3.9 – Queda de blocos e detritos no Quartzito da Formação Cercadinho.

Fonte: Arquivo pessoal (2008).

Como observado pela Figura 3.10, as áreas planas não apresentam nenhuma direção de escoamento. Observe-se na Serra do Curral uma maior frequência do azimute da faixa de  $270^\circ$  a  $360^\circ$ , e justamente ortogonal à linha de cumeada NE-SW. Esta carta foi utilizada mais adiante no método heurístico, para definição das intensidades dos movimentos da massa gravitacionais.



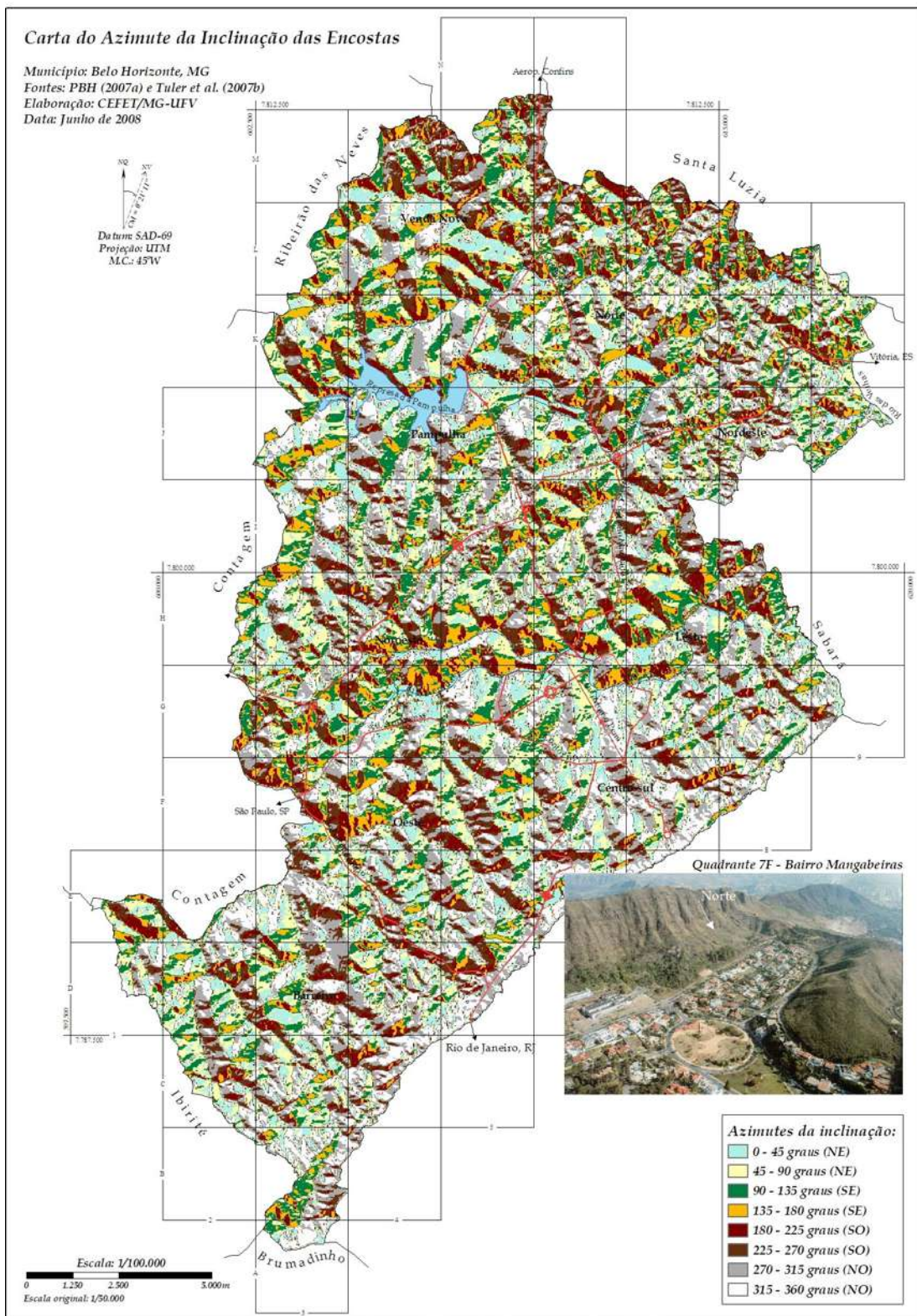


Figura 3.10 - Carta do azimute da inclinação das encostas de BH.

### c) Carta de Feições Morfológicas

Geralmente as feições morfológicas são extraídas a partir de observação de campo, fotointerpretação ou identificação sobre uma planta planialtimétrica.

As feições mais comuns e de interesse para projetos de engenharia dizem respeito àquelas associadas à drenagem como o divisor de águas e o talvegue. Também, para estudos específicos, a curvatura das encostas côncava ou convexa, sua amplitude e extensão são parâmetros de estudo.

De posse do MDT, buscou-se a caracterização morfológica através da rotina *toposhape*. Esta foi concebida por Pellegrini (1995), e automatizada no *software IDRISI Andes* (Clarklabs, 2006), combinando no algoritmo descrições qualitativas e quantitativas da morfologia.

Em síntese, Pellegrini (1995) cita que existem dois métodos para classificação da morfologia: descontínuo e contínuo.

A descontínua ignora a natureza contínua de superfícies de elevação e fundamenta a classificação nas avaliações qualitativas de relações geométricas, exemplificando, nas definições de linhas de fluxo em um MDT.

A metodologia contínua, adotada neste trabalho, fundamenta-se num melhor conhecimento de estrutura da superfície e assume-se que o local é contínuo, dentro de certos limites estabelecidos pela declividade e mudanças na curvatura da encosta.

Pellegrini (1995) sugere inicialmente que o MDT deve ser suavizado. Para tal, aplica-se um filtro sobre o modelo, com objetivo de “suavizar” as curvas de nível, sem alteração significativa de suas altitudes.

Desta forma, aplicou-se um filtro pela “*média 3 x 3*”, que consiste em calcular a média simples das altitudes das 9 células originais que a cercam, e atribuir-se esse valor à célula. Este procedimento busca “suavizar” o modelo, adotando apenas os vizinhos mais próximos na operação.

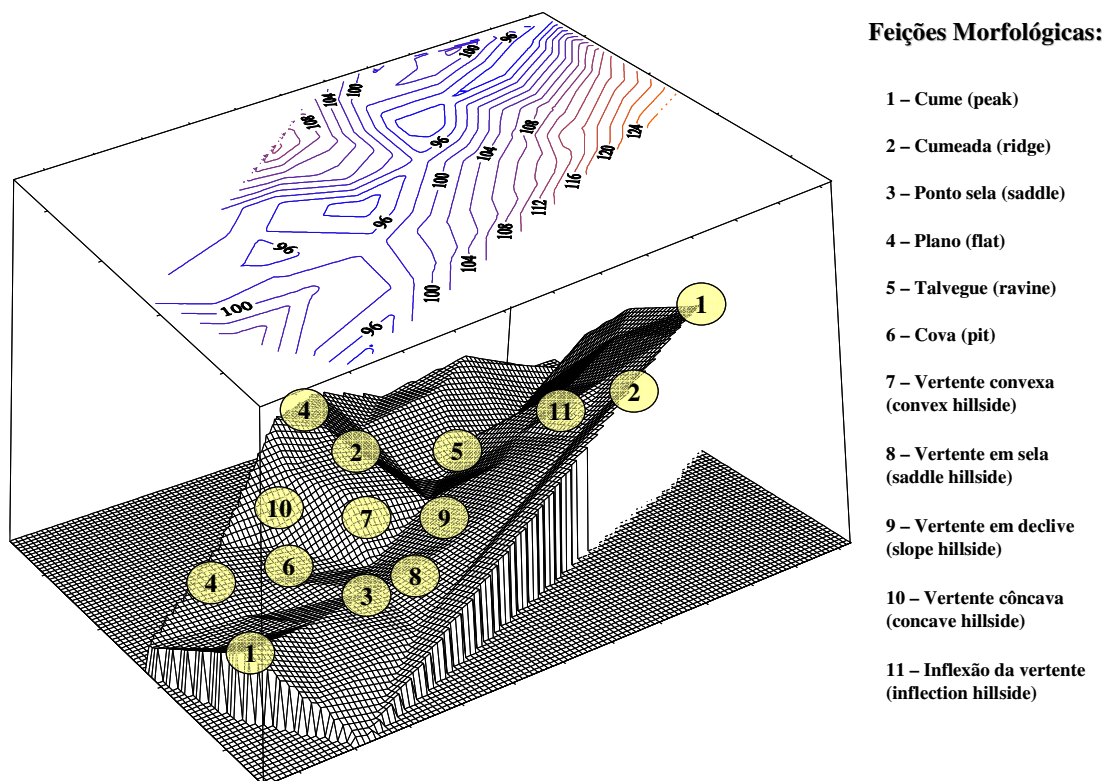
Enfim, com o uso da rotina *toposhape*, as 11 feições morfológicas (Tabela 3.8) puderam ser extraídas (Figuras 3.11 e 3.12). Esta carta foi utilizada no método heurístico para determinação das unidades morfológicas.

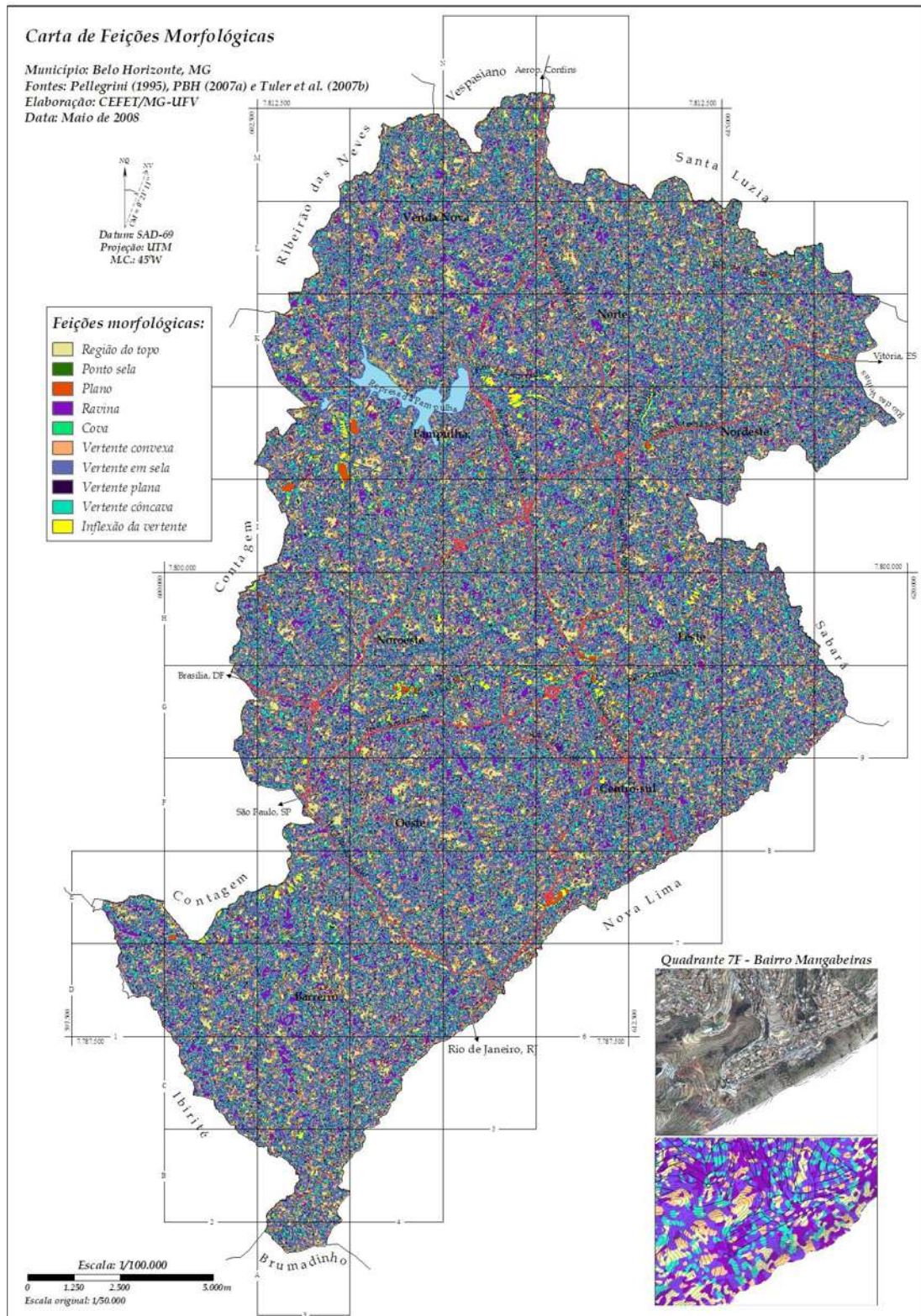


Tabela 3.8 – Feições morfológicas, segundo Pellegrini (1995).

Feição	Definição
1 – Cume, topo ( <i>peak</i> )	Local que é mais alto em elevação que as células circunvizinhas.
2 – Região da cumeada ou cumeeira ( <i>ridge</i> )	Conjunto de células que ocorrem quando as células são mais altas que as células circunvizinhas e por onde se tem a linha de cumeada.
3 – Ponto sela ( <i>saddle</i> )	Ponto de interseção da cumeeira e talvegue, também denominado de garganta.
4 – Plano, planície ( <i>flat</i> )	Superfície sem declividade.
5 – Ravina ( <i>ravine</i> )	Região do talvegue, ou seja, conjunto de células do MDT que ocorrem quando as células são mais baixas que as células circunvizinhas, sendo uma depressão longa e profunda e por onde se tem a linha de talvegue. Pode-se também ser caracterizado como região plano-côncavo.
6 – Cova, sumidouro ( <i>pit</i> )	Local que é mais baixo que as células circunvizinhas.
7 – Vertente convexa ( <i>convex hillside</i> )	Local em que a vertente é convexa.
8 – Vertente em sela ( <i>saddle hillside</i> )	Vertente que tem curvatura positiva em uma direção e negativa em sua ortogonal.
9 – Vertente em declive ( <i>slope hillside</i> )	Local em que a vertente tem declive constante (ou plano-inclinada).
10 – Vertente côncava ( <i>concave hillside</i> )	Local em que a vertente é côncava.
11 – Inflexão da vertente ( <i>inflection hillside</i> )	Local em que ocorre mudança de inflexão entre o côncavo e o convexo.

Fonte: Adaptado de Pellegrini (1995).

Figura 3.11 – Feições morfológicas extraídas pela rotina *topshape*.



### 3.1.2 – ATRIBUTOS MODIFICADOR E DEFLAGRADOR

Considerando a diversidade de atributos modificadores e deflagradores aos movimentos de massa gravitacionais, optou-se nesse trabalho em discutir, para a escala de 1:50.000, os seguintes fatores:

**a) O agente modificador, de natureza tecnogênica**

Representada pela intervenção antrópica sobre o meio ambiente, traduzida pelo padrão de ocupação do espaço urbano e ao tipo de uso.

**b) O agente deflagrador, de origem natural (da pluviosidade)**

Representado exclusivamente pelas chuvas extremas da região, relativo a sua distribuição espacial e temporal.

Esclarece-se que para as escalas propostas de modelagem, não se avaliaram atividades localizadas de degradação das encostas, como lançamentos de lixo clandestinos, cortes verticalizados, lançamentos de esgotos em talvegues, desmatamentos pontuais, construções irregulares, etc.; sendo inferidas tais ações a partir do uso e padrão de ocupação do local, a ser discutido adiante.

Ainda, procede a discussão à respeito da ocupação e uso do solo possa ser apenas um modificador (majorador ou minimizador), ao invés de se tornar efetivamente um agente deflagrador do evento.

Acredita-se aqui, que se houvesse uma frequente atualização das cartas de incidências espaço-temporais dos movimentos de massa gravitacionais, a relação desse uso e ocupação poderia figurar como agente deflagrador. Em caso contrário (como adotado nesse trabalho), será inferido como agente modificador.

Logo, ao considerá-lo agente modificador, surge outro questionamento: “*Em quanto seria o grau de alteração da probabilidade ao evento ?*” Para tal, mais adiante, aplicou-se uma matriz experimental, adotada por Silva et al. (1995) e atualizada por Tuler (2007b), tratando-se de uma abordagem heurística para o problema.

Quanto ao agente deflagrador, ao longo da revisão bibliográfica, observaram-se as várias possibilidades que podem resultar no crescimento das tensões de cisalhamento e/ou na redução da resistência do material, e ocasionar o acidente, inclusive de intensidades variadas. Para simplificação da modelagem e também, pela carência de dados, optou-se em discutir a interferência da pluviosidade local extrema na revisão bibliográfica (Capítulo 2 – Item 2.3), porém não inferir qualquer matriz que alterasse a modelagem.



### 3.1.2.1 – MODIFICADOR - OCUPAÇÃO E USO DO SOLO

Para construção e aplicação da matriz modificadora do padrão de ocupação (Capítulo 4), foi necessário conhecer a evolução urbana de BH e as atuais zonas estabelecidas pela lei 7166/96 e 8137/00 (PBH, 2007c).

A cidade de BH foi inaugurada em 1897, oito anos após a Proclamação da República, quando, em oposição ao modelo monarquista, se consolidavam novos interesses políticos e econômicos no País. Belo Horizonte chegou ao século XXI com quase 2,4 milhões de habitantes, distribuídos em 331 quilômetros quadrados.

O antigo Arraial do Curral D' El Rey foi escolhido para abrigar a capital que viria a ser a síntese dos novos tempos, marcados pela idéia de modernidade e racionalidade (Figura 3.13). Em mais de um século de história, a cidade é hoje uma das principais metrópoles do País.

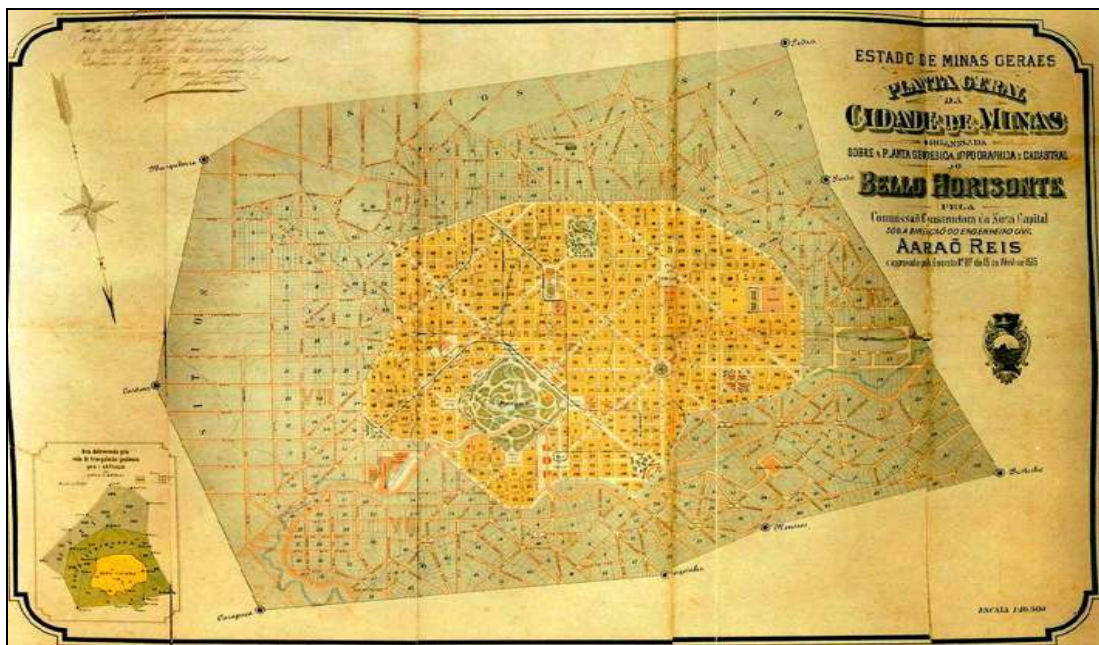


Figura 3.13 – Planta original de Belo Horizonte por Aarão Reis (1897).

Fonte: Adaptado de PBH (2008).

A previsão do projetista e engenheiro Aarão Reis para cidade era de um crescimento centrífugo (Figura 3.13). Porém considerando as exigências contidas na lei à época, bem como o alto preço dos terrenos dentro da avenida do Contorno, levou grande parte da população a ocupar as zonas suburbanas e rural. Assim a expansão se deu ao contrário, ou seja, da periferia para o centro.

Machado (2001) apresenta e discute o processo de formação espacial do município, no período de 1918 a 1995, representando a expansão física da mancha urbanizada por parcelamentos do solo ocupados, instalação de grandes equipamentos urbanos, favelas e outros (Figura 3.14).

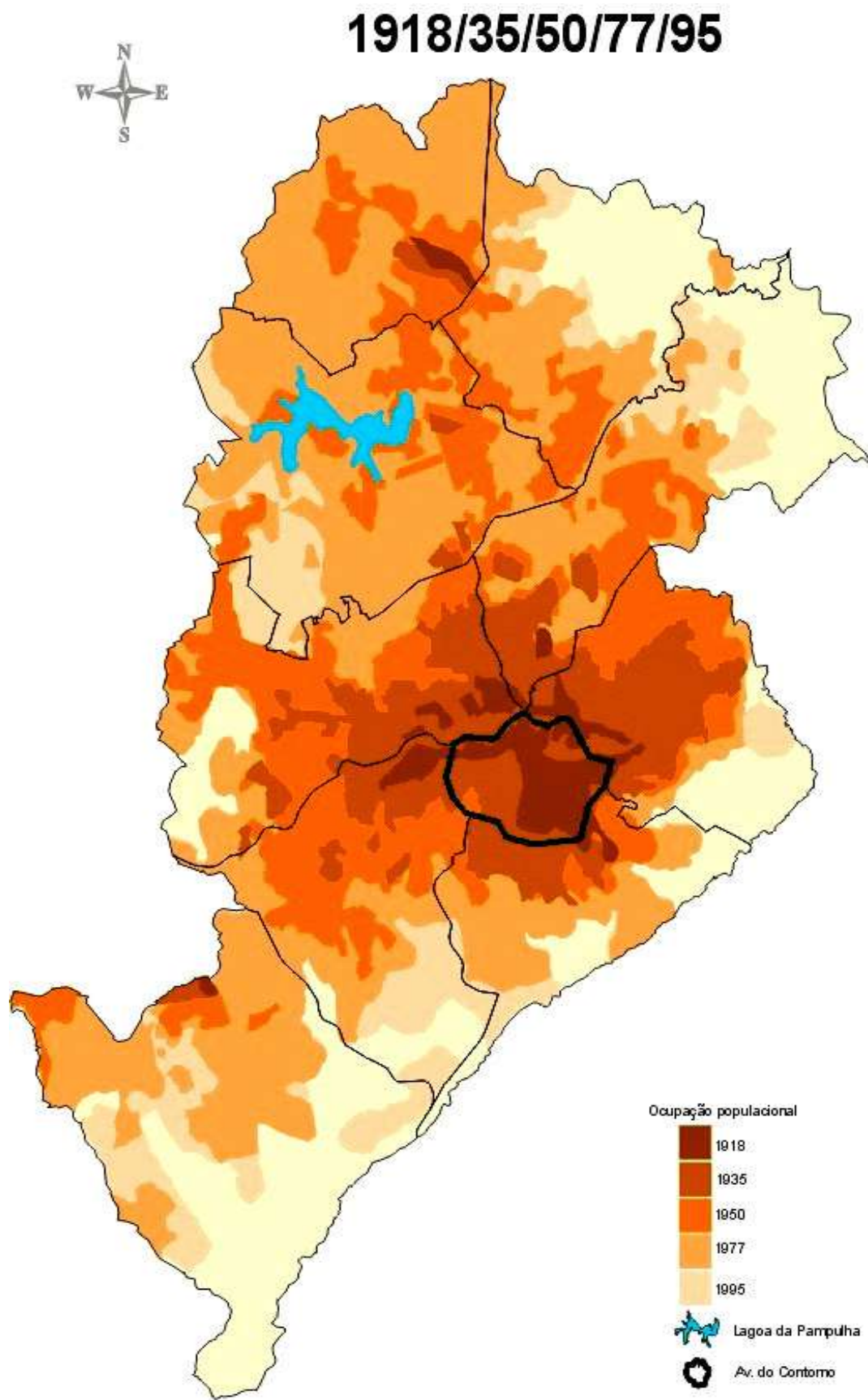


Figura 3.14 – Evolução da mancha urbana de BH.

Fonte: Adaptado de Machado (2001).

Observa-se pela Figura 3.14 que a expansão física da cidade, para fora dos limites originais, iniciou-se já no princípio do século XX. Segundo Machado (2001), a população em 1912 era de, aproximadamente, 40.000 habitantes e 70% dela residia na Zona Suburbana e Colônias Agrícolas, fora da área planejada pela Comissão Construtora como Zona Urbana. Esse número saltou para cerca de 115.000 habitantes em 1935, 690.000 em 1960 e superou 1,7 milhões em 1980, chegando aos aproximadamente 2,4 milhões em 2008.

Na evolução da ocupação urbana, observa-se que entre 1935 e 1950 ocorreu, em média, um maior incremento (13,78% ao ano). A partir desse ano este incremento foi reduzindo, tornando-se insignificante a partir da década de 90.

A redução progressiva da taxa de incremento demográfico associou-se a uma emigração pelas trocas populacionais entre o município de Belo Horizonte e os municípios da região metropolitana, refletindo a partir dos anos 90, um amplo processo de desconcentração demográfica já iniciado na década anterior.

Apesar dos pequenos incrementos atuais da densidade demográfica no município de Belo Horizonte, e com conseqüente expansão da região metropolitana, ocorrem ainda os desvios de conduta de uso e ocupação do solo da capital.

Ainda, observando a Figura 3.14, e relacionando-a com o zoneamento hipsométrico (Figura 3.7), a ocupação do espaço urbano de Belo Horizonte iniciou-se pelo topo e pelas encostas menos íngremes. Atenção se faz à drenagem de áreas alagadiças e a canalização de cursos d'água que permitiram a ocupação dos fundos de vale, na década de 40 a 60 (século passado). Observe ainda, que a ocupação populacional do bairro Conjunto Taquaril deu-se a partir de 1995.

Desta forma, em virtude da natural expansão urbana, as encostas mais declivosas da Serra do Curral, bem como amplas bacias de acumulação da drenagem urbana foram ocupadas. Some-se a isto o fato das ocupações clandestinas e indiscriminadas, acarretando o desordenamento urbano, com o surgimento de favelas.

Este breve histórico não é uma particularidade da capital mineira, mas um “retrato” das metrópoles. Esta ocupação desordenada desencadeia os processos erosivos, os escorregamentos de encostas, com conseqüente assoreamento dos cursos d'água, proporcionando as enchentes e inundações.

O município de BH passou pelos instrumentos urbanísticos da Lei 2262 de 1976, Lei 4034 de 1985, Leis 7165 e 7166 de 1996 e Lei 8137 de 2000 (as três últimas em vigor) (Fabiano, 2005).

A lei 7166/96, atualizada pela Lei 8137/00, estabelece normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo urbano no município de BH, constituindo um pacto da sociedade belo-horizontina visando a garantia da função social da propriedade urbana e da cidade.

Esta legislação contempla aspectos de avaliação relativos ao meio físico tais como geologia, características geotécnicas dos terrenos e questões relacionadas ao risco geológico (Fabiano, 2005; PBH, 2007c).

No Artigo 5º da referida lei, diferenciam-se as zonas segundo os potenciais de adensamento e as demandas de preservação e proteção ambiental, histórica, cultural, arqueológica ou paisagística, apresentadas na Tabela 3.9 e Figura 3.15 (PBH, 2007c).

A carta apresentada na Figura 3.15, se aproxima muito à situação real da ocupação e uso do solo, em 2008, sendo que este mapeamento foi atualizado no ano 2000 (PBH, 2007c). Desta forma, em razão da dinamicidade do problema tratado nesse trabalho, considerou-se que a carta de zoneamento do solo fornecida pela PBH seria o documento cartográfico mais fidedigno para a análise e construção da carta de susceptibilidade modificada.

Fabiano (2005) afirma que apesar da busca em disciplinar a cidade, através de regras ao uso e ocupação, deve-se preocupar com a coexistência no espaço urbano, delimitando o alcance das proposições do processo de planejamento urbano, as temporalidades do capital financeiro, do capital imobiliário, do Estado e do cotidiano.

Observa-se pela Tabela 3.9, que as zonas foram estabelecidas em lei. Apesar da legislação, a ocupação pode divergir do estabelecido, cabendo à prefeitura uma fiscalização constante e eficiente para evitar invasões e uso inapropriado.

Logo, trata-se de uma preocupação pública constante pela fiscalização do uso do solo, principalmente relativo às invasões e ocupações irregulares na ZPAM's (Zonas de Preservação Ambiental) e ZP1's, ZP2's e ZP3's (Zonas de Proteção), em que de alguma forma poderiam majorar os riscos geológicos em tais áreas, e ocasionar os acidentes.

Tabela 3.9 – Zonas estabelecidas segundo as Leis 7166/96 e 8137/00.

Zonas	Siglas	Caracterização
Zona de Preservação Ambiental	ZPAM	Destinam-se à preservação e à recuperação de ecossistemas.
Zona de Proteção	ZP1	Regiões, predominantemente desocupadas, de proteção ambiental e preservação do patrimônio histórico, cultural, arqueológico ou paisagístico ou em que haja risco geológico, nas quais a ocupação é permitida mediante condições especiais.
	ZP2	Regiões, predominantemente ocupadas, de proteção ambiental, histórica, cultural, arqueológica ou paisagística ou em que existam condições topográficas ou geológicas desfavoráveis, onde devem ser mantidos baixos índices de densidade demográfica.
	ZP3	Regiões em processo de ocupação, que será controlado visando à proteção ambiental e preservação paisagística.
Zona de Adensamento Restrito	ZAR1	Regiões com articulação viária precária ou saturada, em que se faz necessário manter baixa densidade demográfica.
	ZAR2	Regiões em que as condições de infra-estrutura e as topográficas ou de articulação viária exigem a restrição da ocupação.
Zona de Adensamento Preferencial	ZAP	Regiões passíveis de adensamento, em decorrência de condições favoráveis de infra-estrutura e de topografia.
Zona Central	ZHIP	Zona Hipercentral.
	ZCBH	Zona Central de Belo Horizonte.
	ZCBA	Zona Central do Barreiro.
	ZCVN	Zona Central de Venda Nova.
Zona Adensada	ZA	Regiões nas quais o adensamento deve ser contido, por apresentarem alta densidade demográfica e intensa utilização da infra-estrutura urbana, de que resultam, sobretudo, problemas de fluidez do tráfego, principalmente nos corredores viários.
Zona de Especial Interesse Social	ZEIS1	Regiões ocupadas desordenadamente por população de baixa renda, nas quais existe interesse público em promover programas habitacionais de urbanização e regularização fundiária, urbanística e jurídica, visando à promoção da melhoria da qualidade de vida de seus habitantes e a sua integração à malha urbana.
	ZEIS2	Regiões não edificadas, subutilizadas ou não utilizadas, nas quais há interesse público em promover programas habitacionais de produção de moradias, ou terrenos urbanizados de interesse social.
	ZEIS3	Regiões edificadas em que o Executivo tenha implantado conjuntos habitacionais de interesse social.
Zona de Grandes Equipamentos	ZE	Regiões ocupadas por grandes equipamentos de interesse municipal ou a eles destinadas.

Fonte: Adaptado das Leis 7166/96 e 8137/00 (PBH, 2007c).



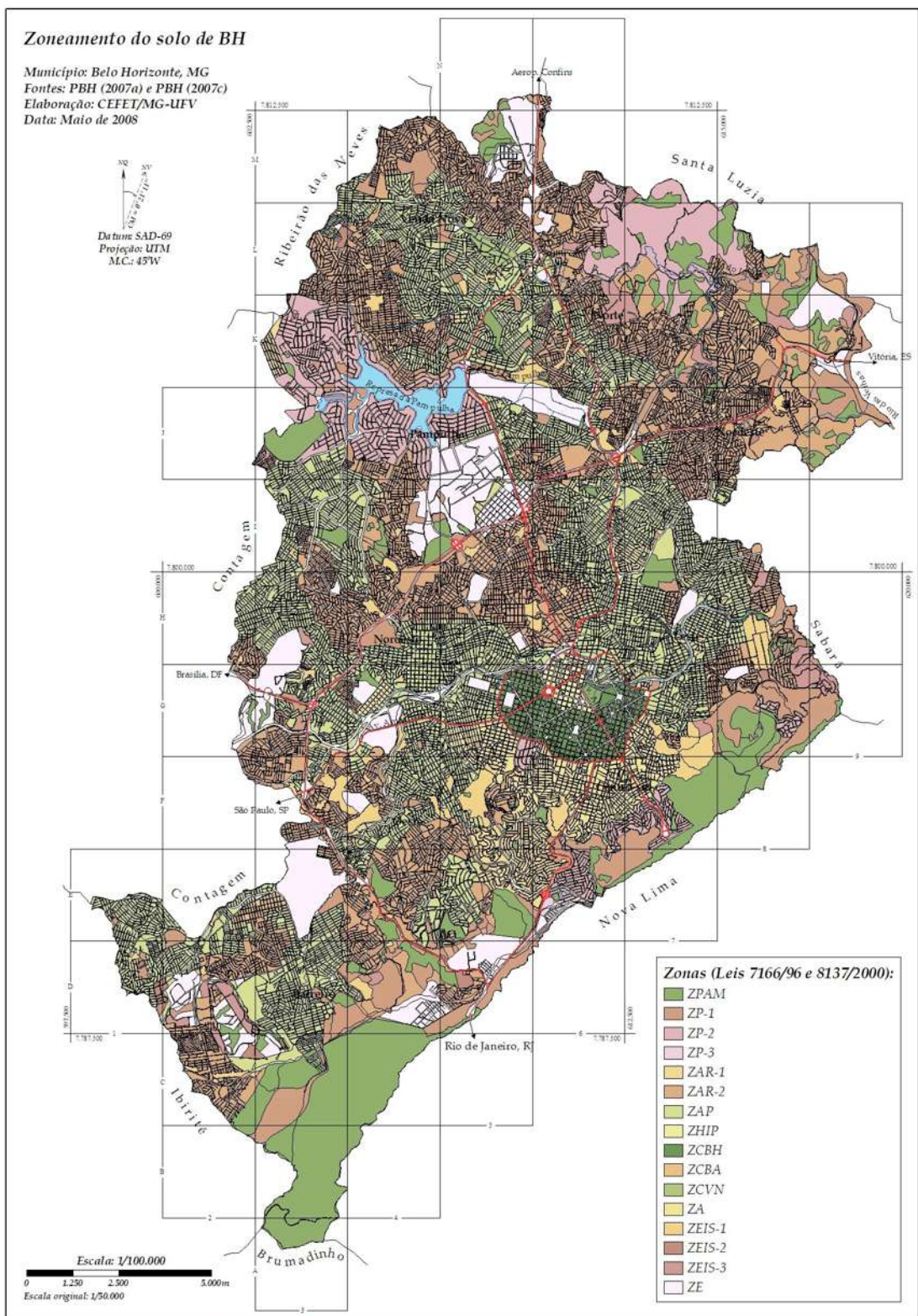


Figura 3.15 – Carta do zoneamento do solo de BH, segundo Leis 7166/96 e 8137/2000.

Enfim, mesmo considerando uma legislação consistente e uma fiscalização eficiente, dois interesses dos agentes hegemônicos se sobressaem frente a suas motivações: de um lado a ocupação do ambiente urbano, cada vez mais especializado para realização do trabalho; de outro lado motivação da conversão do recurso terra em lucro pelo capital, através da obtenção da renda sobre a posse da terra, pela divisão de terras, parcelamentos de solo ou verticalização das edificações.

As consequências deste assincronismo são claramente desastrosas para o meio ambiente e a população de baixa renda. Exemplificando este fato, seja a formação de favelas já no início do século passado, em virtude da imprevisão de um lugar para alojar os trabalhadores que vieram construir a capital.

Segundo Viana (2000), em 1902, iniciou-se uma política de remanejamento dessa população para áreas mais periféricas, processo que se completou apenas nos anos 30 quando a última favela, a Barroca, é removida para fora da Av. do Contorno.

Segundo Machado (2001), a “*favelização*” do espaço urbano em BH expandiu-se na década de 80, na construção de conjuntos populares em condições de infraestrutura extremamente precárias. Esta ocupação deu-se por um processo de invasão nas áreas vazias residuais, exemplificando para regiões do Conjunto Taquaril, Jardim Felicidade, Ribeiro de Abreu e Capitão Eduardo, dentre outros.

Geralmente estes assentamentos se encontram em locais não destinados ou não adequados à habitação, como áreas verdes, ribeirinhas e com predisposição ao risco geológico. O mais grave é que, às vezes, em virtude da forma como se dá a ocupação, transforma até mesmo locais adequados em áreas de risco.

Segundo Fabiano (2005), na última década não surgiram novas favelas, porém ocorreu o crescimento e consolidação das existentes. Destacam-se neste contexto os grandes aglomerados da Serra, Barragem Santa Lúcia e Morro das Pedras, no território das Regionais Centro-Sul e Oeste; Ribeiro de Abreu, na Regional Nordeste, e Taquaril e Conjunto Taquaril, na Regional Leste.

Buscando a comprovação das afirmativas da exclusão, pelos terrenos efetivamente loteáveis, fez-se a relação das áreas do município, de favelas e a declividade local, com base nas classes de declividades adotadas pela PBH (PBH, 2007b) (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 – Classes de declividades nas Vilas e Favelas de BH.

Declividade (% e graus)			% (da área)	Área (km <sup>2</sup> )
%	Graus	Classe		
0 – 5	0 – 2,9	Muito Baixa	7,3	1,1
5 – 10	2,9 – 5,7	Baixa	15,0	2,3
10 – 20	5,7 – 11,3	Média	31,0	4,8
20 – 30	11,3 – 16,7	Média a alta	21,6	3,3
30 – 47	16,7 – 25,2	Alta	20,3	3,1
> 47	> 25,2	Muito Alta	4,8	0,7
<b>Totais</b>			<b>100%</b>	<b>15,5</b>

Observa-se pela Tabela 3.10 e Figura 3.16, em comparação com a Tabela 3.7, que 53% das áreas de Vilas e Favelas estão localizadas em declividades inferiores a 20%, enquanto 73% da área municipal se encontram nessa mesma situação.

O importante a destacar são as localidades com classes de declividades mais elevadas (>30%), mostrando que aproximadamente 25% das moradias em Vilas e Favelas estão nesta situação (Figura 3.17).

Esta análise reforça a discussão do capítulo anterior da exclusão dos terrenos urbanos à população de baixa renda e conseqüente aumento da susceptibilidade aos movimentos de massa nestas localidades.

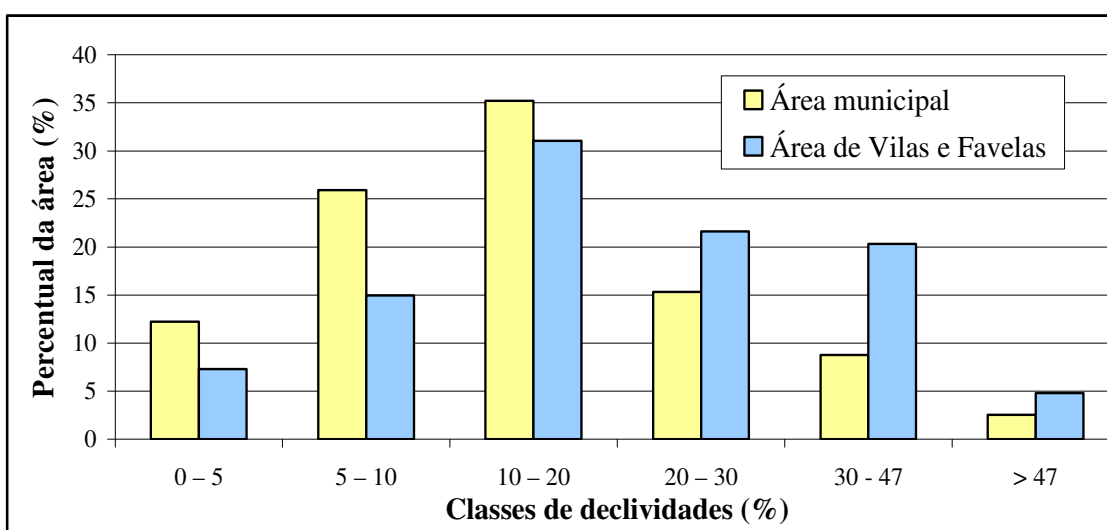


Figura 3.16 – Classes de declividades na área municipal versus Vilas e Favelas.

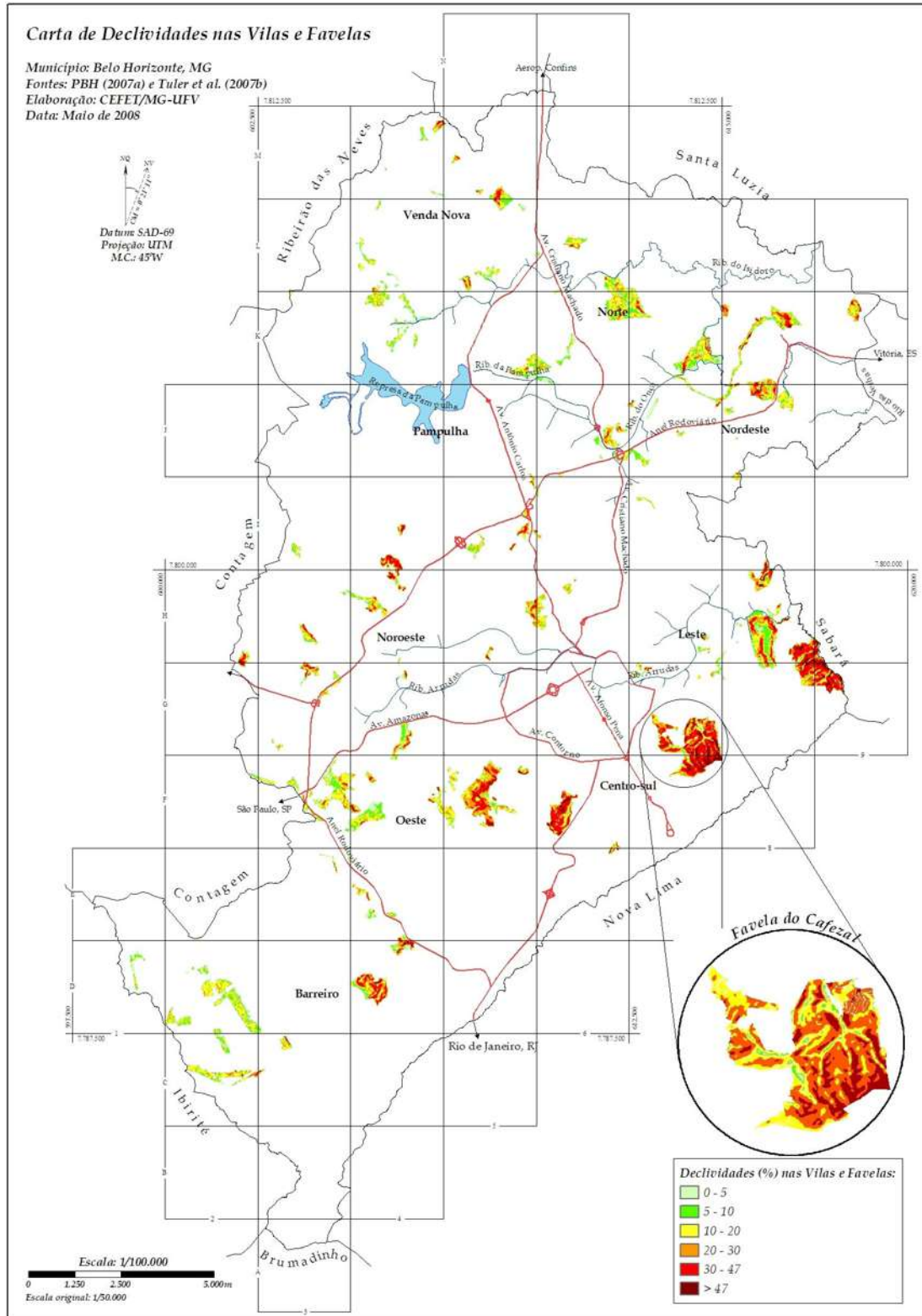


Figura 3.17 - Carta de Declividades apenas nas Vilas e Favelas de BH.

### 3.2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO DE CASO

A utilização do modelo *SHALSTAB* para todo o município de Belo Horizonte não traria resultados acurados de zoneamento das susceptibilidades e dos limites da instabilidade aos movimentos de massa gravitacionais, em função de:

- a) Carência de banco de dados para todo o município, especificamente de parâmetros geotécnicos locais (peso específico do solo natural, ângulo de atrito das partículas, coesão e permeabilidade) e dados meteorológicos (pluviosidade), necessários ao modelo; e
- b) O modelo *SHALSTAB* visa a definição dos locais do relevo mais susceptíveis, atingindo à estabilidade/instabilidade, específica para escorregamentos translacionais rasos de solo.

Na busca de um local para aplicar o modelo, investigou-se dentro do território municipal uma localidade que atendesse as prerrogativas acima. O referencial inicial para a escolha dos possíveis locais foi a carta de zoneamento de susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais (Figura 5.3), construída a partir da metodologia heurística (Item 4.1).

Desta forma, a área eleita localiza-se no bairro Conjunto Taquaril, entre os bairros Taquaril, Alto Vera Cruz, Granja de Freitas e Castanheiras, no extremo da região Leste de BH, divisa com o município de Sabará (Figuras 1.2 e 1.3).

O bairro Conjunto Taquaril é um dos mais populosos aglomerados de Belo Horizonte, com população estimada em mais de 40 mil moradores, adensados em área de aproximadamente 150 ha (PBH, 2008).

Desde a sua ocupação em 1987, esta área não se mostrou apropriada à consolidação urbana, o que foi ratificado em 1992, pela câmara municipal, que a considerou como área imprópria ao estabelecimento de moradias, e reafirmado através da publicação do plano diretor em 1995, como uma área prioritária para um processo de intervenção através de políticas de infraestrutura à ocupação.

Como observado na Figura 1.3, o Conjunto Taquaril está assentado numa área inadequada a loteamentos populares devido às suas características geológicas desfavoráveis e por se tratar de encostas de relevo acentuado com declividades muitas vezes superiores a 47%. Observa-se ainda, pela Figura 1.3, a ocorrência de ocupação desordenada, cortes inapropriados e o traçado íngremes das vias.



Observa-se uma conformação urbana diferenciada no bairro, onde a ocupação recente (mais ao sul e leste) é típica de invasão. Nestas áreas, percebe-se que não houve controle da ocupação, ocorrendo desmatamento e ocupação de talvegues.

Na parte mais ao norte e oeste do bairro já se observa certa regulação urbana, em função da mesma ter sido objeto de planejamento elaborado desde 1987, segundo a PBH (2007b).

Segundo característica observada em algumas visitas ao local, e também descrita por Parizzi (2004), trata-se do sistema construtivo adotado nas encostas íngremes do bairro. Ao construírem suas casas, os moradores executam cortes verticalizados e lançam o solo descartado (e lixo) encosta abaixo, criando depósitos inconsistentes.

Moradores à jusante repetem o procedimento descrito anteriormente, criando vários destes depósitos inconsolidados nas encostas. Junta-se a este fato, a inexistência de fundação projetada, e conseqüentemente, aumentando o risco de escorregamentos nestes locais (Figuras 3.18 e 3.19).

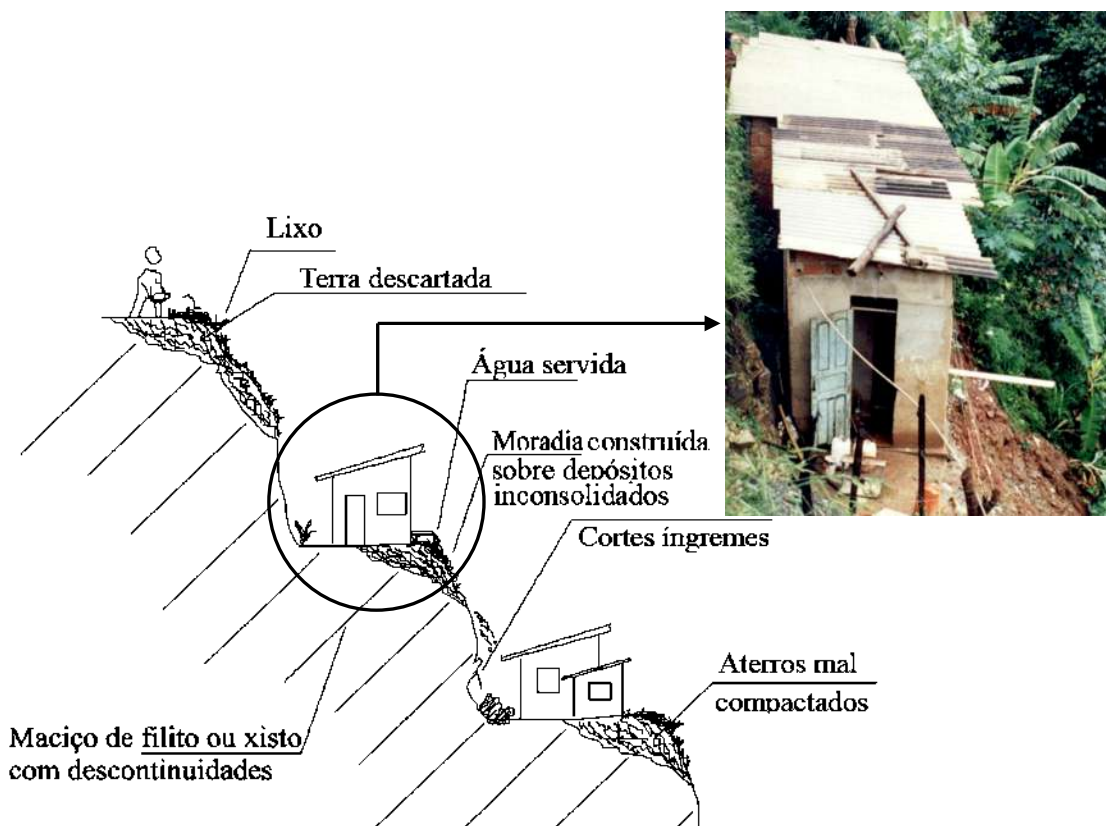


Figura 3.18 – Característica da forma de uso e ocupação de algumas encostas do bairro Conjunto Taquaril.

Fonte: Adaptado de Campos (2004) e Parizzi (2004).



Figura 3.19 – Lançamento frequente de lixo e de solo descartado nas encostas, ocasionado o escorregamento destes materiais inconsolidados.

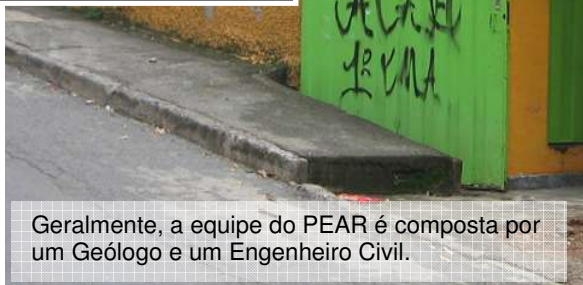
Fonte: Arquivo pessoal (2009).

Segundo a URBEL (PBH, 2007b), dentre as favelas consideradas com áreas de risco, o bairro Conjunto Taquaril se apresenta com o maior número de ocorrências de escorregamentos (Figura 2.3). Parizzi et al. (2002) reafirmam que em períodos de chuva, mais de 60% da área se enquadram na categorias de risco alto a eminente.

Campos (2004) apresenta um estudo de ocorrências, para um período de aproximadamente um ano de registros para o ano de 2003. Este foi baseado em

vistorias realizadas por técnicos do PEAR (Figura 3.20) para o município de Belo Horizonte. Observou-se que cerca de 23% destas ocorrências se localizavam no bairro Conjunto Taquaril. Ainda, verificou-se que para tal período, o número de ocorrências de escorregamento de aterros era superior ao de solo.

Programa Estrutural em Áreas de Risco - PEAR	
Ficha de vistoria - CÔRPA	
Identificação	
Data: / /	
Município: <b>Ficha de vistoria</b>	
Município/Centro	
Nome: / /	Número: / /
Mãe: / /	CPF: / / /
Contato	
Endereço da vistoria	
Código: / / /	Nome: / / /
Bairro: / / /	CEP: / / /
Regional: / / /	
Total de moradores: / / /	
Caracterização local	
Matricial: <input type="checkbox"/> Estrada <input type="checkbox"/> Prática atrelada <input type="checkbox"/> Área apilhada <input type="checkbox"/> Fundo de vale <input type="checkbox"/> Área totalmente ocupada	
Talude: <input type="checkbox"/> De córrego <input type="checkbox"/> Natural <input type="checkbox"/> De aterro <input type="checkbox"/> De corte	
Montante: Altura: m Ataque base: m Inclinação: °	
Plano: Altura: m Ataque base: m Inclinação: °	
Hidrologia: Grau de alteração: Vegetação: Estrutura: / / /	
Características físicas de utilização	
Tipologia: <input type="checkbox"/> Laje <input type="checkbox"/> Insulato <input type="checkbox"/> Lona <input type="checkbox"/> Pedreira <input type="checkbox"/> Madeira	
Estrutura: Tipo de fundação: Pavingamento: / / /	
Esgoto: Água: Drenagem: / / /	
Previsão a processo geodínâmico	
<input type="checkbox"/> Rolamento <input type="checkbox"/> Inundação <input type="checkbox"/> Escorregamento em curva	
<input type="checkbox"/> Rolamento/tombamento/queda de blocos <input type="checkbox"/> Escorregamento planar <input type="checkbox"/> Escorregamento circular	
<input type="checkbox"/> Escorço <input type="checkbox"/> Não se aplica	
Indicativos de processos geodínâmicos/potencializadores	
<input type="checkbox"/> Trinca morada <input type="checkbox"/> Trinca terreno <input type="checkbox"/> Degradação de aterro	
<input type="checkbox"/> Causas escorregamento <input type="checkbox"/> Estrutura deformada <input type="checkbox"/> Fendas e fissuras	
<input type="checkbox"/> Vazamento/supluras redes (infiltrações) <input type="checkbox"/> Concentração de água pluvial <input type="checkbox"/> Lançamento água/legado	
<input type="checkbox"/> Engenharia <input type="checkbox"/> Fossas <input type="checkbox"/> Livramento	
<input type="checkbox"/> Barreira	
Nível de susceptibilidade do processo geodínâmico	
<input type="checkbox"/> Alto <input type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Baixo <input type="checkbox"/> Sem processo de fragilização	
Características atuais	
Data: / /	Material: / / /
Volume estimado: m <sup>3</sup>	
<input type="checkbox"/> Arranjo parcial <input type="checkbox"/> Perda parcial <input type="checkbox"/> Perda total <input type="checkbox"/> Não atingido: Altura inundação: m	
Prejuízo	
<input type="checkbox"/> Remoção temporária sem obra <input type="checkbox"/> Remoção temporária com obra <input type="checkbox"/> Remoção definitiva	
<input type="checkbox"/> Monitoramento pelo morador <input type="checkbox"/> Força critérios - Madeira/lona <input type="checkbox"/> Força critérios - Aluguel	
<input type="checkbox"/> Força critérios - Favor <input type="checkbox"/> Força critérios - Invasão <input type="checkbox"/> Força critérios - Tempo <input type="checkbox"/> Força critérios - Risco constr.	
<input type="checkbox"/> Força critérios - Obra de grande porte <input type="checkbox"/> Força critérios - Melhoria habitacional <input type="checkbox"/> Força critérios - Risco constr.	
<input type="checkbox"/> Sem processo de fragilização <input type="checkbox"/> Indicação de obra <input type="checkbox"/> Força critérios - Cidade formal	
Prevenção	
<input type="checkbox"/> Não se aplicar edificação <input type="checkbox"/> Monitoramento pelo morador	
<input type="checkbox"/> Remoção de esgoto <input type="checkbox"/> Solicitar nova vistoria se modificar quadro	
<input type="checkbox"/> Intervenção do morador <input type="checkbox"/> Inversão de cimento	
<input type="checkbox"/> Cortes de lona <input type="checkbox"/> Remoção de ban aneira	
<input type="checkbox"/> Não permanecer em caso de chuvas <input type="checkbox"/> Isolamento obsoleto	
Considerações finais	
<input type="checkbox"/> Vistoria concluída <input type="checkbox"/> Motivo: / / /	
Ficha de vistoria	
Assinatura: / / /	Responsáveis técnicos: / / /
Equipe complementar: / / /	
Data de vistoria: / / /	



Geralmente, a equipe do PEAR é composta por um Geólogo e um Engenheiro Civil.



Figura 3.20 – Ficha de vistoria, sede do CREAR – Taquaril e técnicos da PBH.

Fonte: Arquivo pessoal (2009).

Para ratificação desta área como estudo de caso, além da análise da carta de zoneamento de susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais (Figura 5.3), um trabalho foi a atualização e o georreferenciamento de um banco de dados de ocorrências, pertencente à URBEL-PBH. Para tal, adquiriu-se junto à URBEL os registros digitalizados, para toda a capital, dos anos de 2006, 2007 e 2008.

Os dados em questão, caracterizam a situação de risco geológico-geotécnico, em que avaliam a casa e o entorno, material e volume mobilizado (aproximado), tipo de processo envolvido e outros; coletados através de ficha de vistoria, conforme



apresentada na Figura 2.17b. Observou-se pela leitura dos dados, uma maior demanda de vistorias nos períodos chuvosos (novembro a fevereiro).

Entre alguns problemas detectados no banco de dados, citam-se:

- falta de registros (digitais) de anos anteriores a 2006;
- falta de georeferenciamento das vistorias;
- alguns erros de preenchimento como: ausência de caracterização da litologia, inconsistências de avaliação do processo geodinâmico, endereço incompleto, dentre outros.

Conforme discutido em Chancón et al. (2006), o mapa de inventário de movimentos de massa gravitacionais auxilia num programa de mitigação de riscos, e fornece a distribuição espacial dos movimentos de massa. No Item 2.4.a, foram citadas várias metodologias de construção da carta de inventários e do seu uso.

Apesar destas inconsistências verificadas (cerca de 5% dos dados), foi possível o georeferenciamento destas ocorrências, apresentadas pela Figura 3.21.

Entre as vantagens dos dados estarem georeferenciados, citam-se:

- Armazenamento, busca e edição automatizados;
- Possibilidades de “pesquisa por atributos” (Figura 3.21), para:
  - a) Aplicação de medidas corretivas de processos mais recorrentes, por localidade;
  - b) Conhecer os fatores que causaram a instabilidade desse local, podendo talvez ser possível prever que ali poderão ocorrer futuros escorregamentos;
  - c) Extrair frequências e intensidades das ocorrências, por localidade; e
  - d) Possibilitar estudos avançados de correlação, por exemplo, com a intensidade e frequência das chuvas e as datas das ocorrências; dentre outras aplicações.

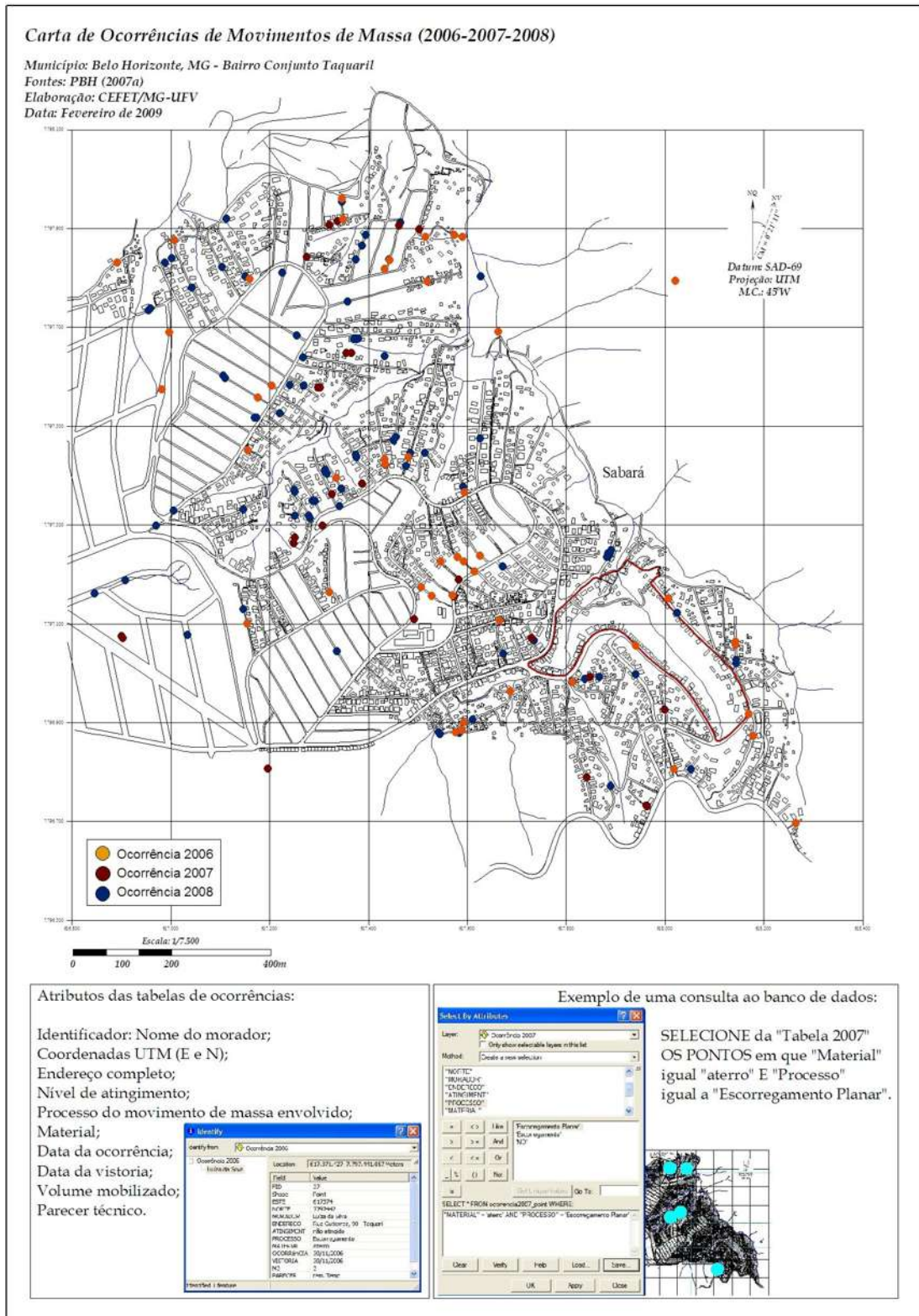


Figura 3.21 - Carta de inventários de ocorrências - 2006, 2007 e 2008.

Na Figura 3.22, tem-se a carta do bairro, apresentando o zoneamento hipsométrico (obtida a partir de modelagem digital de terrenos pela técnica de consistência com a hidrografia), curvas de nível (EV = 5m), sistema viário, hidrografia e edificações existentes. Apresenta-se também a área em que foi utilizada para o estudo de caso.

Na Figura 3.23, apresenta-se a carta de declividades obtida a partir do MDT. Observa-se a alta frequência de declividades maiores que 30% (cerca de 65% da área total do bairro).

Na Figura 3.24, apresenta-se a carta geológica do bairro, construída por Campos (2004). O bairro Conjunto Taquaril está inserido na porção norte do Quadrilátero Ferrífero, onde afloram rochas das Sequências Metassedimentares, mais precisamente, filitos, xistos e metagrauvas do Grupo Sabará, em avançado estado de alteração.

Além das unidades do Grupo Sabará, destacam-se depósitos recentes, inclusive tecnogênicos, diferenciados por sua origem, granulometria e estado de consolidação.

Conforme observado por Xavier (1994), a formação Sabará é resultante do dobramento da Serra do Curral e apresenta cristas alongadas e morros de declividades acentuadas.

Dessa forma, o entalhe do relevo é vigoroso, devido à altitude representativa da área, entre 795 e 1040 m, à pré-disponibilidade litológica e ao clima. Os vales são muito encaixados, em especial junto às cabeceiras, e se alargam próximo à jusante (Figuras 3.22, 3.23 e 3.24).

Destacado por Parizzi (2004), cita-se que as condições locais proporcionam solos rasos (e por vezes inexistentes), e seu substrato é constituído por filito fino intercalado com grauvas do Grupo Sabará, podendo ser classificado como saprolito.

Ainda, quando ocorrem afloramentos, a rocha apresenta foliação penetrativa, preservando esta estrutura, mesmo quando decomposta. Quando fresca, mostra-se muito resistente, porém, quando muito alterada e exposta, se desloca tão facilmente que chega a apresentar comportamento pulverulento (Figura 3.24).

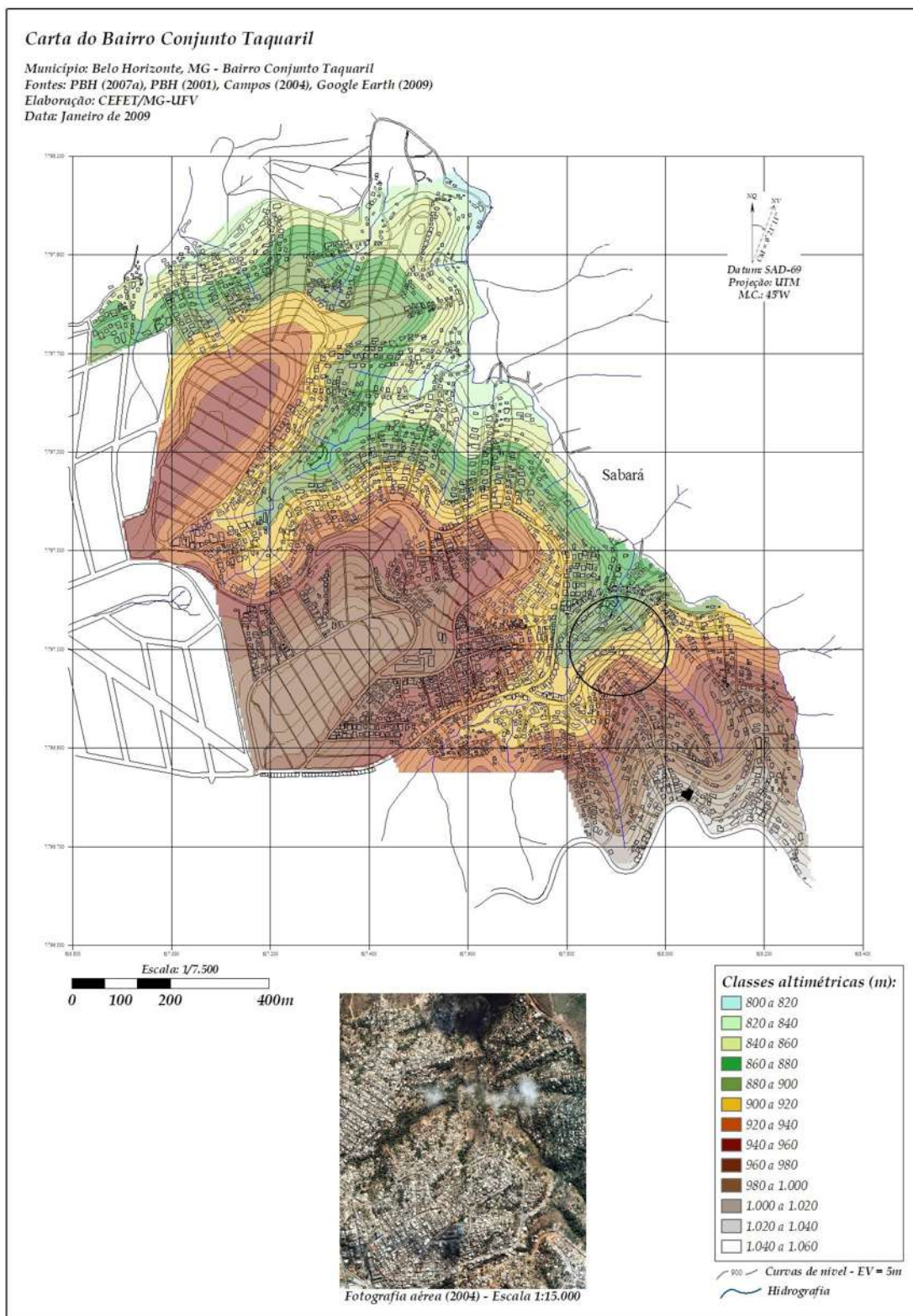


Figura 3.22 - Planta topográfica, hidrografia e edificações do bairro Conjunto Taquaril.



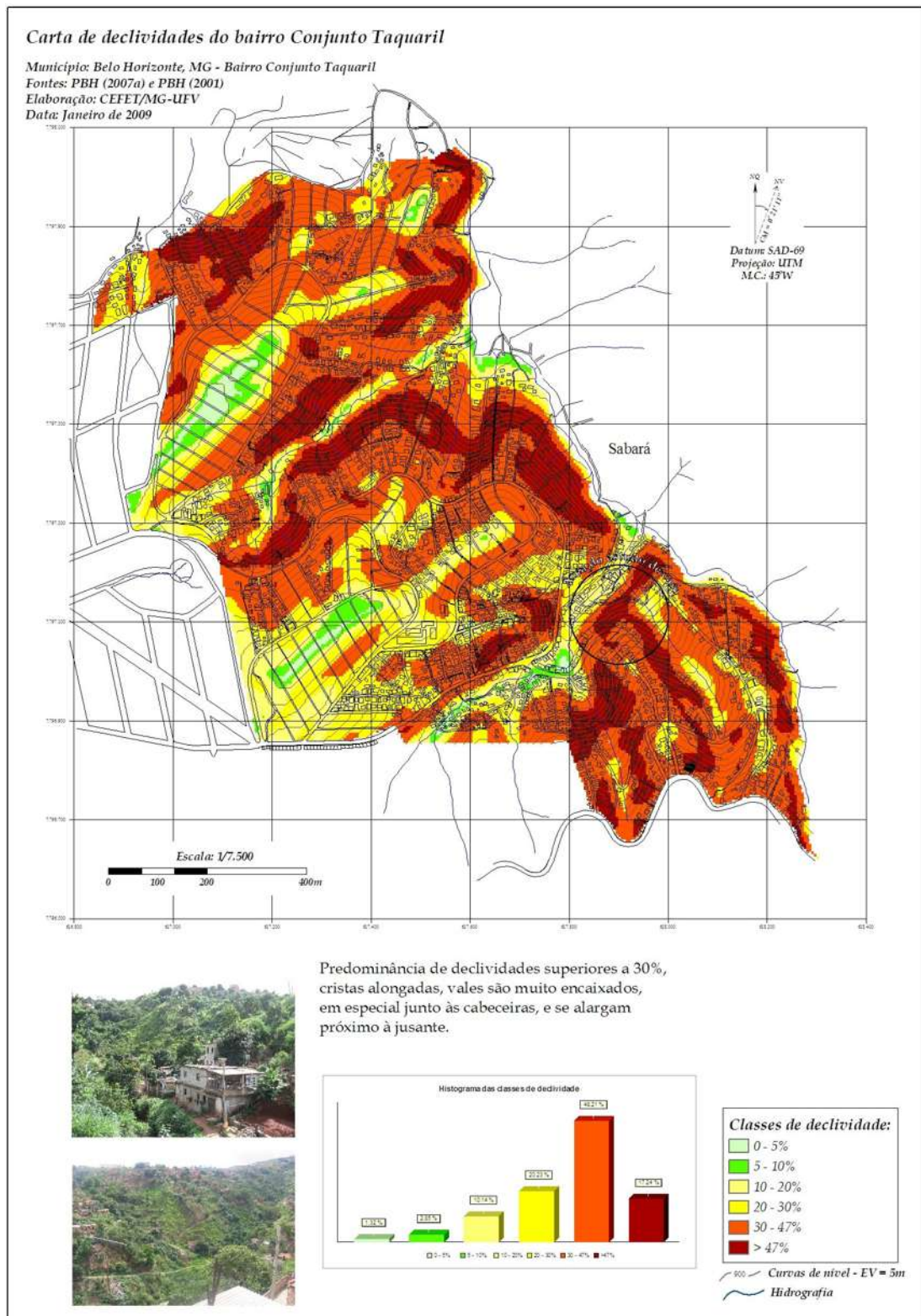


Figura 3.23 - Carta de declividades do bairro Conjunto Taquaril.

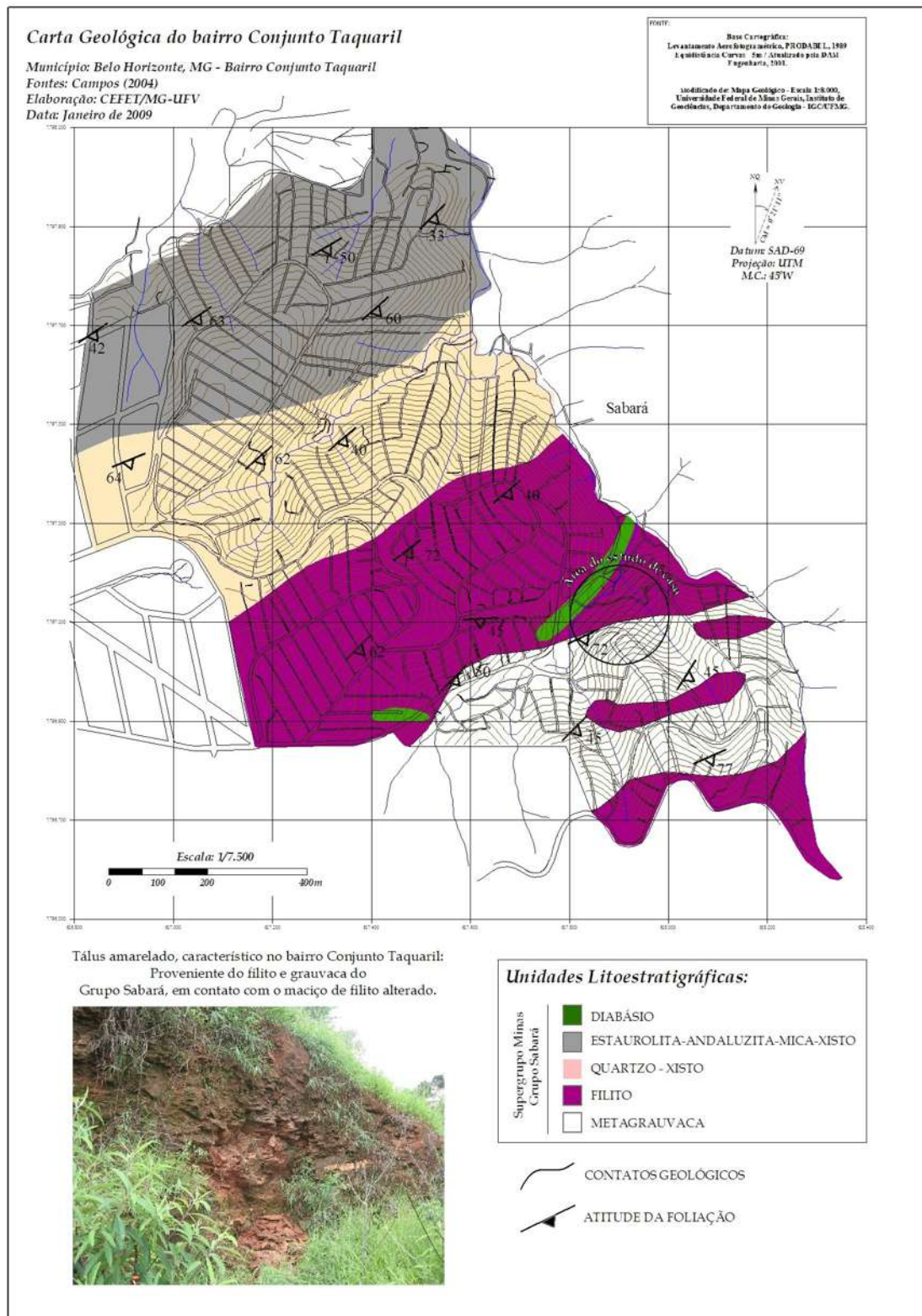


Figura 3.24 - Carta geológica do bairro Conjunto Taquaril.

Entre outros, três trabalhos relativos a movimentos de massa nesta área se destacam, e foram importantes para embasar o estudo de caso pelo modelo *SHALSTAB*, validando em parte, os resultados apresentados no Capítulo 5. Tratam-se de Xavier (1996), Campos (2004) e Parizzi (2004).

O primeiro (Xavier, 1996), com viés qualitativo para a percepção da população com a convivência com o risco (naquela época, investigando as primeiras ocorrências da localidade); o segundo (Campos, 2004), apresenta como proposta, o mapeamento geotécnico visando o zoneamento do uso e ocupação do bairro; o terceiro (Parizzi, 2004), com foco quantitativo, na obtenção detalhada de parâmetros geotécnicos, que apresentassem os principais predisponentes da instabilidade local.

Em Xavier (1996), destacam-se:

- estudos da percepção geográfica dos escorregamentos pelos moradores dos bairros citados, através de entrevistas;
- histórico da ocupação do local, explicitando o adensamento populacional das partes extremas da área, falta de parcelamento ordenado, traçado das vias inadequado às condições topográficas; e
- as características geológico-geotécnicas que dominam os terrenos locais, e as interações do sistema dos componentes naturais com o sistema das atividades humanas, que ocasionavam os acidentes de escorregamentos.

Finalmente, Xavier (1996) apresenta os resultados de sua pesquisa, avaliando dois aspectos: a avaliação do risco pela população local e a mensuração dos limites de tolerância aos escorregamentos. Ainda, sugeriu ainda à época (1996), um programa de educação ambiental para a população residente em áreas de risco aos escorregamentos de encostas.

Em Campos (2004), descrevem-se aspectos referentes da setorização do bairro, do sistema viário, da tipologia das edificações, do comércio, do abastecimento de água e esgotamento sanitário e da drenagem; bem como também sintetiza o histórico da ocupação deste bairro, e descreve as razões da alta incidência de acidentes relacionados aos movimentos de massa. Ainda em Campos (2004), destacam-se os dados sobre as ocorrências registradas de escorregamentos durante os períodos chuvosos de 2003 e 2004, principalmente sobre a frequência e o tipo de escorregamento. Cita-se ainda a construção da carta geológica e carta de descontinuidades locais.

Em Parizzi (2004), destacam-se:

- também, a citação do padrão de ocupação irregular e as características precárias das tipologias das moradias locais, explicitando a falta de projeto das fundações;

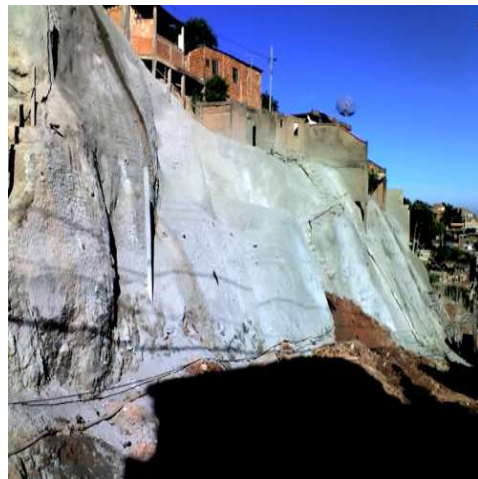


- a atitude dos moradores ao efetuarem cortes verticalizados e descarte de lixo encosta abaixo, propiciando um aumento da susceptibilidade ao escorregamento;
- uma detalhada descrição geológico–getécnica, de uma encosta local (utilizada no estudo de caso);
- a caracterização dos depósitos superficiais, de uma encosta local;
- a classificação do maciço rochoso, de uma encosta local;
- uma análise cinemática e de estabilidade, de uma encosta local (retroanálise); e
- a explicitação (e generalização) dos mecanismos e fatores predisponentes das rupturas dos taludes locais.

Apesar das constatações mostradas na Figura 1.3 (ano 2008) e problemas citados pelos autores acima, dois programas governamentais para mitigação do risco geológico estão em fase de implantação no bairro, a partir de recursos municipais (Programa Vila Viva) e recursos federais (Programa de Aceleração do Crescimento – PAC) (PBH, 2008) (Figura 3.25).



a) Talude anteriormente exposto.



b) Proteção do talude.



c) Diques de contenção, favorecendo a infiltração e drenagem.



Figura 3.25 – Algumas iniciativas governamentais de contenção de taludes no Conjunto Taquaril.

Fonte: Arquivo pessoal (2009).

Como discutido anteriormente e detalhado no Anexo I, para aplicação do modelo *SHALSTAB*, são necessários parâmetros topográficos (MDT) e geotécnicos (peso específico do solo natural, ângulo de atrito das partículas e coesão).

Logo, identificou-se uma encosta que fosse representativa das características morfológicas e geológico-geotécnicas do bairro Conjunto Taquaril, que possuísse a planta topográfica detalhada e um banco de dados geotécnicos.

A área de estudo escolhida é delimitada pelas coordenadas UTM, E = 617.700 m – E = 618.200 m, por N = 7.796.850 m – N = 7.797.250 m, e pode ser observada na Figura 3.26. Este local foi investigado em Parizzi (2004), na busca de condicionantes e mecanismos de ruptura (Figura 3.26).



Figura 3.26 – Foto aérea da região do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril.

Fonte: Adaptado de Google Earth (2009).

### a) Parâmetros Topográficos

A planta topográfica valeu-se de levantamento planialtimétrico, com equidistância vertical de 1 m, na escala de 1:2.000 (Parizzi, 2004; PBH, 2007b). Na carta da Figura 3.27 apresentam-se ainda:

- Sistema viário;
- Hidrografia (Córrego Olaria – Figura 3.27, Foto 3);
- Edificações locais;
- Locais de coleta de amostras de solo para esse trabalho (amostras A1, A2, A3, B1, B2 e B3), alinhadas em dois locais da encosta.
- Locais de coleta de amostras de solo por Parizzi (2004); e
- Registro fotográfico da área.

Na carta da Figura 3.28, apresenta-se o zoneamento hipsométrico, na escala de 1:2.000.

Na Figura 3.29, apresenta-se carta de declividades local, também na escala de 1:2.000.

Para a construção da carta citada acima, utilizou-se do *software* ArcInfo (MDT Hidrologicamente Consistente), e com pixel de 1 m, compatível com a Tabela 3.6 e Brasil (1984).



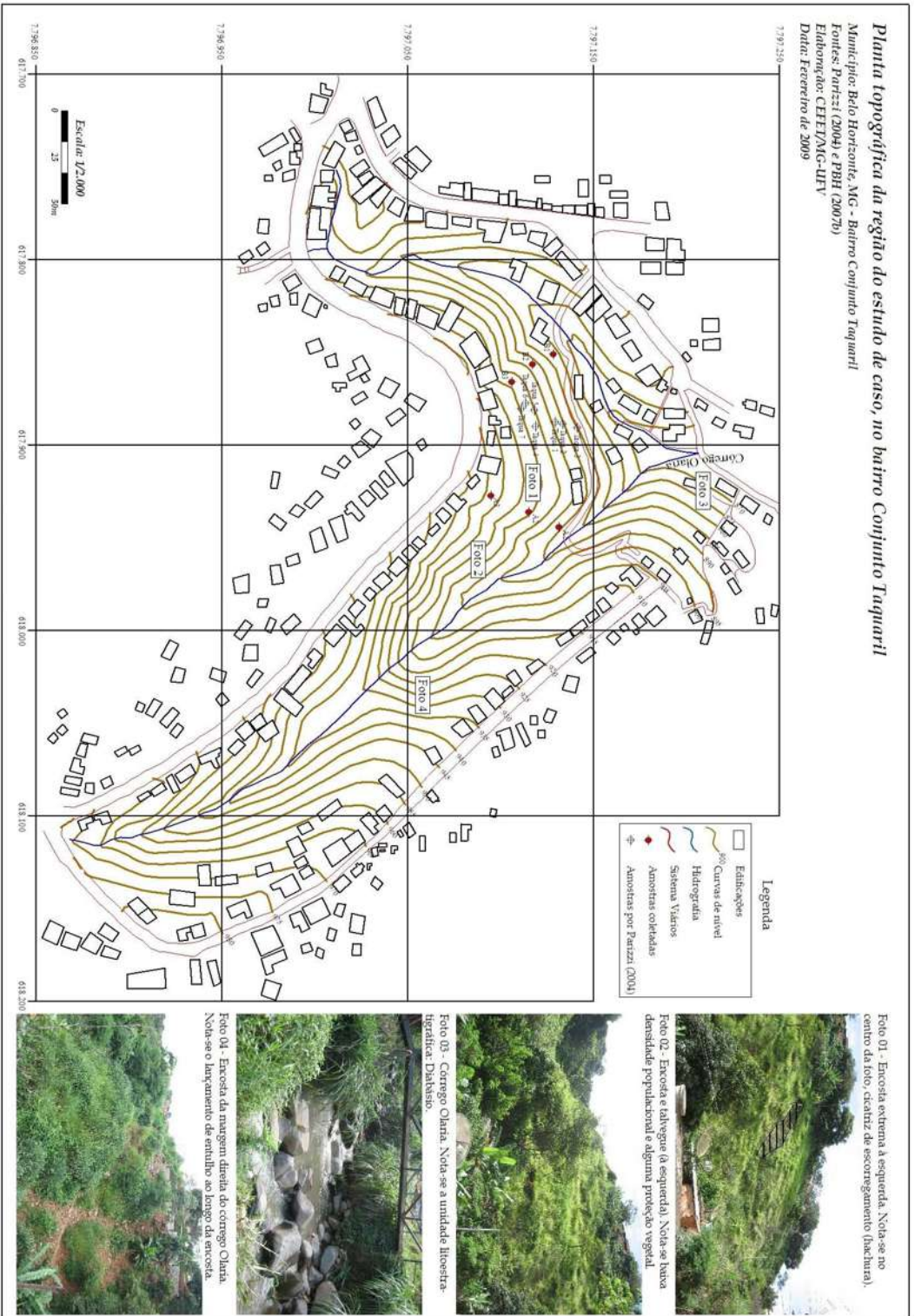
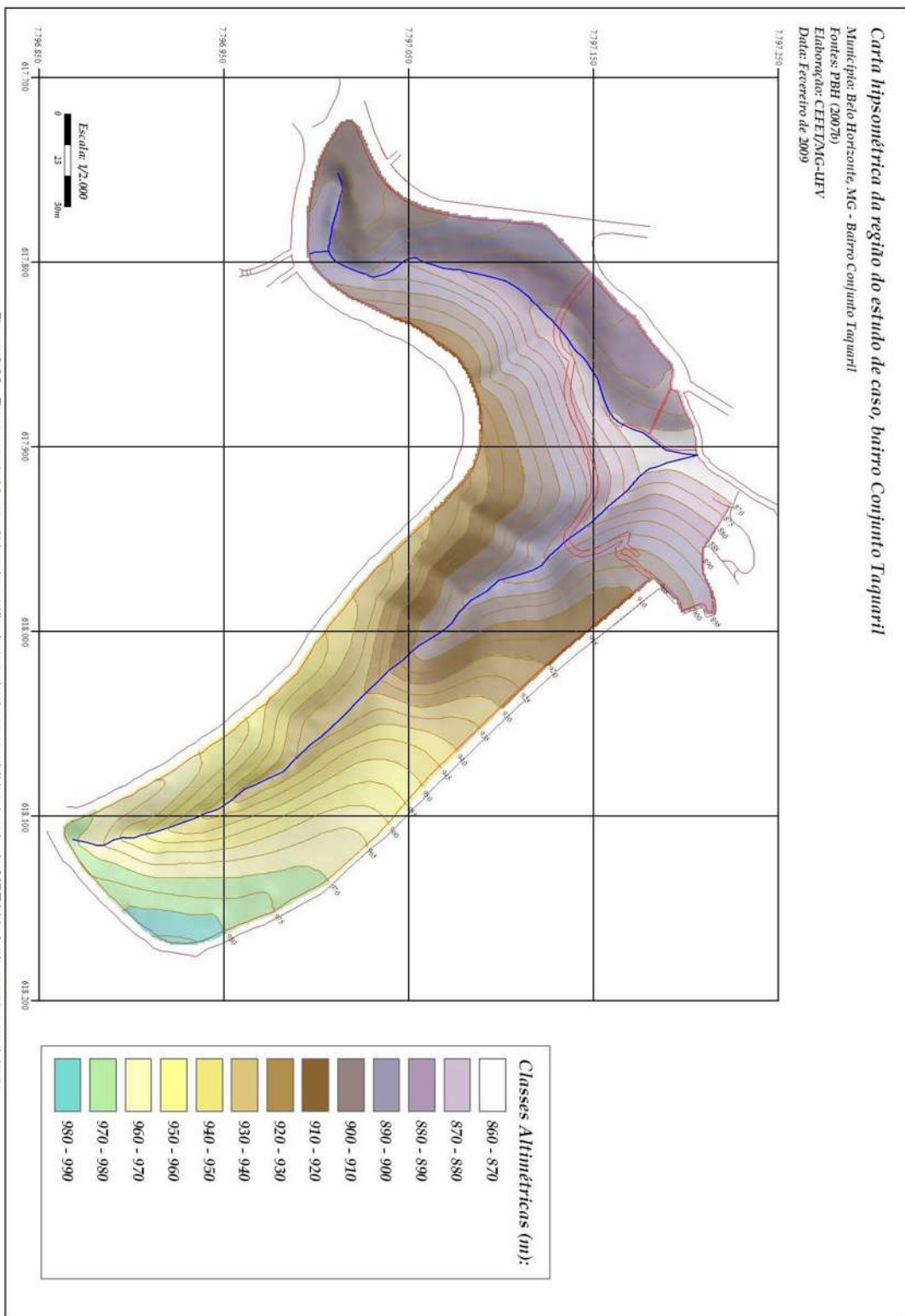


Figura 3.27 - Planta topográfica e registro fotográfico da região do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril.  
137



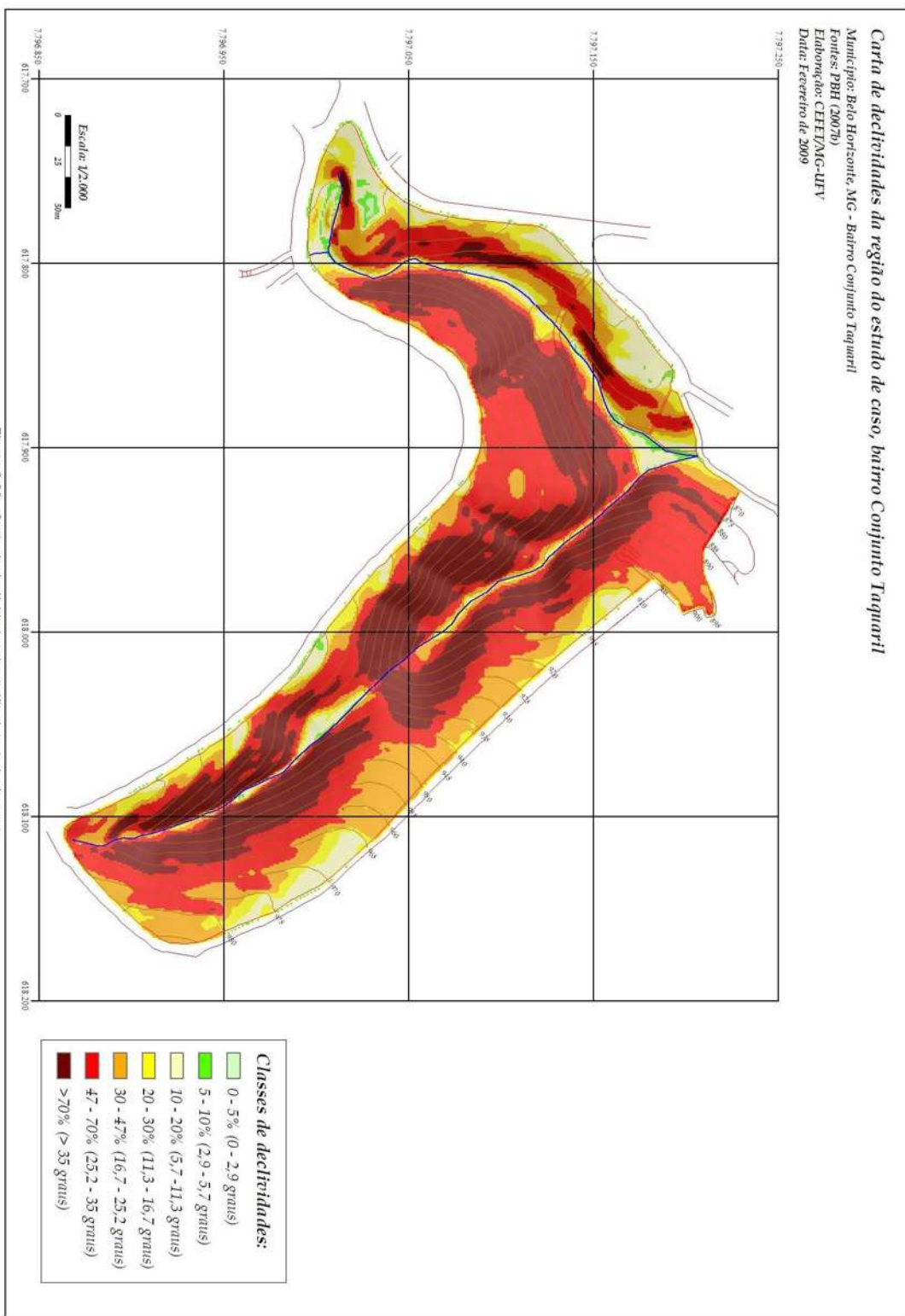


Figura 3.29 - Carta de declividades da região do estudo de caso.



**b) Parâmetros Geotécnicos**

Para obtenção dos parâmetros geotécnicos de interesse, foram coletadas 06 amostras de solo indeformado, conforme sequência apresentada pela Figura 3.30.



Limpeza do local.



Abertura de vala.



Preparação para cravação.



Posicionamento do amostrador.



Cravação do amostrador.



Georeferenciamento do amostrador.



Término da cravação do amostrador.



Retirada do amostrador.



Preparação para transporte.



Identificação do amostrador.

Figura 3.30 – Etapas para retirada das amostras de solo indeformado.

Fonte: Arquivo pessoal (2009).



O georeferenciamento das amostras (A1, A2, A3, B1, B2 e B3) pode ser visualizado na carta da Figura 3.27. As suas coordenadas são apresentadas na Tabela 3.11.

Adotaram-se os seguintes critérios, para a definição dos locais para a coleta das amostras:

- regiões de topo, meio e fim, e que fossem representativas de toda a encosta em estudo;
- limpeza e retirada da camada superficial (vegetação, raízes, etc.);
- mesma profundidade das coletas (abaixo de 0,5m da superfície);
- acessibilidade para possível re-amostragem;
- locais em que verificasse a presença do Tálus amarelado, Tálus avermelhado e Aterro.

Os parâmetros geotécnicos de interesse, obtidos através de ensaios de laboratório, pelo Laboratório de Mecânica dos Solos, da UFV, foram:

- índices físicos (umidade, peso específico dos grãos de solos e peso específico natural; e cálculo de suas correlações) (NBR 6508/ABNT);
- ensaio de cisalhamento direto, com o solo em estado natural (coesão e ângulo de atrito) (ASTM D3080); e
- índices de consistência (Limites de Atterberg) – Limite de Liquidez (LL) (NBR 6459/ABNT) e Limite de Plasticidade (LP) (NBR 7180/ABNT); e
- ensaio de análise granulométrica (NBR 7181/ABNT).

Os resultados resumidos são apresentados da Tabela 3.11, e os gráficos e cálculos detalhados constam do Anexo II.

Os parâmetros da Tabela 3.11 foram aplicados na rotina *SHALSTAB-ArcView*, com objetivo de detectar as áreas instáveis, segundo o modelo *SHALSTAB*.

Em Parizzi (2004) também se coletaram 07 amostras de solo neste local. O georeferenciamento dessas amostras pode ser visualizado também pela carta da Figura 3.27. Os resultados desta referência, para o saprolito e depósitos (cisalhamento direto de amostras saturadas, índices físicos, granulometria e limites de Atterberg) são apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.11 - Parâmetros geotécnicos da região do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril, obtidos pela coleta de campo.

Amostra	Tipo da amostra	Local	Coordenadas (UTM)			Índices Físicos						Ensaio de cisalhamento direto		Limites de Atterberg		Análise Granulométrica					
			N	E	h	$\rho_s$	$\rho_{nat}$	$\rho_d$	$\rho_{sat}$	e	n	c	Ângulo de Atrito	LL	LP	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
			m			kN/m <sup>3</sup>						kPa	Graus	%		%					
A1	Tálus vermelho	Encosta taquaril (Figura 3.27)	7797131	617944	891	26,7	17,5	14,0	18,8	0,9	47,6%	22,5	31,2	35	20						
A2	Tálus amarelo		7797115	617936	906	25,4	16,1	12,7	17,7	1,0	50,1%	20,2	37,4	51	24						
A3	Tálus amarelo		7797094	617927	918	26,9	16,7	12,8	18,0	1,1	52,5%	20,3	31,6	53	34						
B1	Aterro		7797131	617944	891	29,5	16,6	13,0	18,6	1,3	56,0%	ND	ND	38	28						
B2	Saprolito		7797115	617936	906	24,4	16,7	13,1	17,7	0,9	46,5%	ND	ND	40	22						
B3	Saprolito		7797094	617927	918	26,4	16,0	12,4	17,7	1,1	52,8%	24,9	36,1	46	33						

$\rho_s$  – Peso específico dos grãos de solos;  $\rho_{nat}$  – Peso específico natural;  $\rho_d$  – Peso específico seco;  $\rho_{sat}$  – Peso específico saturado; e – Índice de vazios; n – Porosidade; c – Coesão (ensaio de cisalhamento);  $\phi$  - Ângulo de atrito (ensaio de cisalhamento); LL – Limite de liquidez; LP – Limite de plasticidade

Fonte: Arquivo pessoal (2009)

Tabela 3.12 - Parâmetros geotécnicos da região do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril, obtidos em Parizzi (2004).

Amostra	Tipo da amostra	Local	Coordenadas (UTM)			Índices físicos						Ensaio de cisalhamento direto		Limites de Atterberg		Análise granulométrica						Classificação SUCS
			N	E	h	$\rho_s$	$\rho_{nat}$	$\rho_d$	$\rho_{sat}$	e	n	c	Ângulo de Atrito	LL	LP	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho	
			m			kN/m <sup>3</sup>			%		kPa			Graus	%							
Taqua 1	Tálus vermelho	Encosta taquaril (Figura 3.27)	7797129	617888	894	27,9	13,8	12,1	17,8	1,3	57	0	34	40	18	25	35	14	6	6	14	Argila magra arenosa
Taqua 2	Tálus vermelho		7797133	617888	891	27,8	13,8	12,1	17,7	1,3	57	-	-	40	18	21	33	10	4	4	28	Argila magra com areia
Taqua 3	Aterro		7797141	617891	885	27,7	13,4	12,2	17,7	1,3	57	-	-	41	26	29	35	13	4	5	14	Argila magra com areia
Taqua 4	Saprolito		617890	7797118	902	28,2	17,4	15,5	20,1	0,8	45	24	16	34	Não plástico	13	36	18	6	5	22	Silte arenoso
Taqua 5	Tálus amarelo		617881	7797117	900	27,5	14,8	13,3	18,3	1,1	52	6	33	33	Não plástico	4	25	13	7	4	47	Silte arenoso
Taqua 6	Tálus vermelho		617877	7797113	902	27,6	13,8	13,3	18,4	1,1	52	-	-	40	21	26	44	16	4	2	8	Argila magra com areia
Taqua 7	Tálus amarelo		617880	7797111	905	27,8	14,8	13,3	18,5	1,1	52	-	-	40	Não plástico	11	36	12	5	8	28	Silte arenoso

$\rho_s$  – Peso específico dos grãos de solos;  $\rho_{nat}$  – Peso específico natural;  $\rho_d$  – Peso específico seco;  $\rho_{sat}$  – Peso específico saturado; e – Índice de vazios; n – Porosidade; c – Coesão (ensaio de cisalhamento);  $\phi$  - Ângulo de atrito (ensaio de cisalhamento); LL – Limite de liquidez; LP – Limite de plasticidade

Fonte: Adaptado de Parizzi (2004).

A unidade litoestratigráfica local, apresentada pela carta geológica do bairro (Figura 3.24), aponta com predominância de Filito e Metagrauvaca.

Verifica-se, pelas Tabelas 3.18 e 3.19, a presença de três tipos de materiais nas encostas locais:

#### – Tálus amarelado

Em observação ao local e segundo Parizzi (2004), este material é proveniente do filito e grauvaca, e localiza-se mais ao topo do talude, em contato com o maciço de filito alterado, apresentando sinais de movimentação, como degraus de abatimento em superfície côncava. A espessura do depósito é variável (em torno de 1,0 a 1,5m) e de extensão ao longo da face do talude, cobrindo praticamente toda face superior (Figura 3.31). Os ensaios de cisalhamento direto forneceram valores de coesão em torno de 20 kPa e ângulo de atrito em torno de 34° para esse material (Tabela 3.11).



Figura 3.31 – Tálus amarelado, bairro Conjunto Taquaril.

Fonte: Arquivo pessoal (2009).

#### – Tálus avermelhado

Em observação ao local e segundo Parizzi (2004), este material se encontra na face inferior da encosta, possui coloração avermelhada, envolvendo pedregulhos de filito e grauvaca. Também com espessura de aproximadamente 1,5 m, e em ensaios de cisalhamento direto foram obtidos valores de coesão em torno de 21 kPa e ângulo de atrito de 31° para esse material (Tabela 3.11) (Figura 3.32).





Figura 3.32 – Tálus vermelho, bairro Conjunto Taquaril.

Fonte: Arquivo pessoal (2009).

#### – Aterro

Consiste de material avermelhado, contendo fragmentos de xisto/filito, orientados de forma caótica, em função de manuseio de moradores para a construção de aterros das moradias, conforme ilustrado pela Figura 3.33. Geralmente encontra-se material orgânico, lixo e entulho em sua composição (Figura 3.18).



Figura 3.33 – Aterros, bairro Conjunto Taquaril.

Fonte: Arquivo pessoal (2009).



Na região do estudo de caso, durante os estudos de Parizzi (2004), ocorreu uma ruptura pouco profunda nos depósitos de tálus e colúvios que recobriam os maciços de filitos. Naquela época (ano de 2003) o local já apresentava cicatrizes de rupturas translacionais e rotacional, identificadas pelo atual trabalho.

Parizzi (2004) cita ainda que foi possível observar que esse tipo de ruptura em solo é o mais freqüente, tanto na encosta em questão, quanto em outras do bairro Conjunto Taquaril (Figura 3.34).



Situação antes da ruptura (Dezembro de 2002). Demarcado pelas letras “a”, “b” e “c”, as posições de coleta das amostras de Parizzi (2004): Tálus amarelado, Tálus avermelhado e Aterro, respectivamente.



Situação após a ruptura (Janeiro de 2003).



Situação atual (Fevereiro de 2009). As moradias observadas na foto acima foram removidas, substituídas pela vegetação natural. Notam-se no local ainda as cicatrizes da ocorrência dos movimentos de massa.

Figura 3.34 – Ocorrências de movimentos de massa na encosta do estudo de caso, bairro Conjunto Taquaril, em 2003.

Fontes: Adaptado de Parizzi (2004) e Arquivo pessoal (2009).



Observe-se que as coesões das amostras não saturadas, apresentadas na Tabela 3.11, está em torno de 22 kPa. Nestas condições experimentais, quase sempre conduziriam a uma estabilidade da encosta local, até para altas declividades, como será demonstrado adiante.

Considerando a ruptura ocorrida no local em janeiro de 2003 (Figura 3.34), Parizzi (2004) aplicou os parâmetros da Tabela 3.12, para encontrar um fator de segurança unitário (retroanálise), obtendo-se os resultados da Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Parâmetros da retroanálise para a ruptura do talude da Figura 3.34, obtidos em Parizzi (2004), com amostras saturadas.

Material	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (graus)	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	h	Porosidade (kPa)	FS
Tálus amarelado	4	33	15	1,5	11	1
Tálus avermelhado	4	34	14	1,5	6	1

Logo, os valores de coesão e atrito (Tabela 3.13) correspondem aos valores no momento de ruptura, definindo as condições geotécnicas para o equilíbrio limite. Neste local a inclinação era de 55°. Estes parâmetros serão aplicados nos cenários para o modelo *SHALSTAB*, no capítulo adiante.

Observe ainda que a diferença de coesão observada nos ensaios deste trabalho e na retroanálise se deve à saturação do solo, já que os resultados observados pela Tabela 3.11 foram feitos no teor de umidade natural.

# CAPÍTULO 4

## MATERIAL E MÉTODOS

---

- 4.1 – MÉTODO HEURÍSTICO
- 4.2 – MÉTODO DETERMINÍSTICO

#### 4.1 – MÉTODO HEURÍSTICO

O método heurístico foi construído para o município de BH com a intenção de mapear as regiões mais susceptíveis aos movimento de massa, e a partir desta identificação, selecionar uma região para aplicar a modelagem determinística *SHALSTAB*.

Na metodologia aplicada ao mapeamento das susceptibilidades aos movimentos de massa gravitacionais pela técnica heurística, buscou-se atender ao fundamento do termo modelagem, ou seja, a busca de uma representação ideal e simples de formas complexas, de fenômenos, ou idéias; ou apenas uma sistematização consistente do entendimento de um fenômeno e dos fatos a ele concernentes.

Um modelo pode ser uma teoria, uma lei, uma hipótese ou uma idéia estruturada. Pode ser função, uma relação ou uma equação. Pode ser uma síntese de dados. Logo, do ponto de vista geográfico, é importante a inclusão de argumentos sobre o mundo real por meio de translações no espaço (para dar modelos espaciais) ou no tempo (para dar modelos temporais).

Desta forma, o método heurístico aplicado aqui baseia-se na combinação qualitativa de documentos cartográficos, em que os profissionais envolvidos aplicaram o conhecimento especialista para atribuir valores ou classes, para uma série de parâmetros, em geral, distribuídos numa carta.

As classes das intensidades da susceptibilidade deviam garantir uma representatividade do evento em questão, bem como tornar a metodologia prática. Ainda, observou-se durante a construção da metodologia, as possibilidades da automação dos processos.

O método heurístico foi aplicado para o município de BH, na escala de 1:50.000. Valeu-se para este mapeamento, algumas reuniões junto à secretarias da PBH (URBEL, SMURBE e PRODABEL), na coleta de informações, cartas e banco de dados.

Ainda, no produto final desta análise, aplicou-se uma matriz denominada “modificadora” (atributo referente ao padrão de uso e ocupação do solo), de forma a alterar as intensidades atribuídas e construir a carta de eventos perigosos. Os resultados são apresentados no Capítulo 4.

A metodologia proposta baseia-se na filosofia, conceitos e definições já discutidas nos Capítulos 1 e 2, e com base na caracterização do município (Item 3.1). As cadeias causais de eventos em análise foram os escorregamentos de solo e as quedas de rochas e detritos.

Como o objetivo inicial tratava-se de um mapeamento a nível regional, a primeira definição foi a escolha dos atributos predisponentes. Para tal, adotaram-se apenas condicionantes geológicos e geomorfológicos.

Apesar da opção em adotar apenas estes condicionantes, indiretamente os outros atributos apresentados no Item 3.1.1 (pedologia, hidrografia e drenagem urbana e hidrogeologia) auxiliaram na tomada de decisão da equipe especialista, ao atribuir os graus de intensidades do evento em estudo.

Na combinação dos atributos condicionantes e consequente atribuição das intensidades da susceptibilidade, faz-se destaque na busca da metodologia ideal, por estar baseada numa opinião especialista. Para tal apoiou-se em:

- cartas diversas (geologia, hipsometria, hidrografia, uso e ocupação do solo, declividades, etc.), produzidas por Tuler et al. (2007a e 2007b), PBH (2007a, 2007d e 2008), dentre outros;
- bancos de dados de ocorrência, contendo laudos de avaliação do tipo de evento e sua intensidade, por localidade (PBH, 2007b);
- conhecimento técnico–especialista, da equipe envolvida (URBEL, GIND, SMURBE, dentre outros);
- carta de riscos, elaborada pela URBEL/PBH (PBH, 2007b);
- referências bibliográficas, como a de Silva et al. (1995), especificamente nas premissas para construção da carta de predisposição a eventos perigosos de BH, em que a susceptibilidade da ocorrência dos movimentos de massa também apoiava-se em predisponentes geológicos e geomorfológicos;
- entrevistas com os autores da referência Silva et al. (1995); e
- verificações de campo e entrevistas a funcionários da URBEL, para validar algumas intensidades atribuídas para determinada localidade.

As reuniões formais na URBEL-PBH totalizaram-se 12 encontros técnico-científicos e 10 visitas técnicas. A equipe criada para atribuição dos graus de intensidade foi composta por 03 geólogos, 01 geógrafo e 02 engenheiros. Entre os desafios vencidos nessa etapa, citam-se:

- dificuldade em definir os limites entre as unidades, ou seja, as mudanças de propriedades geológico-geotécnicas e comportamentos geomecânicos, para a escala de trabalho; e
- uniformização do conhecimento especialista da equipe de trabalho, para a escala proposta, principalmente na definição das classes de comportamentos geomecânicos e zonas morfológicas;
- acesso a determinadas localidades, por muitas se encontrarem em áreas de “favelas”;
- A busca da simplificação da modelagem, permitindo a automação, sem perder a garantia de retratar o evento em questão;
- A busca das melhores referências bibliográficas, para embasar os procedimentos adotados; e
- A carência de banco de dados atualizados, principalmente dos digitais.

Enfim, a metodologia adotada apóia-se na simplificação da Figura 2.4 e está sintetizado pela Figura 4.1, na qual será discutida nos seguintes itens:

- Item 4.1.1 - Condicionantes geológicos, com base nas unidades geológicas mapeadas pela Figura 3.1;
- Item 4.1.2 - Condicionantes geomorfológicos, através de uma combinação entre unidades morfológicas e classes de declividades, mapeadas pelas Figuras 3.5, 3.8, 3.12;
- Item 4.1.3 – Combinação dos atributos predisponentes, definidos nas alíneas anteriores; e
- Item 4.1.4 – Construção do atributo modificador, a partir de metodologia para construção da matriz modificadora, com base na Figura 3.15 e de Silva et al. (1995).

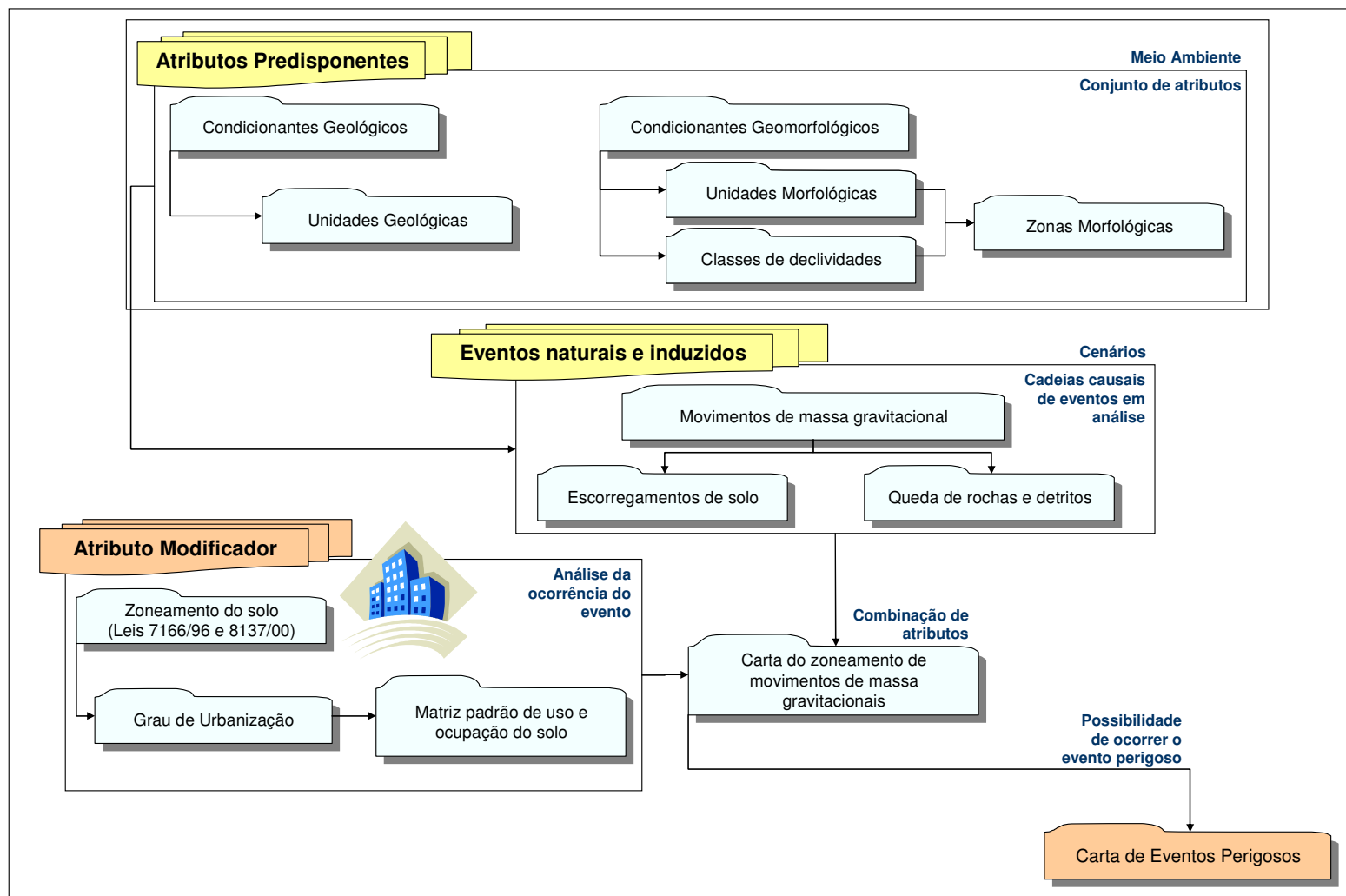


Figura 4.1 – Metodologia heurística adotada para mapear a susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais em BH



#### 4.1.1 – CONDICIONANTES GEOLÓGICOS

Inicialmente identificaram-se oito classes litológicas (Tabela 4.1) a partir da carta geológica (Figura 3.1). A definição destas classes baseou-se nas similaridades de comportamento geomecânico frente aos movimentos de massa.

Entre as características para o agrupamento das classes, verificou-se litologia, estado de alteração, aspectos estratigráficos e estruturais.

Como referência para a definição das classes apresentadas na Tabela 4.1, cita-se Silva et al. (1995), que em parte, apresentou consistência com a proposta desse trabalho.

Observa-se pela Figura 3.1 a extensa área ocupada pelo Complexo BH e sua grande generalização cartográfica. Nos litotipos desse Complexo, ainda foi possível a distinção dos gnaisses, com base nas características do manto de intemperismo, destacados por:

- espesso manto de intemperismo em perfil bem desenvolvido;
- aflorante em estado são a pouco alterado;
- manto de intemperismo variável em espessura e baixo grau de evolução pedológica.

Apesar da generalização, esta área apresenta-se como baixa incidência de escorregamentos, em detrimento de outras áreas, como o Grupo Sabará e Formações Fecho do Funil e Barreiro, que têm uma maior incidência de escorregamentos (Figura 2.3).

Reitera-se que a agregação por classes facilita a discussão e composição para o zoneamento das intensidades ao evento. Os casos possivelmente omitidos, estão relacionados às imprecisões das cartas envolvidas (no caso, da carta geológica - Figura 3.1), bem como em generalização ou simplificação adotada para a análise técnico-especialista.

Tabela 4.1 – Unidades litológicas consideradas, a partir da carta geológica.

Litotipo	Caracterização litológica e estrutural	Comportamentos
<b>Domínio das Rochas Metassedimentares</b>		
Itabiritos da Formação Cauê	Rocha constituída de lâminas alternadamente silicosas e hematíticas, restringindo-se à crista da serra do Curral. As camadas têm direção geral NE-SW mergulhando para sudeste com ângulos de mergulho que variam de 45° a 60°.	O itabirito pode apresentar-se homogeneamente coeso, porém o mais comum é ter sua coesão diminuída frente à remoção das lâminas quartzosas pela erosão.
Dolomitos da Formação Gandarela	Têm ocorrência restrita, formando cristas a partir da meia encosta da serra do curral. Coloração rósea, com aspecto maciço e textura sacaroidal.	Como os itabiritos, os afloramentos podem estar sujeitos a queda de blocos.
Filitos da Formação Gandarela	São filitos dolomíticos raramente encontrados em estado são. Coloração ocre, muito alterado a decomposto. Extensamente recoberto de depósitos de vertente e alúvio-coluviais nas baixas encostas e nos vales.	Em virtude de sua foliação mergulhar para SE, as encostas voltadas neste quadrante possuem maior instabilidade.
Quartzitos e Filitos da Formação Cercadinho	Intercalações centimétricas a métricas de quartzito e filito. O quartzito predominantemente ferruginoso, de coloração cinza e textura média a grossa e filito predominantemente sericítico-hematítico, de coloração cinzenta. Ocasionalmente recoberto de depósitos de vertente.	Em virtude da foliação marcante do filito e menos densa do quartzito, mergulhando para SE, exibem com frequência intensa fraturação, observam-se inúmeros casos de escorregamentos.
Filitos do Grupo Sabará e das Formações Fecho do Funil e Barreiro	Filitos róseos, pardos, avermelhados, cinzento-carbonosos, medianamente alterados a decompostos e frequentemente fraturados.	Em virtude da influência marcante da xistosidade, que orienta persistentemente em direção nordeste, com mergulho para sudeste, pode apresentar problemas de instabilidade.
<b>Domínio do Complexo Belo Horizonte</b>		
Gnaiss Tipo 1	Gnaiss com bandamento bem marcado mostrando bandas centimétrica a métricas, granulação variando de fina a grossa e composto essencialmente por quartzo, feldspato e biotita. Ocorrem predominantemente fraturados.	Associam-se as feições de erosão laminar, sulcos, ravinhas e voçorocas. São comuns a queda de blocos em maciços fraturados, aflorantes e relevo escarpado.
Gnaiss Tipo 2	Gnaiss milonítico com bandamento fino, granulação fina a média, fraturado, com presença de minerais estirados e grande quantidade de minerais micáceos.	Associam-se as feições citadas acima, porém com o agravante da milotização estar sempre associada com planos de fraqueza (falhas), aumentando a predisposição ao voçorocamento
Gnaiss Tipo 3	Gnaiss de granulação grossa e com predominância de quartzo e feldspato.	Associam-se à grande erodibilidade e muitas feições associadas, mesmo em declividades moderadas.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (1995) e Tuler et al. (2007b).

#### 4.1.2 – CONDICIONANTES GEOMORFOLÓGICOS

A composição das zonas morfológicas também buscou similaridade com a referência Silva et al. (1995), que privilegia principalmente os aspectos morfogenéticos e declividades locais.

Procurou-se neste zoneamento, uma simplificação para análises futuras e facilidades para uma avaliação técnico-especialista.

Pela proposta de Silva et al. (1995), apresentavam-se as seguintes unidades morfológicas, obtidas por foto-interpretação:

- áreas planas e elevadas (topos);
- vertentes planas, convexas e côncavas;
- baixadas.

Pela dificuldade de mapeamento por foto-interpretação de todo o município e posterior digitalização dessas unidades, apoiou-se nos trabalhos de Carvalho (2001), identificando as três unidades morfológicas de forma automatizada: Topo, Encosta e Baixada.

Com relação à declividade observou-se, pelas frequências das ocorrências dos escorregamento (PBH, 2007b) e também pelas restrições impostas pela lei de uso e ocupação do solo de BH (Leis 7166/96 e 8136/2000), que os limites de 30% e 47% seriam os ideais para a metodologia.

Logo, o zoneamento em apenas cinco classes (zonas 1 a 5), apresentado em síntese pela Figura 4.2, trata-se da combinação de três unidades morfológicas (topo, encosta e baixada) e três classes de declividades (0-30%, 30-47% e > 47%), aplicadas exclusivamente para a unidade encosta.

Essa opção de apenas cinco classes caracterizariam as possibilidades de ocorrência dos movimentos de massa, bem como facilitaria a atribuição das intensidades ao zoneamento da susceptibilidade aos movimentos de massa, pela equipe técnico-especialista.

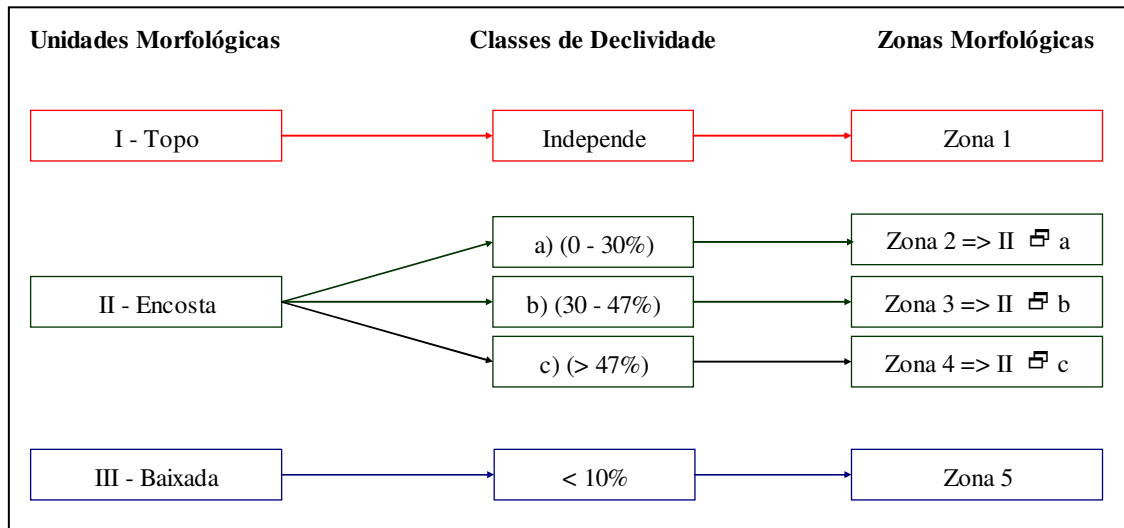


Figura 4.2 – Composição das zonas morfológicas.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2001) e Tuler et al. (2007b).

Dessa forma, a metodologia para confecção da carta das zonas morfológicas, apresentada pela Figura 3.36, foi concebida em duas etapas:

#### a) Caracterização das unidades morfológicas

##### – Mapeamento dos topos

A partir de “rotina” já modelada no *software* IDRISI Andes, obtiveram-se as formas do relevo, identificadas por Pellegrini (1995) (Figuras 3.11 e 3.12). A seguir, extraiu-se dentre as várias formas mapeadas, àquela relativa a “região de cumeada”, ou seja, ao conjunto de células do MDT que ocorrem quando as células são mais altas que as células circunvizinhas, caracterizando os “topos”.

##### – Mapeamento das baixadas

Foi construído um “*buffer*” (limite) de 100 m, ao longo dos cursos d’água, no *software* IDRISI Andes. A partir deste, combinou-se as áreas com declividades menores que 10%, perfazendo as baixadas, conforme as referências Silva et al. (1995), Carvalho (2001) e concordância da equipe técnico-especialista.

Essa opção atendeu a expectativa da equipe, uma vez a metodologia atendeu às restrições de ocupação destas áreas, publicada pela lei de uso e ocupação do solo de BH (Leis 7166/96 e 8137/2000).

Observa-se na unidades mapeadas na Figura 4.3. Esta metodologia só foi possível, em razão da consistente base de dados da hidrografia e drenagem, apresentada no Item 3.1.1.3 (Figura 3.5).

#### **– Mapeamento das encostas**

Por exclusão das áreas de topos e baixadas, as áreas remanescentes foram classificadas como encostas. Trata-se das regiões de maior interesse para a modelagem, uma vez que se tratam das regiões de maior frequência de ocorrência do evento.

Como discutido anteriormente, esta região de transição entre a calha aluvial e o topo sedia os fenômenos destrutivos de vertente: fator gravitacional (declividades moderadas a altas) e o hidrológico (volume de água envolvido no escoamento torrencial).

Para estudos em maiores escalas (1:5.000 ou 1:1000, por exemplo) poder-se-ia até admitir as características dessas encostas (plana, côncava, convexa, etc.), e sua relações com os movimentos de massa, o que não foi admitido para a escala regional, uma vez que a equidistância vertical não traria acurácia na identificação destas unidades e poderia criar uma complexidade na atribuição das intensidades pela equipe técnico-especialista.

#### **b) Combinação das classes de declividades**

Com relação às classes de (0-30%, 30-47% e >47%), as mesmas foram extraídas a partir da carta de declividades (Figura 3.10), por técnicas de classificação do *software* IDRISI Andes. Estas classes foram adotadas apenas para a unidade morfológica mapeada como encosta.

Enfim, com base na composição proposta pela Figura 4.2, concebeu-se a carta das zonas morfológicas, apresentada pela Figura 4.3.

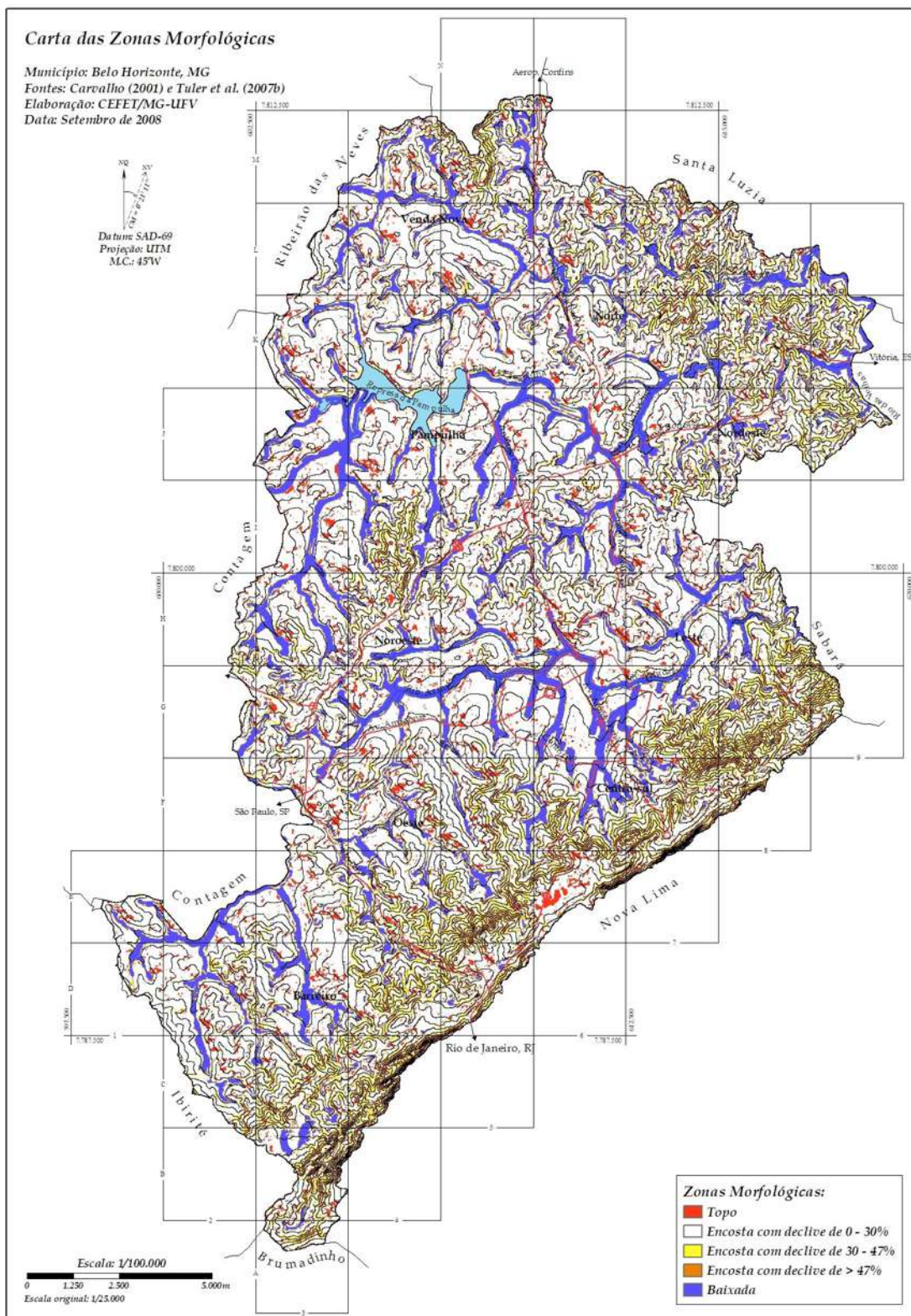


Figura 4.3 - Carta das zonas morfológicas.



### 4.1.3 – COMBINAÇÃO DOS ATRIBUTOS PREDISPOENTES

Para a combinação dos atributos predisponente, inicialmente definiram-se os graus da probabilidade aos movimentos de massa gravitacionais e respectivas características a serem adotadas. Tomaram-se, como base para esta classificação, as referências Silva et al. (1995), Ministério das Cidades (2006) e URBEL (PBH, 2007b), apresentadas pela Tabela 4.2.

Inclusive, as características dos graus de intensidades mostradas na Tabela 4.2 geralmente são aplicadas para a região Sudeste na busca de uma uniformização dos dados, para futuras comparações.

Tabela 4.2 – Critérios adotados para definição do grau de probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em BH.

Grau da probabilidade	Características
Baixo a Inexistente (B)	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção no setor são de baixa potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. Não há indícios de desenvolvimento de processos destrutivos em encostas e em margens de drenagens. É a condição menos crítica.
Médio (M)	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção no setor são de baixa potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. Observa-se a presença de alguma(s) evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
Alto (A)	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. Observa-se a presença de significativa(s) evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
Muito Alto (MA)	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção no setor são de elevada potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. As evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação ao córrego, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número e/ou magnitude. É a condição mais crítica.

Fonte: Adaptado de Silva et al. (1995), Ministério das Cidades (2006) e Tuler et al. (2007b).

Em Silva et al. (1995), para avaliar qualitativa e quantitativamente a intensidade do evento, levantaram alguns problemas de caráter prático, como a necessidade de trabalhar com níveis contínuos de susceptibilidade, ou seja, intermediários aos extremos de susceptibilidade desprezível ao de susceptibilidade muito elevada, e que fosse de fácil comparação futura e com outras metodologias.

Na Tabela 4.3, inicialmente apresentam-se as classes dos condicionantes geológicos (com base na Tabela 4.1) e geomorfológicos (com base nas Figuras 4.2 e 4.3).

A seguir têm-se as combinações entre estas classes, atribuindo-se os respectivos graus de probabilidade da ocorrência do evento natural em questão: movimentos de massa gravitacionais.

Observa-se que a coluna “movimento de massa” da Tabela 4.3, foi subdividida em outras duas: escorregamentos de solo e queda de rochas e detritos. Essa opção foi adotada pela maior frequência de ocorrência desses tipos de movimentos de massa gravitacionais em BH. Na caracterização destes movimentos apoiou-se em Hutchinson (1988).

O preenchimento da Tabela 4.3 teve como base, o julgamento dos profissionais encarregados do mapeamento de risco da PBH-URBEL (Tuler et al., 2007b). Nesta atividade, foram consideradas as referências Silva et al. (1995), Xavier (1996), Viana (2000), Carvalho (2001), Costa (2002), Parizzi (2004), PBH (2007a), PBH (2007b), Tuler et al. (2007b), PBH (2008) e outros; além da experiência adquirida em vários anos de atividade em áreas de risco da equipe da URBEL e SMURBE, bem como, de visitas técnicas ao campo.

No Capítulo 5 são apresentadas e discutidas as cartas de zoneamento das susceptibilidades aos movimentos de massa, obtidas pelos graus de intensidades atribuídos na Tabela 4.3 (Figuras 5.1, 5.2 e 5.3).

Condicionantes Geológicas (Tabela 3.14)		Condicionantes Geomorfológicos (Figuras 3.37 e 3.38)		Intensidades da susceptibilidade aos movimento de massa		
				Escorregamento de solo	Queda de rocha e detritos	
1	Itabirito da Formação Cauê: rocha constituída de lâminas alternadamente silicosas e hematíticas; pouco a medianamente alterada.	1	Topo	M	M	
		2	Encosta (0 - 30%)	M (Quadrante SE) e B (Demais quadrantes)	M (Quadrante SE) e B (Demais quadrantes)	
		3	Encosta (30 - 47%)	A (Quadrante SE) e M (Demais quadrantes)	A (Quadrante SE) e M (Demais quadrantes)	
		4	Encosta (> 47%)	MA (Quadrante SE) e A (Demais quadrantes)	MA (Quadrante SE) e A (Demais quadrantes)	
		5	Baixada	B	B	
2	Dolomito da Formação Gandarela, são a pouco alterado.	1	Topo	B	M	
		2	Encosta (0 - 30%)	B	M	
		3	Encosta (30 - 47%)	M	A	
		4	Encosta (> 47%)	A	MA	
		5	Baixada	B	B	
3	Filito dolomítico da Formação Gandarela, de coloração ocre, muito alterado a decomposto. Extensamente recoberto por depósitos de vertente e alúvio-coluviais nas baixas encostas e nos vales.	1	Topo	M	B	
		2	Encosta (0 - 30%)	M (Quadrante SE) e B (Demais quadrantes)	B	
		3	Encosta (30 - 47%)	A (Quadrante SE) e M (Demais quadrantes)	M	
		4	Encosta (> 47%)	MA (Quadrante SE) e A (Demais quadrantes)	A	
		5	Baixada	B	B	
4	Intercalações centimétricas a métricas de quartzo e filito da Formação Cercadinho. Ocasionalmente recoberto de depósitos de vertente e freqüentemente de terras descartadas.	1	Topo	M	M	
		2	Encosta (0 - 30%)	M (Quadrante SE) e B (Demais quadrantes)	M (Quadrante SE) e B (Demais quadrantes)	
		3	Encosta (30 - 47%)	A (Quadrante SE) e M (Demais quadrantes)	A (Quadrante SE) e M (Demais quadrantes)	
		4	Encosta (> 47%)	MA (Quadrante SE) e A (Demais quadrantes)	MA (Quadrante SE) e A (Demais quadrantes)	
		5	Baixada	B	B	
5	Filitos róseos, pardos, cinzento-carbonosos, medianamente alterados a decompostos das Formações Fecho do Funil e Barreiro e do Grupo Sabará.	1	Topo	M	B	
		2	Encosta (0 - 30%)	M (Quadrante SE) e B (Demais quadrantes)	B	
		3	Encosta (30 - 47%)	A (Quadrante SE) e M (Demais quadrantes)	M	
		4	Encosta (> 47%)	MA (Quadrante SE) e A (Demais quadrantes)	A	
		5	Baixada	B	B	
6	Gnaise com bandamento bem marcado mostrando bandas centimétrica a métricas, granulação variando de fina a grossa e composto essencialmente por quartzo, feldspato e biotita (Tipo 1).	1	Topo	Espesso manto de intemperismo em perfil bem desenvolvido	M	B
		2	Encosta (0 - 30%)		M	B
		3	Encosta (30 - 47%)		A	B
		4	Encosta (> 47%)		MA	M
		5	Baixada		B	B
		1	Topo	Aflorantes em estado são a pouco alterado	B	M
		2	Encosta (0 - 30%)		B	M
		3	Encosta (30 - 47%)		M	A
		4	Encosta (> 47%)		A	MA
		5	Baixada		B	B
		1	Topo	Manto de intemperismo variável em espessura e baixo grau de evolução pedológica	M	B
		2	Encosta (0 - 30%)		M	B
		3	Encosta (30 - 47%)		A	M
		4	Encosta (> 47%)		MA	M
		5	Baixada		B	B
7	Gnaise milonítico com bandamento fino, granulação fina a média, fraturado, com presença de minerais estríados e grande quantidade de minerais micáceos (Tipo 2).	1	Topo	Espesso manto de intemperismo em perfil bem desenvolvido	M	B
		2	Encosta (0 - 30%)		M	B
		3	Encosta (30 - 47%)		A	B
		4	Encosta (> 47%)		MA	M
		5	Baixada		B	B
		1	Topo	Aflorantes em estado são a pouco alterado	B	M
		2	Encosta (0 - 30%)		B	M
		3	Encosta (30 - 47%)		M	A
		4	Encosta (> 47%)		A	MA
		5	Baixada		B	B
		1	Topo	Manto de intemperismo variável em espessura e baixo grau de evolução pedológica	M	B
		2	Encosta (0 - 30%)		M	B
		3	Encosta (30 - 47%)		A	M
		4	Encosta (> 47%)		MA	M
		5	Baixada		B	B
8	Gnaise de granulação grossa e com predominância de quartzo e feldspato (Tipo 3).	1	Topo	Espesso manto de intemperismo em perfil bem desenvolvido	M	B
		2	Encosta (0 - 30%)		M	B
		3	Encosta (30 - 47%)		A	B
		4	Encosta (> 47%)		MA	M
		5	Baixada		B	B
		1	Topo	Aflorantes em estado são a pouco alterado	B	M
		2	Encosta (0 - 30%)		B	M
		3	Encosta (30 - 47%)		M	A
		4	Encosta (> 47%)		A	MA
		5	Baixada		B	B
		1	Topo	Manto de intemperismo variável em espessura e baixo grau de evolução pedológica	M	B
		2	Encosta (0 - 30%)		M	B
		3	Encosta (30 - 47%)		A	M
		4	Encosta (> 47%)		MA	M
		5	Baixada		B	B

Fonte: Adaptado de Silva et al. (1995) e Tuler et al. (2007b).

#### 4.1.4 – ATRIBUTO MODIFICADOR

Conforme discutido no Capítulo 2, ocorrem possíveis alterações das susceptibilidades, em função do padrão de uso e ocupação do solo e/ou das condições climáticas, especificamente de uma pluviosidade extrema ou de baixa intensidade, porém com acumulação contínua.

As matrizes modificadora (por exemplo, do padrão de uso e ocupação) e deflagradora (por exemplo, da pluviosidade) são dinâmicas, com variações espaciais e temporais. O fluxograma simplificado da Figura 2.4 apresentou estes atributos, que atuam, por exemplo, sobre uma carta de susceptibilidade aos movimentos de massa.

Silva et al. (1995) propuseram uma matriz modificadora da susceptibilidade, em função do padrão de uso e ocupação do solo para BH. O estudo foi genérico, pois investigou as alterações para escorregamentos para uma escala regional.

Em síntese, a metodologia aplicada por esses autores foi apoiada em fotografias aéreas de 1994, e na classificação do uso e ocupação do solo, de forma analógica. Eles consideraram que os principais aspectos que proporcionariam alterações de intensidades ao risco geológico, estavam relacionados à movimentação de terra, proporção de cobertura vegetal e de terreno exposto à erosão, padrão de ocupação do terreno e tipo da edificação. A partir dessas características, resultou-se em 04 classes principais:

##### **a) Áreas de ocupação não consolidada**

Caracterizadas por maior exposição do terreno ao escoamento superficial, grande movimentação de terras nos lotes, ruas não asfaltadas ou córregos não canalizados. Quanto ao padrão de ocupação, foram ainda classificadas como: Favelas, Conjuntos Habitacionais, Ocupação Ordenada com baixo padrão construtivo e Ocupação Ordenada com padrão construtivo médio a elevado.

##### **b) Áreas de ocupação consolidada**

Caracterizadas por poucas áreas expostas à erosão, ruas pavimentadas, sistema de esgoto, córregos canalizados, e pouca ou nenhuma movimentação de terra nos lotes. Poderiam ser ocupadas por: Conjunto Habitacional e Edificações, de padrão médio a elevado.

**c) Áreas Especiais**

Incluíam os parques e clubes, em que por via de regra, grande parte do solo estava protegido da erosão pela cobertura vegetal.

**d) Áreas Verdes**

Áreas não ocupadas, incluindo as áreas ainda não parceladas do município e as áreas de proteção, garantidas por lei, como a Serra do Curral.

Ainda, pela metodologia de Silva et al. (1995), nas áreas classificadas como “Consolidadas”, as intensidades da susceptibilidades tendiam a ser reassumidas como “Desprezíveis”. As áreas tidas como “Não Consolidadas”, por outro lado, tendiam a potencializar a intensidade da susceptibilidade ao evento.

Por exemplo, se uma área estivesse classificada, a partir de características geológico-geotécnicas e geomorfológicas, com grau de intensidade de susceptibilidade “Médio”, porém se neste local o seu uso e ocupação, fosse classificada como “Não Consolidada”, ou seja, por exemplo ocupado por “Favelas”, atribuía-se a esta classe, uma intensidade “Alta”, ou até “Muito Alta”.

Apesar da subjetividade do método, considera-se aqui que os resultados de Silva et al. (1995) estavam dentro das margens admissíveis para a experimentação e atendiam ao proposto, ou seja, a construção do IQVU, versão de 1996.

A metodologia aplicada nesse trabalho foi similar, em alguns conceitos, àqueles assumidos por Silva et al. (1995). Constatado realmente que as maiores frequências dos movimentos de massa gravitacionais estão associados a áreas “não consolidadas” e de baixo padrão construtivo (PBH, 2007b e PBH, 2008), sugeriu-se a seguinte classificação para o padrão de uso e ocupação do solo (PBH, 2007d):

- a) Consolidado e Não consolidado;
- b) Luxo, Alto, Médio e Popular;
- c) Vilas/Favelas e Conjuntos Habitacionais;
- d) Áreas Especiais (ZE); e
- e) Áreas Verdes e/ou não urbanizadas (ZPAM, ZP-1, Programa BH-Verde (parte) e UC Cercadinho).

Tem-se a seguir um detalhamento destas classes, fontes dos dados e simplificação da sequência adotada nos trabalhos, aplicando para tal, os *softwares MapInfo 8.0* e *IDRISI 15 Andes*:

#### **a) Áreas Consolidada e Não Consolidada**

Com relação às classes “Consolidado” e “Não consolidado”, as fontes dos dados foram: as bases digitais de dados do Imposto Predial Territorial Urbano (IPTU) (PBH, 2007c) e a Planta de Quadras do Cadastro Técnico Municipal (CTM), ambas de 2007 (PBH, 2007a).

A proposta de classificação se baseou na percentagem de lotes vagos, numa quadra do CTM, considerando ser este parâmetro a garantia de presença do equipamentos urbanos básicos. Adotou-se a seguinte sequência nos trabalhos:

- seleção dos lotes vagos (área construída = 0 m<sup>2</sup>);
- agregação dos lotes vagos (LV) por quadra;
- cálculo da média da área (m<sup>2</sup>) dos LV por quadra;
- atribuição da classe “Consolidado”, sendo a média percentual dos LV por quadra menor que 50%; e
- atribuição da classe “Não Consolidado”, sendo a média percentual dos LV por quadra maior ou igual a 50%.

#### **b) Faixas de Padrão de Renda**

Com relação às classes de faixa de padrão de renda (“Luxo”, “Alto”, “Médio” e “Popular”), as fontes dos dados foram: o Censo Demográfico, 2000 - Resultados do Universo por Setor Censitário (IBGE, 2000), Classificação das Faixas de Renda, a partir de metodologia da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas, Administrativas e Contábeis de Minas Gerais (IPEAD/UFMG, 2007), e a Planta de Quadras do Cadastro Técnico Municipal (CTM), todas de 2007 (PBH, 2007a).

A proposta de classificação adotou a seguinte metodologia:

- seleção do número de domicílios por setor censitário;
- cálculo da renda nominal do responsável por domicílio (média), segundo o setor censitário;
- divisão das quadras de acordo com os setores censitários; e
- vinculação da renda por quadra do CTM.



**c) Vilas/Favelas e Conjuntos Habitacionais**

A fonte dos dados foi o Diagnóstico de Risco de 2004, da URBEL (PBH, 2007b). A sequência dos trabalhos tratou primeiramente de selecionar estas áreas e a seguir, fez-se sua vinculação na tabela de quadras do CTM.

A definição de uma classe exclusiva para as “Vilas/Favelas e Conjuntos Habitacionais” vem do fato destas regiões possuírem um mapeamento de risco em escalas maiores (1:5.000), e permitirem, em possíveis investigações futuras, o seu detalhamento e “ranqueamento” das intensidades, por localidade.

**d) Áreas Especiais (ZE)**

A fonte dos dados foi a Carta de Uso e Ocupação do Solo (Lei 8137/2000) (PBH, 2007c), com seleção das áreas classificadas como ZE's e a seguir sua vinculação na tabela de quadras do CTM.

**e) Áreas Verdes e/ou não urbanizadas**

A fonte dos dados foi a Carta de Uso e Ocupação do Solo (Lei 8137/2000) (PBH, 2007c), com seleção das áreas classificadas como ZPAM's, ZP-1's, Programa BH-Verde e UC Cercadinho.

Enfim, na Figura 4.4 apresenta-se a Carta do Padrão de Uso e Ocupação do Solo de BH, a partir das classes detalhadas acima. Apresentam-se nessa carta as condições de urbanização e nível de renda, além das ZE's, favelas e áreas verdes.

Para cumprir esse objetivo, admitiram-se algumas considerações na metodologia, a citar:

- a carta de padrão de uso e ocupação do solo, com base no mapa de zoneamento do solo (Leis 7166/96 e 8137/2000); e classes de renda, com base nos dados do IBGE (2000) e IPEAD/UFMG (2007), poderiam não traduzir o “real” padrão de uso e ocupação do solo; e
- os resultados de aplicação da matriz modificadora experimental (Tabela 4.1), poderiam não traduzir as reais alterações das intensidades de susceptibilidades, como por exemplo, para uma intervenção tecnológica localizada.

Porém, apesar das possíveis inconsistências dessa matriz, é fato que estas interações não poderiam ser negligenciadas. A carta em questão permite ainda várias aplicações para o planejamento urbano, principalmente em verificações de acessibilidades da população aos equipamentos urbanos. Desta forma, o produto apresentado motiva estudos avançados e refinamentos.

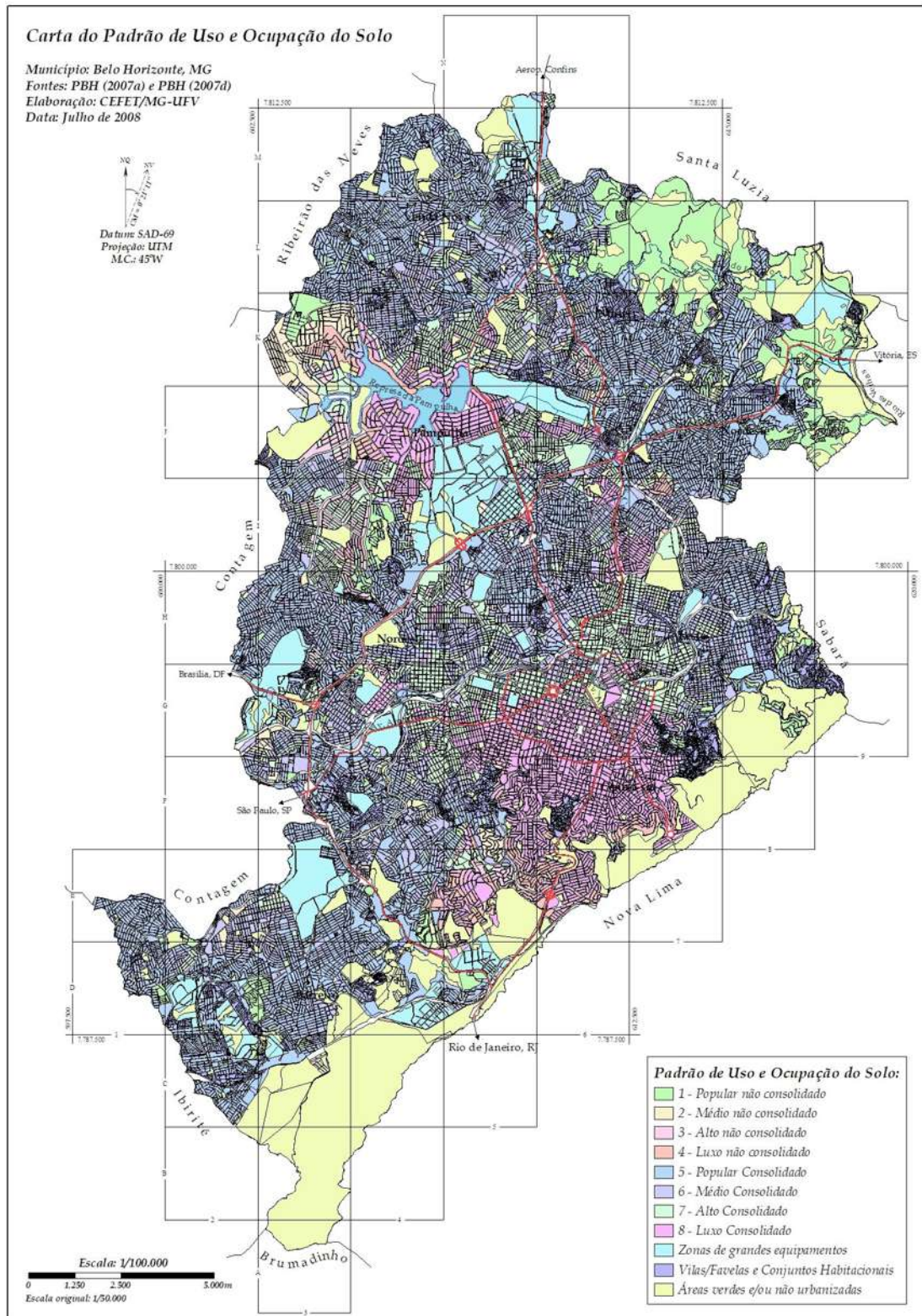


Figura 4.4 – Carta do padrão de uso e ocupação do solo.

Enfim, a partir dessa carta (Figura 4.4), propõe-se a matriz modificadora das intensidades das susceptibilidades aos movimentos de massa gravitacionais, com base em Silva et al. (1995) e Tuler et al. (2007b), e apresentada pela Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Matriz modificadora padrão de uso e ocupação do solo.

Padrão de ocupação		Intensidades modificadas de susceptibilidades aos movimentos de massa			
		Baixo (B)	Médio (M)	Alto (A)	Muito Alto (MA)
Consolidado	Luxo	B	B	B	M
	Alto	B	B	B	M
	Médio	B	B	M	A
	Popular	B	M	A	MA
Não consolidado	Luxo	B	B	B	M
	Alto	B	M	A	MA
	Médio	B	M	A	MA
	Popular	M	A	MA	MA
Áreas verdes e/ou não urbanizadas (ZPAM's e ZP-1's, EEE Cercadinho, parques e praças)		B	B	B	B
Zonas Especiais (ZE's)		B	B	B	M
Vilas/Favelas		M	A	MA	MA

Observe pela Tabela 4.4 que as regiões de padrão de ocupação “Luxo” e “Alto”, originalmente mapeadas pelas relações geológico-geotécnicas e geomorfológicas com intensidades “Médio” e “Alto”, quando apresentadas em áreas ditas “Consolidadas”, minimizaram o grau na intensidade.

Em detrimento das áreas ditas “Não Consolidadas”, em que áreas mapeadas como “Popular” e “Vilas/Favelas”, majoraram sua intensidade.

Ainda, adotou-se para as “Áreas verdes e/ou não urbanizadas (ZPAM's e ZP-1's, EEE Cercadinho, parques e praças)” a intensidade “Baixo”, por considerar que se trata de áreas não ocupadas, e desta forma a susceptibilidade ao movimento de massa gravitacionais não afetar pessoas, ou seja, não ocorrer acidentes à população.

Desta forma, a matriz modificadora atua sobre a carta de susceptibilidade aos movimentos de massa (Figura 5.3), construindo a carta de eventos perigosos (Figura 5.11).

Porém, seria imprudente auferir qualquer análise conclusiva e localizada para uma área de risco geológico com base na matrizes apresentada, principalmente para uma maior escala de trabalho. Para tal, sugere-se um visita *in situ*, e a composição de um laudo geotécnico.

## 4.2 – MÉTODO DETERMINÍSTICO

No Anexo I – Formulação do Modelo *SHALSTAB*, apresenta-se detalhadamente as equações que definem fisicamente o modelo *SHALSTAB*. Ainda, três rotinas foram desenvolvidas em Excel para o estudo da estabilidade aplicando esta técnica (Figuras I.5, I.9 e I.10).

Na Figura 4.5 tem-se uma visão esquemática do uso do modelo *SHALSTAB*. Observa-se que os parâmetros topográficos, geotécnicos e meteorológicos são combinados, e apresentados sob a forma da razão “ $q/T$ ”, a ser discutido nos itens a seguir.

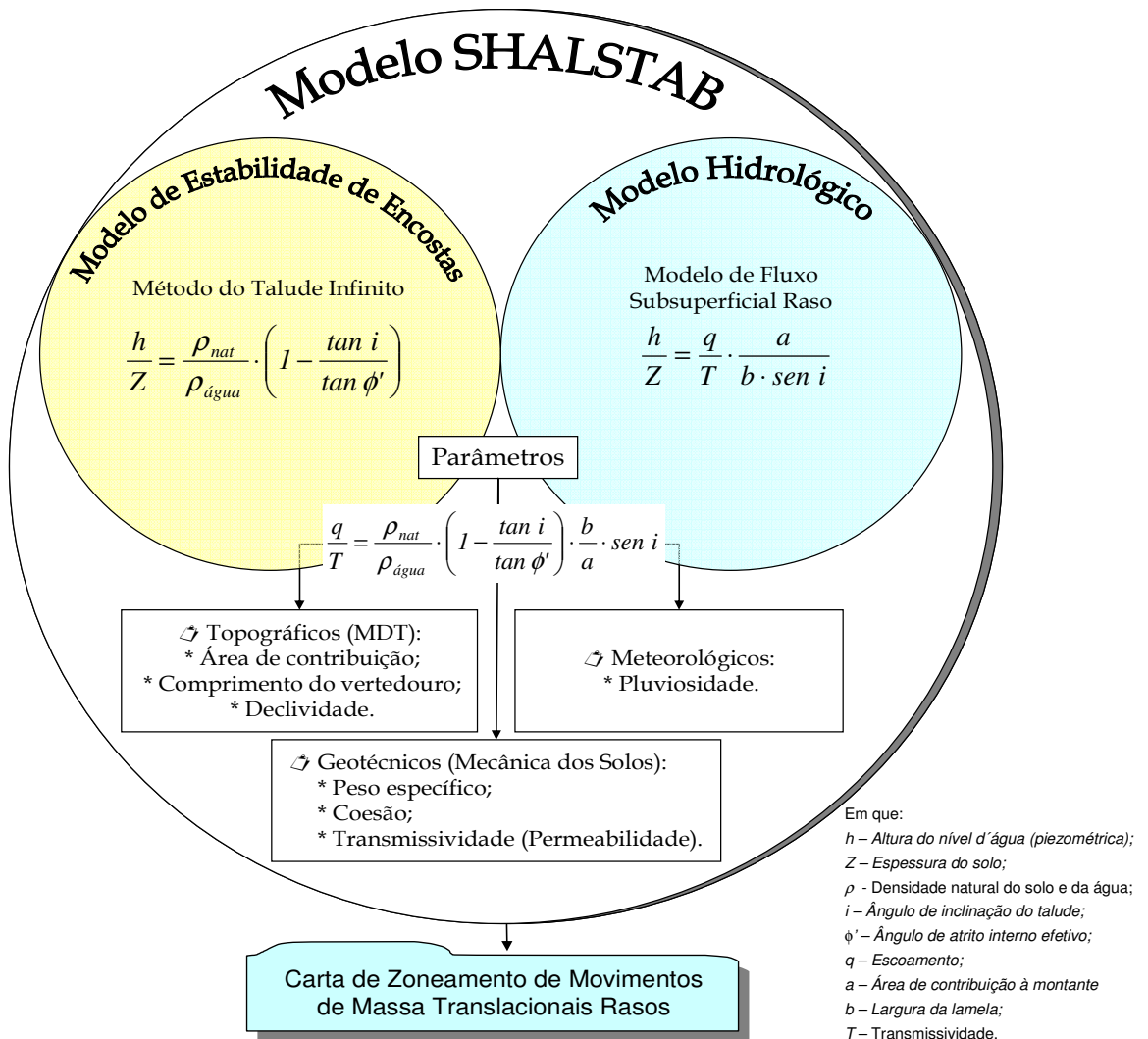


Figura 4.5 – Modelo *SHALSTAB* para o zoneamento da susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais, adotado numa região de BH.

As Equações I.19 e I.20 (Anexo I) são denominadas por Dietrich e Montgomery (1998) de “*equações SHALSTAB*” e os parâmetros necessários são:

- **$a$ ,  $b$  e  $i$** : parâmetros topográficos, a partir de um modelo digital de terreno (MDT);
- **$\rho$ ,  $\phi'$  e  $T$** : parâmetros geotécnicos, a partir de ensaios de laboratório de solos; e
- **$q$** : parâmetro meteorológico, a partir de dados pluviométricos.

Para a aplicação da modelagem, inicialmente deve-se garantir que os parâmetros listados acima estejam, preferencialmente, de forma digital. Estes dados foram apresentados no Item 3.2.

Para automatizar o uso do modelo e respectivas equações, aplicou-se a rotina *SHALSTAB.avx* para o ambiente *ArcView* (Anexo I – Figura I.11).

Na Figura 4.6 tem-se um esquema do fluxo de dados, da rotina *SHALSTAB-ArcView*.

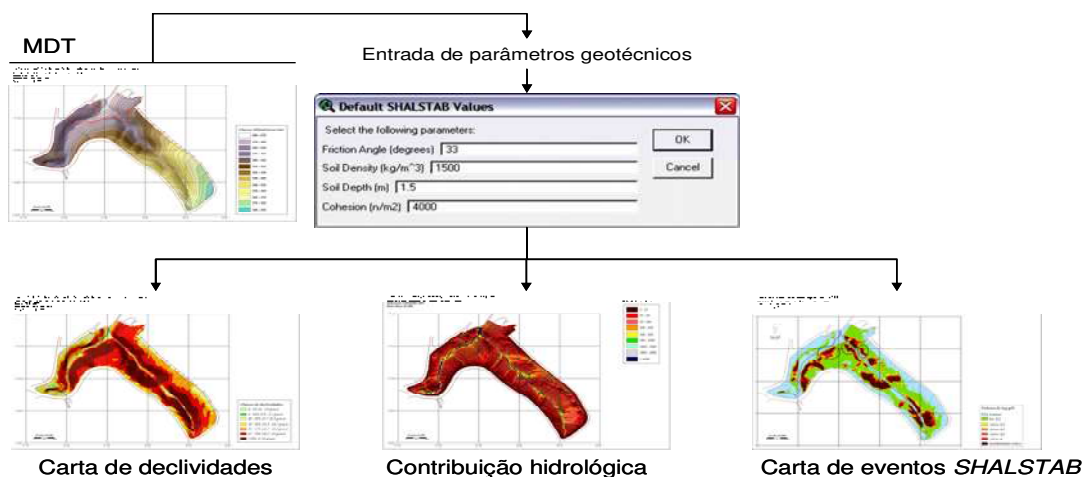


Figura 4.6 – Esquema do fluxo de dados na rotina *SHALSTAB-ArcView*.

Observe pela Figura 4.6, que o primeiro parâmetro é o modelo digital de terreno, obtido a partir da carta da Figura 3.28 para a região de interesse. A carta de declividades também pode ser obtida automaticamente pela rotina *SHALSTAB-ArcView*, já apresentada pela Figura 3.29. Estas foram construídas com pixel de 1 m, na escala de 1:2.000.

De posse dos dados e da rotina, estabeleceu-se uma sequência para o uso do modelo, de forma a validar sua funcionalidade. Para tal, optou-se em simular cenários por níveis de estabilidade, com a alteração dos parâmetros geotécnicos locais.

Esta opção foi detalhada no Capítulo 5 – Resultados e Discussão, sendo obtida, em síntese, as seguintes cartas:

- carta da relação “  $h/Z$  ”, com base na Equação I.9;
- carta da relação “  $a/b$  ” e “  $a/(b \cdot \text{sen } i)$  ”, com base na Equação I.17;
- carta de susceptibilidade, com valores para a razão “  $\log q/T$  ”, com base na Equação I.19 e fixando alguns parâmetros geotécnicos; e
- cartas de susceptibilidades, com valores para a razão “  $\log q/T$  ”, a partir de cenários.

# CAPÍTULO 5

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

---

5.1 – PRODUTOS DO MÉTODO HEURÍSTICO

5.2 – PRODUTOS DO MÉTODO DETERMINÍSTICO



## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados e discutidos em duas etapas:

- Item 5.1: referentes àqueles obtidos pela metodologia heurística (com base no Item 4.1), a partir dos dados para o município de BH (Item 3.1); e
- Item 5.2: referentes àqueles obtidos pela metodologia determinística (com base no Item 4.2 e Anexo I), a partir dos dados para uma localidade de BH (Item 3.2). Para este caso serão apresentados os resultados a partir de cenários, com a modificação dos parâmetros geotécnicos locais.

### 5.1 – PRODUTOS DO MÉTODO HEURÍSTICO

Os seguintes documentos cartográficos, na escala de 1:50,000, foram construídos a partir dos dados e metodologia apresentados:

- a) Carta de zoneamento das susceptibilidades ao escorregamento de solo de BH;
- b) Carta de zoneamento das susceptibilidades à queda de rochas e detritos de BH;
- c) Carta de zoneamento da susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais de BH; e
- d) Carta de eventos perigosos associados aos movimentos de massa gravitacionais de BH.

Os produtos das alíneas a) e b) foram construídos com base na Tabela 3.16 (Figuras 5.1 e 5.2). Salienta-se que a simplificação apresentada pela Tabela 3.16, foi amplamente discutida juntamente com técnicos da PBH (URBEL e SUDECAP).

O produto da alínea c) trata-se da associação das duas cartas apresentadas anteriormente, atribuindo-se ao local, o valor de maior intensidade das cartas supracitadas (Figura 5.3).

O produto da alínea d) trata-se da aplicação da matriz modificadora (Tabela 3.17) sobre os valores da carta da alínea c) (Figura 5.4).

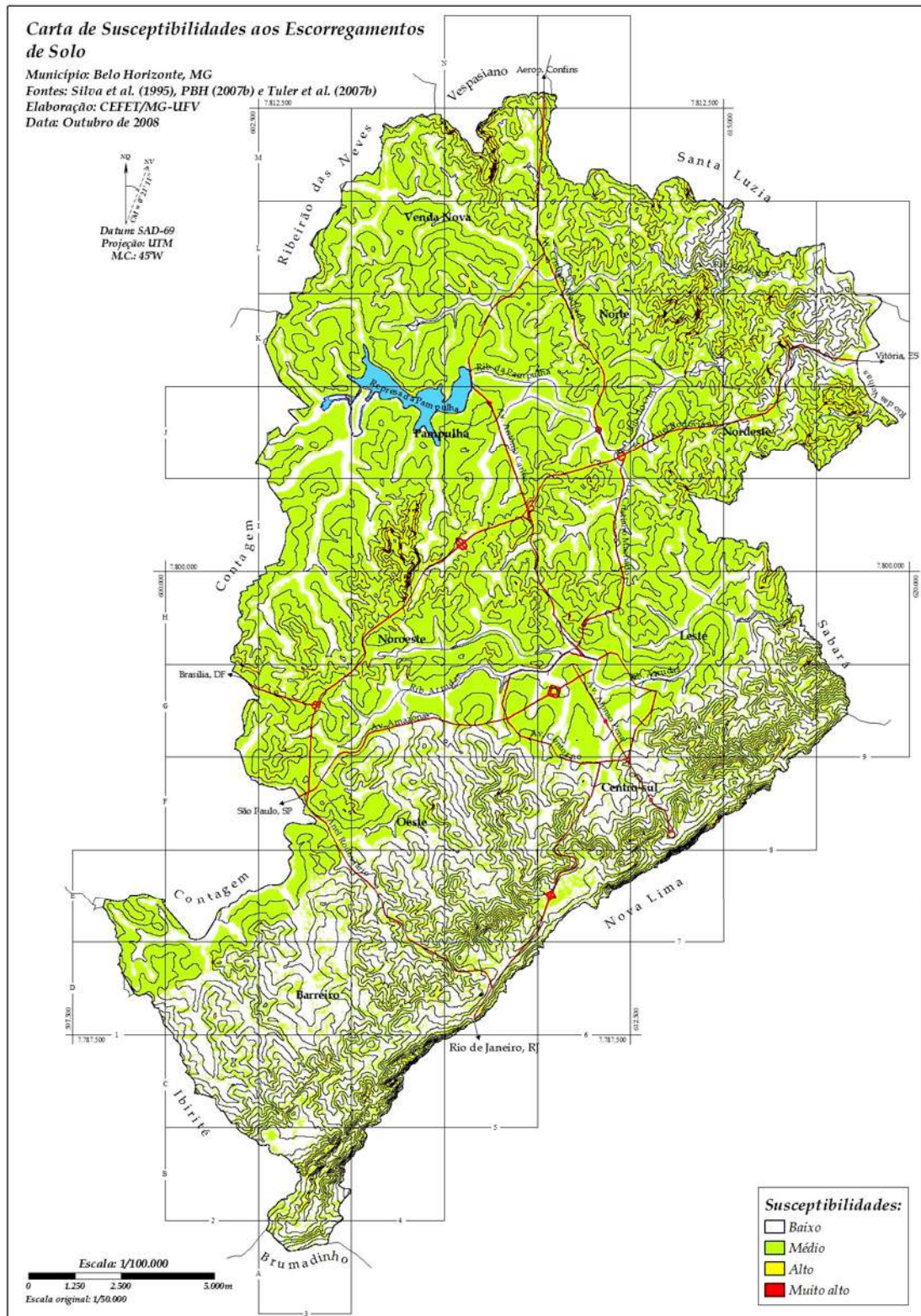


Figura 5.1 - Carta de zoneamento das susceptibilidades aos escorregamentos de solo de BH.

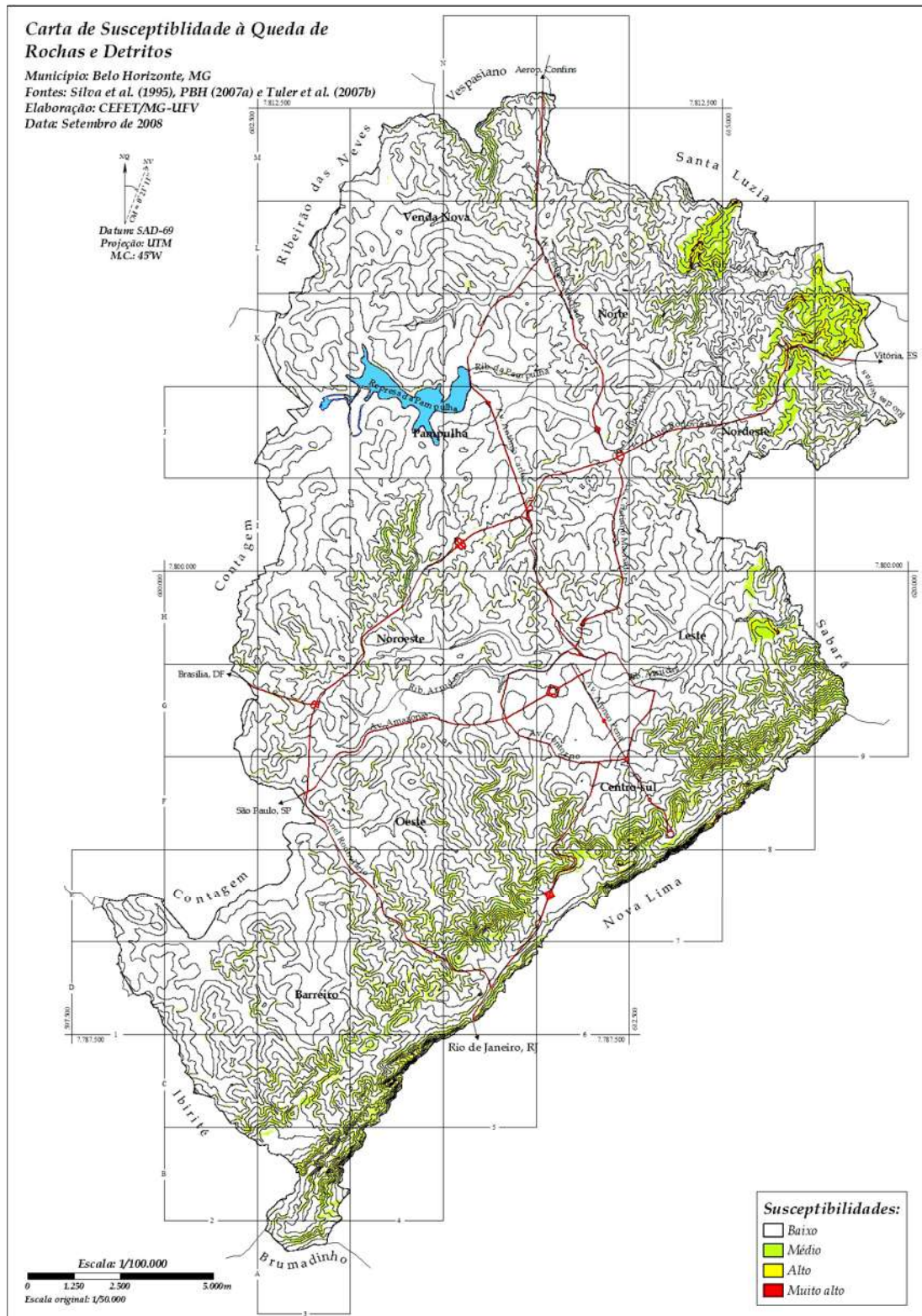


Figura 5.2 - Carta de zoneamento das susceptibilidade à queda de rochas e detritos de BH.



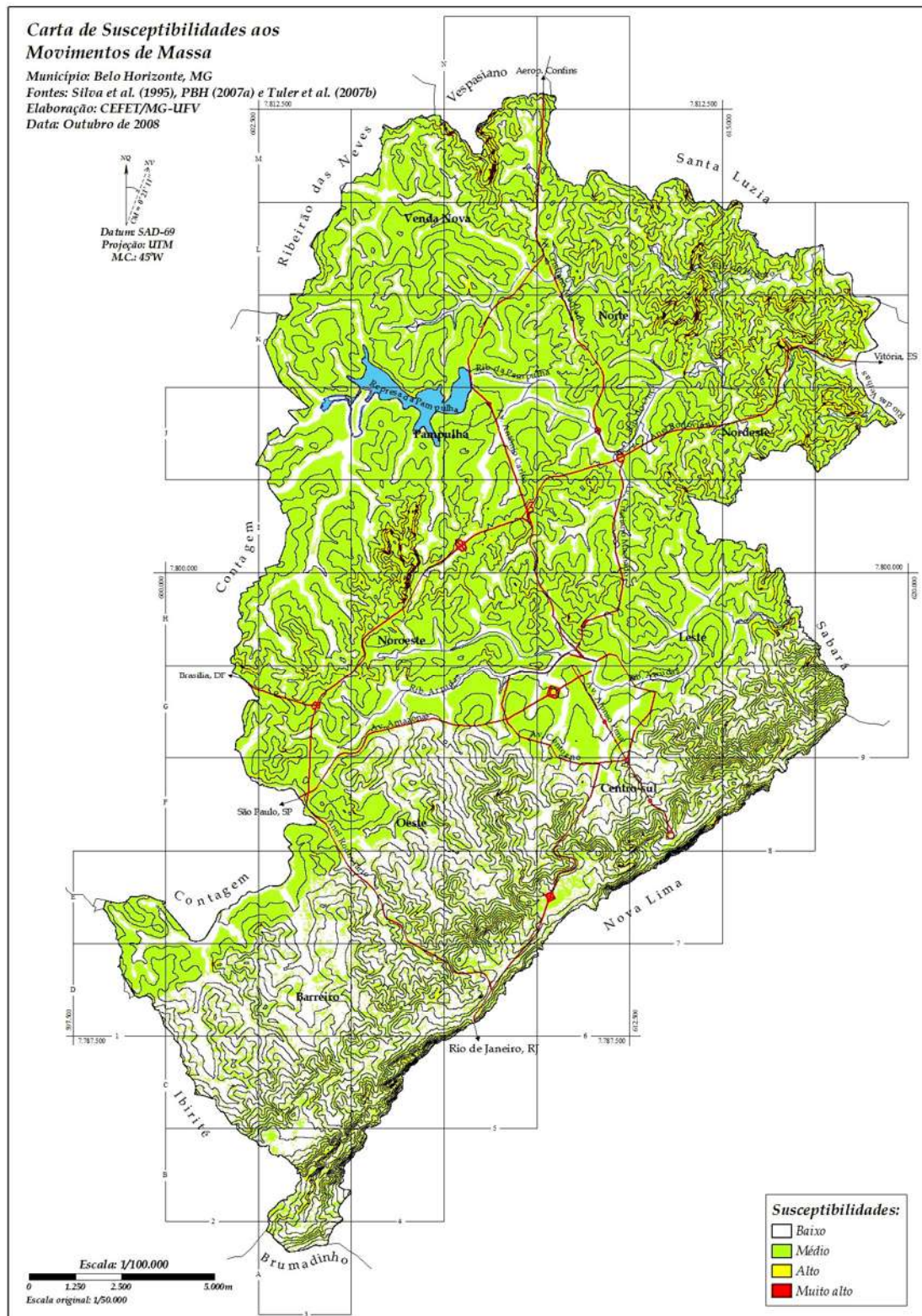


Figura 5.3 - Carta de zoneamento da susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais de BH.

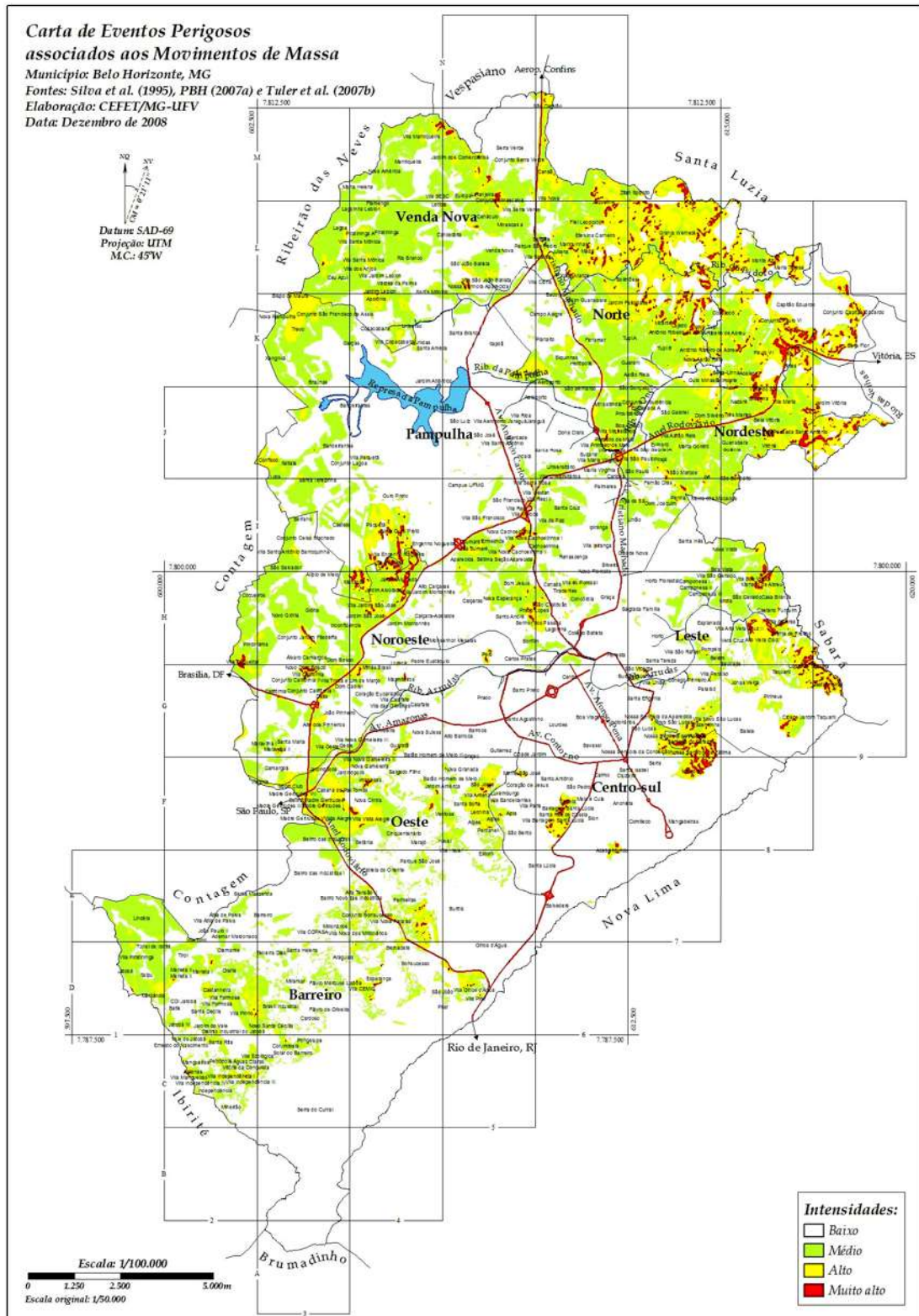


Figura 5.4 - Carta de eventos perigosos associados aos movimentos de massa gravitacionais de BH.

Observa-se pela Figuras 5.1 e 5.12 que se destacam as áreas de classes de intensidades de “baixo” e “médio”. Porém, algumas regiões apresentaram áreas com intensidades “alto” e “muito alto”, a citar:

- Regional Nordeste, nos bairros Tupi e Ribeiro de Abreu (quadrículas K7 e K8) e bairros Monte Azul e Capitão Eduardo (quadrículas K8 e L8);
- Regional Noroeste, nos bairros Engenho Nogueira e Jardim Montanhês (quadrículas H4 e I4);
- Extremo norte, nos bairros Laranjeiras e Jardim dos Comerciantes (quadrícula M5) e;
- Ao longo da Serra do Curral.

A Figura 5.2 apresenta uma grande extensão da classe de intensidade “baixo”. Destacam-se pequenas áreas das classes “alto” e “muito alto”, especificamente:

- Áreas da Formação Cercadinho (litotipos quartzito e filito) e da Formação Cauê Itabirito), ao longo da Serra do Curral; ambas com mergulho para o quadrante SE;
- Gnaisse dos tipos 1, 2 e 3, aflorantes em estado são a pouco alterado, em regiões com alta declividade, nas regionais Norte e Nordeste, com destaque para o bairro Engenho Nogueira (quadrícula I4).

A Figura 5.3 apresenta as intensidades máximas de cada “pixel”, pela combinação das cartas das Figuras 5.1 e 5.2. Apesar de possíveis inconsistências na modelagem, observou-se que esta carta, quando comparada com a carta de predisposição ao risco geológico produzida por Silva et al. (1995), apresentaram regiões similares, segundo suas intensidades.

A Figura 5.3 está respaldada nas referências bibliográficas e beneficiou-se de um prévio enquadramento nos grandes domínios litomorfológicos destacados na Tabela 3.14:

- a) Domínio do Complexo Belo Horizonte; e
- b) Domínio das Sequências Metassedimentares.

#### **a) Complexo Belo Horizonte**

As áreas de relevo suave a moderadamente ondulado de colinas e vales amplos do Complexo Belo Horizonte em regra não estão expostas ao risco de escorregamentos ou queda de rochas e detritos.

A exceção dá-se nos casos em que, no espesso solo dessas áreas, ocorrem voçorocas, estabilizadas ou ativas, caso em que podem sobrevir escorregamentos em suas paredes, ativados pela ocupação (Figura 5.5). No caso, tendem a ocorrer escorregamentos cilíndricos, típicos de solo homogêneos dotados de baixa coesão nos horizontes superficiais.



As rochas gnáissicas do Complexo Belo Horizonte perfazem cerca de 75% do total da plataforma geológica de Belo Horizonte. Para os gnaisses dos tipos 1, 2 e 3, com espesso manto de intemperismo e perfil bem desenvolvido, considerou-se a possibilidade de escorregamentos por rupturas translacionais e rotacionais, que envolvem volumes maiores de terra (Figura 5.6).

Nos gnaisses dos tipos 1, 2 e 3, estando aflorantes em estado são a pouco alterado, considerou-se a possibilidade de ocorrer afloramento rochoso, portanto predispondo ao risco de queda de rochas e detritos, principalmente em altas declividades (Figura 5.7). A ocorrência de escorregamentos de solo nesta classe é “baixa”.

Para os gnaisses dos tipos 1, 2 e 3, com manto de intemperismo variável em espessura e baixo grau de evolução pedológica, considerou-se que os tipos 2 e 3 são mais propensos ao escorregamento do que o tipo 1, em função da granulometria do solo formado (mais arenoso) e em função da foliação marcante (foliação milonítica).

Em relação à queda de rochas e detritos, considerou-se que raramente ocorre afloramento de rocha fresca neste grupo. Entretanto, adotou-se a intensidade “média” em altas declividades (encostas com declives > 47%), uma vez que a camada de solo pode ser pouco espessa ou a rocha estar muito pouco alterada.



Figura 5.5 – Possibilidade de escorregamento das paredes de voçorocas, presentes no Complexo Belo Horizonte (quadrícula K8 da Figura 5.3).

Fonte: Arquivo Pessoal (2008)



Figura 5.6 – Escorregamento rotacional, no bairro Engenho Nogueira (quadrícula H4 da Figura 5.3).

Fonte: Adaptado de Parizzi et al. (2004).



Figura 5.7 – Pedreira no bairro Engenho Nogueira, em gnaisse muito fraturado com possibilidade de queda de rocha e detritos (quadrícula H4 da Figura 5.3).

Fonte: Arquivo Pessoal (2008).



## b) Sequências Metassedimentares

### b1) Formação Cauê

Os fatores estruturais e geomorfológicos ligados às áreas de ocorrência dessa formação são favoráveis à estabilidade. Do ponto de vista estrutural, o mergulho para o quadrante SE da foliação principal faz com que ela esteja sempre confinada, não podendo assim sediar escorregamentos ou queda de rochas, com superfície voltada para o quadrante NW.

Do ponto de vista geomorfológico, a posição alçada da formação proporciona-lhe boas condições de drenagem natural e a existência, no topo, da cobertura de canga, conferindo proteção adicional.

Apesar de pouco alterado, a anisotropia do itabirito faz com que seu comportamento quanto ao escorregar, seja semelhante ao do filito, até mesmo porque o contato com o Gandarela é gradacional, com intercalações de filito. A presença de porções frescas pode ocasionar queda de blocos de rochas e detritos, em grau menor do que em pacotes maciços como no gnaiss fresco e no dolomito.

Como a faixa exposta do território municipal coincide com a existência de restrições legais à ocupação (Leis 7166/96 e 8137/00), as possíveis situações de risco ficam limitadas ao evento fortuito de blocos em construções no sopé da encosta, quando a incinação da encosta coincidir com o mergulho das camadas (Figura 5.8).

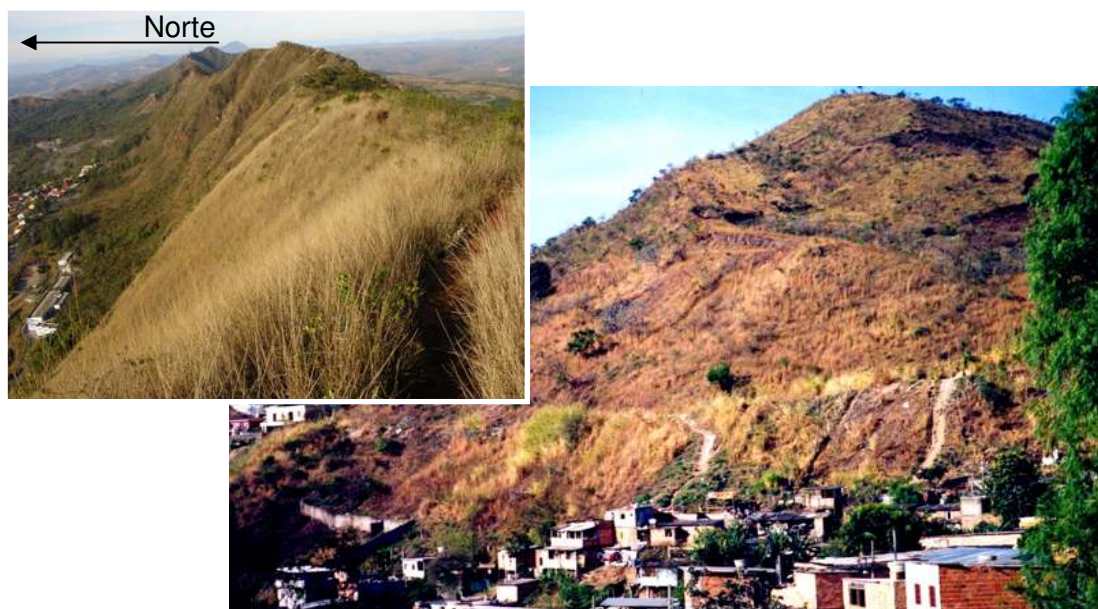


Figura 5.8 – Possibilidade “baixa” a “média” de escorregamento ou queda de rochas nas moradias ao pé de um dos contrafortes da Formação Cauê, na Serra do Curral, com superfície voltada para o quadrante NW.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2001) e Arquivo Pessoal (2008).

## b2) Formação Gandarela

Conforme visto na Figura 3.1, esta formação é caracterizada por vales longitudinais à Serra do Curral. Morfologicamente a Formação Gandarela aparece deprimida ao longo da encosta da Serra do Curral, sendo responsável pelos patamares de menor declividade, observada pela Figura 3.8.

Observou-se nesta formação ocorrências de depósitos mais expressivos de vertentes heterométricas, passíveis de instabilização. Para as encostas voltadas para sudeste (quadrante SE), as condições de confinamento ficam na dependência de seu mergulho ser maior que o pendor da encosta, ou se descalçados por escavações para ruas ou residências. Tais áreas estão pouco ocupadas (parque Rola Moça), ou de baixa densidade (bairro Mangabeiras), como acontece com a Formação Cauê (Figura 5.9).

Para o filito dolomítico desta formação, a susceptibilidade foi classificada como “média” a “elevada”, em função do mergulho (quadrante SE) e zona morfológica em que se encontrasse.

Quanto à susceptibilidade de queda de rocha e detritos desta formação, esta só aflora em encosta de altas declividades com ausência de solo espesso. Nestas situações foram adotadas as intensidades “alta” e “muito alta”. Esta classe é pouco representativa em extensão.



Figura 5.9 – Possibilidades “baixa” a “média” de ocorrência de movimentos de massa na Formação Gandarela (regiões hachuradas).

Fonte: Arquivo pessoal (2008).

### b3) Grupo Piracicaba

#### Formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro

Do ponto de vista fisiográfico, as encostas naturais voltadas para NW são em princípio as mais estáveis, dado o confinamento das estruturas planares. As instabilidades mais notáveis têm ocorrido em direção nordeste e sudeste como, por exemplo, ao longo da avenida Raja Gabaglia (Figura 5.10) e ruas do bairro Mangabeiras.

Em virtude da significativa heterogeneidade litológica desse conjunto, não são frequentes mobilizações de grandes volumes, por causa da existência de intercalações de materiais mais resistentes entre os mais brandos.



Figura 5.10 – Ocorrência de escorregamento de solo e queda de detritos na av. Raja Gabaglia.

Formação Cercadinho (PPmpc). Sua litologia característica é o quartzito cinza em estratos de espessura centimétrica a métrica, intercalados com filitos.

Fonte: Arquivo Pessoal (2008).

Especificamente na Formação Cercadinho, para o escorregamento de solo, ocorre a predominância de filito e para queda de rochas e detritos, a predominância de quartzito.



#### b4) Grupo Sabará

Como observado na Figura 3.1, o Grupo Sabará estende-se desde o extremo sudeste do município, no bairro Barreiro; até o extremo leste, nos bairros Taquaril e Conjunto Taquaril, na divisa com o município de Sabará.

Em função de seu comportamento geomecânico, verificou-se em linhas gerais com as seguintes regras: em geral estáveis nos topos dos espigões e nas encostas dos anfiteatros, voltadas para noroeste; medianamente estáveis nas altas encostas dos espigões, voltadas para nordeste e sudoeste; instáveis nas encostas voltadas para sudeste, principalmente quando a xistosidade não se encontra confinada.

Com relação aos domínios das baixas encostas, estes apresentam adversidades como: um estado de alteração mais intenso, maior teor de umidade, frequente ocorrência de coberturas coluvionares, onde escorregamentos rasos em cunha e planares tendem a ocorrer nas áreas de exposição direta da formação (Figura 5.11).



a) Escorregamento planar de solos.



b) Influência marcante da xistosidade, com mergulho para sudeste.

Figura 5.11 – Ocorrências de escorregamentos de solos no bairro Conjunto Taquaril e quedas de blocos e detritos na Av. Nossa Sra. do Carmo, BH.

Fonte: Adaptado de Parizzi (2004) e Arquivo Pessoal (2008).



Relativo à carta da Figura 5.4, observa-se que as áreas de intensidades da classe “baixa” aumentaram consideravelmente, o que se atribui à urbanização (consolidação urbana).

Ainda, as classes de intensidades “alta” e “muito alta” se apresentaram em áreas relativamente pequenas, especificamente em regiões classificadas como “Não consolidadas”.

Especificamente com relação às regiões ocupadas por “Favelas”, estas intensificaram a susceptibilidade, corroborando a proposta original de Silva et al. (1995). Apesar desta verificação, construiu-se uma modelagem conservadora, uma vez que nem todas as Vilas e Favelas possuíam problemas de susceptibilidades aos movimentos de massa.

Observou-se ainda que a carta da Figura 5.4, quando comparada com a carta de risco produzida pela URBEL/PBH, para as áreas de risco geológico das Vilas e Favelas (Figura 2.19), apresentou regiões similares, segundo suas intensidades.

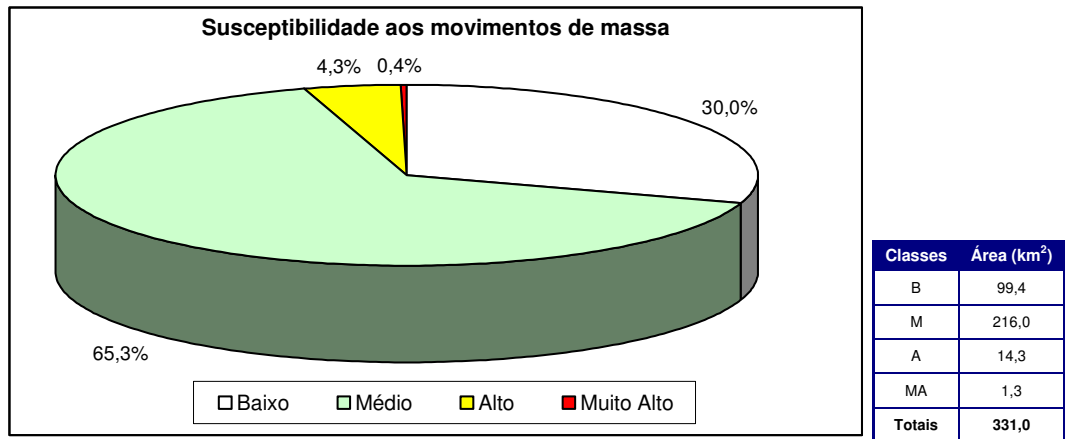
Os produtos da metodologia heurística para o município de BH foram fundamentais em dois aspectos:

- a possível utilização dos resultados, em nível de planejamento, pela PBH; e
- para tomada de decisão sobre em quais locais poderiam ser aplicados a metodologia determinística *SHALSTAB*.

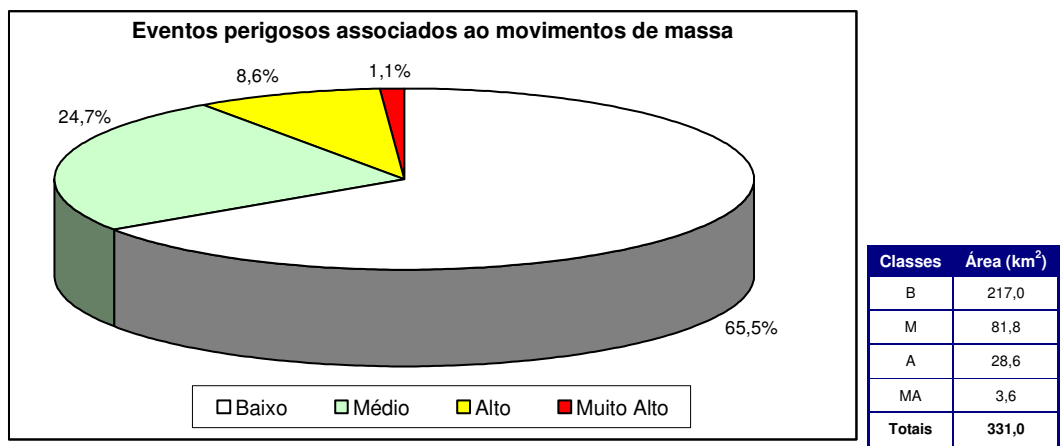
Logo, a partir da carta da Figura 5.4, investigou-se em quais áreas seriam possíveis aplicar a metodologia determinística *SHALSTAB*. Além desta carta, ratificou-se a escolha do local com a análise de um banco de dados de ocorrências de escorregamentos para BH.

Corroborando com a decisão de escolha para a localidade, observa-se pela Figura 5.4 que o bairro Conjunto Taquaril (quadrículas G8, G9, H8 e H9 – divisa com município de Sabará), localizado na regional Leste, destacou-se pelos níveis de intensidade “alto” e “muito alto” de susceptibilidade, com 56% e 17% da área, respectivamente.

Na Figura 5.12 tem-se uma comparação das classes envolvidas na avaliação das susceptibilidades aos movimentos de massa, em percentuais, antes e após a aplicação da matriz uso e ocupação do solo e respectivas áreas em km<sup>2</sup>.



a) Antes da aplicação da matriz uso e ocupação, com base na Figura 5.3.



b) Após aplicação da matriz uso e ocupação, com base na Figura 5.4.

Figura 5.12 – Comparações entre a modelagem heurística original e modificada.

Somando as classes “baixo” e “médio” da Figura 5.12a, tem-se aproximadamente 95%, ilustrando a pouca susceptibilidade ao evento natural em BH, porém com cerca de 0,4% para a classe “muito alto”.

Segundo os critérios adotados no trabalho para a definição do grau de probabilidade (Tabela 3.15), e para a classe de maior percentagem da Figura 5.12a igual a “médio”, tem-se que mantidas as condições existentes nestas classes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.

Observando a Figura 5.12b, houve um aumento percentual considerável da classe “baixo” (de 30% para 65%) em virtude da alta consolidação urbana da capital mineira, e um aumento percentual das classes “alto” e “muito alto”.

Observe ainda que apesar da classe “muito alto” ser ainda percentualmente baixa (1,1%) (porém com aumento de mais de 100% da situação anterior), torna-se uma preocupação para os órgãos de governo, uma vez que estes locais, geralmente, se encontram com alta densidade demográfica.

Também com base nos critérios da Tabela 3.15, nos locais classificados como “alto” e “muito alto” é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas. Ainda, nestes locais, as evidências de instabilidade já estão presentes como trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, etc.

## 5.2 – PRODUTOS DO MÉTODO DETERMÍNISTICO

Dentre as regiões que apresentaram maior susceptibilidade, considerando a carta da Figura 5.3, identificou-se a área que atendesse as prerrogativas do método determinístico *SHALSTAB* (Item 3.4 e Anexo I). Este local está ilustrado nas Figuras 3.26 e 3.27.

Os documentos cartográficos produzidos são:

- a) Carta da relação “  $h/Z$  ”, com base na Equação I.9;
- b) Carta da relação “  $h/Z$  ”, com base na Equação I.17, ou seja, carta de contribuição do fluxo subsuperficial pela relação “  $a/b$  ” e “  $a/(b \cdot \text{sen } i)$  ”;
- c) Carta de susceptibilidade aos escorregamentos translacionais rasos, com valores para a razão “  $\log q/T$  ”, com base na Equação I.19 e fixando alguns parâmetros; e
- d) Cartas de susceptibilidades, com valores para a razão “  $\log q/T$  ”, a partir de alguns cenários.

### a) Carta da relação “ $h/z$ ” do modelo do talude infinito

Na Figura 5.13, têm-se os valores de “  $h/Z$  ”, com base na Equação I.9, Figura I.4 e Tabela I.1.

A equação I.9 relaciona a densidade natural do solo, ângulo de atrito e a declividade, para as situações de estabilidade.

Para a carta em questão, considerou-se para o local a densidade e ângulo de atrito como constantes, ficando a relação “  $h/Z$  ” dependente apenas da parâmetro topográfico da declividade.

Desta forma, adotou-se para construção desta carta os seguintes valores:

- $\gamma_{\text{nat}} = 1,6 \text{ t/m}^3$ ;
- $\phi' = 34^\circ$ ;
- “  $i$  ”, a partir do MDT, obtido pela Figura 3.29.

Nota-se pela Tabela I.1, que os valores de “  $h/Z$  ” para o “incondicionalmente estável” excedem a unidade. Esta carta reflete a importância da declividade local, ou seja, em locais mais íngremes, menor será a quantidade de água para provocar instabilidade.

Ainda, observa-se que regiões de baixa declividade, mesmo estando saturadas (“  $h/Z > 1$  ”), são mapeadas como “incondicionalmente estáveis”.

Porém, para uma determinada chuva, o padrão atual de “  $h/Z$  ” será diferente do apresentado nessa carta, devido ao fluxo subsuperficial. O fluxo subsuperficial será divergente nos topos e encostas convexas, diminuindo a razão “  $h/Z$  ”; e enquanto convergente nos vales e talwegues, aumentado a razão “  $h/Z$  ”.

Os locais mapeados como “incondicionalmente instável” ocorrerão, por exemplo, quando a camada subsuperficial rasa estiver saturada. Logo, analisando-se a carta da Figura 5.13, observa-se o que é necessário para causar a instabilidade apenas considerando o aspecto topográfico, ficando ainda na dependência de um modelo hidrológico para produzir uma acurácia na relação “  $h/Z$  ”, a ser discutido adiante.

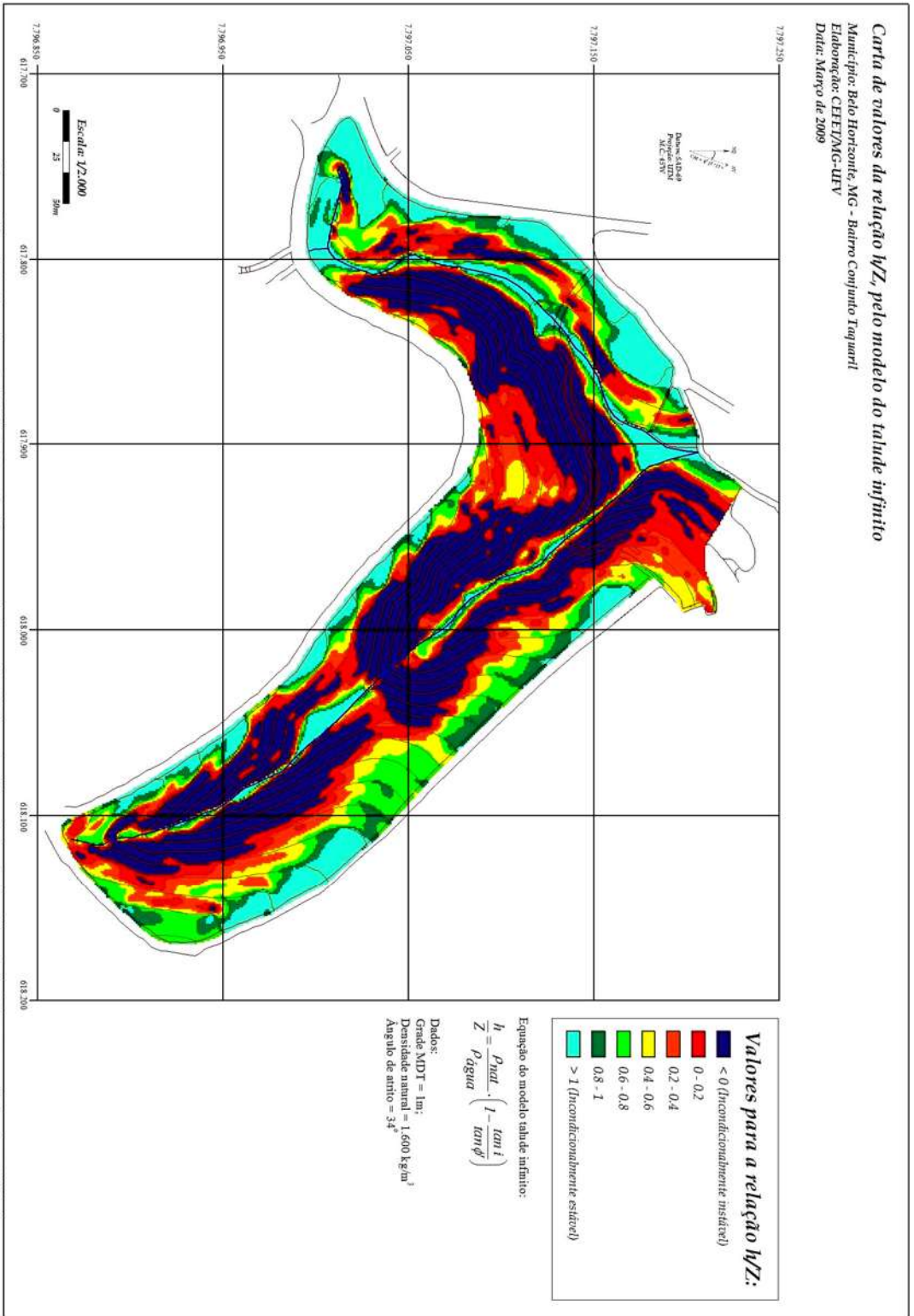


Figura 5.13 – Carta dos valores de “ $h/Z$ ” da Equação 1.9, em que relaciona a densidade natural do solo, ângulo de atrito e declividade e as condições de estabilidade.



**b) Carta da relação “  $h/z$  ” do modelo hidrológico**

Nas Figuras 5.14 e 5.15, aplicam-se os estudos hidrológicos sugeridos por O'Loughlin (1986), ilustrados pela equação I.17, no Anexo I.

A interferência topográfica no modelo hidrológico é representada pelo termo “ $(a / (b \cdot \text{sen } i))$ ” da Equação I.17 e captura os efeitos da topografia no fluxo da água, especificamente na concentração ou dispersão do escoamento.

Considerando os “*hollows*”, ou seja, uma maior área drenada “ $a$ ” para uma célula “ $b$ ”, reflete-se em maior relação “ $h/Z$ ”, com conseqüente aumento das poro pressões, e os locais serão mapeados como menos estáveis.

Na Figura 5.14, a relação topográfica “ $a/b$ ” é claramente mais alta nos “*hollows*” e fundos de vale, ao longo da drenagem natural.

Na Figura 5.15, adicionou-se o termo “ $\text{sen } i$ ”, da equação I.17.

Comparando as Figuras 5.14 e 5.15, observa-se que as relações são dominadas pela razão “ $a/b$ ” em detrimento dos valores de “ $\text{sen } i$ ”.

Considerando que o termo “ $\text{sen } i$ ” sempre será menor que a unidade, este elevará os valores da relação topográfica “ $a/b$ ”, e conseqüentemente, as áreas planas e com drenagens modestas, terão valores de “ $h/Z$ ” mais elevados, quando comparados com declividades mais íngremes.

Na Figura 5.16 incorpora-se o termo “ $q/T$ ” da equação I.17. Esta figura mostra a relação de “ $h/Z$ ” em função de diferentes valores de “ $q/T$ ”.

As cartas da Figura 5.16 não apresentam a relação de “ $h/Z$ ” para uma possível ruptura, mas a proporção da coluna de solo possivelmente saturada para um determinado evento hidrológico, caracterizado por uma precipitação “ $q$ ” e a transmissividade “ $T$ ” do local.

Logo, fixando-se o valor da transmissividade “ $T$ ”, que é função da permeabilidade e espessura do solo (Equação I.16), podem-se calcular valores de chuvas “ $q$ ” para valores típicos de “ $\log q/T$ ”, apresentada pela Tabela 5.1.

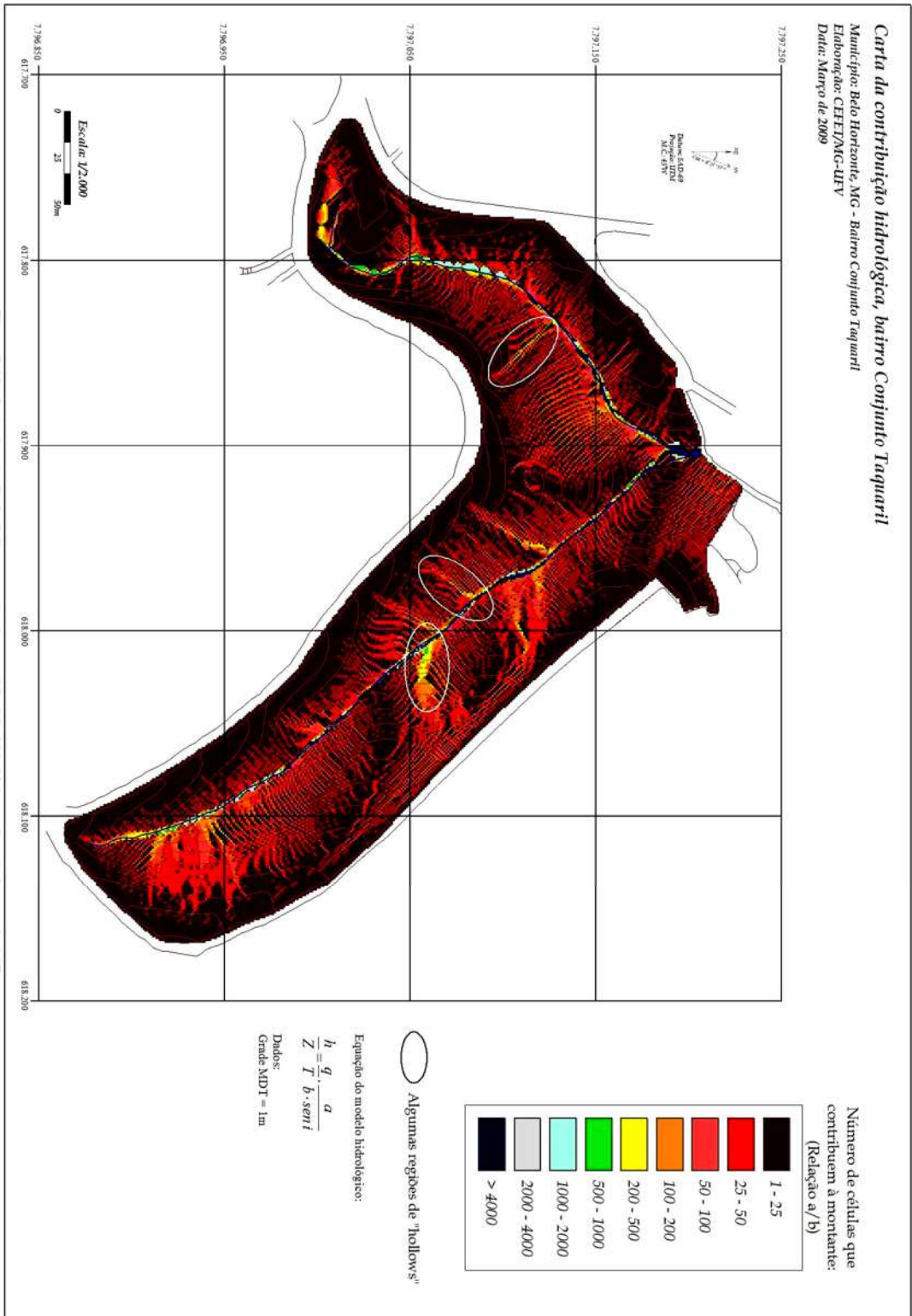


Figura 5.14 - Carta da relação "a/b", apresentando a contribuição hidrológica, referente à equação 1.17.

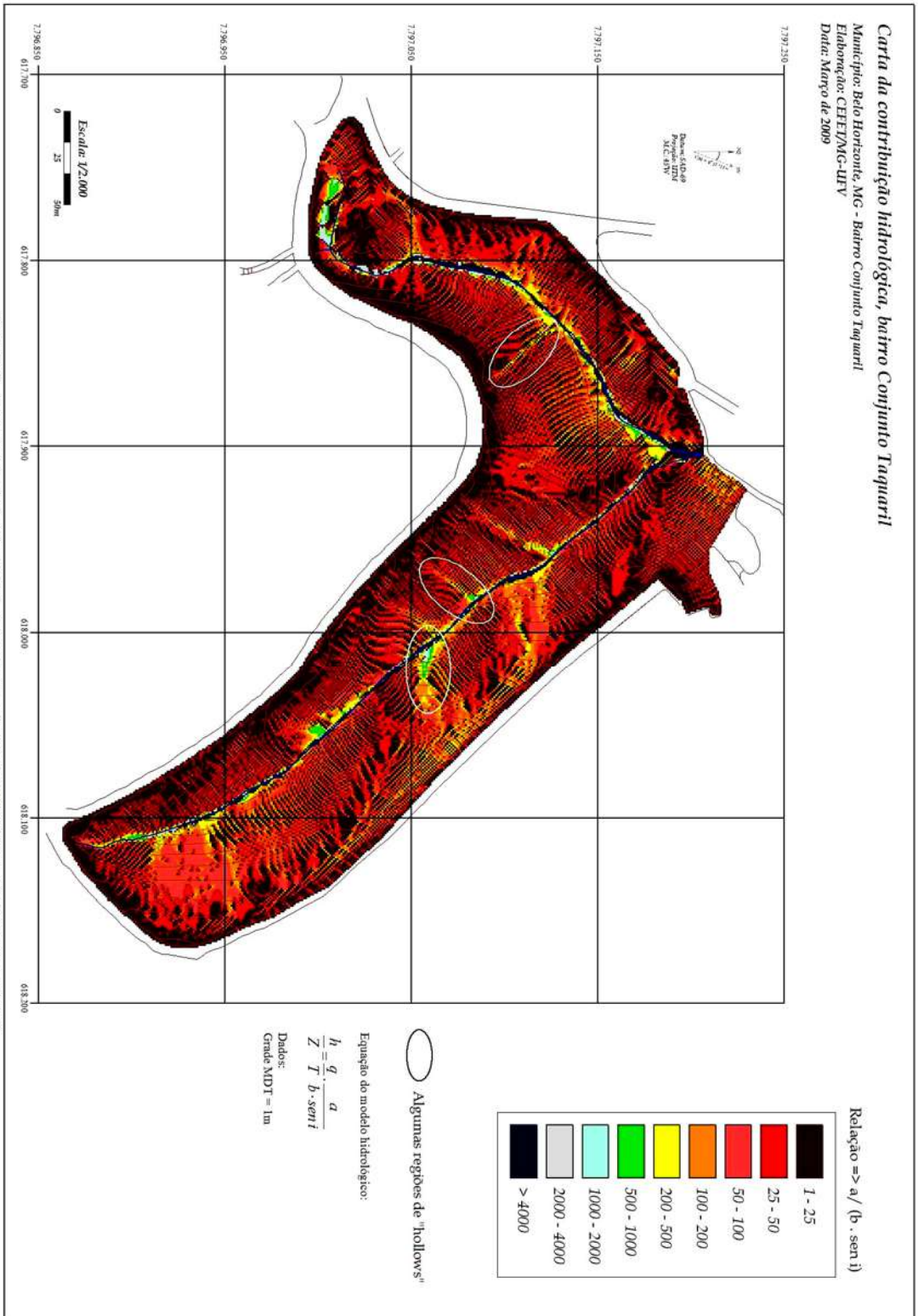


Figura 5.15 - Carta da relação "a / (b . sen i)", apresentando a contribuição hidrológica, referente à equação 1.17.

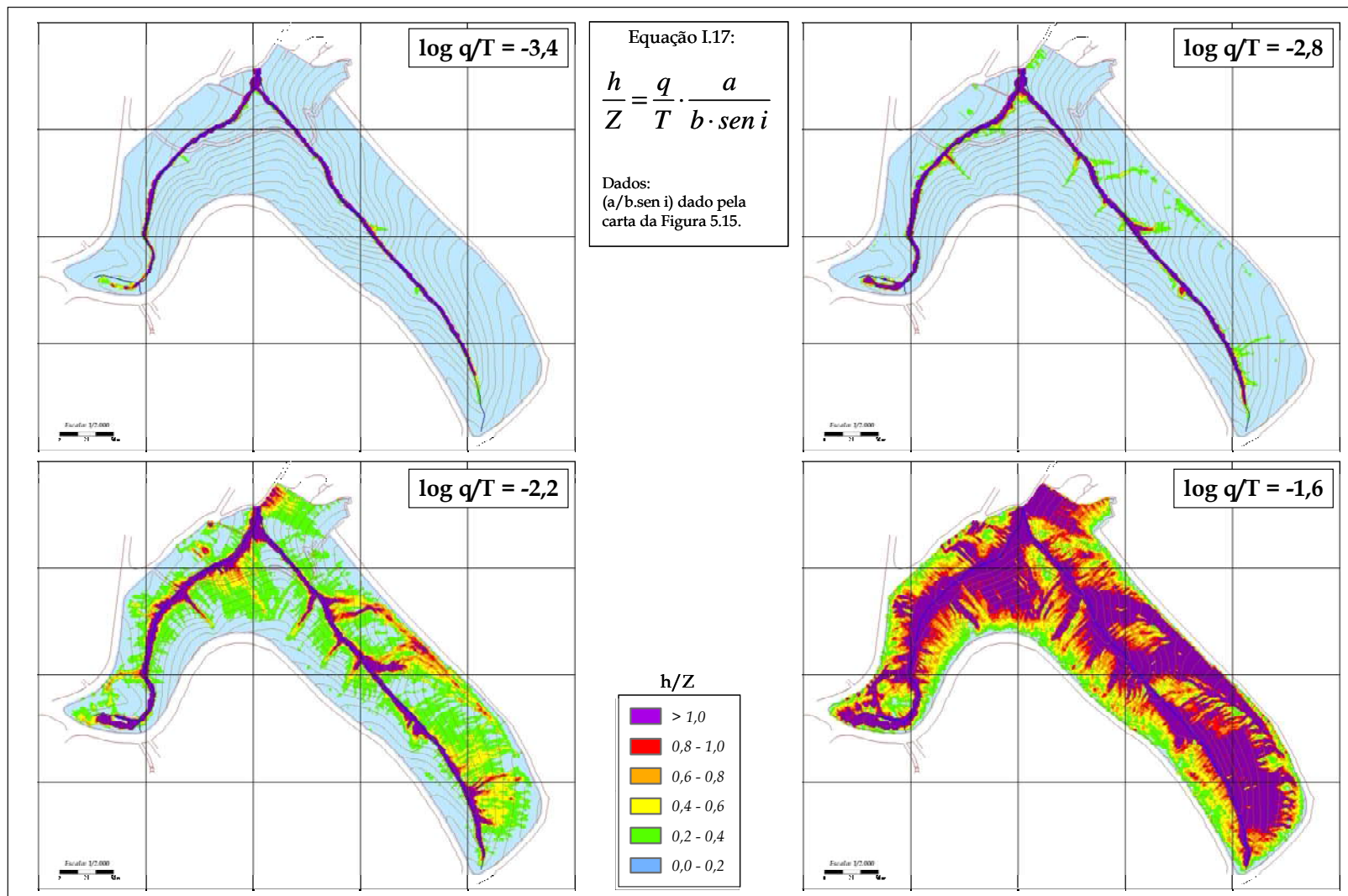


Figura 5.16 – Relação “h/Z” em função da variação de valores típicos de “log q/T”.

Tabela 5.1 – Valores de chuva “ $q$ ” para valores típicos de “ $\log q/T$ ” e “ $T$ ” fixo.

$\log (q/T)$ (1/m)	$K$ (permeabilidade) (cm/s)	$h$ (espessura) (m)	$T$ ( $m^2/dia$ )	Chuva ( $q$ ) (mm/dia)
- 3,4	$10^{-4}$	1,5	0,13	0,05
	$10^{-3}$		1,30	0,52
	$10^{-2}$		13,00	5,20
- 2,8	$10^{-4}$		0,13	0,21
	$10^{-3}$		1,30	2,05
	$10^{-2}$		13,00	20,54
- 2,2	$10^{-4}$		0,13	0,82
	$10^{-3}$		1,30	8,18
	$10^{-2}$		13,00	81,78
- 1,6	$10^{-4}$		0,13	3,26
	$10^{-3}$		1,30	32,55
	$10^{-2}$		13,00	325,54

Observe que adota-se o logaritmo para razão “ $q/T$ ”, uma vez que este é um número relativamente pequeno. Na Tabela 5.2 apresentam-se as conversões de valores típicos de: “ $\log q/T$ ”, “ $q/T$ ” e “ $T/q$ ”.

Tabela 5.2 – Valores de “ $\log q/T$ ” e conversões.

$\log (q/T)$ (1/m)	$q/T$ (1/m)	$T/q$ (m)
- 3,4	0,000398	2513
- 3,1	0,000794	1259
- 2,8	0,001585	631
- 2,5	0,003162	316
- 2,2	0,006310	158
- 1,9	0,012589	79
- 1,6	0,025119	40

As cartas da Figura 5.16 foram construídas com um incremento de 0,6 no valor de “ $\log q/T$ ”, o que equivale em aproximadamente quadruplicar o valor da relação “ $q/T$ ”.

Consequentemente, ao assumir que a transmissividade local é a mesma em todas as cartas, significa um efeito de quadruplicar a precipitação no local para observar uma possível saturação (“ $h/Z > 1$ ”). Por exemplo, a chuva crítica da última carta

(relação “  $\log q/T$  ” igual -1,6) é 64 vezes mais intensa que na primeira carta (relação “  $\log q/T$  ” igual a -3,4).

Observe que, em razão da transmissividade ser muito baixa num local (baixas permeabilidades), teoricamente pequenas quantidades de chuva seriam suficientes (em volume) para preencher os vazios deste solo e causar a saturação de algumas áreas, para valores de “  $\log q/T$  ” tomados como constantes.

Porém as situações de saturação apresentadas na Figura 5.16 (relação “  $h/Z$  ”) não são conclusivas, pois considerando uma baixa permeabilidade de um local ( $10^{-4}$  cm/s, por exemplo), seriam necessários muito dias para a efetiva saturação.

Ainda, considerando o exemplo acima, em regiões íngremes e de baixa permeabilidade, seria privilegiado o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Também, o índice pluviométrico deve ser analisada sob o aspecto de intensidade e frequência.

Na Figura 5.17 apresenta-se uma localidade da área do estudo de caso em que houve ruptura em 2003 (Parizzi, 2004). A taxa de precipitação naquele dia foi de 217 mm, somada aos 65 mm dos 3 dias anteriores, totalizando 282 mm.

Outro fator importante a ser considerado é a água que já se encontra no interior do solo (teor de umidade), precedente a uma chuva. Sendo a permeabilidade muito baixa para um local, a água permanece por longo período em seus poros. Por exemplo, na ruptura observada na Figura 5.17, a umidade precedente no solo certamente contribuiu para uma possível saturação daquele solo.

Reforçam-se aqui os resultados obtidos por Tatizana (1987) para a Serra do Mar, em que as intensidades horárias pluviométricas críticas para deflagração de escorregamentos decresciam exponencialmente com o aumento da precipitação acumulada nos dias anteriores ao evento.





Figura 5.17 – Escorregamento ocorrido em janeiro de 2003, em localidade do estudo de caso – Foto 1.

Fonte: Parizzi (2004) e Google Earth (2009).

Ainda, observando a foto da Figura 5.17, observa-se que a vegetação pode também ter contribuído como efeito adverso, em função de um maior volume de água armazenado, tornando-se uma sobrecarga no talude.

Enfim, uma soma de fatores pode estabelecer uma relação complexa para a saturação solo, com conseqüente diminuição da coesão aparente, devendo ser investigado com precaução cada caso específico.

### c) Carta de susceptibilidade aos escorregamentos translacionais rasos

Na Figura I.10 do Anexo I apresentou-se uma rotina, em Excel, para análise das condições de estabilidade de um ponto, com base na equações *SHALSTAB* (Equações I.19 e I.20).

A Figura 5.18 apresenta as condições de estabilidade para um ponto, para variação da declividade “*i*” e razão “*a/b*”, com base nos seguintes parâmetros:

- $\rho_{\text{nat}} = 1,6 \text{ g/cm}^3$ ;
- $\phi' = 34^\circ$ ; e
- $\log q/T (1/m) = - 2,2$  (ou  $T/q (m) = 158$ ).

O ponto ilustrado tem “ $i = 20^\circ$ ” e “ $a/b = 500 \text{ m}$ ”, e para este exemplo encontra-se numa região caracterizada por “instável e saturado”.

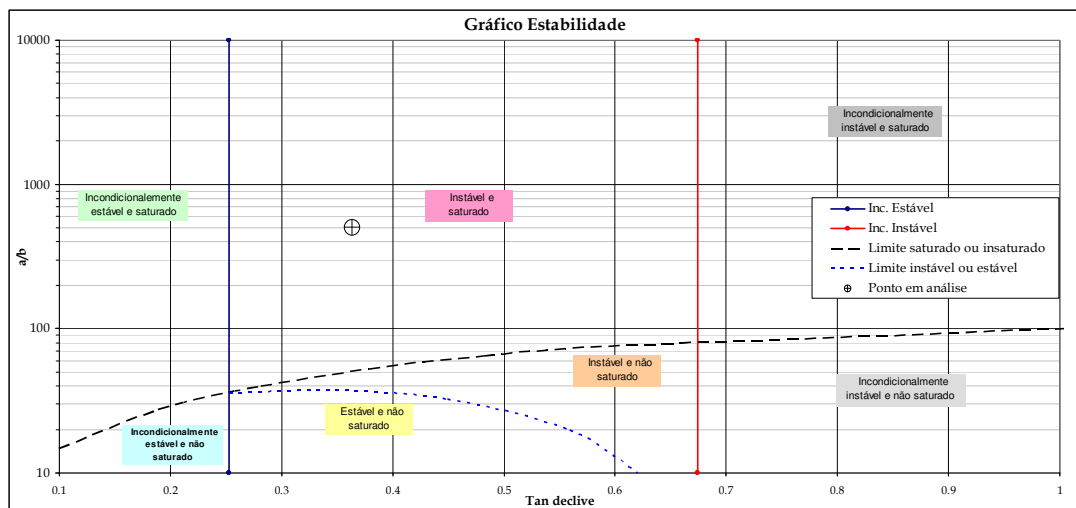


Figura 5.18 – Situações de estabilidade para  $\rho_{\text{nat}} = 1,6 \text{ g/cm}^3$ ,  $\phi' = 34^\circ$  e  $\log q/T (1/m) = - 2,2$ .

Na Figura 5.19, têm-se as condições de estabilidade, variando-se os valores de “ $\log q/T$ ”, e parâmetros geotécnicos citados acima.

Observe que as áreas dos “Incondicionalmente instável” e “Incondicionalmente estável” são mantidas inalteradas. À proporção que a razão “ $\log q/T$ ” cresce vai aumentando as regiões do “instável”, em detrimento do “estável”.

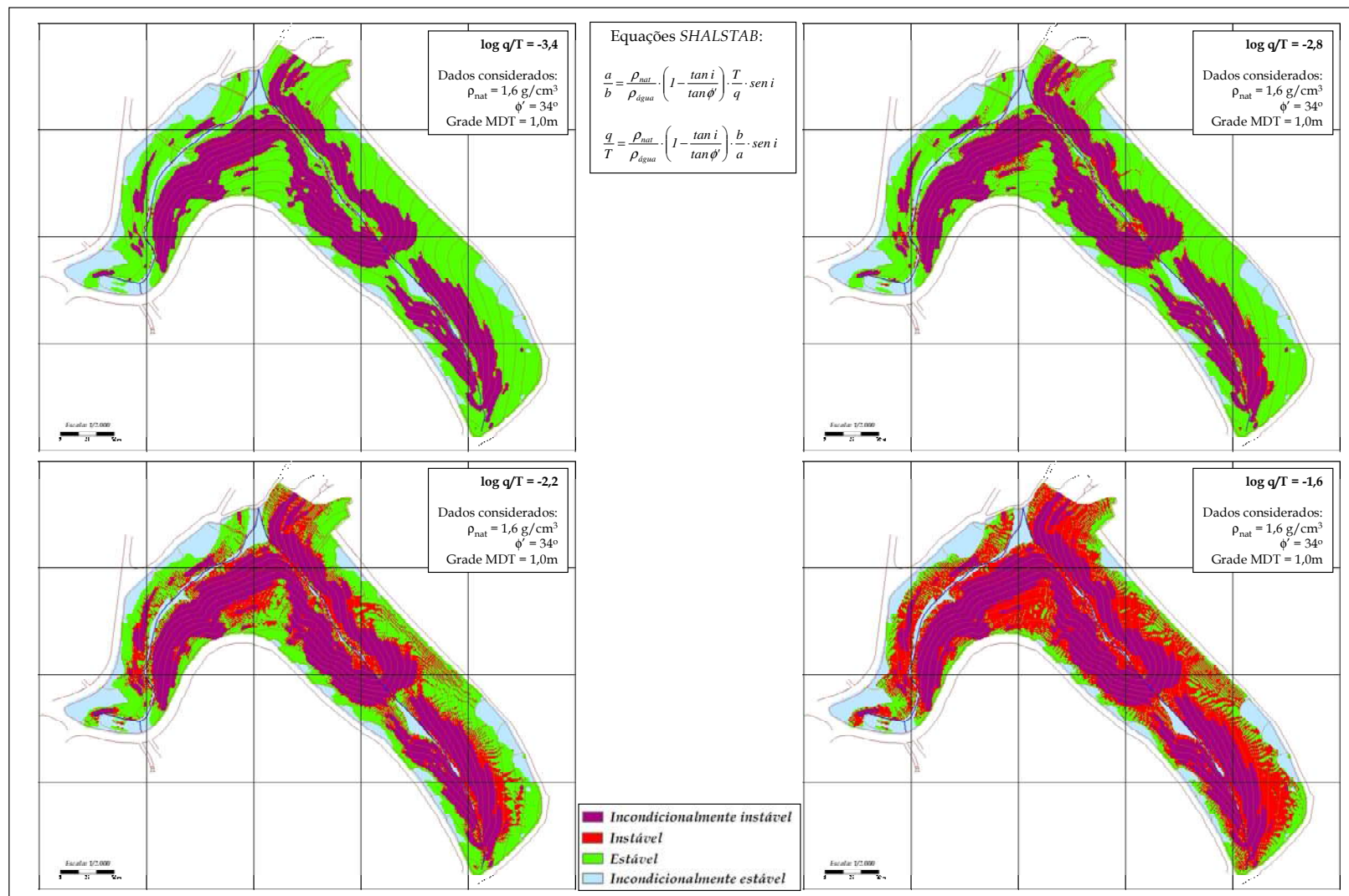


Figura 5.19 – Condições de estabilidade, com variação de valores típicos de "log q/T".

**d) Cartas de susceptibilidades, com valores para a razão “  $\log q/T$  ”, a partir de alguns cenários**

A equação I.19 do Anexo I combinou os modelos de talude infinito e hidrológico, e possui três parâmetros topográficos (“ $i$ ”, “ $a$ ” e “ $b$ ”) definidos pelo MDT e três condições do solo (“ $\rho$ ”, “ $\phi$ ” e “ $T$ ”), além da pluviosidade (“ $q$ ”).

Nesse Item, para a aplicação do modelo *SHALSTAB*, propõe-se uma simulação através de possíveis cenários aplicados ao estudo de caso. Considerou-se para tal que a topografia local será inalterada, mantendo-se para as simulações o mesmo modelo digital de terrenos.

Para os parâmetros geotécnicos, com base nos ensaios de laboratório, propõem-se as seguintes variações:

**a) Ângulo de atrito**

Adotaram-se os valores de 31° e 34°, com base no menor valor encontrado e na média dos valores obtidos nos ensaios de cisalhamento direto (Anexo II e Tabela 3.11). A decisão de dois valores de ângulo de atrito permite avaliar e comparar a importância deste parâmetro no modelo *SHALSTAB*, para as áreas de estabilidade.

**b) Pesos específicos**

Adotaram-se os valores para o solo saturado ( $\gamma_{\text{sat}} = 1,8 \text{ t/m}^3$ ) e para o solo natural (maior frequência igual a  $\gamma_{\text{sat}} = 1,6 \text{ t/m}^3$ ) (Tabela 3.11). Valores menores que o “natural” adotado são pouco prováveis.

**c) Coesão**

Adotaram-se quatro valores característicos:  $c = 0 \text{ kPa}$ ,  $c = 3 \text{ kPa}$ ,  $c = 6 \text{ kPa}$  e  $c = 9 \text{ kPa}$ . O primeiro valor refere-se à possibilidade de ausência de coesão do solo. Esta situação simula o cenário mais crítico considerando este parâmetro e a estabilidade.

O segundo valor de coesão refere-se ao obtido por Parizzi (2004), em estudo de retroanálise, após a ruptura ocorrida em 2003 (Tabela 3.20). O último valor refere-se à resposta do modelo pela estabilidade de praticamente todo o local em estudo.

**d) Espessura dos depósitos superficiais**

Pela observação de campo, adotou-se a profundidade média dos depósitos superficiais igual a 1,5 m.

Logo, destas composições originaram-se dezesseis cenários com cálculo da razão “  $\log q/T$  ”, sintetizados pela Figura 5.20. Observa-se que a pior situação simulada para a estabilidade está representada pelo cenário 1, e a melhor situação pelo cenário 16.

Os títulos dos arquivos e das legendas gerados automaticamente pela rotina *SHALSTAB-ArcView*, traduz os parâmetros geotécnicos adotados na simulação. Por exemplo, para o cenário 1 tem-se:

*“cenário1\_31\_1800\_0\_1.5”, ou seja, ângulo de atrito igual a 31°; densidade do solo igual a 1.800 kg/m³; coesão igual a 0 kPa e espessura igual a 1,5 m.*

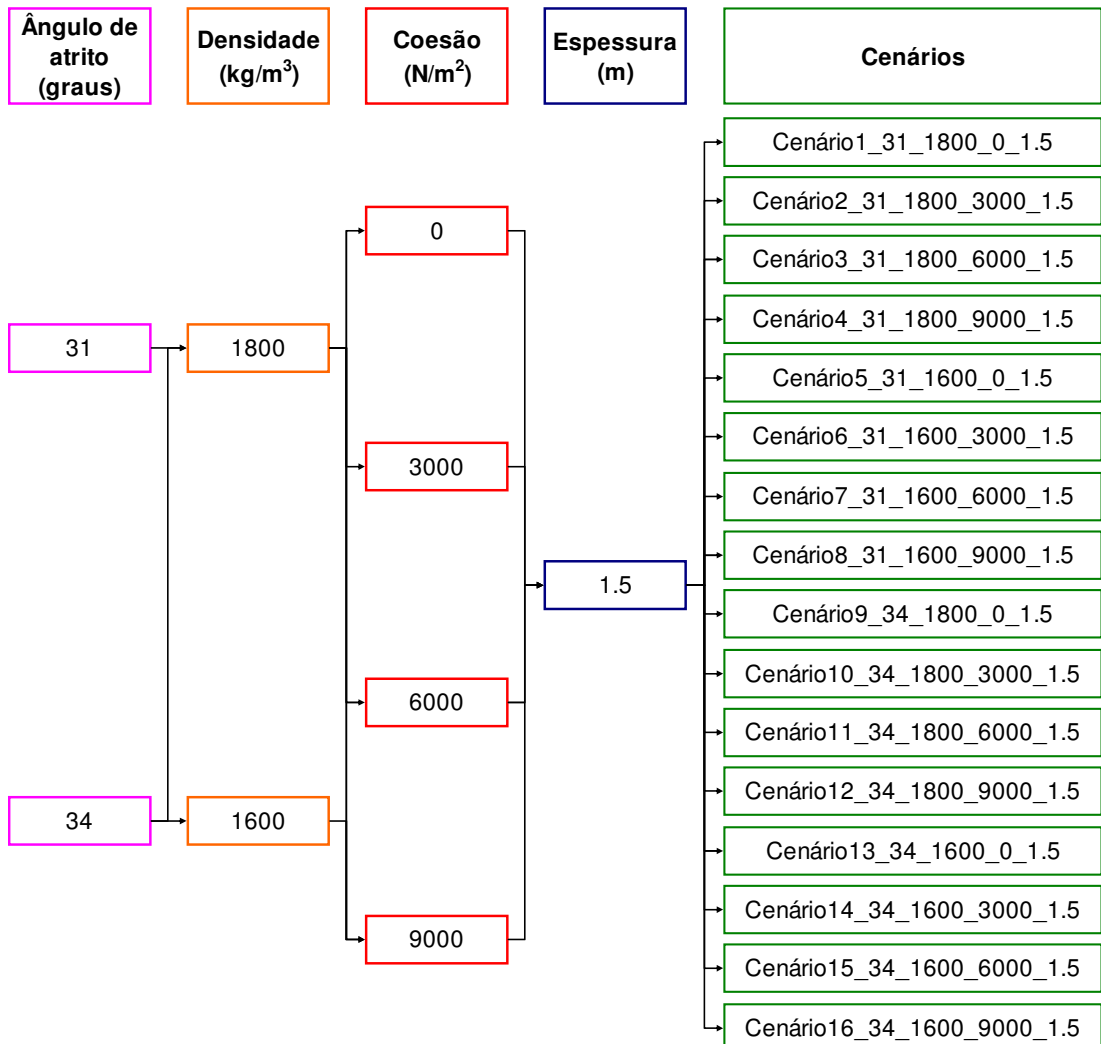
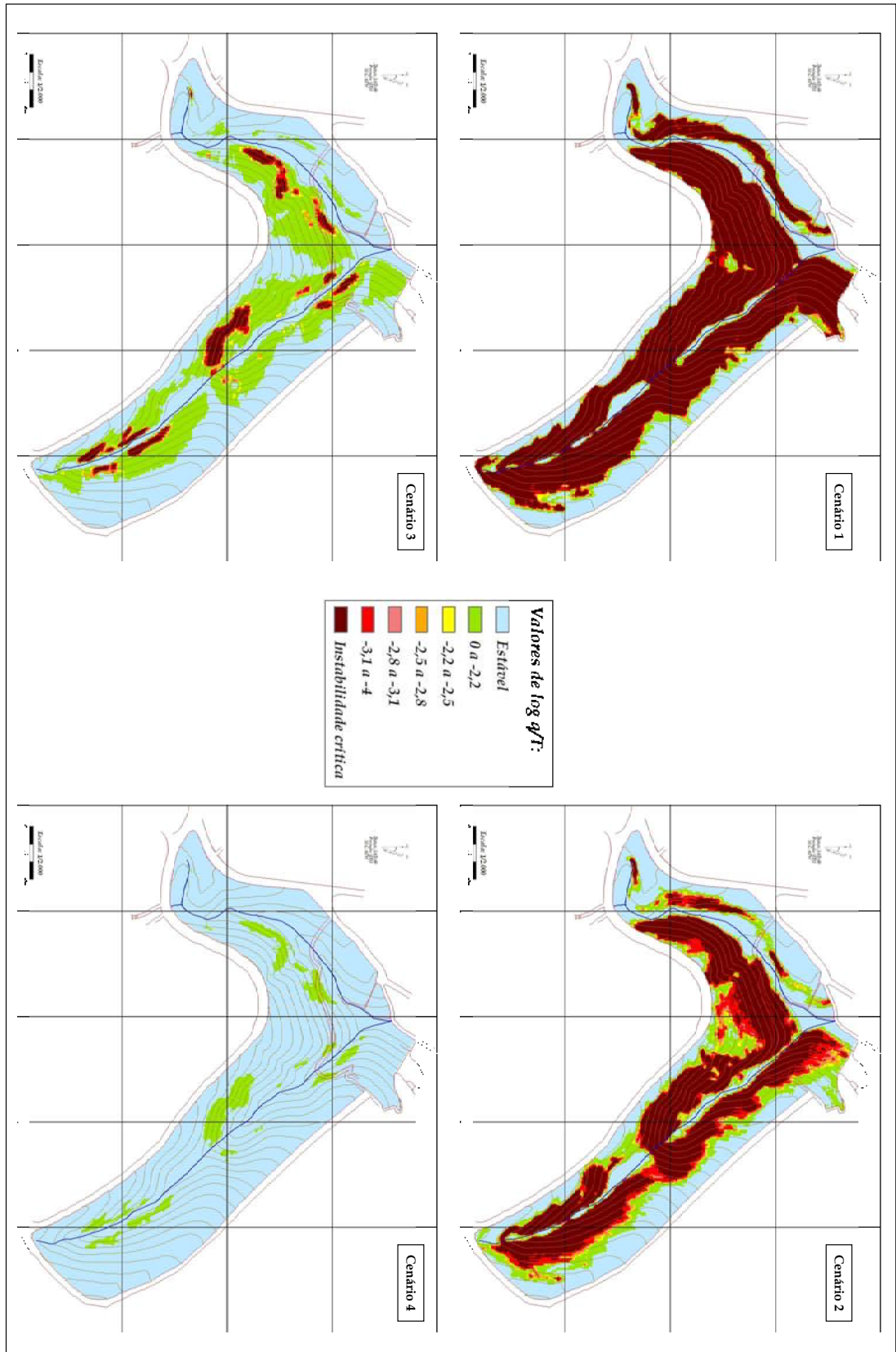


Figura 5.20 – Composição dos cenários para a simulação *SHALSTAB*.







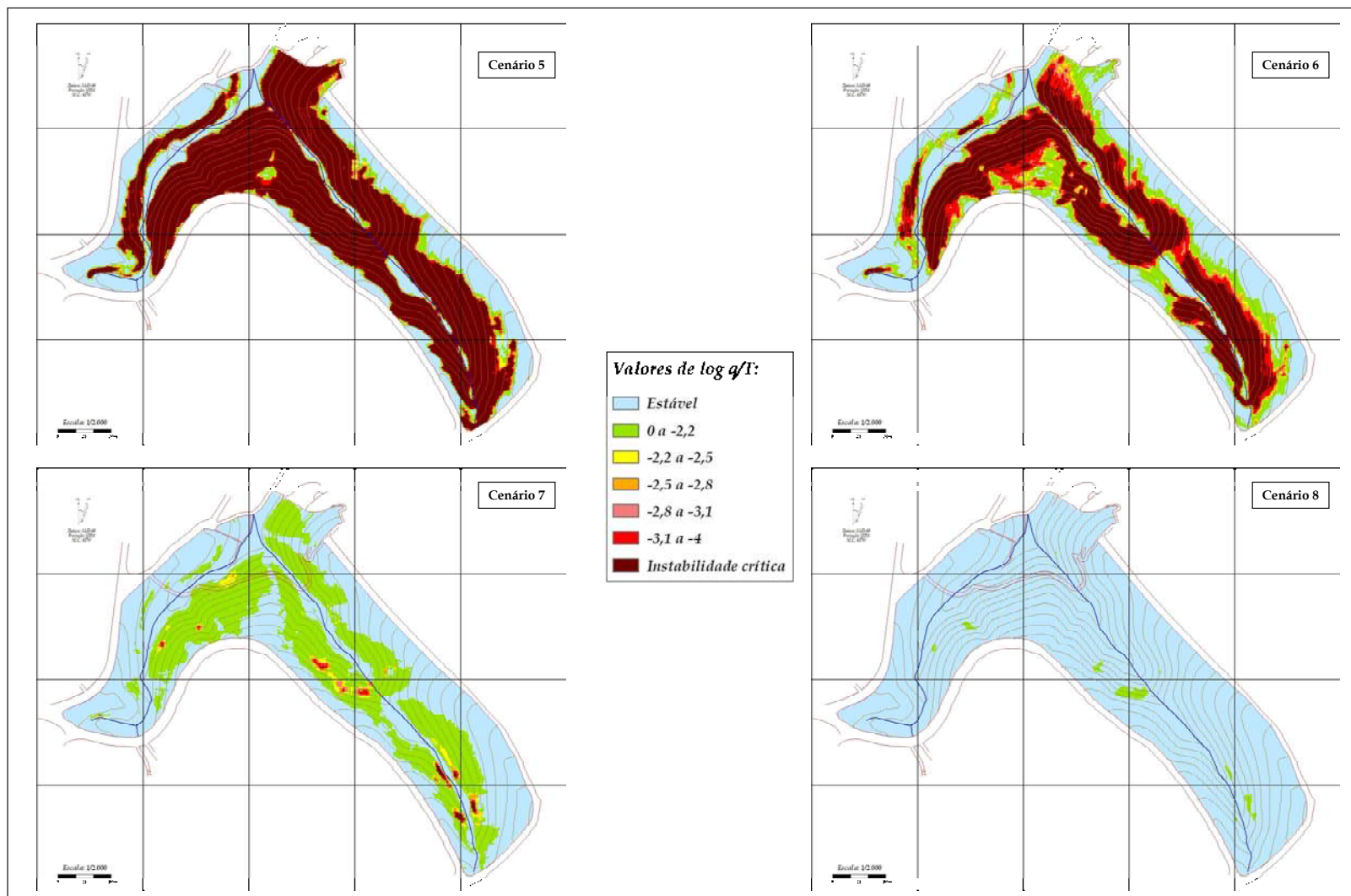


Figura 5.22 – Carta de eventos dos cenários 5, 6, 7 e 8, pela modelagem SHALSTAB.

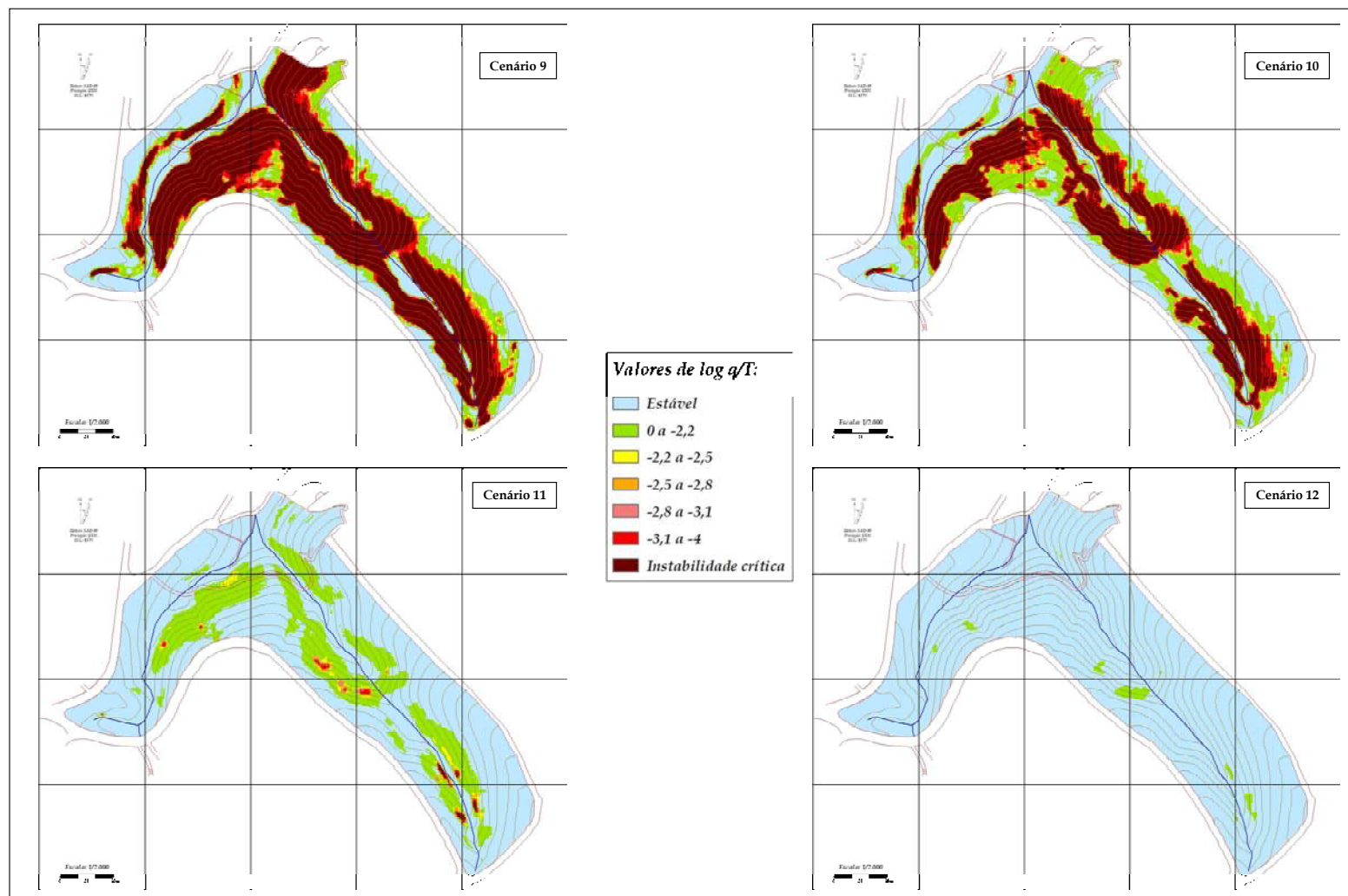


Figura 5.23 – Carta de eventos dos cenários 9, 10, 11 e 12, pela modelagem SHALSTAB.

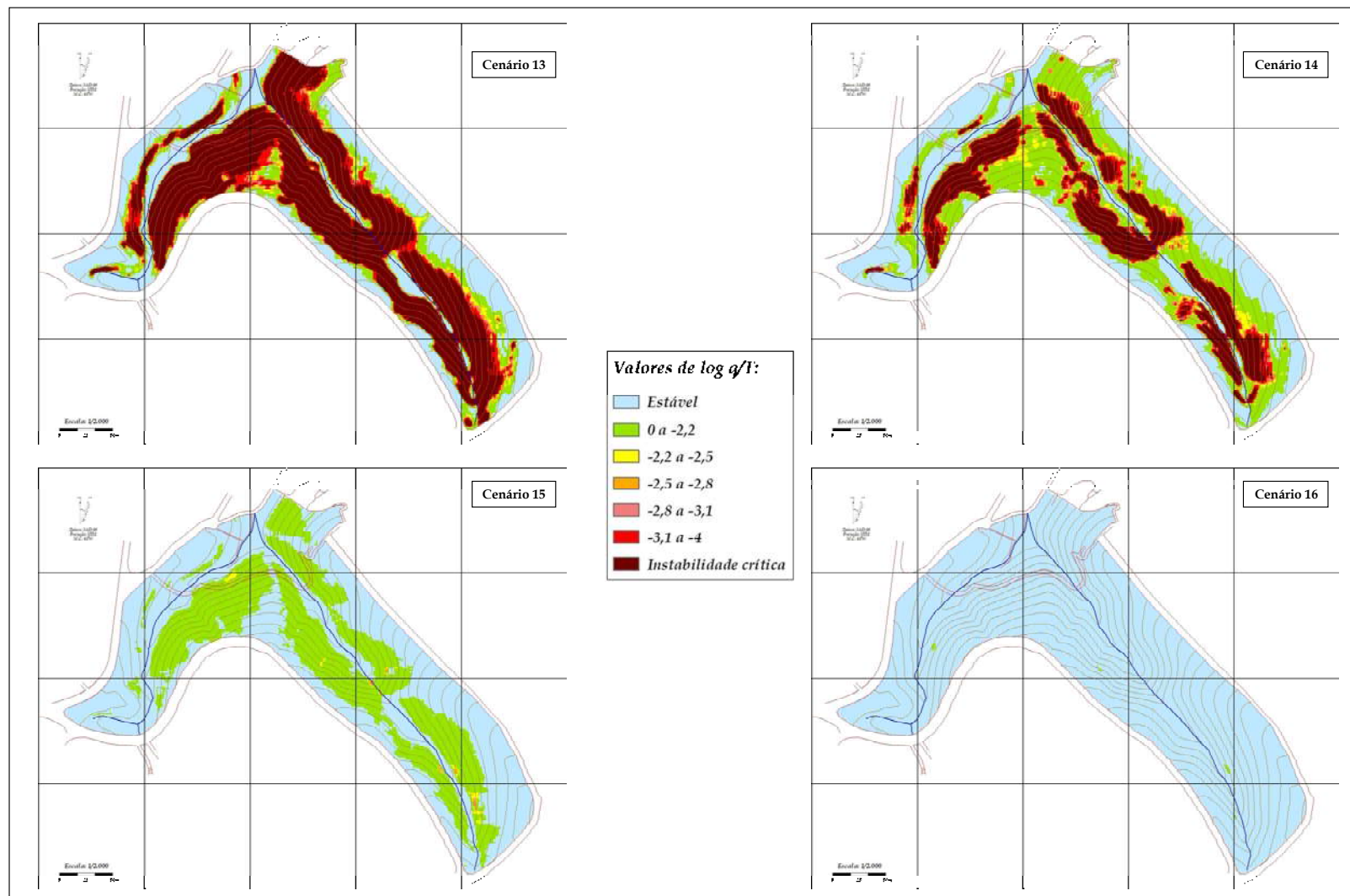


Figura 5.24 – Carta de eventos dos cenários 13, 14, 15 e 16, pela modelagem SHALSTAB.

Na Tabela 5.3 têm-se os valores percentuais de cada classe de “  $\log q/T$  ”, para os diferentes cenários.

Tabela 5.3 – Valores percentuais das classes segundo os cenários estabelecidos pela Figura 5.20.

Cenários	Classes						
	Estável	0 a -2,2	-2,2 a -2,5	-2,5 a -2,8	-2,8 a -3,1	-3,1 a -4	Inst. crítica
1	27,8%	6,5%	1,2%	0,9%	0,9%	2,7%	60,1%
2	35,6%	15,1%	2,3%	2,2%	2,3%	8,0%	34,5%
3	60,8%	30,6%	1,3%	1,0%	0,8%	1,8%	3,8%
4	93,1%	6,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	27,8%	6,5%	1,1%	0,9%	0,9%	2,8%	60,1%
6	35,5%	15,2%	2,3%	2,3%	2,4%	8,0%	34,2%
7	61,1%	36,1%	1,3%	0,5%	0,3%	0,4%	0,2%
8	99,0%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9	30,0%	11,4%	2,0%	1,7%	1,7%	5,8%	47,3%
10	41,0%	18,4%	2,0%	1,9%	1,8%	5,9%	28,9%
11	76,0%	21,9%	0,9%	0,4%	0,3%	0,4%	0,2%
12	98,8%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
13	29,8%	11,2%	2,1%	1,7%	1,7%	5,9%	47,5%
14	36,7%	27,7%	3,5%	2,3%	2,1%	5,6%	22,1%
15	61,9%	37,5%	0,4%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
16	99,9%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Nas cartas dos vários cenários (Figuras 5.21 a 5.24), observa-se que as zonas instáveis/estáveis aos escorregamentos mostram os níveis de instabilidade expressos por meio da razão “  $\log q/T$  ”.

A classe com menor relação “  $\log q/T$  ”, é a mais próxima do incondicionalmente instável. Estas ficaram localizadas nas porções mais íngremes e côncavas.

As áreas mapeadas como “estáveis”, foram localizadas nas baixas e médias declividades, incluindo aquelas em que possivelmente os valores do ângulo de atrito do solo estavam maiores que a declividade, regiões de baixa concentração de fluxo subsuperficial e proximidades dos divisores de água.

As cartas produzidas devem ser entendidas e tomadas como “verdadeiras”, em função da razão “  $\log q/T$  ” ser confirmada. Por exemplo, com base na Tabela 5.2, pode-se relacionar a razão “  $\log q/T$  ” para uma determinada pluviosidade “  $q$  ” ou uma determinada transmissividade “  $T$  ”.

Logo, dentro da expectativa de mapear os graus de estabilidade, cabe ao pesquisador fixar um dos termos da equação 1.19 (“ $q$ ” ou “ $T$ ”) para detectar as áreas de possíveis ocorrências do evento em questão, neste caso, de movimentos de massas translacionais rasos.

Na Figura 5.25 tem-se uma comparação entre os vários cenários mapeados.

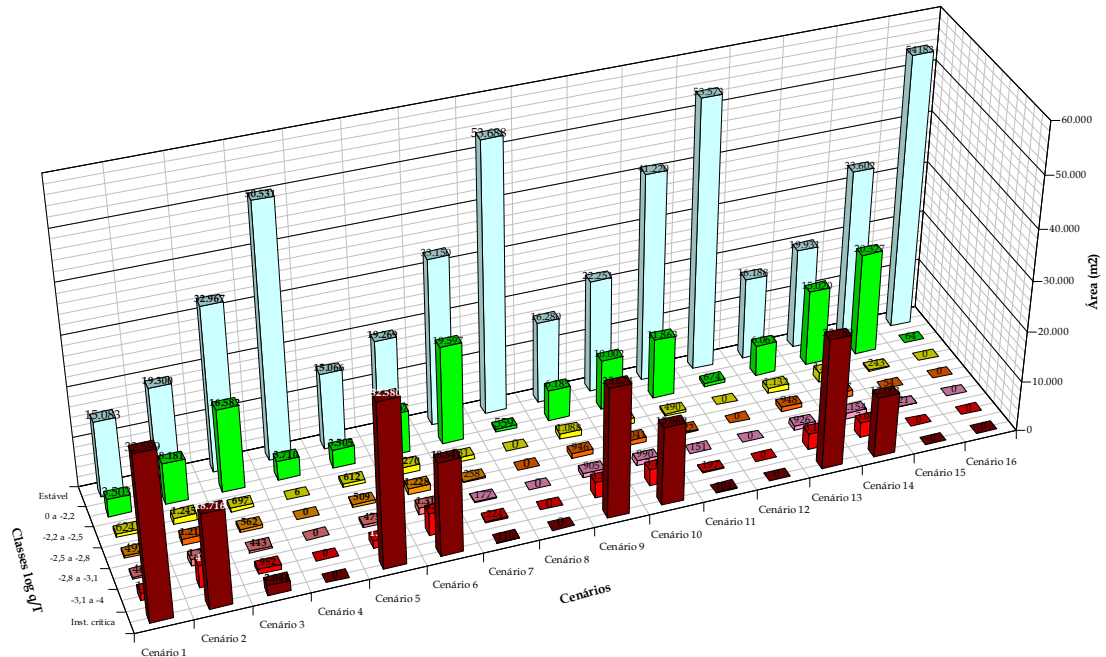


Figura 5.25 – Histograma dos vários cenários estabelecidos pela Figura 5.20.

Traçando uma análise comparativa entre os cenários e especificamente sobre o cenário 10, pode-se afirmar que:

#### a) Ao aumentar a coesão

Ao considerar um aumento da coesão (entre os cenários 1, 2, 3 e 4, ou entre os cenários 5, 6, 7 e 8, etc.), como era esperado, observou-se um aumento das áreas das classes que proporcionam mais estabilidade.

Por exemplo, do cenário 1 para o cenário 2, houve um aumento de aproximadamente 8% das áreas classificadas como “estáveis”. Do cenário 2 ao 3, observa-se um aumento de 25%, ao dobrar o valor da coesão. Isto demonstra o papel desempenhado pela diminuição da coesão do solo para a deflagração de movimentos de massa.

Também se explica a alta incidência dos escorregamentos ocorridos no bairro, proporcionado pela baixa coesão dos aterros. Os aterros verificados no campo, em geral, encontram-se com fragmentos de variados tamanhos de xisto/filito, geralmente orientados de forma caótica, e ainda incorporado de material orgânico, lixo e entulho.

#### **b) Ao diminuir a densidade do solo**

Esta propriedade busca simular o grau de susceptibilidade ao evento em função do teor de umidade, de próxima ao natural a saturada. Observe que este fator pode ser relacionado, entre outros parâmetros, com a transmissividade e pluviosidade (intensidade e frequência) local.

Ao considerar a diminuição da massa específica (de saturado para natural) (cenários 1 e 5; 2 e 6; 3 e 7; etc.), observa-se apenas um pequeno aumento das áreas das classes que proporcionam mais estabilidade.

Observa-se que com a coesão próxima a 8 kPa, existe em todos os cenários uma grande porcentagem de áreas consideradas estáveis.

#### **c) Ao aumentar o ângulo de atrito**

Observa-se que ao considerar um aumento de apenas 3° no ângulo de atrito (de 31° para 34°), para o mesmo terreno (mesmas declividades) (cenários 1 e 9; 2 e 10, 3 e 11, etc.), houve uma redução das áreas classificadas com “instabilidade crítica” (cerca de 12% para os cenários 1 e 9, por exemplo).

#### **d) Sobre o cenário 10**

Na construção do cenário 10, buscou-se adotar os parâmetros geotécnicos similares aos ocorridos antes da ruptura apresentada pelas Figuras 5.17 e 5.28. Estes parâmetros foram obtidos por retroanálise elaborada por Parizzi (2004).



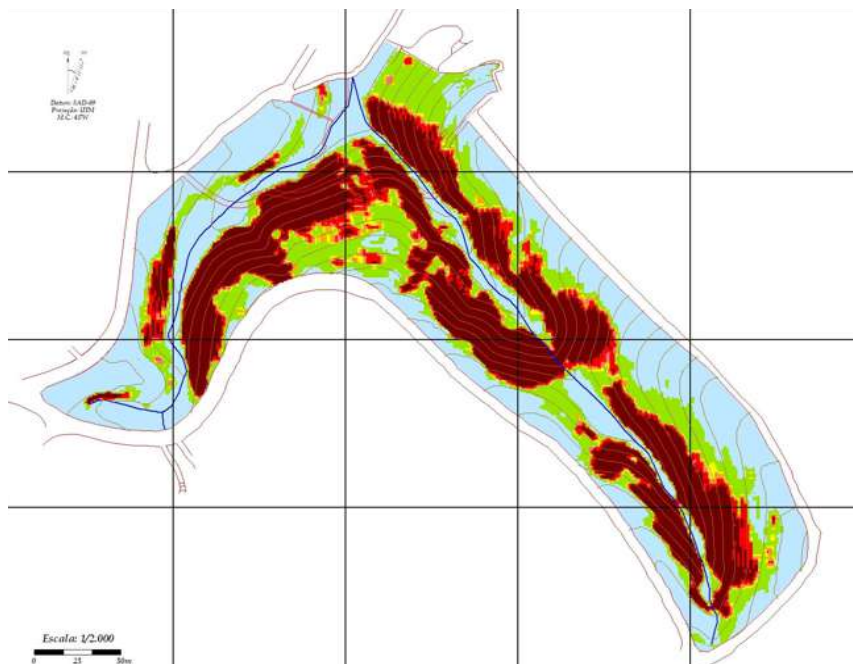


Figura 5.26 – Cenário 10, a partir de parâmetros de retroanálise.

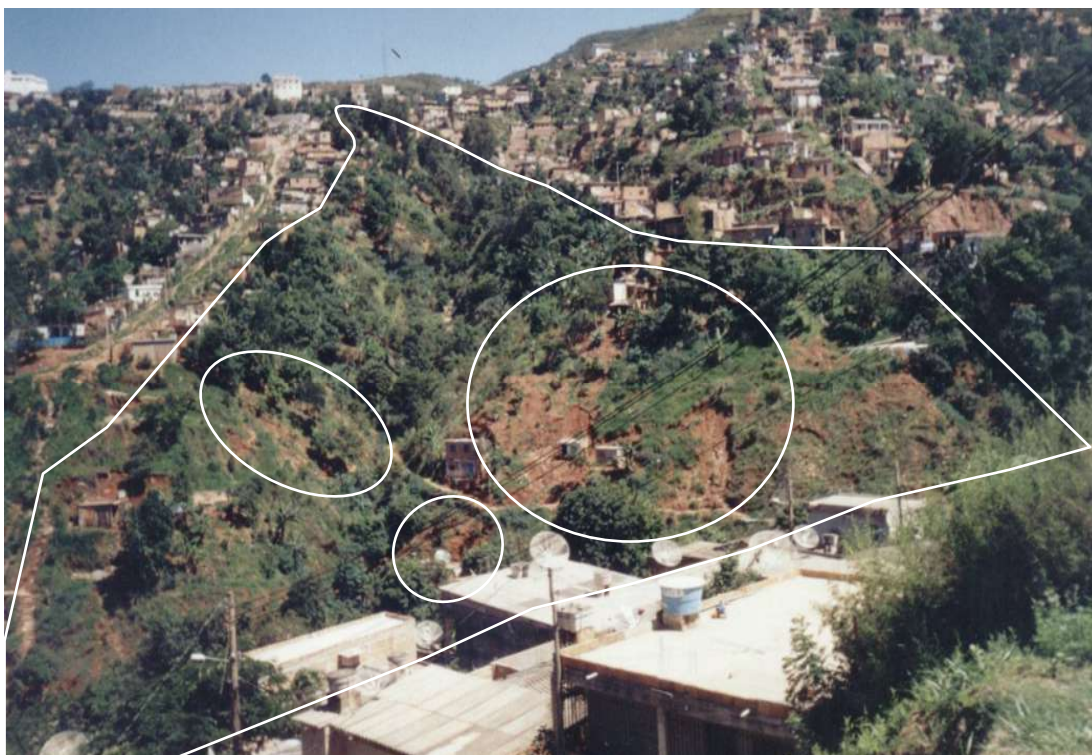


Figura 5.27 – Escorregamento ocorrido em janeiro de 2003, em localidade do estudo de caso – Foto 2.

Fonte: Adaptado de Campos (2004).

Observa-se também na foto da Figura 5.27, registrada em 2004 por Campos (2004), a localidade em que ocorreu a ruptura ilustrada na Figura 5.17. A encosta

vista a centro apresentava, à época (2004), as várias cicatrizes dos escorregamentos de 2003.

Estas mesmas áreas também foram identificadas pelo modelo *SHALSTAB*, (cenário 10), como pode ser verificado pela Figura 5.26.

Através de recentes vistorias de campo no bairro Conjunto Taquaril realizados em 2008 e 2009, foi possível verificar outros locais constituídos por materiais semelhantes aos mobilizados nas rupturas ocorridas em 2003 (depósitos tecnogênicos, pacotes de solo e saprolitos), em que ocorreram significativos escorregamentos planares e rotacionais.

Observa-se, na Figura 5.28, obtida a partir de detalhe da carta de inventário da Figura 3.21, que no entorno da área de estudo já houve alguns registros de ocorrências de escorregamentos de solo.

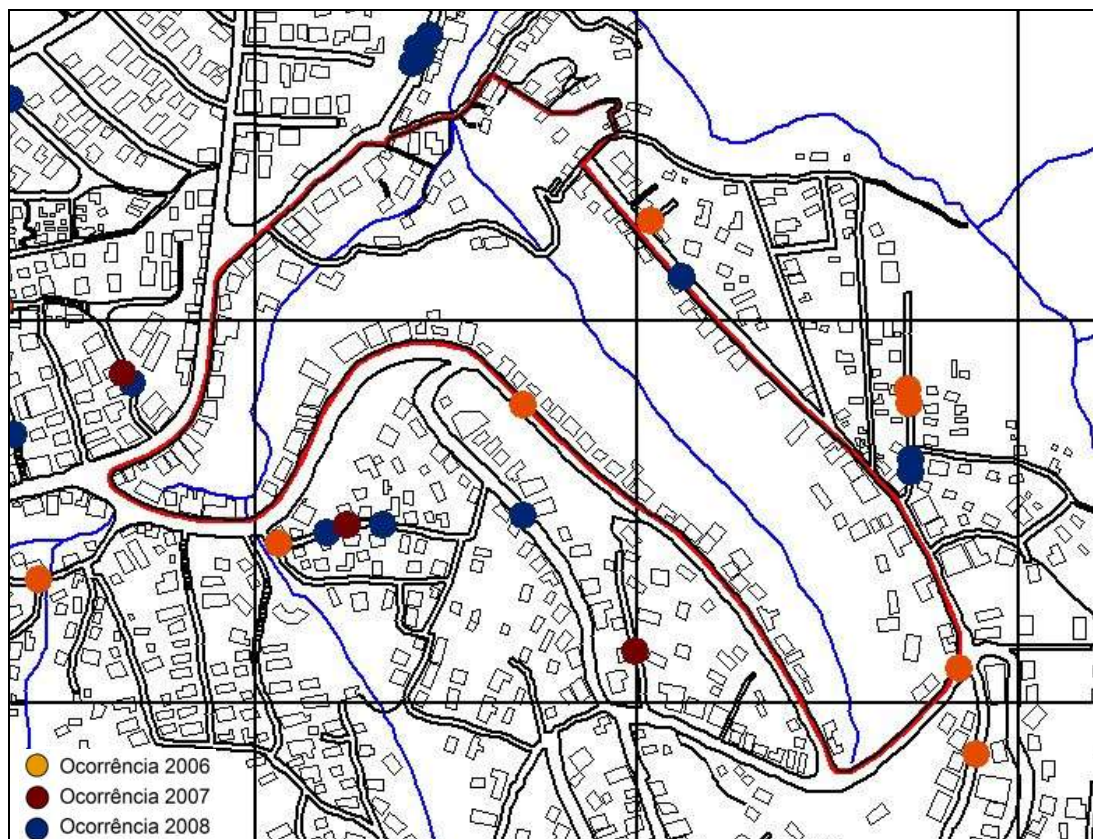


Figura 5.28 – Detalhe da carta de inventários, próximos à área do estudo de caso.

Interessante notar, pela Figura 5.28, que nenhum registro foi anotado de 2006 a 2008 na área do estudo de caso. Isto decorre do fato da área atualmente estar

interditada pela PBH, conforme informado pelo CREAM-Taquaril (PBH, 2009) e portanto desocupada.

Observando ainda a Figura 5.26 (Cenário 10), observam-se outras localidades que também foram classificadas com “instabilidade crítica”.

Possivelmente estas rupturas ainda não se confirmaram, por apresentarem uma coesão maior que a mapeada para este cenário, ou ainda, por uma relação “ $\log q/T$ ” em que nem a transmissividade, nem a pluviosidade alcançaram os níveis críticos para a ruptura. Ainda, outros fatores aqui não considerados (condução da drenagem, vegetação, etc.) podem ter contribuído para a estabilidade apresentada pelo cenário 10.

Variando os parâmetros geotécnicos locais, observou-se que o modelo *SHALSTAB* atendeu ao que se propõe:

*“Avaliar as áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos rasos, em função do acúmulo de fluxo d’água das células à montante (hollows), associado às propriedades geotécnicas locais”.*

Apesar da metodologia ser relativamente simples, observaram-se limitações similares à metodologia heurística:

- a falta de dados georeferenciados, especificamente daqueles relacionados à variabilidade espacial das propriedades dos solos;
- a dificuldade de definir os limites entre as unidades, ou seja, as mudanças de propriedades e comportamentos geológico-geotécnicos, para a escala de trabalho;
- a impossibilidade de caracterizar outras modalidades de movimentos de massa gravitacionais; e
- a impossibilidade de modificar e incorporar certos parâmetros geológico-geotécnicos locais, uma vez que a rotina já está implementada no *software* ArcGIS 2.0.

Ainda que as limitações interferissem nos resultados, a modelagem foi relativamente acurada para as regiões de estabilidade. Interessante ainda foi a possibilidade de atuar em alguns parâmetros geotécnicos locais (coesão, ângulo de atrito, transmissividade e pluviosidade) e perceber as alterações da susceptibilidade ao evento.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

6.1 – CONCLUSÕES

6.2 – SUGESTÕES

## 6.1 – CONCLUSÕES

Conclui-se que:

- Sob o aspecto geológico, observou-se que pode haver uma complementaridade das metodologias, segundo os seguintes aspectos: na metodologia heurística foi possível incorporar atributos segundo a relevância, como por exemplo, a análise da direção do mergulho das encostas, que é um dos principais condicionantes geológico–geotécnicos à estabilidade na região. Na modelagem determinística, foi possível evitar certa generalização do comportamento geomecânico, por localidade.
- Morfológicamente, a confiabilidade dos resultados, tanto da metodologia heurística, quanto determinística, ficou diretamente relacionada à atualização e acurácia da base de dados topográficos e ao algoritmo interpolador utilizado na construção do modelo digital de terrenos. Na metodologia heurística, para a extração das unidades morfológicas, as metodologias propostas por Pellegrini (1995) e Carvalho (2001) se mostraram eficientes. Na modelagem *SHALSTAB*, observou-se que a carta de áreas de contribuição hidrológica, obtida pela rotina *SHALSTAB-ArcView*, definiu com acurácia a rede de drenagem.
- Para aplicação da metodologia heurística, além da disponibilidade de base de dados confiável e softwares adequados para a sua manipulação, a equipe de trabalho deve ser multidisciplinar para definir os limites entre as mudanças de propriedades e comportamentos geológico–geotécnicos, para qualquer escala de mapeamento proposta. Ainda, a escolha dos atributos deve possibilitar a atualização futura, representatividade, ser de baixo custo e de fácil aquisição pelas secretarias envolvidas.
- O modelo *SHALSTAB* se mostrou eficiente ao que se destina, tendo a característica marcante, por ser determinístico, de não delegar o poder de decisão a critérios subjetivos. Como visto, a decisão de quais áreas são instáveis se baseiam em processos hidrológicos e mecânicos e, com significância, aos aspectos topográficos; na busca de retratar as leis da natureza. Porém, esta eficiência traçada anteriormente reduz-se, ao se deparar com uma carência e/ou inconsistência dos dados topográficos e geotécnicos locais. Ainda, mostra-se limitado à especificidade de escorregamentos translacionais rasos.

- De maneira geral, observou-se que a problemática dos movimentos de massa gravitacionais em BH possui um condicionamento físico, porém existe uma interrelação deste meio com as intervenções antrópicas ao meio ambiente. Fato este notável no alto índice de ocorrências de acidentes verificado nas áreas classificadas por Vilas e Favelas. Neste ponto constatou-se que, para a capital, as áreas com maiores restrições geológicas e topográficas coincidem justamente ao pouco rigor na fiscalização, ao longo de seu histórico de ocupação.

- Durante as investigações para o estudo de caso, no bairro Conjunto Taquaril, observou-se que os casos de rupturas são mais frequentes em aterros mal compactados. As rupturas dos depósitos de tálus e colúvio são mais expressivas, que as movimentações de maciços rochosos. Confirmou-se também em campo que os maiores problemas de instabilidade são as de face voltada para o quadrante SE, principalmente para a foliação desconfinada, favorecendo rupturas planares. Além disso, os cortes e aterros executados pelos moradores em elevada declividade, em áreas naturalmente susceptíveis ao movimento de massa, aceleram e ampliam os locais naturalmente susceptíveis aos processos geodinâmicos, e também são responsáveis por grande número de ocorrências.

- A partir da modelagem heurística, observou-se que apesar de apenas 10% das áreas estarem classificadas nas intensidades “Alto” e “Muito Alto” de susceptibilidade aos movimentos de massa, estas devem ser objeto de preocupação, por acomodar altas densidades demográficas. Observou-se também que desde os trabalhos iniciados por Silva et al. (1995) e outros, bem como da última atualização do Plano Diretor e da Lei de Uso e Ocupação do Solo, e em vários projetos dirigidos pela URBEL, tem ocorrido um declínio de acidentes, principalmente aqueles com vítimas fatais. Prova-se tal constatação pelos altos índices pluviométricos e os baixos índices de ocorrências registrados no verão de 2009.

- A metodologia heurística, com apoio das tecnologias do Geoprocessamento e com base nas referências citadas ao longo deste trabalho, e ainda, complementado pelo uso da metodologia determinística, no detalhe de localidades de interesse, permite um pleno controle das áreas propensas aos movimentos de massa gravitacionais da capital.



- Enfim, buscando ratificar e aperfeiçoar a metodologia do geoindicador “risco geológico”, variável integrante do IQVU, acredita-se que, com a incorporação da carta de susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais versus padrão de uso e ocupação, já na construção do IQVU/2010, este geoíndice ficará mais acurado. Resta a modelagem de outros eventos naturais extremos (enchentes e inundações, erosão, etc.) para aprimorar o geoíndice.

## 6.2 – SUGESTÕES

No título desse trabalho recorre-se aos termos: “Estudo Dinâmico”. Não poderia ser diferente numa avaliação de susceptibilidades, uma vez que os atributos condicionantes, modificadores e deflagradores são extremamente interdependentes, no tempo e espaço.

Em se tratando da análise numa cidade, isto se torna ainda mais um desafio. Carvalho (2001) comenta que a cidade é uma das mais complexas obras de engenharia, em função dos agentes diversos, atuando sob escassa coordenação.

Ainda, a compreensão das causas para um dado efeito (diagnóstico), e principalmente, a antevisão dos efeitos de determinadas intervenções (prognóstico) devem ser assumidas considerando que ações humanas já empreenderam modificações no ambiente geológico natural.

O diagnóstico pode-se valer da busca e atualização dos dados utilizados neste trabalho, principalmente, junto à PBH entre 2007 a 2009, durante a parceria entre a UFV e a PBH para construção do IQVU-2008. Cita-se ainda que todas as cartas da referência Silva et al. (1995), encontram-se digitalizados, fato que se iniciou com os trabalhos desta Tese. Destaque às cartas geológica e zoneamento hipsométrico, escala 1:50.000, que resultou, segundo a própria PBH, nas mais atualizadas até a publicação desse trabalho.

Para trabalhos futuros na área urbana de BH, sugerem-se os seguintes estudos:

- Melhor conhecimento e mapeamento da geologia local, especificamente das características geomecânicas da sequência Metassedimentar do Supergrupo Minas;
- Atualização e digitalização da planta topográfica municipal, a partir de vôo já contratado para 2009 e compatibilização das bases de dados;
- Documentação das metodologias, de forma a permitir uma comparação futura dos resultados;
- Investigação da adequabilidade da matriz modificadora proposta, bem como verificação da sua precisão e acurácia;

- Melhor avaliação da relação entre o desencadeamento de movimentos de massa gravitacionais e das variações climáticas extremas, com monitoramento de taludes, para composição de banco de dados;
- Possibilidade de incorporação de novas variáveis aos modelos, como por exemplo, dos aspectos morfológicos e geotécnicos, possibilitado pela modelagem determinística *SHALSTAB*; e
- Incorporação de dados aos modelos determinísticos, como por exemplo, a utilização de parâmetros de campo, tais como a condutividade hidráulica, pluviosidade extrema e a espessura do solo.

## CAPÍTULO 7

## REFERÊNCIAS

---

Aguiar, M.F.P; Filho, F.C.S; Almeida, M.S.S. *Análise de movimentos em encostas naturais através de monitoramento por instrumentação – Caso Coroa Grande – RJ*. Rev. Tecnol., Fortaleza, v.26, n.1, p.46-71, 2005.

Ahrendt, A. *Movimentos de massa gravitacionais – Proposta de um sistema de previsão: Aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 390p., 2005.

Albala-Bertrand, J.M. *Political economy of large natural disasters: with a special reference to developing countries*. New York: Oxford University Press, 259 p., 1993.

Alcántara-Ayala, I. *Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries*. V.47, n.2-4, p.107-124, 2002.

American Geological Institute (AGI). *Glossary of geology*. Disponível em < <http://www.cprm.gov.br> >. Acesso em 10 dez. 2008.

Anagnostopoulos, C., Georgiadis, M. *Analysis of rainfall data and correlation to landslides: The case of Sykia-Pieria, Greece*. In: International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Balkema, Proceedings, 1: 483 – 487, 1997.

Aronoff, S. *Geographic Information Systems: A management perspective*; Ottawa, Canadá, WDL Publications, 1989.

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). *Ensaio de Permeabilidade: Orientações para sua execução no campo*. 3ed. São Paulo: Boletim 04, 34p., 1996.

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). *Diagnóstico preliminar da cartografia geotécnica e geoambiental no Brasil*. 5º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental. São Carlos, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 10520: Apresentação de citações em documentos: Procedimento*. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 6023: Informação e documentação – Referências - Elaboração*. Rio de Janeiro, 2000.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 11682: Estabilidade de Encostas - Projeto*. Rio de Janeiro, 2006.

Augusto Filho, O. *Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP*. São Paulo. 168p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 1994.

Augusto Filho, O.; Virgili, J.C. *Estabilidade de taludes*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.243-269, 1998.

Azevedo, A.A; Albuquerque Filho, J.L. *Águas subterrâneas*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.111-131, 1998.

Berger, A.R. *Assessing rapid environmental change using geoindicators*. Environmental Geology, p.36-44, 1997.

Beven, K.J.; Kirkby, M.J. *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology*. Bulletin of Hydrological Sciences, 24: p.43-69, 1979.

Bitar, O.Y.; Ceneviva, L.L.V. *O uso de indicadores ambientais em gestão ambiental municipal: O caso do município de São Paulo, SP*. Simpósio sobre Gestão Ambiental, SimGeA, São Paulo. 18p., 2003.

Bonuccelli, T.J. *Movimentos de massa em Ouro Preto: importância da ocupação desordenada e caracterização dos fenômenos*. Tese de Doutorado – EESC/USP, São Carlos, 1999.

Brabb, E.E.; Pampeyan E.H.; Bonilla, M.G. *Landslide susceptibility in San Mateo County, California*. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies, Map MF-360, scale 1:62,500, 1972.

Braschke, K.; Kux, H. *Sensoriamento Remoto e SIG avançados: Novos sistemas Sensores/Métodos Inovadores*. Oficina de Textos, SP, 286p., 2005.

Brasil. *Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional*. Brasília, DF, 1984.

Cajazeiro, J.M.D.; Parizzi, M.G.; Nogueira, C.A.; Abreu, M.L.; Viana, C.S. *Chuvas e escorregamentos em Belo Horizonte*. In: 2º SIBRADEN Simpósio Brasileiro de desastres naturais e tecnológicos, 2007, Santos. Anais do 2º SIBRADEN. São Paulo: ABGE, 2007.

Calijuri, M.L. *Sistemas de Informações Geográficas*. Notas de aula. S.ed. UFV, 2007.

Campos, L.C. *Zoneamento de Uso e Ocupação do Conjunto Taquaril*. Monografia. Especialização em Geotecnia Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 80p. 2004.

Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F. *Uncertainty in assessing landslide hazard and risk*. ITC-Journal, v.2, p.172-183, 1992.

Carvalho, J.A.R. *Perigos Geológicos, Cartografia Geotécnica e Proteção Civil*. In: 3º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica. Florianópolis, UFSC. CD-ROM, 1998.

Carvalho, C.S; Galvão T. *Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: Guia para elaboração de políticas municipais*. Ministério das Cidades, 2006.

Carvalho, E.T. *Geologia urbana para todos: Uma visão de Belo Horizonte*. 175p., 2001.

Carvalho, E.T; Prandini, F.L. *Áreas urbanas*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.487-497, 1998.

Celestino, T.B.; Diniz, N.C. *Informática*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.227-241, 1998.



- Cendrero, A.; Francés, E.; Coral, D. *Environmental quality indices; a tool for assessing and monitoring geoenvironmental maps units*. In: Cartografia Geotécnica e Geoambiental. Conhecimento de meio físico: Base para a sustentabilidade. Pejon, O.J.; Zuquette, L., Ed. Universidade de São Paulo, p.525-564, 2004.
- Cerri, L.E.S. *Mapeamento de riscos nos municípios*. In: Prevenção de risco de deslizamentos em encostas: Guia para elaboração de políticas municipais. Brasília: Ministério das Cidades, 2006.
- Cerri, L.E.S; Amaral, A.P. *Riscos geológicos*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.301-310, 1998.
- Chancón, J.; Irigaray, C.; Fernández T.; El Hamdouni, R. *Engineering geology maps: landslides and geographical information systems*. IAEG Commission N°.1— Engineering Geological Maps, 2006.
- Charif, M. *Digital Terrain Model*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, ITC, Enschede, Holland, 1992.
- Christofolletti, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blucher, 188p., 1980.
- Chugh, A.K. *Variable factor of safety in slope stability analysis*. Geotechnique, v.1, p.57-64., 1984.
- Clarklabs. *CartaLinx 1.2*. Clark University, USA, 2000.
- Clarklabs. *IDRISI Andes 15*. Clark University, USA, 2006.
- Clerici, A.; Perego, S.; Tellini, C.; Vescovi, P. *A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method*. Geomorphology, v.48, n.4, p.349-364, 2002.
- Coelho, A.M.L.G. *A cartografia geotécnica no planejamento regional e urbano: Experiência de aplicação na região de Setúbal*. Lisboa: Lab. Nac. de Engenharia Civil, 1980.

Coelho, C.W.G.A. *Estudo da variabilidade espacial das chuvas em Belo Horizonte a partir da expansão da rede pluviométrica: Uma análise qualitativa*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. Coord. Feitosa, A.C.; Filho, J.M., Fortaleza, 2º ed., 391p., 2000.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). *Projeto SIAGAS*. Disponível em < <http://www.cprm.gov.br> >. Acesso em 16 out. 2007.

Costa, W.D. *Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas de Município de BH*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 350p., 2002.

Cruden D.M.; Varnes, D.J. *Landslide types and processes*. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides-investigation and mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, Washington, p.36-75, 1996.

Cunha, R.P.; Pereira, J.H.F. *Análise da estabilidade e obras de drenagem em talude de solo residual colapsível da cidade de Belo Horizonte-MG*. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, III COBRAE, Rio de Janeiro, Anais, p.223-237, 2001.

Cunha, F.L.S.J. *O uso de indicadores de sustentabilidade ambiental no monitoramento do desenvolvimento agrícola*. Brasília, Dissertação de Mestrado, UNB/CDS, 2003.

Deeg, M. *Natural disaster: recent trends and future prospects*. *Geography*, p.198-242, 1992.

Deere, D.U.; Patton, F.D. *Slope stability in residual soils from the proceedings*. In: Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.2, RJ, p.399-417, 1971.

Defesa Civil/MG. *Balancete das chuvas*. Disponível em: < <http://www.defesacivil.mg.gov.br> >. Acesso em 06 fev. de 2008.

Defesa Civil/SC. *Enchentes 2008*. Disponível em: < <http://www.desastre.sc.gov.br> >. Acesso em 09 dez. de 2008.

Demchyshyn, M.G. *Landslide Hazard in the Urban Areas*. In: Marinós, Koukís, Tsiambaos & Stoumaras (ed.). *Engineering Geology and the Environment*. Rotterdam, p.587-592, 1997.

Dietrich, W.E., Bellugi, D., Asua, R.R., Stanziano, L. *Using SHALSTAB Tools to map shallow landslide potential*. Disponível em: < <http://soctates.berkeley.edu/geomorph/shalstab/> >. Acesso em 09 jun. de 2008, 2000.

Dietrich, W. E.; Dunne, T. *The channel head*. In: Beven, K. e Kirkby, M. (eds.) *Channel Network Hydrology*. John Wiley, Chichester: p.175-219, 1993.

Dietrich, W.E.; Montgomery, D.R. *SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement, Technical Report, 26p., 1998.

Dietrich, W.E.; Reiss, R.; Hsu, M.L.; Montgomery, D.R. *A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data*. *Hydrological Processes*, 9: p.383-400, 1995.

Dietrich, W. E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R. and McKean, J. *Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a Digital Terrain Model*. *The Journal of Geology*, v.101, 1993.

D'Orsi, R.; D'Ávila, C.; Ortigão, J.A.R.; Dias, A.; Moraes, L.; Santos, M.D. *Rio-Watch: the Rio de Janeiro landslide watch system*. In: Pan American Symposium on Landslides, 2, Conferência Brasileira de Estabilidade de Taludes, Rio de Janeiro. Anais, v.1, p.21-30, 1997.

Einstein, H.H. *Special lecture: landslide risk assessment procedure*. In: *Proceedings of the Vth ISL Lausanne*, v.2, p.1075–1090, 1988.

EM-DAT – Emergency Events Database. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: < <http://www.em-dat.net/> >. Acesso em 02 de dez. 2008.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). *Análise espacial de dados geográficos*. Planaltina, DF, 2004.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). *ArcGIS 9.2*. New York, USA, 2006.

Fabiano, P.C.A. *O processo de planejamento urbano e suas temporalidades - Uma análise da influência da legislação urbanística na produção do espaço urbano de Belo Horizonte*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2005.

Faugères, M.L. *Les risques naturels*. Bulletin Association Geographique Française, n.2, p.89-98, 1990.

Fell, R. *Some landslide risk zoning schemes in use in Eastern Australia and their application*. In: Proceedings of the VIth Australian–New Zealand conference on geomechanics society, Christchurch, NZ, p.505-512, 1992.

Fell, R. *Landslide risk assessment and acceptable risk*. CanGeotech J 31: p.261-272, 1994.

Fernandes, N.F.; Guimarães, R.F.; Gomes, R.A.T; Vieira, B.C.; Montgomery, D.R.; Harvey, D. R. *Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis*. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.2, n.1, p.51-71, 2001.

Ferrari, C. *Curso de Planejamento Municipal Integrado*. São Paulo: Pioneira, 1988.

Ferreira, A.S. *Fórum dos professores de geotecnia do estado de Santa Catarina*. Santa Catarina, 1999.

Ferreira, V.O. *Eventos pluviais concentrados em Belo Horizonte, Minas Gerais – Caracterização genérica e impactos físico-ambientais*. IGC, UFMG, dissertação de mestrado, 195p., 1996.

Fiori, A.P.; Carmignani, L. *Fundamentos de mecânica dos solos e rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. Curitiba: Editora da UFPR, 550p., 2001.

Fiori, A.P. *Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas*. Boletim Paranaense de Geografia, n.43, p.7-24, 1995.

Godard, A. *La place des risques naturels dans La recherche en géographie physique*. Bulletin Association Geographique Française, n.2, p.99-112, 1990.

Governo do Estado de Minas Gerais. *Informações sobre Projeto Linha Verde*. Disponível em < <http://www.linhaverde.mg.gov.br> >. Acesso em: 31 jan. de 2008.

Grant, K. *A systematic approach to mapping engineering geology*. In International Congress of the International Association of Engineering Geology – IAEG, 2<sup>o</sup> ed., Proceedings, v.1, III-PC-2.1-2.9, São Paulo, SP, 1974.

Greenway, D.R. *Vegetation and slopes stability*. In: Anderson, M.G.; Richards, K.S. (Ed.). *Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology*. Chichester: John Wiley. cap. 6, p.187-230. 1989.

Guidicini, G.; Iwasa, O.Y. *Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido*. São Paulo: IPT, 48p., 1976.

Guidicini, G.; Nieble, C.M. *Estabilidade de taludes e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher, 194p., 1983.

Guimarães, R.F. *Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis à escorregamentos rasos com controle topográfico: Adequação e calibração em duas bacias de drenagem*. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro, 156p., 2000.

Guzzetti F., Carrara, A., Cardinali M., Reichenbach P. *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. *Geomorphology* 31. p.181-216, 1999.

Hach-Hach, A.M. *Inventário das feições erosivas e dos movimentos de massa gravitacionais na região leste da Grande Curitiba (PR)*. Dissertação de Mestrado - EESC/USP, São Carlos, 1998.

- Hammond, C., Hall, D., Miller, S., and Swetik, P. *Level 1 stability analysis (LISA)*. Documentation for version 2.0. USDA Forest Service, Gen. Techn. Report INT-285, 190p., 1992.
- Hart, J.F. *Central tendency in areal distributions*. Economic Geography, p.48-59., 1954.
- Hays, W.W. *Hazard and risk assessments em the United States*. Episodes, v.14, 1991.
- Highland, L., *Landslides causes and processes*. U.S. Geological Survey, U.S.A. Disponível em < <http://pbs.usgs.gov/fs/2004/3072> >. Acesso em: 03 dez. de 2008.
- Hoek, E., Bray, J. *Rock Slope Engineering*. London, Institution of Min. Metall & Elsevier Applied Science. 358p., 1981.
- Hutchinson, J.N. *General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrology*. In: International Symposium on Landslides, 5, Lausanne. Resumos, Rotterdam, Balkema, p.3-29, 1988.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Estimativa de população. 2003*. Disponível em < <http://www.ibge.gov.br> >. Acesso em 31 jan. de 2008.
- Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA). *Informações IDH. 2000*. Disponível em < <http://www.ipea.gov.br> >. Acesso em 31 jan. de 2008.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *Treinamento de técnicos municipais para o mapeamento e gerenciamento de áreas urbanas com risco de escorregamentos, enchentes e inundações*. Publicação Ministério das Cidades, 2006.
- International Association for Engineering Geology and the environment (IAEG). *Rock and soil description and classification for engineering geological mapping*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Krefeld, n.24, 1981.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). *Suggest methods for rock characterization, testing and monitoring*. Oxford: ed. Pergamon, 1981.



International Strategy for Disaster Reduction (ISRD). *Terminology: basic terms of disaster risk reduction*. Disponível em < <http://www.unisdr.org/eng/library> >. Acesso em 10 de dez. de 2008.

Irigaray, C.; Fernández, T.; El Hamdouni, R.; Chacón, J. (1999). *Verification of landslide susceptibility mapping. A case study*. Earth Surf Processes Landforms 24: p.537-544, 1999.

Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment (IUGS-WGL). *Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the state of the art*. In: Cruden, D.; Fell, R. (Ed.) *Landslide risk assessment*. Rotterdam: Balkema, p.3-12, 1997.

Keefer, D.K.; Wilson, R.C.; Mark, R.K.; Brabb, E.E.; Brown, W.M., Ellen, S.D.; Harp, E.L.; Wieczorek, G.F.; Alger, C.S.; Zarkin, R.S. *Real time landslide warning during heavy rainfall*. Science, v.238, p. 921-925, 1987.

Koch, T. *The Map as Intent: Variations on the Theme of John Snow*. Cartographica, v.39, 2004.

Lacerda, W.A. *Notas de aula da disciplina estabilidade de taludes*. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 13p., 2003.

Lambe, P.C. *Residual Soils*. In: Turner, A.K e Schuster, R.L. (ed.) *Landslides – Investigation and Mitigation*, Special Report 247. Washington D.C., National Academy Press, p.507-524, 1996.

Landim, P.M.B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: ed. UNESP, 253p., 2003.

Larousse. *Grande Enciclopédia Larousse Cultural*. Nova Cultural Ltda, 1995.

Lehre, A. *Using SHALSTAB in ArcView*. Dept. of Geology, Humboldt State University. Disponível em < [http://sorrel.humboldt.edu/~geodept/geology551/551\\_handouts/using\\_SHALSTAB.pdf](http://sorrel.humboldt.edu/~geodept/geology551/551_handouts/using_SHALSTAB.pdf) >. Acesso em 10 de março de 2008.

Lopes, G.A. *Estudo hidrogeológico e geotécnico da região da futura Mina de Fábrica Nova, Mariana, MG*. Dissertação de Mestrado, Viçosa, MG, 136p., 1999.

- Lúcio, P.S.; Abreu, M.L.; Toscano, E.M.M. *Caracterização de séries climatológicas em Belo Horizonte – MG*. 10º Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília – DF, 1998.
- Machado, M.S.R. *Dinâmica Espacial - A evolução das manchas de ocupação urbana de Belo Horizonte 1918-1995*. In: Belo Horizonte, Prefeitura - PBH. Anuário Estatístico de Belo Horizonte, Belo Horizonte: SMPL, p.1-29, 2000.
- Mantovani, F.; Soeters, R.; Van Westen, C.J. *Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe*. *Geomorphology*, v.15, p.213-225, 1996.
- Mapinfo Corporation. *MapInfo Professional Version 8.0*. 2005.
- Marcelino, E.V. *Desastres naturais e geotecnologias*. INPE, Santa Maria, RS, 2007.
- Marcelino, E.V. *Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no Município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto*. Dissertação de Mestrado. INPE, São José dos Campos, SP, 2003.
- Marques, E.A.G. *Introdução à Interpretação de Mapas Geológicos*. S.ed. UFV, 2007.
- MG Tempo. *Relatório diário de pluviosidade – Estações URBEL (2007-2008)*. Disponível em < <http://www.mgtempo.com.br/mgtempo/estacoesurbel/> >. Acesso em 16 de dez. de 2008.
- Ministério das Cidades. *Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais / Celso Santos Carvalho e Thiago Galvão, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades, 2006*.
- Monteiro, C.A.F. *Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico*. Florianópolis: Editora da UFSC, 241p., 1991.
- Moreira, C.V.R.; Pires Neto, A.G. *Clima e relevo*. In: ABGE. *Geologia de Engenharia*. Oficina de Textos, p.69-85, 1998.

- Nagarajan, R.; Roy, A.; Kumar, R.V.; Mukherjee, A.; Khire, M.V. *Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions*. Bull Eng Geol Environ 58: p.275-287, 2000.
- Nogueira, C.A., Parizzi, M.G., Cajazeiro, J.M., Viana, C.S. *O uso de tensiômetros para monitoramento de áreas de risco em Belo Horizonte*. In: 2º SIBRADEN Simpósio Brasileiro de desastres naturais e tecnológicos, 2007, Santos. Anais do 2º SIBRADEN. São Paulo: ABGE, 2007.
- O'Callaghan, J.F., Marl, D.M. *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. V.28, p.324-344, 1994.
- Ojeda-Moncayo, J., Locat, J., Couture, R., Leroueil, S. *The magnitude of landslides: an overview*. In: Lacerda WA, Ehrlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (eds) Landslides: evaluation and stabilization. Balkema, Taylor & Francis Group, London, p.379-384, 2004.
- Oliveira, C. *Dicionário Cartográfico*. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.
- Ollier, C., Pain, C. *Regolith, soils and landforms*. England, John Wiley & Sons. 316p., 1995.
- O'Loughlin, E.M. *Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis*. Water Resources Research, v.22, p.794-804, 1986.
- Olshansky, R.B.; Rogers, J.D. *Unstable ground: landslide policy in the United States*. Berkeley: Ecology Law Quarterly, v.13, n.4, p.939-1006, 1987.
- Ortigão, J.A.R. *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*. 2ªed., Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 378p., 1995.
- Pack, R.T.; Tarboton, D.G.; Goodwin, C.N. *SINMAP. A stability index approach to terrain stability hazard mapping – Users Manual*. Utah State University, 1997. Disponível em < <http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/> >. Acesso em 10 de dez. de 2008.

Paredes, E.A. *Sistema de informação geográfica – Geoprocessamento: Princípios e Aplicações*. São Paulo, Érica, 1994.

Parizzi, M.G.; Porto, C.G.; Piumbini, B.S. *Caracterização geológica-geotécnica e avaliação do risco do Conjunto Taquaril, Belo Horizonte (MG)*. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 10, Ouro Preto, ABGE, Anais CdRom. 15p. 2002.

Parizzi, M.G. *Condicionantes e mecanismos de ruptura em taludes da região metropolitana de Belo Horizonte*. Tese de Doutorado, UFOP, MG, 200p., 2004.

Parizzi, M.G.; Sobreira, F.G.; Galvão, T.C.B.; Elmiro, M.A.T. *Chuvvas e escorregamentos de taludes em Belo Horizonte, MG*. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, Florianópolis. Anais. Florianópolis: GEDN/UFSC, p.29-43, 2004.

Pastori, E.L.; Fontes, R.M. *Caracterização e classificação de solos*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.197-210, 1998.

Patton, F. D., Hendron JR., A. J. *General Report on "Mass Movements"*. International Congress of the International Association of Engineering Geology, 2, São Paulo, Brazil, Proceedings, 2: V-GR.1–V-GR. 57, 1974.

Paulo, J.R. *Avaliação de áreas de risco geológico na bacia de Vargem das Flores, municípios de Contagem e Betim, MG*. Dissertação de Mestrado, Ouro Preto, MG. 94p., 2004.

Peloggia, A.U.G. *Parâmetros Geomecânicos de Solos Saprolíticos do Município de São Paulo (SP)*. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, 20 (3): p.209-213, 1997.

Pellegrini, G.J. *Terrain Shape Classification of Digital Elevation Models using Eigenvectors and Fourier Transforms*. [dissertation]. Syracuse (NY): State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. 207 p. 1995.

Pereira, C.V.L. *Estudo de caso: O programa de áreas de risco em Belo Horizonte*. In: 2º SIBRADEN Simpósio Brasileiro de desastres naturais e tecnológicos, 2007, Santos. Anais do 2º SIBRADEN. São Paulo: ABGE, 2007.

- Pinheiro, A.L. *Análise de Rupturas e Taludes no Morro do Curral, Ouro Preto, Minas Gerais*. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 111p., 2002.
- Pinto, C.S. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 2ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- Prandini, F.L.; Guidicini, G.; Bottura, J.A.; Ponçano, W.L.; Santos, A.R. *Atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas: uma resenha crítica*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 38p., 1976.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *O índice de qualidade de vida urbana (IQVU)*. Assessoria de Comunicação da PBH, 31p., 1996.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Plano Diretor de Drenagem de Belo Horizonte – Programa DRENURBS*. SUDECAP, 2001.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Plano Municipal de Saneamento de Belo Horizonte (PMS) – 2004/2007 - “Saneamento para Todos”*. SUDECAP, 192p., 2004.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Base InterGeo da Empresa de Informática e Informação do Município de BH (PRODABEL)*. PRODABEL, 2007a.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Base de dados referente ao risco geológico de vilas e favelas*. URBEL, 2007b.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Base de dados referente às Leis 7166/96 e 8137/00 - Normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo em BH*. SUDECAP, 2007c.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Carta de padrão de ocupação de Belo Horizonte*. SMURBE/SUDECAP, 2007d.
- Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Informações Gerais do Município*. Disponível em < <http://www.pbh.gov.br> >. Acesso em 30 de ago. de 2008.
- Pruski, F.F. *Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. Viçosa: ed.UFV, 2006.

Ramos, M.H.D.; Viana, C.S.; Baptista, M.B. *Classificação dos solos de Belo Horizonte segundo grupos hidrológicos do US Soil Conservation Service*. Publicado nos anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Belo Horizonte, 1999.

Ramos, V.M.; Guimarães, R.F.; Redivo, A.L.; Gomes, R.A.T.; Fernandes, N.F.; Júnior, O.A.C. *Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente ArcView, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do quadrilátero ferrífero (MG)*. Espaço & Geografia, vol.5, n.1, p.49-67, 2002.

Ramos, V.M.; Guimarães, R.F.; Redivo, A.L.; Carvalho, O.A.J.; Fernandes, N.F.; Gomes, R.A.T. *Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição*. Revista Brasileira de Geomorfologia, ano 4, n.2, p.41-49, 2003.

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)*. Soil and Rocks. ABMS/ABGE, v.30, n.3, 2007.

Rego Neto, C.B.R.; Uceda, A.C. *Considerações sobre a utilização de indicadores e índices no mapeamento e gestão ambiental de municípios: aplicação em Florianópolis – SC*. 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, Uberlândia, MG, 2007.

Reis R.J.; Guimarães, D.P.; Coelho, C.W.G.A.; Paixão, G.M.M.; Nascimento, J.S.; Simões, T.K.S.L. *Determinação das áreas de potencial de riscos de precipitações intensas em Belo Horizonte*. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, Ceará, 2004.

Rodrigues, B.B. *Inventário e análise da susceptibilidade aos movimentos de massa gravitacionais e erosão na região de Águas de Lindóia/SP-escala 1:10.000*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

Rodrigues, N. *Belo Horizonte Vista do Céu*. Ed. Caras S.A., São Paulo, 2006.



- Rodrigues, R. *Massas Coluviais: Velocidade de deslocamento nas encostas da Serra do Mar*. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1a COBRAE, Rio de Janeiro. Anais, p.357 – 369, 1999.
- Ruiz, M.D.; Guidicini, G. *Introdução*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.87-99, 1998.
- Salomão, F.X.T.; Antunes, F.S. *Solos em Pedologia*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.487-497, 1998.
- Saraiva, S.L.C. *Mecânica dos solos*. Universidade Federal de Ouro Preto, 48p., 2008.
- Scheidegger, A.E. *Hazards: singularities in geomorphic systems*. Geomorphology 10, 19–25, 1994.
- Schor, H.J.; Gray, D.H. *Influence of vegetation on hillside stability*. Landforming: An Environmental Approach to Hillside Development, Mine Reclamation and Watershed Restoration. C.3, 368p., 2007.
- Soares, E.P. *Análise de Estabilidade de um Talude da Mina de Águas Claras - MBR: uma Visão Probabilística*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- Soil Conservation Service (SCS). *Urban Hydrology for small watersheds*. TR-55. Washington, D.C., 1996.
- Secretaria Nacional de Defesa Civil. *Manual de Desastres*. Sistema Nacional de Defesa Civil, 2003.
- Selby, M.J. *Hillslope Materials and Processes*. Oxford: 2ed. Oxford University Press, Oxford, 451p., 1993.
- Serra Júnior, E.; Ojima, F.L. *Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos*. In: ABGE. Geologia de Engenharia. Oficina de Textos, p.211-226, 1998.

Silva, A.B.; Carvalho, E.T.; Fantinel, L.M.; Viana, C.S.; Romano, A.W. *Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no município de Belo Horizonte*. Belo Horizonte: UFMG-IGC-FUNDEP-PBH, 426p., 1995.

Silva, A.B. *Estudo Hidrogeológico do Município de Belo Horizonte-MG*. In: Congresso Brasileiro de Água Subterrânea, n.8, 1994, Recife. Anais. Recife: ABAS, p.481-490, 1994.

Silva, D.C.O. *Aplicação do Modelo SHALSTAB na Previsão de Deslizamentos em Petrópolis*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 132p., 2006.

Simões, M.G. *Modeladores digitais de terreno em sistemas de informação geográfica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1993.

Soeters, R.; Van Westen, C.J. *Slope stability: recognition, analysis and zonation*. In Turner, A.K.; Schuster, R.L. *Landslides investigation and mitigation*. Washington: Transportation Research Board, National Research Council, Cap.8, p.129-177, 1996.

Souza Neto, J.B.; Futai, M.M.; Lacerda, W.A. *Previsão de ruptura de taludes por fluência*. In: COBRAE, 2001, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABMS, p.69-74, 2001.

Spiker, E.C., Gori, P.L. *National landslide hazards mitigation strategy: a framework for loss reduction*. Open-file report 00-450, Department of Interior, U.S.G.S., USA, 49 p., 2000.

Spiker, E.C., Gori, P.L. *Partnerships for reducing landslide risk: assessment of the national landslide hazards mitigation strategy*. The National Academy of Sciences Press, Washington, DC, 2003a.

Spiker, E.C., Gori, P.L. *National landslide hazards mitigation strategy: a framework for loss reduction*. USGS Circular 1244, US Department of Interior, U.S.G.S. Reston, Virginia, 56 p., 2003b.

- Tatizana, C. *Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, no município de Cubatão*. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, São Paulo, ABGE, v.2, p.225-236, 1987.
- Teixeira, A.A.; Matias, L.F; Noal, R.H & Moretti, E. *A história dos SIGs*. Fator GIS, Editora Sagres, Curitiba, n.10, p.21-26, 1995.
- Terzaghi, K. *From theory to practice in soil mechanics. Selections from writing of Karl Terzaghi*. New York: John Wiley, 1960.
- Terzaghi, K. *Mecanismos de escorregamentos de terra*. Trad. de Ernesto Pichler. São Paulo: Grêmio Politécnico. 41p., 1950.
- Thomas, M.F. *Geomorphology in the tropics – A study of weathering and Denudation in low latitudes*. New York, John Wiley & Sons. 460p., 1994.
- Tuler, M.O. *Comparação entre os métodos de classificação fuzzy e booleano para determinação do mapa de umidade: estudo de caso*. Dissertação de Mestrado, IME/RJ, Rio de Janeiro, 1994.
- Tuler, M.O.; Calijuri, M.L.; Marques, E.A.G. *Automação Digital dos Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte, MG*. Anais do 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, Uberlândia, MG, 2007a.
- Tuler, M.O.; Calijuri, M.L.; Marques, E.A.G. *Concepção do índice de risco geológico efetivo para as unidades de planejamento em Belo Horizonte, MG*. In: 2º SIBRADEN Simpósio Brasileiro de desastres naturais e tecnológicos, 2007, Santos. Anais do 2º SIBRADEN. São Paulo: ABGE, 2007b.
- Tuler, M.O.; Calijuri, M.L.; Marques, E.A.G. *Índice de Risco Geológico nas Unidades de Planejamento em Belo Horizonte, MG*. IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Porto, Portugal, 2008.
- Turner, A. K. *Colluvium and Talus*. In: Turner, A. K & Schuster, R. L. (ed.) *Landslides – Investigation and Mitigation*, Special Report 247. Washington D.C., National Academy Press, p.525-554, 1996.

United Nations Disaster Relief Office (UNDRO). *Serving the information needs of the humanitarian relief community*. Disponível em < <http://www.reliefweb.int/rw/dbc.nsf/doc100?openForm> >. Acesso em 10 de dez. de 2008.

Van Westen, C.J. *Geoinformation tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments*. In: Lacerda WA, Ehrlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (eds) *Landslides: evaluation and stabilization*. Balkema, Taylor & Francis Group, London, p.39–56, 2004.

Vargas, M. *Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos da Serra do Mar*. Solos e Rochas, v.22, n.1, p.53-83, 1999.

Varnes, D.J. *The logic of geological maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes*. Washington: U.S. Government Printing Office. 48p., 1974.

Varnes, D.J. *Slope movement types and process*. In: *Landslides analysis and control*. Washington: National Academy of Sciences, p.1-33, 1978.

Varnes, D.J. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes. Int Assoc Eng Geol, UNESCO Natural Hazards Series no. 3, 63p., 1984.

Viana, C.S. *Caracterização dos processos erosivos no município de Belo Horizonte: uma contribuição à gestão ambiental e ao planejamento urbano*. Dissertação de Mestrado, UFMG, MG, 220p., 2000.

Wieczorek, G.F. *Landslide Triggering Mechanisms* – In: Turner, A. K & Schuster, R.L. (ed.) *Landslides – Investigation and Mitigation*, Special Report 247. Washington D.C., National Academy Press, p.76-90. 1996.

Wold JR., R.L.; Jochim, C.L. *Landslide loss reduction: a guide for state and local government planning*. A Federal Emergency Management Agency publication (FEMA 182), 50p., 1989.

- Wolle, C.M., Hachich, W. *Rain-induced landslides in southeastern Brazil. In: Internacional. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12, Rio de Janeiro, Proceedings, v.3, p.1639-1642, 1989.*
- Xavier, H. *Percepção geográfica dos deslizamentos de encostas em áreas de risco no município de Belo Horizonte, MG.* Tese de Doutorado, UNESP, SP, 222p., 1996.
- Young, A. *Slopes.* London and New York, Longman, 288p, 1971.
- Yoshikawa, N.K. *Roteiro para avaliação de estabilidade de rochas e maciços rochosos.* Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, 2006.
- Zaruba, G.; Mencl, V. *Landslides and their control.* New York, John Willey & Sons, p.1-6., 1981.
- Zuquette, L.V. *Mapeamento geotécnico preliminar da região de São Carlos.* Dissertação de Mestrado, EESC/USP, São Carlos, 1981.
- Zuquette, L.V. *Análise crítica sobre a cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.* Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, 1987.
- Zuquette, L.V. *Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamento e guia para elaboração.* 1993. 2v. 368f. Tese (Livre-docência em Geotecnia) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Zuquette, L.V.; Pejon, O.J.; Gandolfi, N.; Paraguassu, A.B. *Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamento de eventos perigosos e riscos associados.* Geociências, v.14, n.2, p.9-39, 1995.
- Zuquette, L.V.; Gandolfi, N. *Cartografia Geotécnica.* São Paulo: Oficina de textos, 190p., 2004.
- Zuquette, L.V.; Pejon, O.J. *Eventos perigosos geológico-geotécnicos no Brasil.* In: Simpósio Brasileiro de desastres naturais. Florianópolis, SC, p.312-336, 2004.

## ANEXOS

---

ANEXO I – FORMULAÇÃO DO MODELO *SHALSTAB*

ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS

ANEXO III – DVD COM IMAGENS EM FORMATOS JPG E PDF



## ANEXO I – FORMULAÇÃO DO MODELO *SHALSTAB*

---

I.1 – MODELO DO TALUDE INFINITO

I.2 – MODELO HIDROLÓGICO

I.3 – COMBINAÇÃO DOS MODELOS TALUDE INFINITO E HIDROLÓGICO

## **ANEXO I.1 – FORMULAÇÃO DO MODELO *SHALSTAB***

O modelo *SHASTAB* (*Shallow Stability Model*) propõe a combinação de um modelo de estabilidade de encostas (método do talude infinito), combinado com um modelo hidrológico.

Os principais parâmetros são extraídos de feições topográficas e características geotécnicas locais, especificamente, do coeficiente de permeabilidade, peso específico do solo e coesão do solo.

No modelo de estabilidade do talude (método do talude infinito), os parâmetros topográficos e geotécnicos são: ângulo de inclinação do talude, peso específico do solo natural, ângulo de atrito do solo e coesão.

O modelo hidrológico tem por base os estudos de O'Loughlin (1986). A partir da Lei da Darcy, combinam-se os seguintes parâmetros: área de contribuição da drenagem, declividade, precipitação e permeabilidade do solo.

### **I.1 – MODELO DO TALUDE INFINITO**

Um talude será considerado infinito quando a relação entre as suas grandezas geométricas (extensão e espessura) forem muito grandes e desta forma a linha potencial de ruptura for paralela à superfície do terreno. Trata-se de uma simplificação adotada pelo modelo *SHALSTAB*.

No modelo *SHALSTAB*, aplica-se a teoria do equilíbrio limite, ou seja, admitem-se as seguintes hipóteses (Dietrich et al., 2000; Pinto, 2002):

- existência de uma linha de escorregamento de forma conhecida, que delimita a porção instável do maciço, que movimenta como um corpo rígido;
- respeita o critério de resistência de *Mohr-Coulomb*, ao longo da linha de escorregamento.

Segundo Pinto (2002), a ruptura de solos é quase sempre um fenômeno de resistência ao cisalhamento do solo, definida como a máxima tensão de corte que um solo pode suportar. Pode-se sintetizar que a resistência dos solos está associada às forças de atrito resultantes de enlaces moleculares nas superfícies de contato.

Considerando a envoltória de resistência *Mohr-Coulomb* (Figura I.1), tem-se que a resistência do solo é definida em termos de tensões normais e tensões cisalhantes desenvolvidas no plano de ruptura, dada pela Equação I.1 (Pinto, 2002):

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \phi' \quad (\text{Equação I.1})$$

em que:

$\tau$  – Resistência ao cisalhamento;

$c'$  – Intercepto de coesão efetiva;

$\sigma_n$  – Tensão normal no plano de ruptura;

$u$  – Poro pressão da água;

$\sigma_n - u = \sigma'$  – Tensão efetiva no plano de ruptura; e

$\tan \phi'$  – Tangente do ângulo de atrito interno efetivo.

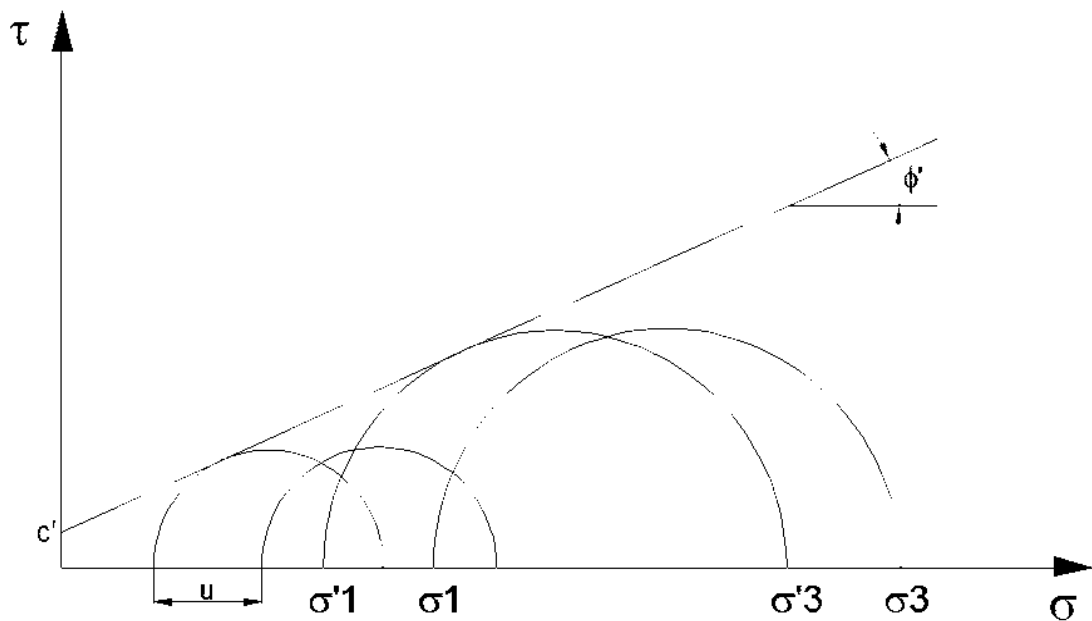


Figura I.1 – Envoltória de resistência *Mohr-Coulomb*.

Uma análise simplificadora das forças e tensões que atuam sobre um elemento de solo, considera talude de largura ( $b$ ), altura ( $Z$ ) e comprimento unitário, inicialmente sem a presença de percolação de água ( $h = 0$ ) (Figura I.2).

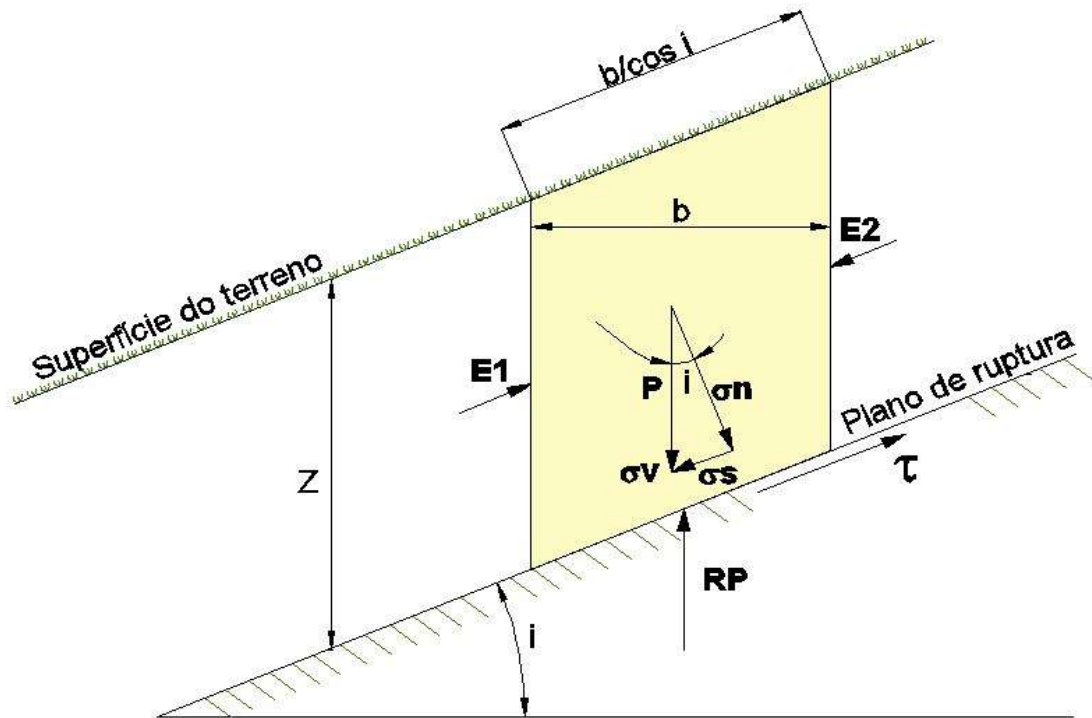


Figura I.2 – Forças atuantes no talude, considerando-o seco ( $h = 0$ ).

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

Da Figura I.2, entre as forças atuantes, têm-se:

**a) Peso da coluna de solo ( $P$ ), atuando no centro de massa**

Pode ser escrita pela Equação I.2:

$$P = \gamma_{nat} \cdot b \cdot Z \quad (\text{Equação I.2})$$

em que:

$\gamma_{nat}$  – Peso específico natural do solo;

$b$  – Largura da lamela; e

$Z$  – Espessura do solo considerado.

**b) As forças ( $E1$ ) e ( $E2$ )**

Atuam nas faces laterais do elemento de solo e são de igual magnitude, com sentido oposto e se anulam.

**c) A reação do peso ( $RP$ )**

Para satisfazer a condição de equilíbrio, deverá ser de igual magnitude, porém de sentido oposto a ( $P$ ), ou seja,  $P = -RP$

Devido ao peso (  $P$  ), tem-se as tensões atuantes (  $\sigma_v$ ,  $\sigma_n$  e  $\sigma_s$  ) na base do talude, respectivamente pelas equações:

$$\sigma_v = \frac{P}{\text{Área}} = \frac{\gamma_{nat} \cdot b \cdot Z \cdot \cos i}{b} = \gamma_{nat} \cdot Z \cdot \cos i \quad (\text{Equação I.3})$$

$$\sigma_n = \sigma_v \cdot \cos i = \gamma_{nat} \cdot Z \cdot \cos i \cdot \cos i = \gamma_{nat} \cdot Z \cdot \cos^2 i \quad (\text{Equação I.4})$$

$$\sigma_s = \sigma_v \cdot \sin i = \gamma_{nat} \cdot Z \cdot \cos i \cdot \sin i \quad (\text{Equação I.5})$$

em que:

$i$  – Ângulo de inclinação do talude.

Na condição de equilíbrio-limite (Equação I.1), a resistência ao cisalhamento (  $\tau$  ) se opõe a (  $\sigma_s$  ), ou seja:

$$\tau = \gamma_{nat} \cdot Z \cdot \cos i \cdot \sin i \quad (\text{Equação I.6})$$

Agora considere a presença de uma altura de percolação de água (  $h > 0$  ) (Figura I.3).

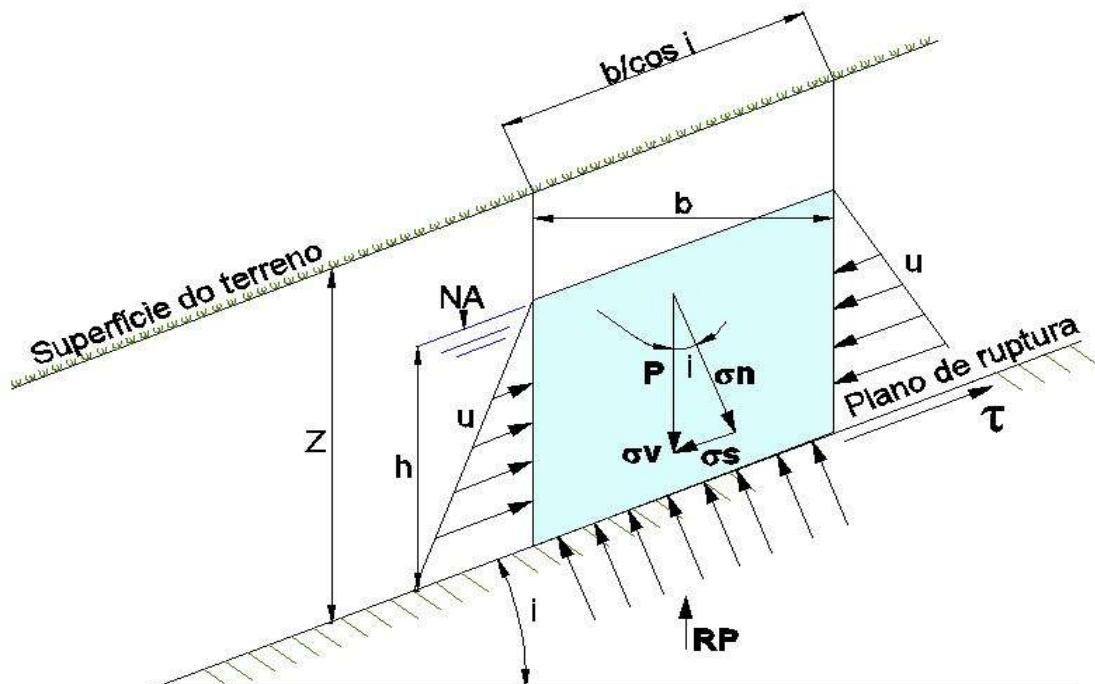


Figura I.3 – Forças atuantes no talude, considerando a poro-pressão (  $h > 0$  ).

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

O valor da poro pressão (  $u$  ), que atua perpendicularmente na base do elemento de solo, a uma altura (  $h$  ), será:

$$u = \sigma_{n_u} = \gamma_{\text{água}} \cdot h \cdot \cos^2 i \quad (\text{Equação I.7})$$

em que:

$h$  – Altura do nível d'água (piezométrica); e

$\gamma_{\text{água}}$  – Peso específico da água.

Das Equações I.4, I.6 e I.7, substituindo na Equação I.1 têm-se:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \phi' \quad \therefore$$

$$\gamma_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \cos i \cdot \sin i = c' + \left( \gamma_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \cos^2 i - \gamma_{\text{água}} \cdot h \cdot \cos^2 i \right) \cdot \tan \phi' \quad (\text{Equação I.8})$$

Da Equação I.8, desconsiderando o valor da coesão (  $c'$  ) (condição adotada pelo modelo SHALSTAB) (Dietrich et al., 2000), e exprimindo o peso específico (  $\gamma$  ) em função da densidade (  $\rho$  ), tem-se:

$$\rho_{\text{nat}} \cdot g \cdot Z \cdot \cos i \cdot \sin i = \phi' + \left( \rho_{\text{nat}} \cdot g \cdot Z \cdot \cos^2 i - \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 i \right) \cdot \tan \phi' \quad \therefore$$

$$\rho_{\text{nat}} \cdot g \cdot Z \cdot \cos i \cdot \sin i = \phi' + \left( \rho_{\text{nat}} \cdot g \cdot Z \cdot \cos^2 i - \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 i \right) \cdot \tan \phi' \quad \therefore$$

$$\rho_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \sin i = \left( \rho_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \cos i - \rho_{\text{água}} \cdot h \cdot \cos i \right) \cdot \tan \phi' \quad \therefore$$

$$\frac{\rho_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \sin i}{\left( \rho_{\text{nat}} \cdot Z - \rho_{\text{água}} \cdot h \right) \cdot \cos i} = \tan \phi' \quad \therefore \quad \frac{\rho_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \tan i}{\left( \rho_{\text{nat}} \cdot Z - \rho_{\text{água}} \cdot h \right)} = \tan \phi' \quad \therefore$$

$$\frac{\rho_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \tan i}{\tan \phi'} = \left( \rho_{\text{nat}} \cdot Z - \rho_{\text{água}} \cdot h \right) \quad \therefore \quad \rho_{\text{nat}} \cdot Z - \frac{\rho_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \tan i}{\tan \phi'} = \rho_{\text{água}} \cdot h \quad \therefore$$

$$\rho_{\text{nat}} \cdot Z \cdot \left( 1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'} \right) = \rho_{\text{água}} \cdot h \quad \therefore$$

$$\frac{h}{Z} = \frac{\rho_{\text{nat}}}{\rho_{\text{água}}} \cdot \left( 1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'} \right) \quad (\text{Equação I.9})$$



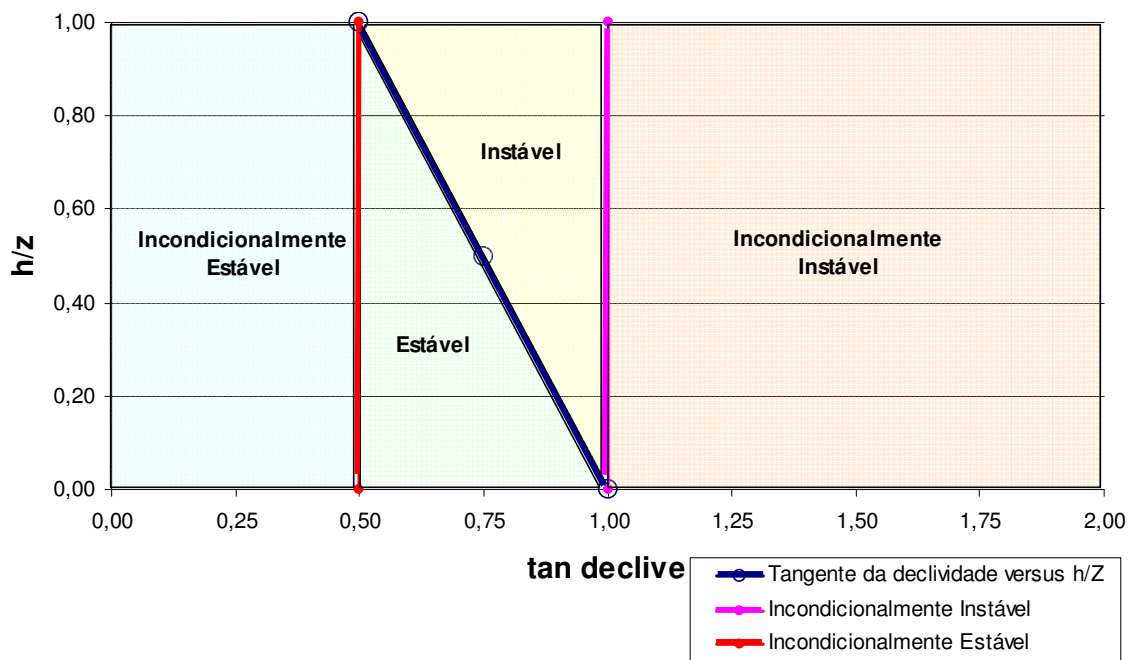
A Equação I.9 relaciona a proporção da coluna de água ( $h$ ) na espessura ( $Z$ ) considerada (Figura I.3). Denomina-se taxa de submersão do solo. Ainda, considere que ( $h$ ) será no máximo igual a ( $Z$ ) no caso de solo saturado.

Com base na Equação I.9 e analisando apenas a relação entre ( $h/Z$ ) em função do ângulo de inclinação do talude ( $i$ ) e do ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ), observa-se, pela análise da Tabela I.1 as situações de estabilidade para um talude.

Tabela I.1 – Relação entre ângulos de declive e atrito para o modelo SHALSTAB.

Relação ângulo de inclinação versus ângulo de atrito	Equação	Resultados	Situação
$i \geq \phi'$	$\frac{h}{Z} = f\left(1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'}\right)$	Como resultado tem-se um valor ( $h/Z$ ) igual a 0 a valores negativos	Incondicionalmente instável
$\phi' > i > 0$		Como resultado tem-se um valor ( $h/Z$ ) positivo, entre 0 e 1	Região do estável/instável
$i = 0$		Como resultado tem-se um valor ( $h/Z$ ) igual a 1	Incondicionalmente estável

Conforme Dietrich e Montgomery (1998), considere um solo com  $\phi' = 45^\circ$ ,  $\rho_{nat} = 2 \text{ g/cm}^3$  e  $\rho_{\text{água}} = 1 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, razão  $\rho_{nat} / \rho_{\text{água}} = 2$ . Para tal situação, variando valores de declividade do talude ( $\tan i$ ) em função de ( $h/Z$ ), apresentam-se regiões de estabilidade ilustradas pela Figura I.4.



Pela Figura I.4, definem-se os seguintes limites de estabilidade:

**a) Incondicionalmente estável**

Situação em que, independente do valor de  $(h/Z)$  (seco a saturado), a tangente da declividade  $(\tan i)$  é menor ou igual a  $(\tan \phi' \cdot (1 - \rho_{\text{água}} / \rho_{\text{nat}}))$ . Para o exemplo da Figura I.4, este valor encontra-se em torno de  $i = 26^\circ$ .

**b) Incondicionalmente instável**

Situação em que, independente do valor de  $(h/Z)$  (seco a saturado), a tangente da declividade  $(\tan i)$  é maior ou igual à tangente do ângulo de atrito  $(\tan \phi')$ . Para o exemplo da Figura I.4 este valor encontra-se para  $i \geq 45^\circ$ .

**c) Estável ou Instável**

Nestas situações, a Equação I.9 definirá o limiar das condições estável ou instável. Uma rotina desenvolvida em Excel para análise das possibilidades de estabilidade, bem como avaliação de Fator de Segurança (ABNT, 2006), pode ser visualizada pela Figura I.5. Enfatiza-se uma vez mais, que a metodologia *SHALSTAB* é conservadora por desprezar a coesão do solo.

### ROTINA PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE (TALUDE INFINITO) E CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA

Autor: Marcelo Tuler de Oliveira - Pós-Graduação em Engenharia CIVIL - UFV-CEFET/MG - Março de 2008

	Dados de Entrada		Dados de Saída							
	Z (m) Espessura	Coesão (tf/m <sup>2</sup> )	Peso específico natural (tf/m <sup>3</sup> )	Declividade do talude (graus)	Ângulo de atrito (graus)	Tangente da declividade	Tangente do atrito	h/Z	Fator de Segurança	Situação
Talude de Referência	4	0	1,7	30	40	0,58	0,84	0,53	1,45	Estável

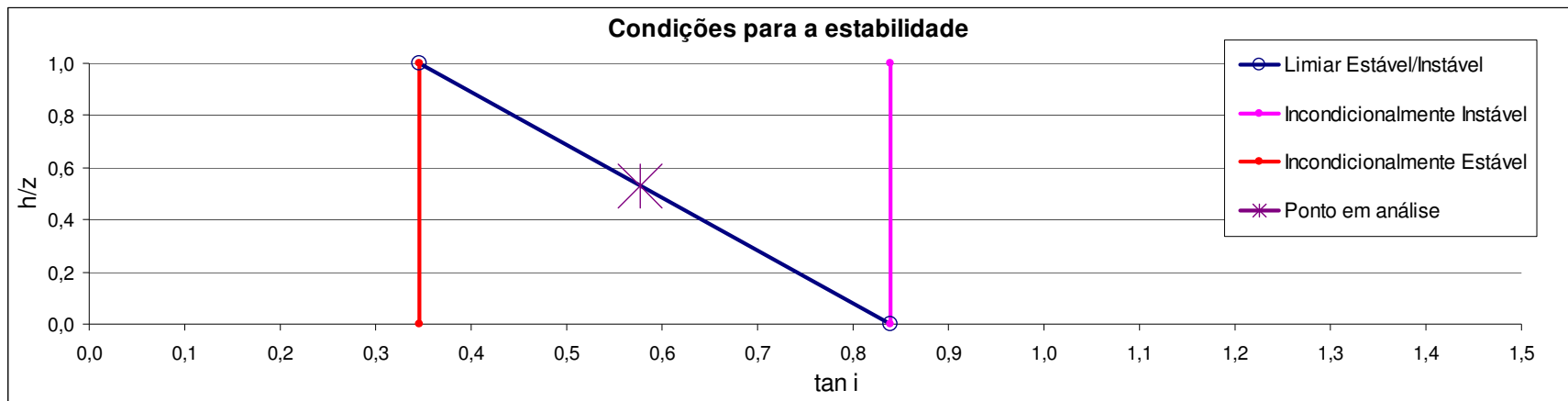


Figura I.5 – Rotina desenvolvida no software Excel para estudo da estabilidade I.

## I.2 – MODELO HIDROLÓGICO

Os modelos hidrológicos são aplicados para determinação do balanço de água no solo, buscando simular o percurso da água desde a precipitação até o escoamento ou a evapotranspiração. Observa-se a complexidade desta análise para o meio urbano em virtude das alterações antrópicas na drenagem.

O modelo hidrológico adotado pelo *SHALSTAB* tem por base os estudos de O'Loughlin (1986). O autor propõe que a topografia das encostas e de toda a área de contribuição de água à montante seja computada no cálculo dos parâmetros locais de geometria e drenagem, para análise da saturação do solo e consequente alteração da estabilidade do talude.

Dietrich et al. (1993) aplicaram este modelo buscando prever áreas de instabilidade na paisagem, especificamente através da identificação de zonas de saturação que apresentassem intensos processos erosivos.

Na Figura I.6 tem-se a vista em planta e uma perspectiva, representado o balanço hídrico, definido simplificadaamente pela Equação I.10:

$$q = p - e - r \quad (\text{Equação I.10})$$

em que:

$q$  – Escoamento (superficial e subsuperficial);

$p$  – Precipitação;

$e$  – Evapotranspiração (a ser desconsiderado no modelo); e

$r$  – Drenagem profunda (a ser desconsiderado no modelo).

O escoamento (*runoff*) ( $q$ ) é resultante de uma área de contribuição à montante ( $a$ ), através de um vertedouro (comprimento unitário) ( $b$ ) (Figura I.6). Logo, a vazão ( $Q$ ) resultante é dada pela Equação I.11:

$$Q = q \cdot a \quad (\text{Equação I.11})$$

em que:

$Q$  – Vazão; e

$a$  – Área de contribuição à montante.

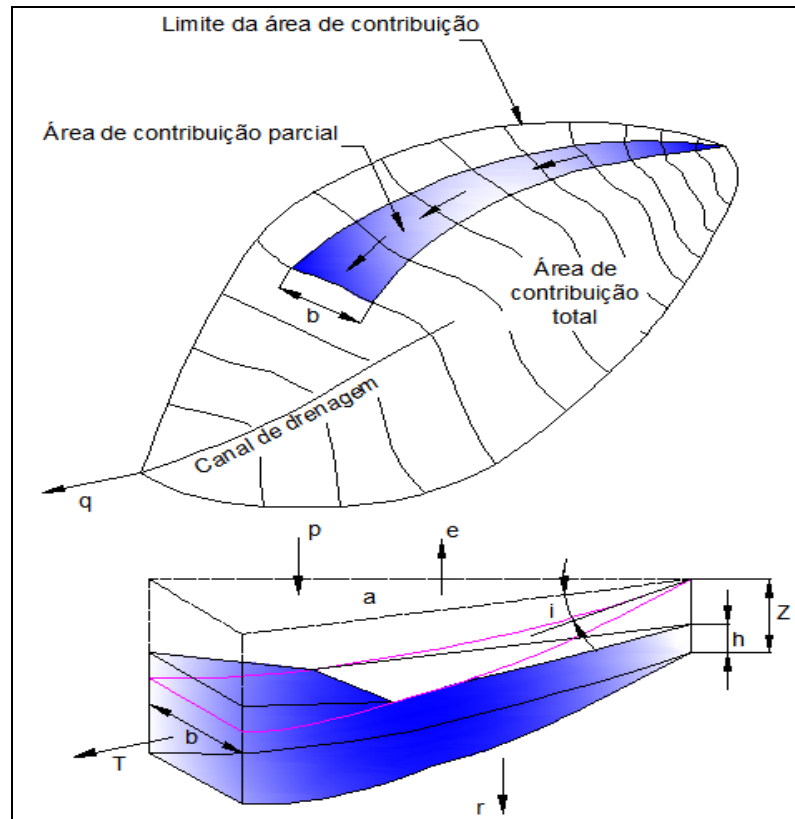


Figura I.6 – Vista em planta e perspectiva do balanço hídrico.

Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998).

Para o fluxo da água subsuperficial aplica-se a Lei de Darcy, em que a vazão será (Equação I.12):

- Proporcional à área da seção transversal;
- Proporcional à diferença de carga hidráulica; e
- Inversamente proporcional à distância percorrida.

$$Q = K \cdot A \cdot \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad (\text{Equação I.12})$$

em que:

$Q$  – Vazão;

$h_1$  e  $h_2$  – Cargas hidráulicas;

$L$  – Comprimento percorrido;

$A$  – Área da seção transversal; e

$K$  – Condutividade hidráulica (ou coeficiente de permeabilidade).

A relação  $(\Delta h/L)$  é o gradiente hidráulico ( $g_i$ ) dada pela Equação I.13, e ilustrada na Figura I.7.

$$\left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) = \frac{\Delta h}{L} = g_i = \text{sen } i \quad (\text{Equação I.13})$$

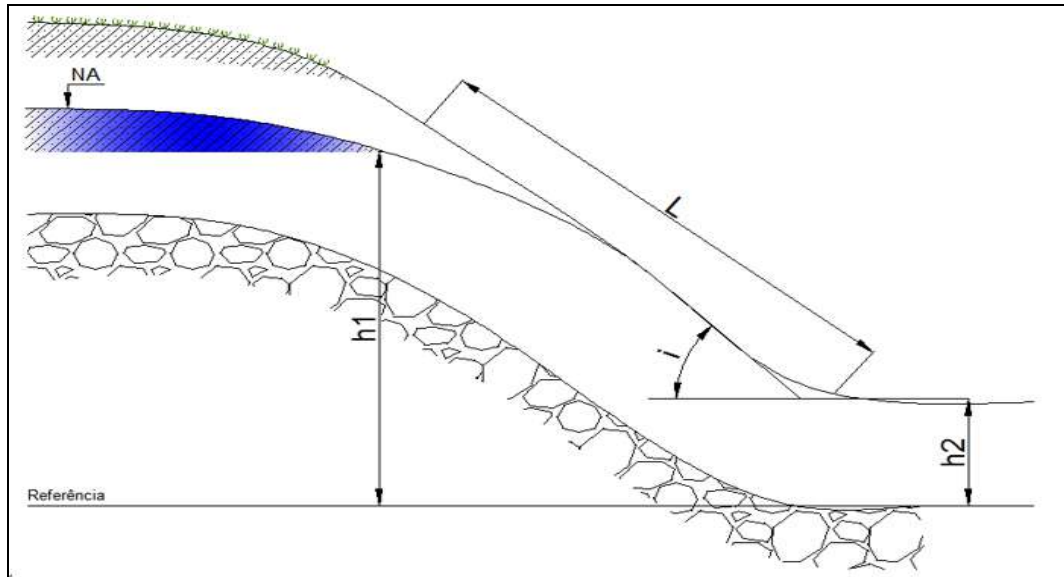


Figura I.7 – Simplificação da Lei de Darcy ao longo da encosta, para aplicação no modelo SHALSTAB.

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

A área da seção transversal saturada (  $A$  ) é expressa em função da altura piezométrica (  $h$  ), do comprimento unitário (  $b$  ) e da declividade (  $i$  ) (Equação I.14) (Figura I.8):

$$A = h \cdot \cos i \cdot b \quad \text{(Equação I.14)}$$

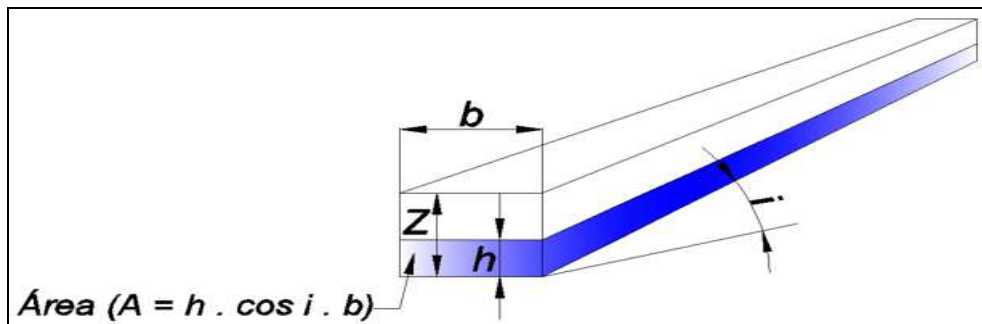


Figura I.8 – Área da seção saturada.

Fonte: Adaptado de Silva (2006).

Das Equações I.11, I.13 e I.14, substituindo na Equação I.12, tem-se a Equação I.15:

$$Q = K \cdot A \cdot \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad \therefore \quad q \cdot a = K \cdot h \cdot \cos i \cdot b \cdot \sin i \quad \text{(Equação I.15)}$$

Adotando o conceito da transmissividade do solo (  $T$  ), como sendo o produto do coeficiente de permeabilidade (  $K$  ) pela espessura de solo (  $Z$  ), pode-se escrever a Equação I.16:



$$T = K \cdot Z \cdot \cos i \quad \therefore \quad K = \frac{T}{Z \cdot \cos i} \quad (\text{Equação I.16})$$

em que:

$T$  – Transmissividade; e

$Z$  – Espessura solo considerado.

Finalmente da Equação I.16, substituindo da Equação I.15, tem-se a Equação I.17:

$$q \cdot a = K \cdot h \cdot \cos i \cdot b \cdot \sin i \quad \therefore \quad q \cdot a = \frac{T}{Z \cdot \cos i} \cdot h \cdot \cos i \cdot b \cdot \sin i$$

$$\frac{h}{Z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin i} \quad (\text{Equação I.17})$$

em que:

$h$  – Altura do nível d'água (piezométrica);

$Z$  – Espessura solo considerado;

$q$  – Escoamento substituído pela precipitação ( $p$ );

$a$  – Área de contribuição à montante;

$T$  – Transmissividade;

$b$  – Comprimento unitário; e

$i$  – Declividade.

A Equação I.17 descreve a taxa de encharcamento do solo ( $h/Z$ ) (O'Loughlin, 1986), ou seja, reproduz a relação entre a concentração de água e a transmissividade do solo.

Observa-se portanto, que para uma chuva ( $p$ ), a relação ( $h/Z$ ) pode representar duas relações: uma hidrológica e outra topográfica.







- A hidrológica é representada por ( $q/T$ ), e captura a magnitude que um evento de precipitação ( $p$ ) tem para ser escoado subsuperficialmente. Uma maior relação ( $q/T$ ) acontece quando o solo está saturado, e certamente os locais serão mapeados como menos estáveis.

- A topográfica é representada por ( $a / (b \cdot \sin i)$ ) e captura os efeitos da topografia no escoamento, especificamente da concentração do escoamento (*hollows*) (Figura 2.9). Observa-se que uma maior área drenada ( $a$ ) para uma célula ( $b$ ), reflete-se em maior relação ( $h/Z$ ) com conseqüente aumento das poro pressões, e certamente os locais também serão mapeados também como menos estáveis.

Analisando o efeito da declividade do talude, observa-se que quanto mais íngremes, mais rápido será o escoamento subsuperficial e conseqüentemente menor a relação ( $h/Z$ ). Discute-se aqui a função da declividade na Equação I.17, uma vez que o aumento da declividade pode causar menos estabilidade, como visto na análise do talude infinito (Item I.1).

Na Tabela I.2 observa-se as situações de estabilidade, com base na Equação I.17. Na Figura I.9, tem-se rotina em Excel para a análise do modelo hidrológico proposto por O'Loughlin (1986).

Tabela I.2 – Variação dos parâmetros da Equação I.17 e as situações da estabilidade.

Parâmetros	Variações positivas	Situação da estabilidade do talude ( relação $h/Z$ )
$q$ – Pluviosidade	Caso aumente 	Menos estável 
$K$ – Coeficiente de permeabilidade		Mais estável 
$Z$ – Espessura		Mais estável 
$T$ – Transmissividade		Mais estável 
$a$ – Área de contribuição		Menos estável 
$b$ – Comprimento do vertedouro		Mais estável 
$i$ – Declividade		Mais estável 
$h$ - Altura do nível d'água		Menos estável 

**ROTINA PARA ANÁLISE HIDROLÓGICA**

Autor: Marcelo Tuler de Oliveira - Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFV-CEFET/MG - Março de 2008

	Dados de Entrada		Dados de Saída							
	$q$ - intensidade de chuva - mm/h	$i$ - Declividade do talude (graus)	$Z$ - Espessura do talude acima do impermeável (cm)	$K$ - Coeficiente de permeabilidade (cm/s)	$T$ - Transmissividade (cm <sup>2</sup> /s)	$a$ - Área de contribuição (m <sup>2</sup> )	$b$ - Comprimento do contorno (m)	$q/T$ - Parte hidrológica (1/cm)	$a/(b \cdot \text{sen } i)$ - Parte topográfica (cm)	$h/Z$
Talude de Referência	50	30	400	0,01	4	25,00	5,00	0,00035	1000	0,35
Notas:	Se $h/Z$ - Diminuir => mais estável $h/Z$ - Aumentar => menos estável		Se $q/T$ - Aumentar => menos estável $a/(b \cdot \text{sen } i)$ - Aumentar => menos estável							

Figura I.9 – Rotina desenvolvida no software Excel para estudo da estabilidade II.

### I.3 – EQUAÇÕES SHALSTAB

Combinando a Equação I.9 (Método do Talude Infinito) com a Equação I.17 (Modelo Hidrológico) tem-se a Equação I.18:

$$\frac{h}{Z} = \frac{\rho_{nat}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot \left( 1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'} \right) \quad (\text{Equação I.9}) \quad \text{e} \quad \frac{h}{Z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \text{sen } i} \quad (\text{Equação I.17})$$

$$\frac{\rho_{nat}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot \left( 1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'} \right) = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \text{sen } i} \quad (\text{Equação I.18})$$

Expressando a Equação I.18 em termos de  $(q/T)$ , tem-se:

$$\frac{q}{T} = \frac{\rho_{nat}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot \left( 1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'} \right) \cdot \frac{b}{a} \cdot \text{sen } i \quad (\text{Equação I.19})$$

Os valores resultantes  $(q/T)$  da Equação I.19 são geralmente muito baixos em função de valores altos das áreas de contribuição  $(a)$ . Desta forma, geralmente são apresentados pelo logaritmo da expressão  $(\log(q/T))$ .

Expressando a Equação I.19 em termos de  $(a/b)$ , tem-se a Equação I.20:

$$\frac{a}{b} = \frac{\rho_{nat}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot \left( 1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'} \right) \cdot \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i \quad (\text{Equação I.20})$$

A partir das Equações I.9, I.17 e I.20, Dietrich e Montgomery (1998) sugerem uma análise da estabilidade sob três limites (Figura I.10):

#### a) Limite 01

Delimita as regiões do “*incondicionalmente estável*” e “*incondicionalmente instável*” a partir da Equação I.9:

$$\begin{aligned} - \tan i &\leq \tan \phi' \cdot \left( 1 - \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{nat}} \right) - \text{Incondicionalmente estável;} \\ - \tan i &\geq \tan \phi' - \text{Incondicionalmente instável.} \end{aligned}$$

#### b) Limite 02

Considera a situação em que o solo está (ou não) saturado a partir da Equação I.17. Em caso de saturação, a razão  $(h/Z)$  é igual a 1. Desta forma a Equação I.17 tem a seguinte apresentação:

$$\frac{h}{Z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \text{sen } i} \quad \therefore \quad l = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \text{sen } i} \quad \therefore \quad \frac{a}{b} = \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i \quad (\text{Equação 1.21})$$

A Equação 1.21 define a linha tracejada da Figura 1.10. Todo ponto situado acima desta linha, ou seja,  $\left( \frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i \right)$  estará saturado.

### c) Limite 03

Delimita as regiões consideradas estáveis e instáveis, o que dependerá dos valores obtidos na razão entre área de contribuição (  $a$  ) por unidade de contorno (  $b$  ) plotados em função de (  $\tan i$  ), a partir da Equação 1.20.

Na Tabela 1.3 observam-se as regiões de estabilidade e saturação, considerando as 07 possibilidades de ocorrência (Dietrich e Montgomery, 1998; Guimarães, 2000; Ramos, 2002; Silva, 2006).

Na Figura 1.10, elaborada a partir de rotina no *software* Excel, tem-se os limites definidos pela Tabela 1.3, visualizando as possibilidades da estabilidade de um ponto.

Logo, com base na Figura 1.10, uma carta resultante pela metodologia apresentará locais de estabilidade, instabilidade, incondicionalmente estável ou instável, a partir dos limites estabelecidos acima, como será apresentado adiante.

Segundo Guimarães (2000), o procedimento discutido anteriormente é útil para a realização de uma calibração do modelo a partir dos parâmetros topográficos, extraídos de um mapa de cicatrizes dos escorregamentos. Em síntese, para cada escorregamento verificado, determina-se a célula correspondente ao maior valor de área de contribuição e sua respectiva declividade. A plotagem da relação entre os valores da área de contribuição e declividade produz uma nuvem de pontos que pode ser usada para estimar a razão de instabilidade (  $q/T$  ) a partir da Equação 1.20.

Enfim, as Equações 1.19 e 1.20 são denominadas por Dietrich e Montgomery (1998) de “*equações SHALSTAB*”. Os parâmetros obtidos para o método são:

- **$a$ ,  $b$  e  $i$** : Parâmetros topográficos, por exemplo, a partir de um modelo digital de terreno (MDT);
- **$\rho$ ,  $\phi'$  e  $T$** : Parâmetros geotécnicos, a partir de ensaios de laboratório de solos; e
- **$q$** : Parâmetro meteorológico, a partir de dados pluviométricos.

Tabela I.3 – Classes de estabilidade em função dos limites estabelecidos pela relação “  $a/b$  ” versus “  $\tan i$  ”, na estabilidade e saturação.

Classes de estabilidade	Situação	Limites e Condição para o ponto
A	Incondicionalmente estável e saturado	$\tan i \leq \tan \phi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{nat}}}\right)$ e $\left(\frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i\right)$
B	Incondicionalmente estável e não saturado	$\tan i \leq \tan \phi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{nat}}}\right)$ e $\left(\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i\right)$
C	Estável e não saturado	$\left(\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i\right); \tan \phi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{nat}}}\right) < \tan i < \tan \phi'$ e $\frac{a}{b} < \frac{\rho_{\text{nat}}}{\rho_{\text{água}}} \cdot \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'}\right) \cdot \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i$
D	Instável e não saturado	$\left(\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i\right); \tan \phi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{nat}}}\right) < \tan i < \tan \phi'$ e $\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_{\text{nat}}}{\rho_{\text{água}}} \cdot \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'}\right) \cdot \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i$
E	Instável e saturado	$\left(\frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i\right); \tan \phi' \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{nat}}}\right) < \tan i < \tan \phi'$ e $\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_{\text{nat}}}{\rho_{\text{água}}} \cdot \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \phi'}\right) \cdot \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i$
F	Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan i \geq \tan \phi'$ e $\left(\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i\right)$
G	Incondicionalmente instável e saturado	$\tan i \geq \tan \phi'$ e $\left(\frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} \cdot \text{sen } i\right)$

Fonte: Adaptado de Dietrich e Montgomery (1998).

**ROTINA SHALSTAB**

Autor: Marcelo Tuler de Oliveira - Pós-Graduação em Engenharia CIVIL - UFV-CEFET/MG - Janeiro de 2009

Ponto livre	Constantes para o gráfico		Dados de Saída						
i - Declividade do talude (graus)	a/b	Z - Espessura do talude acima do impermeável (m)	K - Coeficiente de permeabilidade (cm/s)	T - Transmissividade (m <sup>2</sup> /dia)	q/T - Parte hidrológica (1/m) calculado	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Ângulo de atrito (graus)	q - intensidade de chuva (mm/dia)	Situação do ponto
17	500	1,50	0,014	17,77	0,007	1,60	40	120	Incondicionalmente estável e saturado

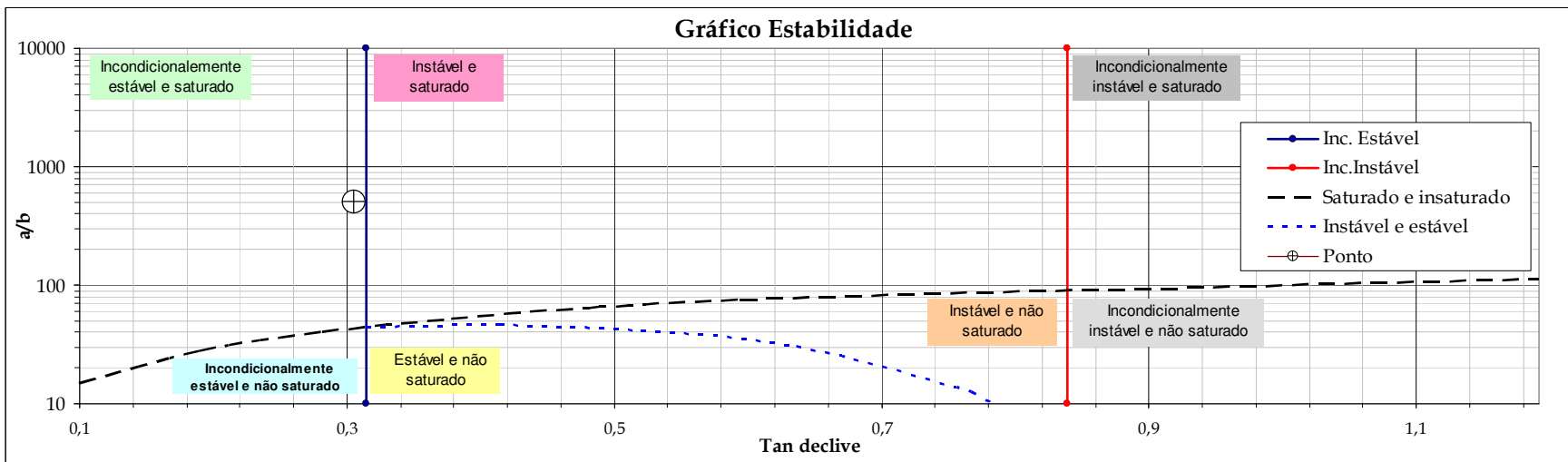


Figura I.10 – Rotina desenvolvida no software Excel para estudo da estabilidade III.

Para executar o modelo *SHALSTAB*, Dietrich et al. (2000) desenvolveram uma rotina para o ambiente *ArcView*, em linguagem *AVENUE*, denominada *SHALSTAB.avx*. O programa está disponível no sítio: < <http://socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/index.htm> > (último acesso em jan. 2009).

Na referência citada acima encontra-se um tutorial para manuseio das rotinas. Sugere-se ainda Lehre (2008), em que apresenta um exemplo de aplicação.

Ao usuário sugere-se que os arquivos a serem manipulados estejam em formato *ASCII Raster*, para as conversões entre softwares. Será necessário fornecer à rotina *SHALSTAB* o modelo digital de terreno, bem como os parâmetros geotécnicos locais.

O programa é constituído pelos seguintes módulos: *SHALtopo*, *SHALSTAB*, *SHALSTABco*, *SHALteste* e *SHALspecial* (Figura I.11).

O módulo *SHALtopo* verifica e remove as depressões geradas pelo interpolador, calcula a declividade e a área de drenagem (ou área de contribuição) por unidade de contorno (  $a/b$  ).

O módulo *SHALSTAB* obtém a relação (  $\log q/T$  ) a partir das grades da área de contribuição e declividade, bem como permite a introdução do ângulo de atrito e da densidade do solo. A relação de estabilidade na paisagem é mostrada a partir de valores de logaritmos que variam de estável até incondicionalmente instável.

O módulo *SHALSTABco* obtém a relação (  $\log q/T$  ) caso existam valores de coesão do solo.

O módulo *SHALteste*, composto por seis opções, pode ser usado para gerar dados estatísticos e avaliar o desempenho do modelo.

O módulo *SHALspecial* permite nomear temas já existentes e criar linhas de contorno.

Na região do estudo de caso será utilizado os módulos *SHALSTAB* e *SHALSTABco*.



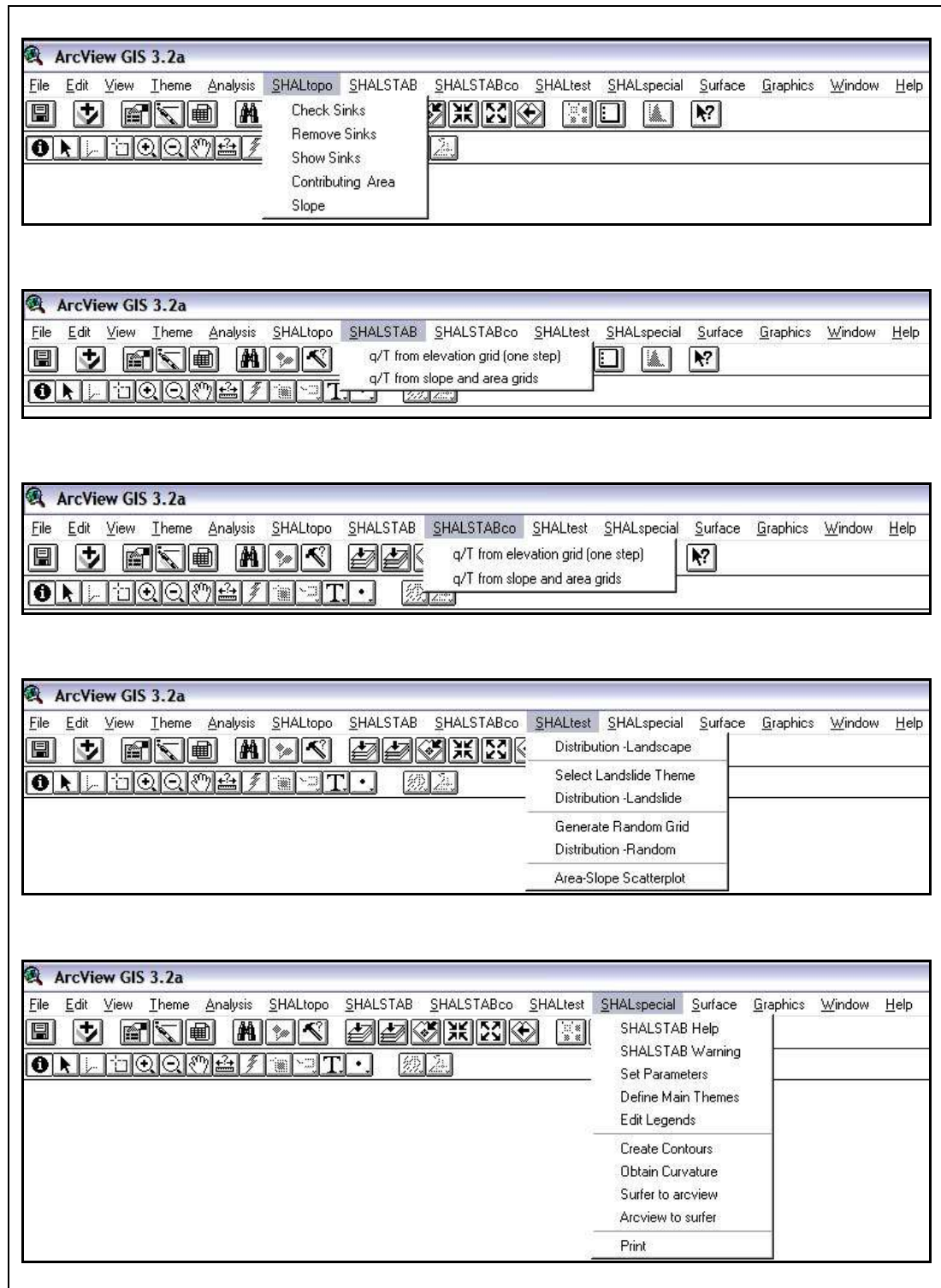


Figura I.11 – Menus da rotina *SHALSTAB*, suportadas pelo *software* ArcView.

No Capítulo 04 é apresentada e discutida a carta de eventos naturais associado aos movimentos de massa gravitacionais de uma localidade, com base nas equações do modelo *SHALSTAB*.

## ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS

---

II.1 – ENSAIOS DE CISALHAMENTO


II.2 – ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

II.3 – ENSAIOS LIMITES DE ATTERBERG

II.4 – ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

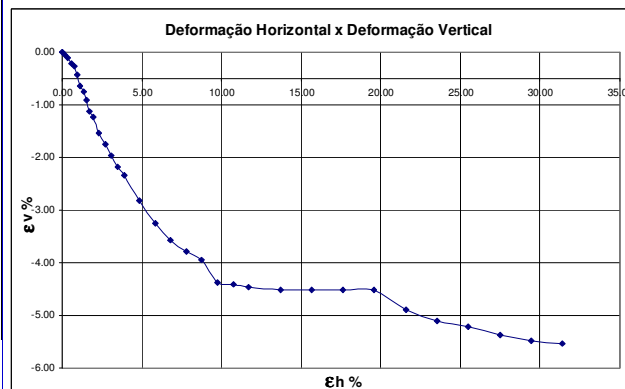
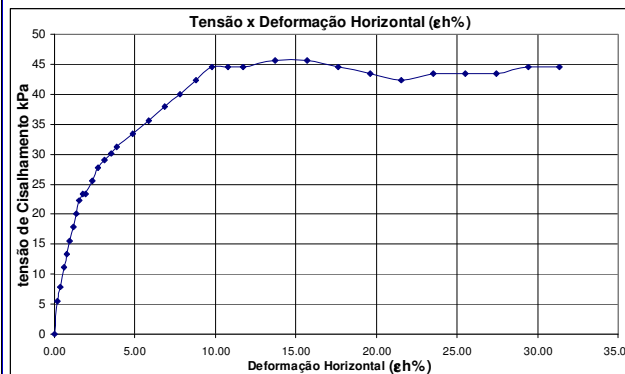
II.1 – ENSAIOS DE CISALHAMENTO – AMOSTRAS A1, A2, A3 E B3

a.1) Amostra A1 – Tensão Normal de 50 kPa

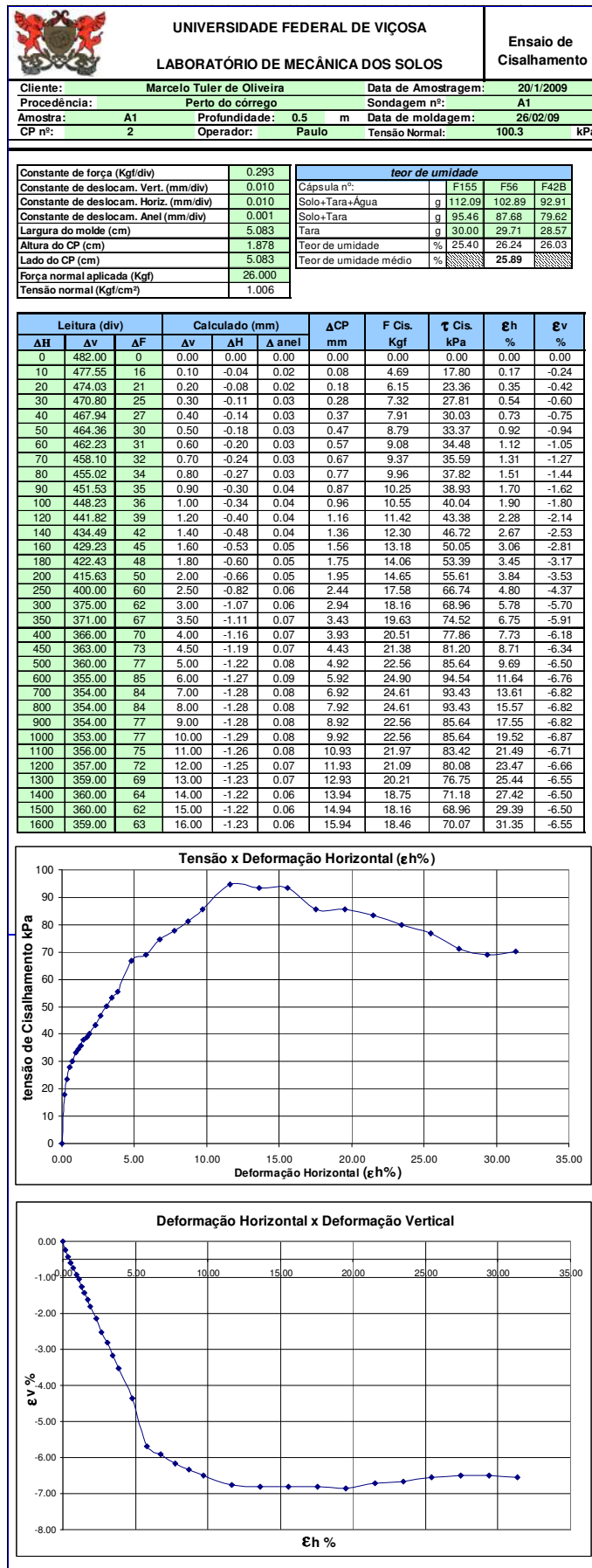
 UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS		Ensaio de Cisalhamento	
		Ciente: Marcelo Tuler de Oliveira	Data de Amostragem: 20/1/2009
Procedência: Perto do córrego		Sondagem nº: A1	
Amostra: A1	Profundidade: 0.5 m	Data de moldagem: 26/02/09	
CP nº: 1	Operador: Paulo	Tensão Normal: 50.3 kPa	

Constante de força (Kgf/div)	0.293	teor de umidade				
Constante de deslocam. Vert. (mm/div)	0.010	Cápsula nº:	30	F97	A91	
Constante de deslocam. Horiz. (mm/div)	0.010	Solo+Tara+Água	g	102.06	93.15	86.60
Constante de deslocam. Anel (mm/div)	0.001	Solo+Tara	g	88.03	79.74	74.71
Largura do molde (cm)	5.083	Tara	g	26.84	28.56	29.73
Altura do CP (cm)	1.878	Teor de umidade	%	22.93	26.20	26.43
Lado do CP (cm)	5.083	Teor de umidade médio	%	25.19		
Força normal aplicada (Kgf)	13.000					
Tensão normal (Kgf/cm <sup>2</sup> )	0.503					

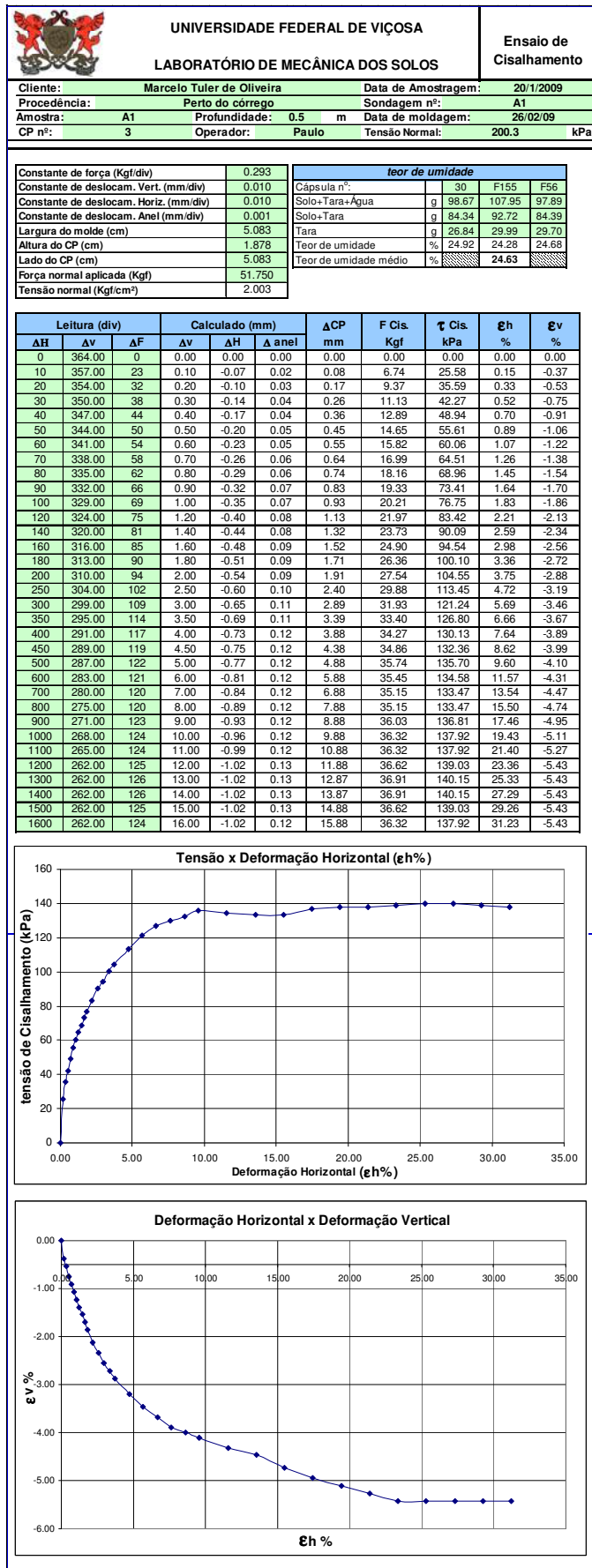
Leitura (div)			Calculado (mm)			ΔCP mm	F Cis. Kgf	τ Cis. kPa	εh %	εv %
ΔH	Δv	ΔF	Δv	ΔH	Δanel					
0	392.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	391.00	5	0.10	-0.01	0.01	0.10	1.46	5.56	0.19	-0.05
20	390.00	7	0.20	-0.02	0.01	0.19	2.05	7.79	0.38	-0.11
30	388.00	10	0.30	-0.04	0.01	0.29	2.93	11.12	0.57	-0.21
40	387.00	12	0.40	-0.05	0.01	0.39	3.52	13.35	0.76	-0.27
50	384.00	14	0.50	-0.08	0.01	0.49	4.10	15.57	0.96	-0.43
60	380.00	16	0.60	-0.12	0.02	0.58	4.69	17.80	1.15	-0.64
70	378.00	18	0.70	-0.14	0.02	0.68	5.27	20.02	1.34	-0.75
80	375.00	20	0.80	-0.17	0.02	0.78	5.86	22.25	1.53	-0.91
90	371.00	21	0.90	-0.21	0.02	0.88	6.15	23.36	1.73	-1.12
100	369.00	21	1.00	-0.23	0.02	0.98	6.15	23.36	1.93	-1.22
120	363.00	23	1.20	-0.29	0.02	1.18	6.74	25.58	2.32	-1.54
140	359.00	25	1.40	-0.33	0.03	1.38	7.32	27.81	2.71	-1.76
160	355.00	26	1.60	-0.37	0.03	1.57	7.62	28.92	3.10	-1.97
180	351.00	27	1.80	-0.41	0.03	1.77	7.91	30.03	3.49	-2.18
200	348.00	28	2.00	-0.44	0.03	1.97	8.20	31.14	3.88	-2.34
250	339.00	30	2.50	-0.53	0.03	2.47	8.79	33.37	4.86	-2.82
300	331.00	32	3.00	-0.61	0.03	2.97	9.37	35.59	5.84	-3.25
350	325.00	34	3.50	-0.67	0.03	3.47	9.96	38.00	6.82	-3.57
400	321.00	36	4.00	-0.71	0.04	3.96	10.55	40.04	7.80	-3.78
450	318.00	38	4.50	-0.74	0.04	4.46	11.13	42.27	8.78	-3.94
500	310.00	40	5.00	-0.82	0.04	4.96	11.72	44.49	9.76	-4.37
550	309.00	40	5.50	-0.83	0.04	5.46	11.72	44.49	10.74	-4.42
600	308.00	40	6.00	-0.84	0.04	5.96	11.72	44.49	11.73	-4.47
700	307.00	41	7.00	-0.85	0.04	6.96	12.01	45.60	13.69	-4.53
800	307.00	41	8.00	-0.85	0.04	7.96	12.01	45.60	15.66	-4.53
900	307.00	40	9.00	-0.85	0.04	8.96	11.72	44.49	17.63	-4.53
1000	307.00	39	10.00	-0.85	0.04	9.96	11.42	43.38	19.60	-4.53
1100	300.00	38	11.00	-0.92	0.04	10.96	11.13	42.27	21.57	-4.90
1200	296.00	39	12.00	-0.96	0.04	11.96	11.42	43.38	23.53	-5.11
1300	294.00	39	13.00	-0.98	0.04	12.96	11.42	43.38	25.50	-5.22
1400	291.00	39	14.00	-1.01	0.04	13.96	11.42	43.38	27.47	-5.38
1500	289.00	40	15.00	-1.03	0.04	14.96	11.72	44.49	29.43	-5.48
1600	288.00	40	16.00	-1.04	0.04	15.96	11.72	44.49	31.40	-5.54

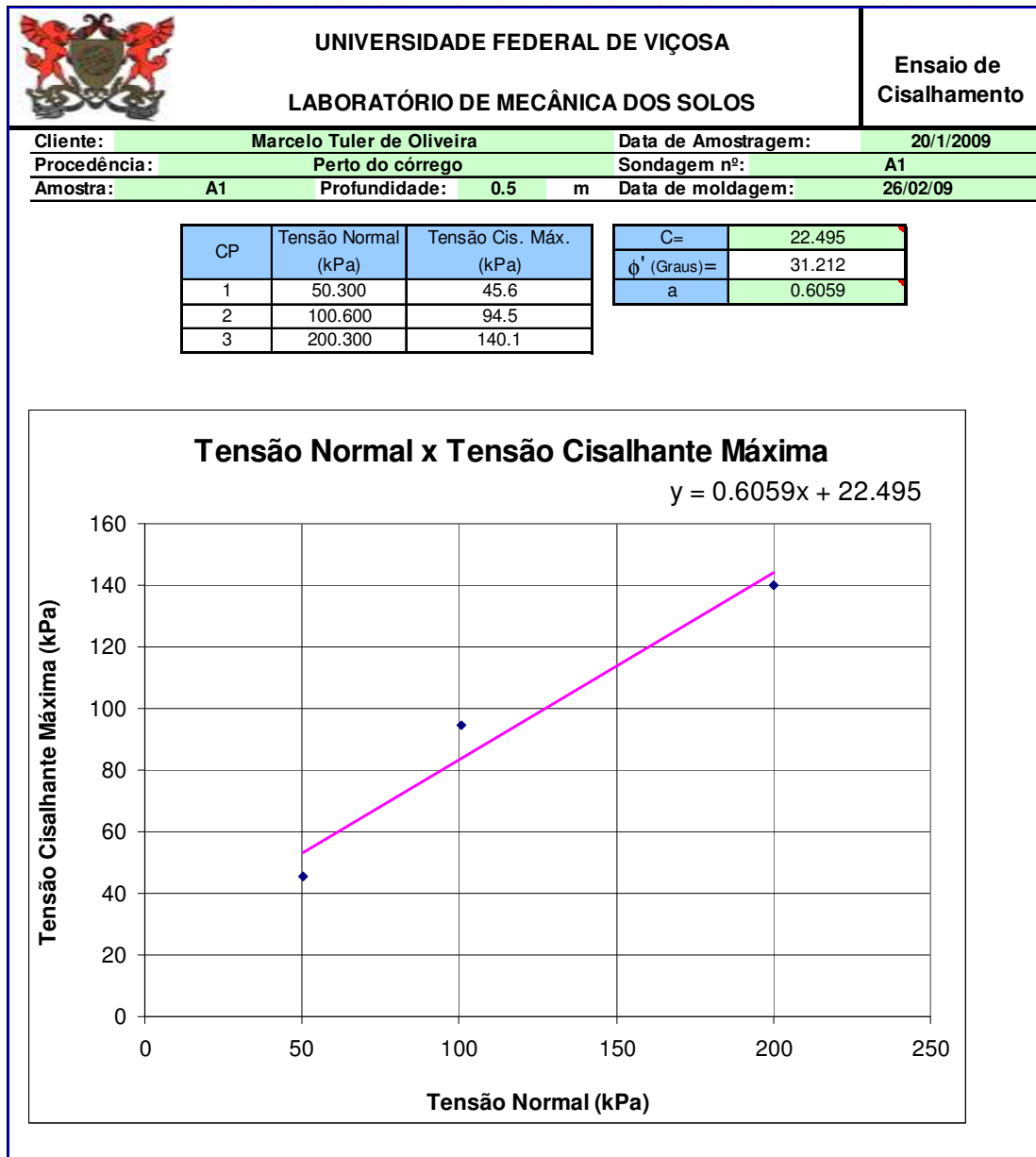


a.2) Amostra A1 – Tensão Normal de 100 kPa

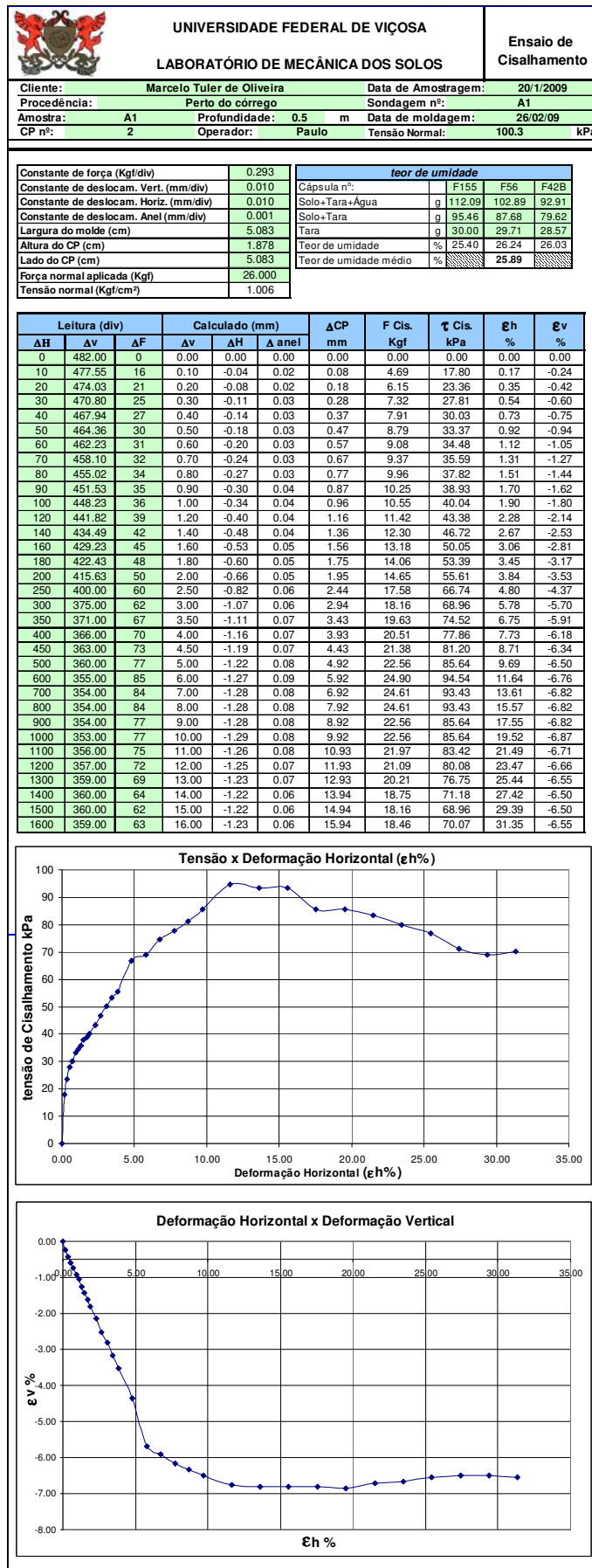


a.3) Amostra A1 – Tensão Normal de 200 kPa



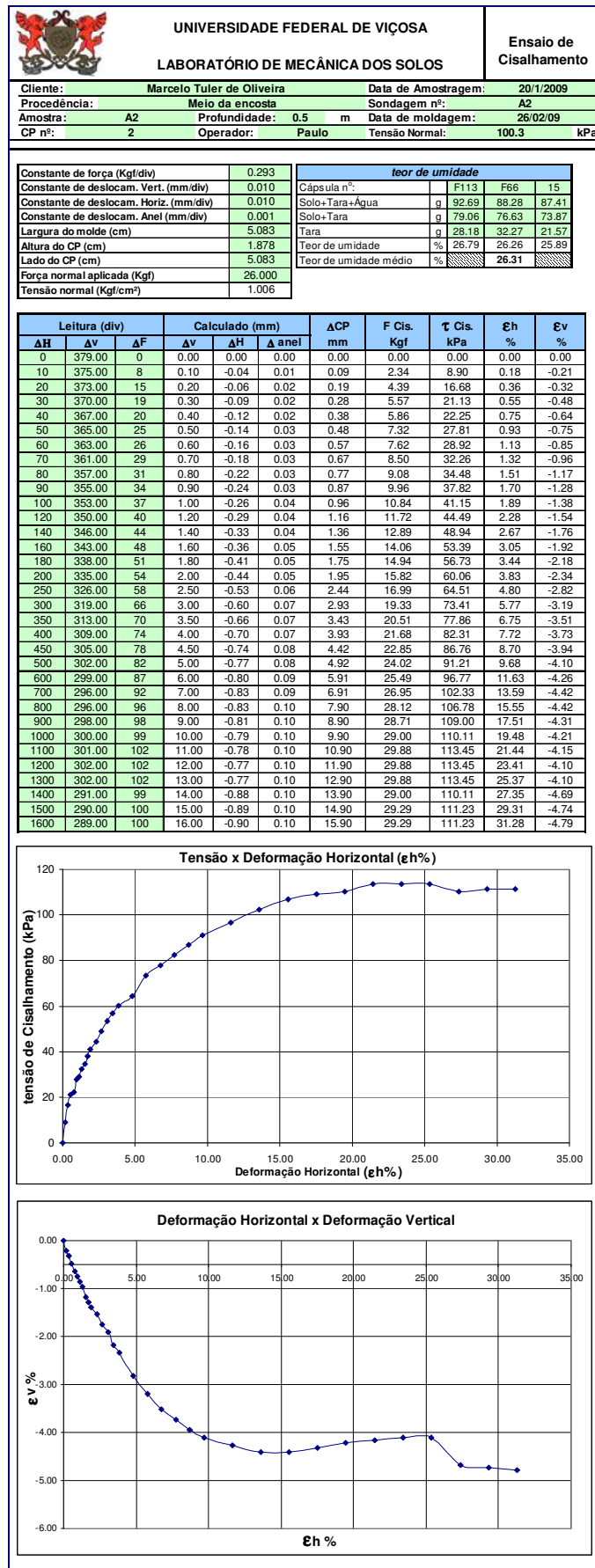
a.4) Amostra A1 – Gráfico Tensão Normal *versus* Tensão Cisalhante

b.1) Amostra A2 – Tensão Normal de 50 kPa

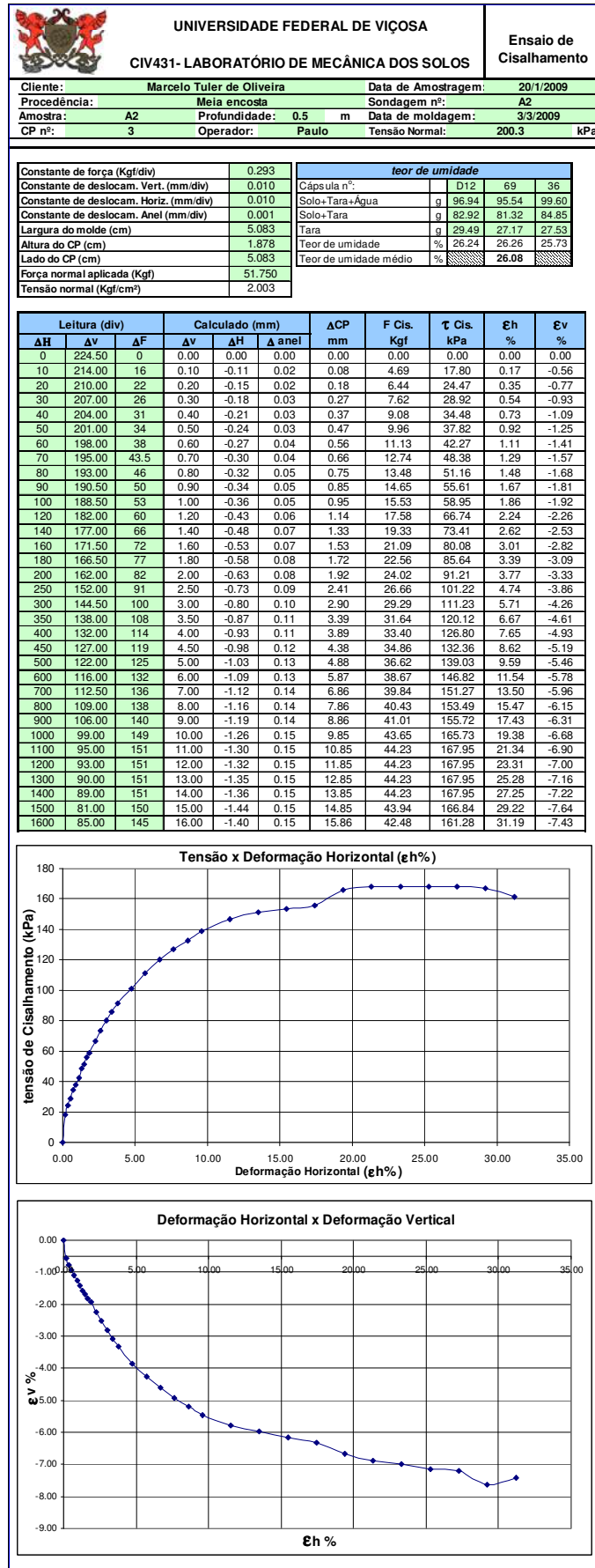


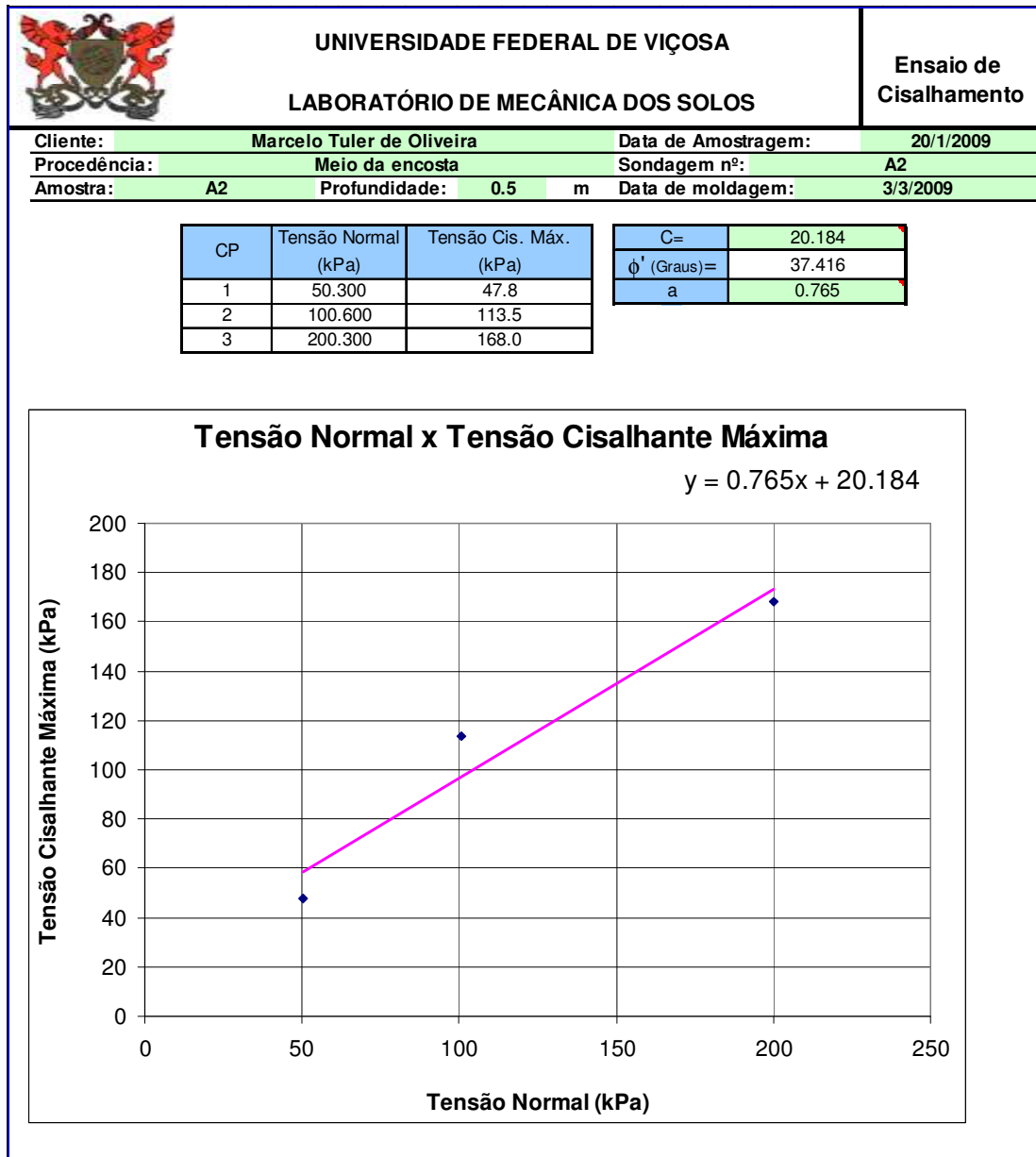


b.2) Amostra A2 – Tensão Normal de 100 kPa

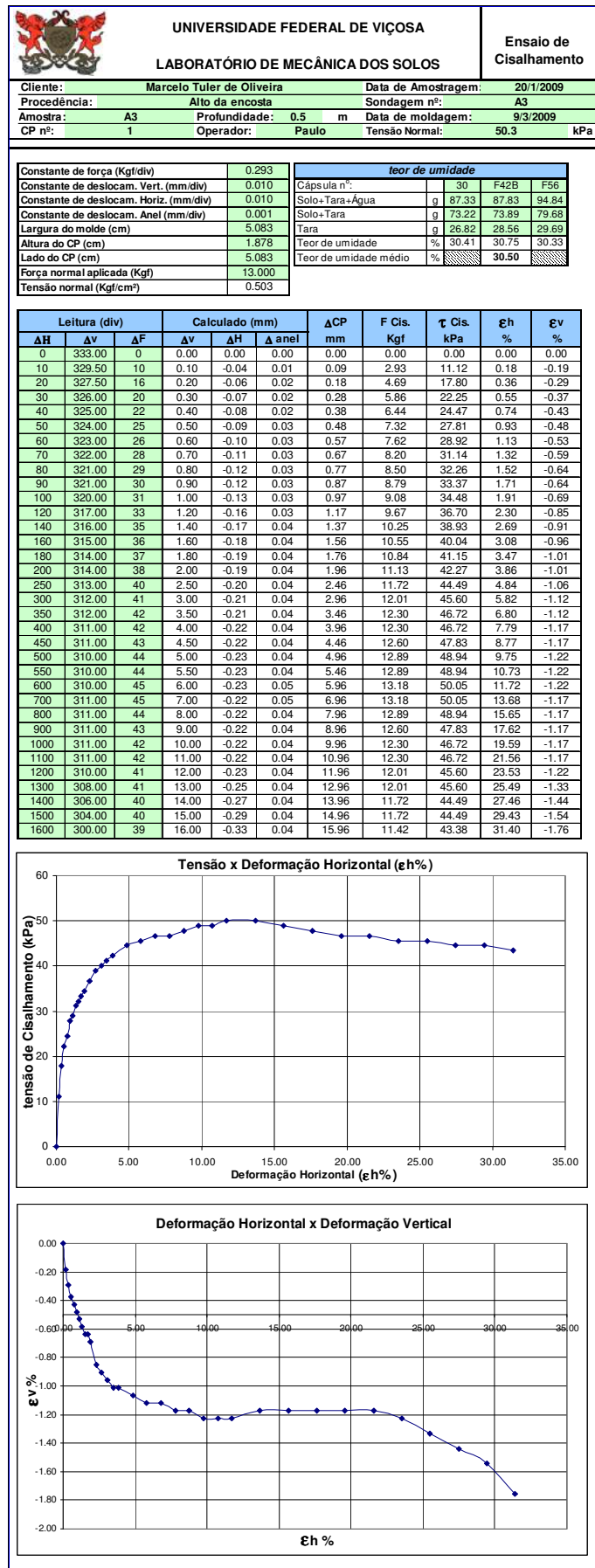


b.3) Amostra A2 – Tensão Normal de 200 kPa

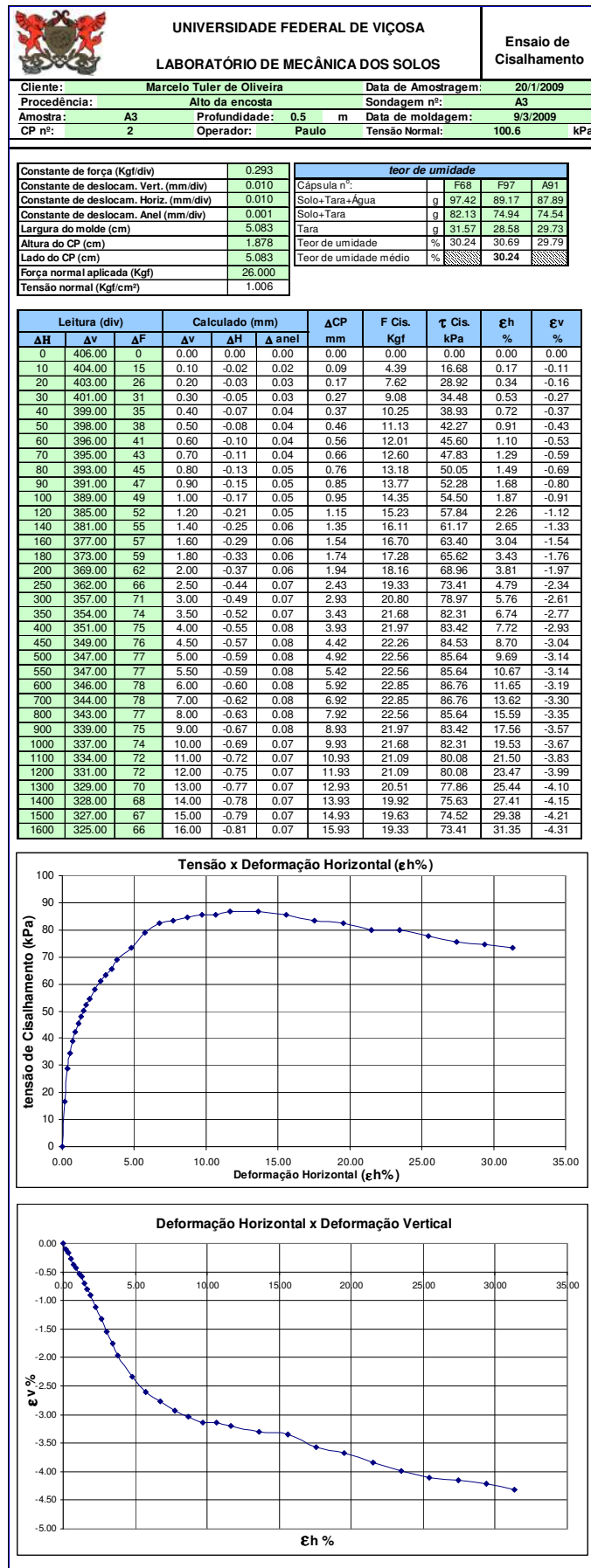


b.4) Amostra A2 – Gráfico Tensão Normal *versus* Tensão Cisalhante

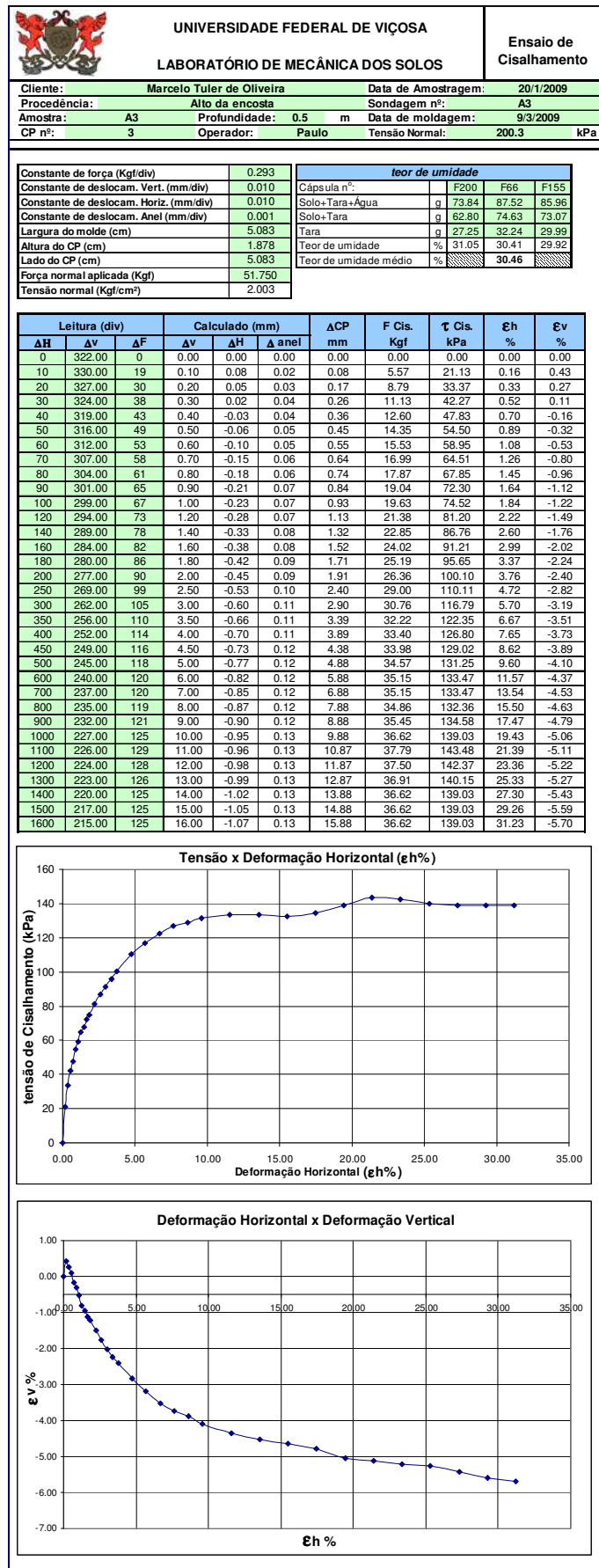
c.1) Amostra A3 – Tensão Normal de 50 kPa

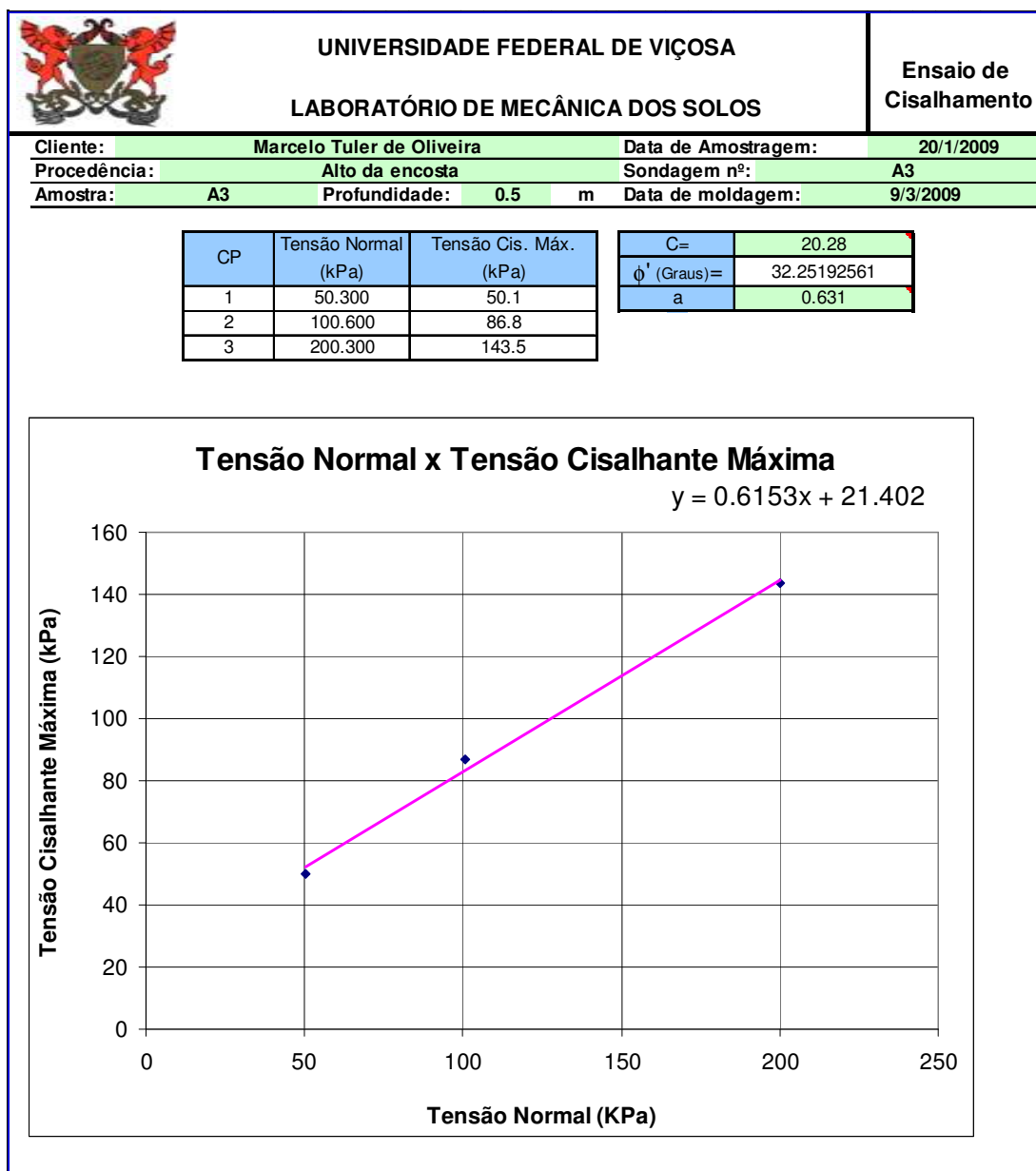


c.2) Amostra A3 – Tensão Normal de 100 kPa



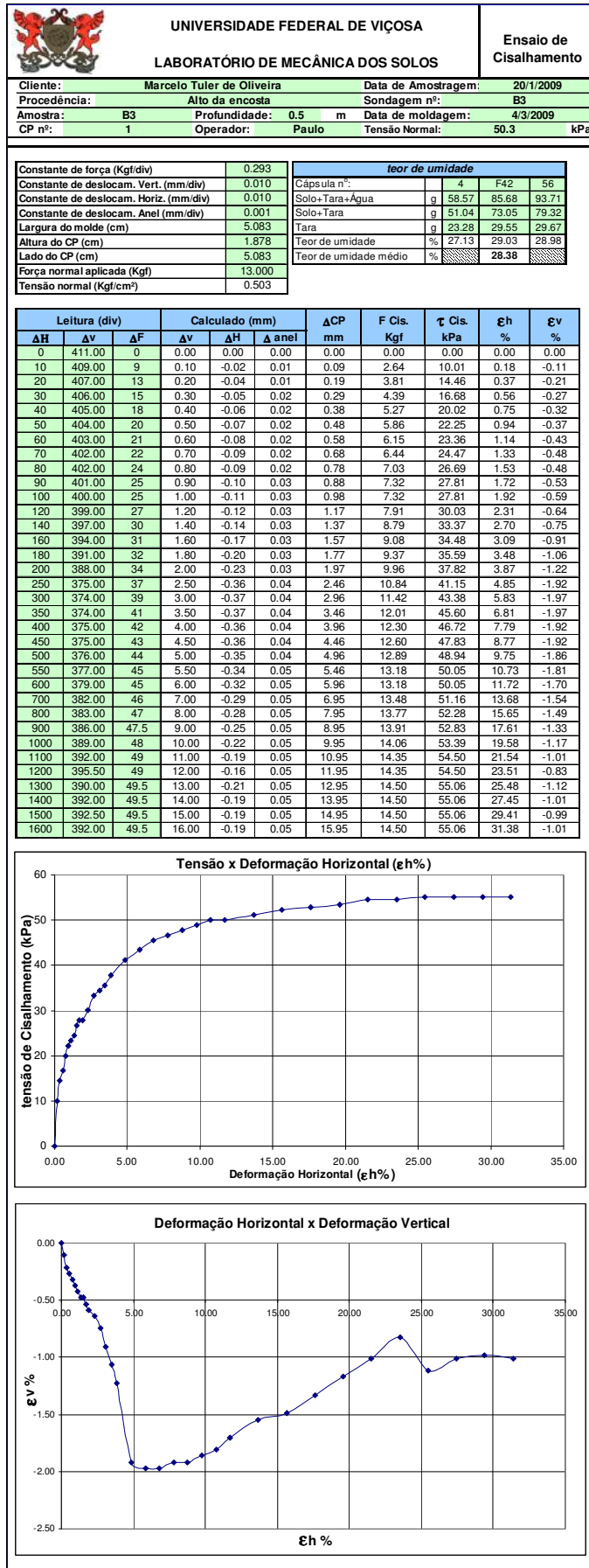
c.3) Amostra A3 – Tensão Normal de 200 kPa



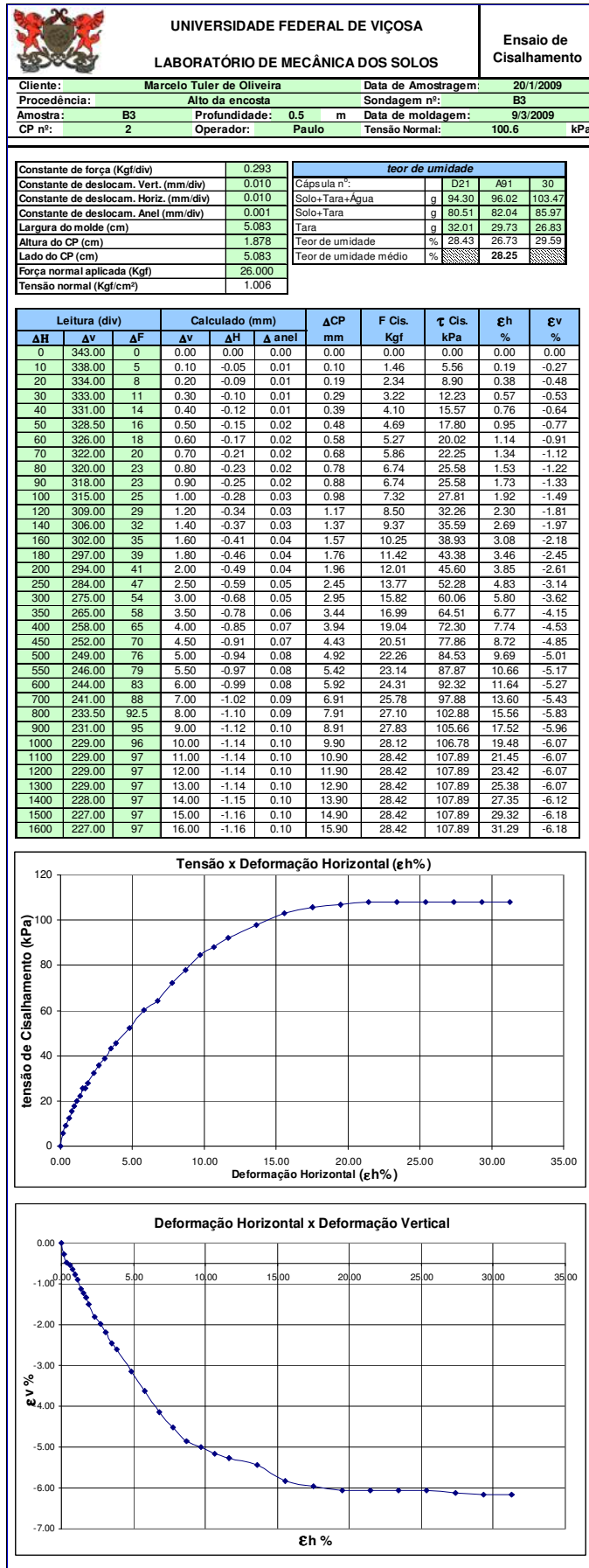
c.4) Amostra A3 – Gráfico Tensão Normal *versus* Tensão Cisalhante



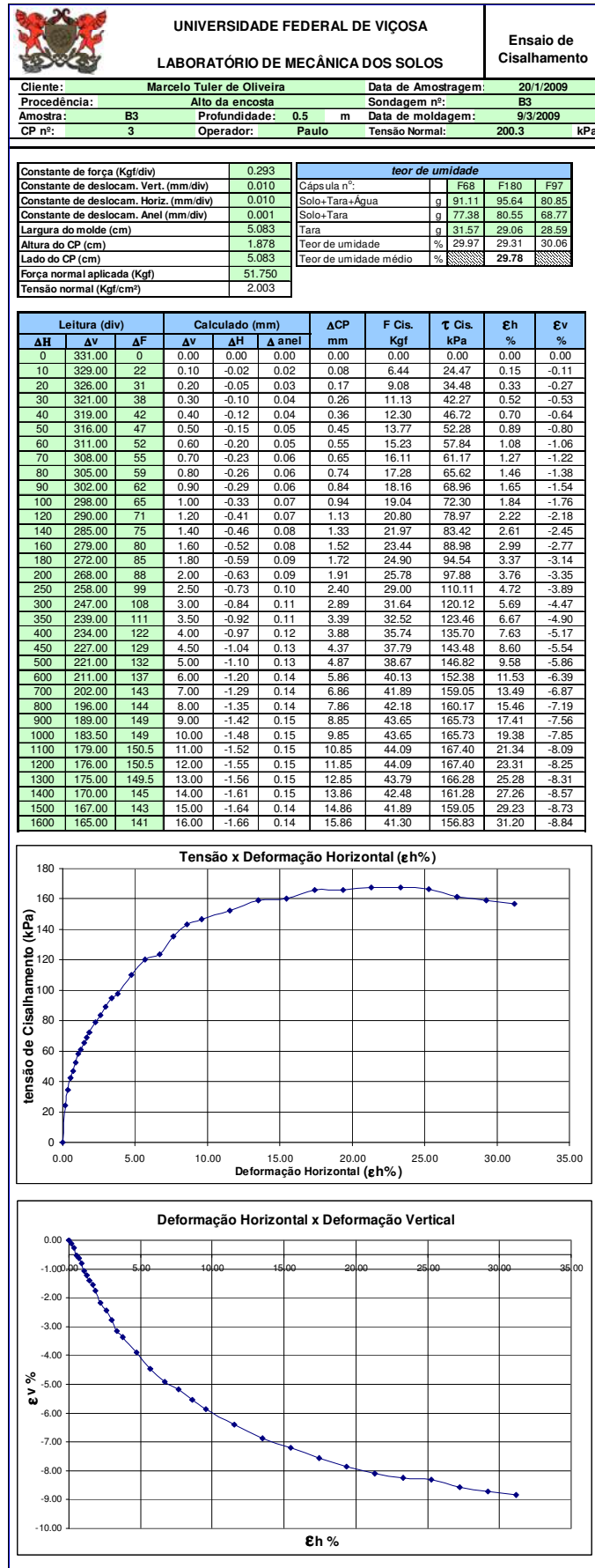
d.1) Amostra B3 – Tensão Normal de 50 kPa

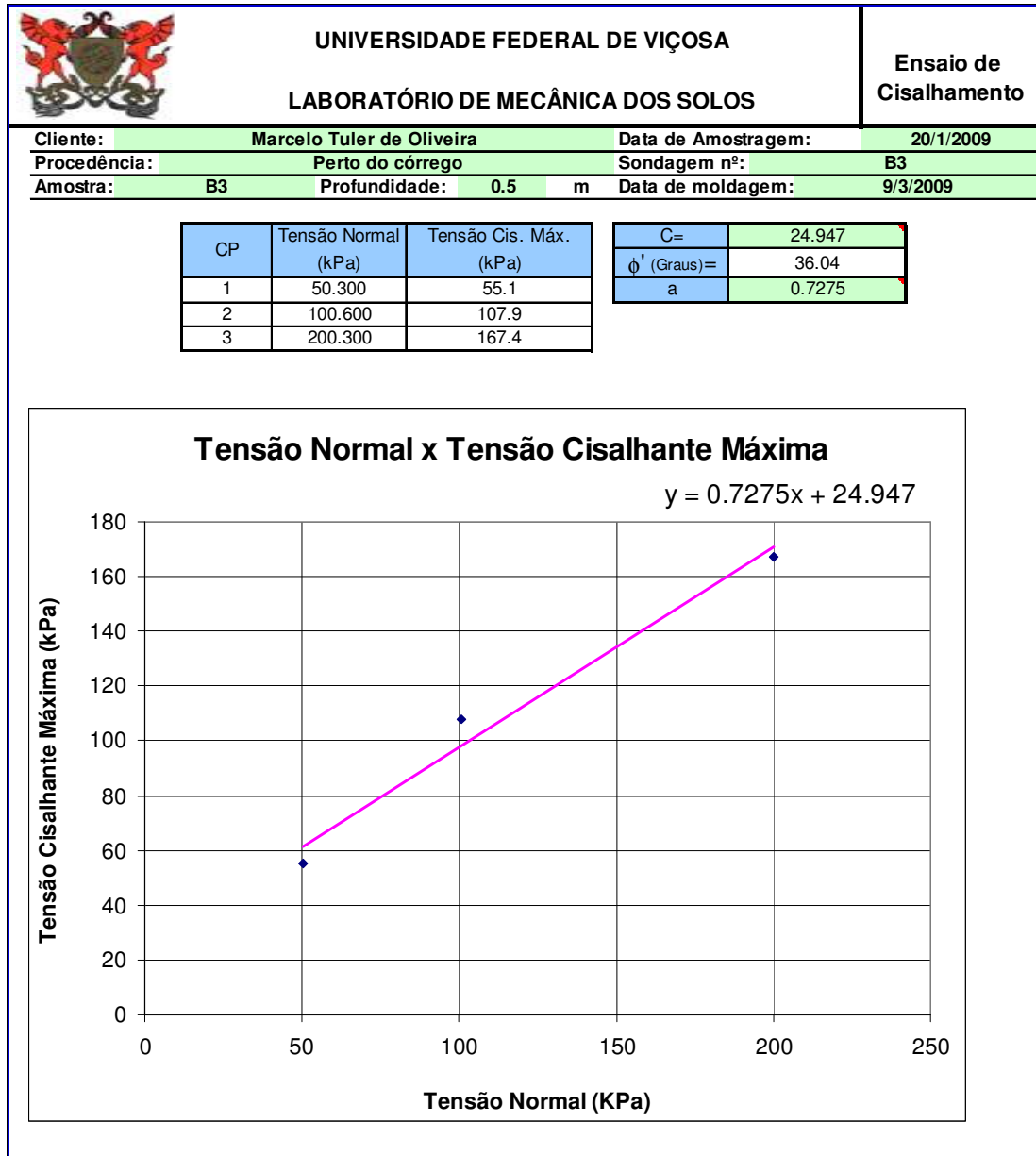


d.2) Amostra B3 – Tensão Normal de 100 kPa




d.3) Amostra B3 – Tensão Normal de 200 kPa




d.4) Amostra B3 – Gráfico Tensão Normal *versus* Tensão Cisalhante

## II.2 – MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DE SOLO – A1, A2, A3, B1, B2, B3


## a) Amostra A1

		UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA			Ensaio de massa específica	
		LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS				
Cliente:	Marcelo Tuler de Oliveira		Data de Amostragem:	20/1/2009		
Procedência:	Perto do córrego		Sondagem n.º:	A1		
Amostra:	A1		Data de moldagem:	16/3/2009		
CP n.º:	1		Picnómetro	49		
Profundidade:	0,5 m		Operador:	Nilton		
Cápsulas	Número	F51	F8	6		
Massa bruta úmida	(g)	62.06	68.81	67.74		
Massa bruta seca	(g)	60.75	67.22	66.33		
Tara da cápsula	(g)	28.00	28.36	32.19		
Massa de água	(g)	1.31	1.59	1.41		
Massa do solo	(g)	32.75	38.86	34.14		
Teor de umidade	(%)	4.00	4.09	4.13		
Média (W)	(%)			4.07		
Massa do solo úmido	(g)	75				
Média (W)	(%)	4.07				
Massa de solo seco	(g)	72.06				
PICNÓMETRO	49					
PARÂMETROS	A	B	C			
	-0.003000	0.028500	632.310000			
DETERMINAÇÃO	1	2	3	4	5	
Massa do picnómetro + massa do solo + massa da água	(g)	674.63	674.02	673.33	672.87	672.33
Temperatura do ensaio	°C	24.80	28.80	33.30	35.30	38.50
Massa do picnómetro + massa de água	(g)	629.76	629.00	628.03	627.57	626.77
Massa do solo seco	(g)	72.06	72.06	72.06	72.06	72.06
Massa específica da água	g/cm <sup>3</sup>	0.9971	0.9971	0.9947	0.9941	0.993
Massa específica do solo	g/cm <sup>3</sup>	2.642	2.657	2.678	2.677	2.700
Massa específica do solo (média)	g/cm <sup>3</sup>	2.671				


## b) Amostra A2

		UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA			Ensaio de massa específica	
		LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS				
Cliente:	Marcelo Tuler de Oliveira		Data de Amostragem:	20/1/2009		
Procedência:	Meia encosta		Sondagem n.º:	A2		
Amostra:	A2		Data de moldagem:	16/3/2009		
CP n.º:	1		Picnómetro	19		
Profundidade:	0,5 m		Operador:	Nilton		
Cápsulas	Número	380	201	94		
Massa bruta úmida	(g)	65.31	69.11	63.68		
Massa bruta seca	(g)	64.98	68.64	63.29		
Tara da cápsula	(g)	25.82	27.68	30.55		
Massa de água	(g)	0.33	0.47	0.39		
Massa do solo	(g)	39.16	40.96	32.74		
Teor de umidade	(%)	0.84	1.15	1.19		
Média (W)	(%)			1.06		
Massa do solo úmido	(g)	75				
Média (W)	(%)	1.06				
Massa de solo seco	(g)	74.21				
PICNÓMETRO	19					
PARÂMETROS	A	B	C			
	-0.002231	-0.000893	640.660000			
DETERMINAÇÃO	1	2	3	4	5	
Massa do picnómetro + massa do solo + massa da água	(g)	684.33	683.95	683.45	683.03	682.58
Temperatura do ensaio	°C	26.00	31.00	33.00	35.00	37.50
Massa do picnómetro + massa de água	(g)	639.18	638.54	638.26	637.96	637.56
Massa do solo seco	(g)	74.21	74.21	74.21	74.21	74.21
Massa específica da água	g/cm <sup>3</sup>	0.9968	0.9954	0.9947	0.9941	0.9932
Massa específica do solo	g/cm <sup>3</sup>	2.546	2.564	2.543	2.532	2.525
Massa específica do solo (média)	g/cm <sup>3</sup>	2.542				


c) Amostra A3

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS	Ensaio de massa específica				
Cliente:	Marcelo Tuler de Oliveira	Data de Amostragem:	20/1/2009			
Procedência:	Topo da encosta	Sondagem n°:	A3			
Amostra:	A3	Data de moldagem:	16/3/2009			
CP n°:	1	Picnômetro	19			
Profundidade:	0,5 m	Operador:	Nilton			
Cápsulas	Número	27	F124	A30		
Massa bruta úmida	(g)	64.19	68.94	60.02		
Massa bruta seca	(g)	63.33	68.02	59.14		
Tara da cápsula	(g)	29.81	29.91	25.87		
Massa de água	(g)	0.86	0.92	0.88		
Massa do solo	(g)	33.52	38.11	33.27		
Teor de umidade	(%)	2.57	2.41	2.65		
Média (W)	(%)	2.54				
Massa do solo úmido	(g)	75				
Média (W)	(%)	2.54				
Massa de solo seco	(g)	73.14				
PICNÔMETRO	19					
PARÂMETROS	A	B	C			
	-0.002231	-0.000893	640.660000			
DETERMINAÇÃO	1	2	3	4	5	
Massa do picnômetro + massa do solo + massa da água	(g)	685.3	684.98	684.58	684.04	683.56
Temperatura do ensaio	°C	23.50	29.00	32.00	35.00	37.50
Massa do picnômetro + massa de água	(g)	639.45	638.81	638.40	637.96	637.56
Massa do solo seco	(g)	73.14	73.14	73.14	73.14	73.14
Massa específica da água	g/cm <sup>3</sup>	0.9974	0.996	0.9951	0.9941	0.9932
Massa específica do solo	g/cm <sup>3</sup>	2.673	2.701	2.699	2.687	2.677
Massa específica do solo (média)	g/cm <sup>3</sup>	2.687				


d) Amostra B1

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS	Ensaio de massa específica				
Cliente:	Marcelo Tuler de Oliveira	Data de Amostragem:	20/1/2009			
Procedência:	Pé da encosta	Sondagem n°:	B1			
Amostra:	B1	Data de moldagem:	16/3/2009			
CP n°:	1	Picnômetro	49			
Profundidade:	0,5 m	Operador:	Nilton			
Cápsulas	Número	45	84	F147		
Massa bruta úmida	(g)	66.47	72.4	64.58		
Massa bruta seca	(g)	66.18	72.08	64.26		
Tara da cápsula	(g)	30.59	28.36	32.19		
Massa de água	(g)	0.29	0.32	0.32		
Massa do solo	(g)	35.59	43.72	32.07		
Teor de umidade	(%)	0.81	0.73	1.00		
Média (W)	(%)	0.85				
Massa do solo úmido	(g)	75				
Média (W)	(%)	0.85				
Massa de solo seco	(g)	74.37				
PICNÔMETRO	49					
PARÂMETROS	A	B	C			
	-0.003000	0.028500	635.310000			
DETERMINAÇÃO	1	2	3	4	5	
Massa do picnômetro + massa do solo + massa da água	(g)	678.87	678.53	678.02	677.74	676.96
Temperatura do ensaio	°C	23.00	27.50	30.50	32.00	36.50
Massa do picnômetro + massa de água	(g)	633.07	632.26	631.65	631.33	630.27
Massa do solo seco	(g)	74.37	74.37	74.37	74.37	74.37
Massa específica da água	g/cm <sup>3</sup>	0.9971	0.9971	0.9947	0.9941	0.993
Massa específica do solo	g/cm <sup>3</sup>	2.596	2.639	2.642	2.645	2.668
Massa específica do solo (média)	g/cm <sup>3</sup>	2.638				

e) Amostra B2

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS	Ensaio de massa específica				
Cliente:	Marcelo Tuler de Oliveira	Data de Amostragem:	20/1/2009			
Procedência:	Meio da encosta	Sondagem n°:	B2			
Amostra:	B2	Data de moldagem:	16/3/2009			
CP n°:	1	Picnômetro	8			
Profundidade:	0,5 m	Operador:	Nilton			
Cápsulas	Número	F 200	F142	F100		
Massa bruta úmida	(g)	68.33	70.9	73.04		
Massa bruta seca	(g)	67.05	69.67	71.76		
Tara da cápsula	(g)	27.32	31.3	30.74		
Massa de água	(g)	1.28	1.23	1.28		
Massa do solo	(g)	39.73	38.37	41.02		
Teor de umidade	(%)	3.22	3.21	3.12		
Média (W)	(%)	3.18				
Massa do solo úmido	(g)	75				
Média (W)	(%)	3.18				
Massa de solo seco	(g)	72.69				
PICNÔMETRO	8					
PARÂMETROS	A	B	C			
	-0.001711	0.045120	676.000000			
DETERMINAÇÃO	1	2	3	4	5	
Massa do picnômetro + massa do solo + massa da água	(g)	717.11	716.39	716.04	715.65	715.36
Temperatura do ensaio	°C	23.80	27.50	31.00	32.00	36.50
Massa do picnômetro + massa de água	(g)	673.96	673.47	672.96	672.80	672.07
Massa do solo seco	(g)	72.69	72.69	72.69	72.69	72.69
Massa específica da água	g/cm <sup>3</sup>	0.9973	0.9964	0.9954	0.9951	0.9935
Massa específica do solo	g/cm <sup>3</sup>	2.455	2.433	2.444	2.424	2.456
Massa específica do solo (média)	g/cm <sup>3</sup>	2.442				

f) Amostra B3

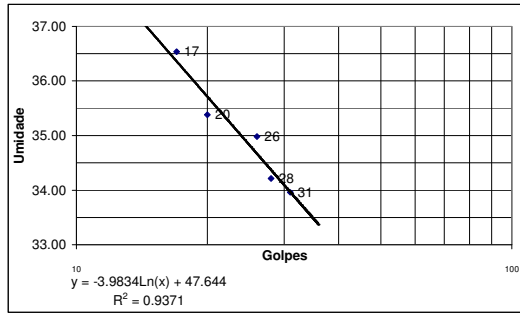
	UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS	Ensaio de massa específica				
Cliente:	Marcelo Tuler de Oliveira	Data de Amostragem:	20/1/2009			
Procedência:	Alto da encosta	Sondagem n°:	B3			
Amostra:	B3	Data de moldagem:	16/3/2009			
CP n°:	1	Picnômetro	10			
Profundidade:	0,5 m	Operador:	Nilton			
Cápsulas	Número	9	F196	38		
Massa bruta úmida	(g)	78.07	72.03	68.1		
Massa bruta seca	(g)	77.5	71.49	67.58		
Tara da cápsula	(g)	30.10	31.23	25.5		
Massa de água	(g)	0.57	0.54	0.52		
Massa do solo	(g)	47.4	40.26	42.08		
Teor de umidade	(%)	1.20	1.34	1.24		
Média (W)	(%)	1.26				
Massa do solo úmido	(g)	75				
Média (W)	(%)	1.26				
Massa de solo seco	(g)	74.07				
PICNÔMETRO	10					
PARÂMETROS	A	B	C			
	0.000220	-0.148410	691.060000			
DETERMINAÇÃO	1	2	3	4	5	
Massa do picnômetro + massa do solo + massa da água	(g)	733.98	733.67	733.24	732.87	732.2
Temperatura do ensaio	°C	24.00	28.00	31.00	34.00	38.00
Massa do picnômetro + massa de água	(g)	694.75	695.39	695.87	696.36	697.02
Massa do solo seco	(g)	74.07	74.07	74.07	74.07	74.07
Massa específica da água	g/cm <sup>3</sup>	0.9973	0.9963	0.9954	0.9944	0.993
Massa específica do solo	g/cm <sup>3</sup>	2.120	2.062	2.009	1.961	1.891
Massa específica do solo (média)	g/cm <sup>3</sup>	2.009				



**II.3 – ENSAIOS LIMITES DE ATTERBERG - AMOSTRAS A1, A2, A3, B1, B2, B3**

**a) Amostra A1**

PROCEDENCIA DO SOLO:		A1-Perito do córrego						
LIMITE DE LIQUIDEZ								
Determinação	1	2	3	4	5	6	7	
Cápsula	16A	6	W8	28	13			
Massa Bruta Úmida (g)	18.30	17.80	21.39	16.71	20.98			
Massa Bruta Seca (g)	15.98	15.55	18.64	14.66	18.23			
Tara da Cápsula (g)	9.60	9.20	10.75	8.70	10.15			
Massa de Água (g)	2.33	2.25	2.76	2.04	2.75			
Massa do Solo Seco (g)	6.38	6.35	7.89	5.97	8.09			
Umidade (%)	36.53	35.38	34.98	34.22	33.96			
Golpes	17	20	26	28	31			

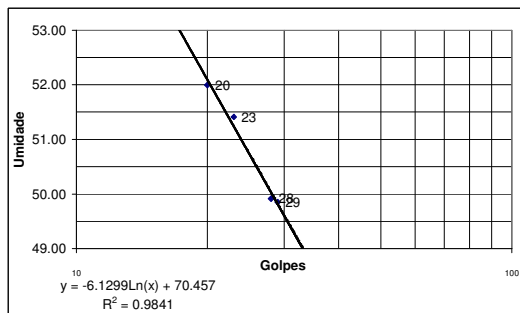


LIMITE DE PLASTICIDADE								
Determinação	1	2	3	4	5	6	7	
Cápsula	2P	11	68	P13				
Massa Bruta Úmida (g)	10.70	7.49	10.29	8.53				
Massa Bruta Seca (g)	10.62	7.42	10.22	8.48				
Tara da Cápsula (g)	10.23	7.00	9.83	8.21				
Massa de Água (g)	0.08	0.07	0.07	0.05				
Massa do Solo Seco (g)	0.40	0.42	0.39	0.27				
Umidade (%)	19.44	17.79	19.48	19.70				
Média (%)	18.15			A		20.06		
Intervalo (%)	19.44			19.48		19.70		
Umidade no intervalo (%)	18.56539595			A		20.51964815		
Nova Média (%)	19.54							
Novo Intervalo (%)	18.56539595			A		20.51964815		
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	19.54							

UMIDADE	%
LIMITE DE LIQUIDEZ	35 %
LIMITE DE PLASTICIDADE	20 %
INDICE DE PLASTICIDADE	15 %
INDICE DE CONSISTENCIA	%

**b) Amostra A2**

PROCEDENCIA DO SOLO:		A2-Meia encosta						
LIMITE DE LIQUIDEZ								
Determinação	1	2	3	4	5	6	7	
Cápsula	22	1	16A	6				
Massa Bruta Úmida (g)	18.51	20.35	18.77	18.92				
Massa Bruta Seca (g)	15.86	17.10	15.66	15.69				
Tara da Cápsula (g)	10.77	10.59	9.60	9.19				
Massa de Água (g)	2.65	3.25	3.11	3.24				
Massa do Solo Seco (g)	5.09	6.51	6.06	6.49				
Umidade (%)	51.99	49.92	51.41	49.85				
Golpes	20	28	23	29				

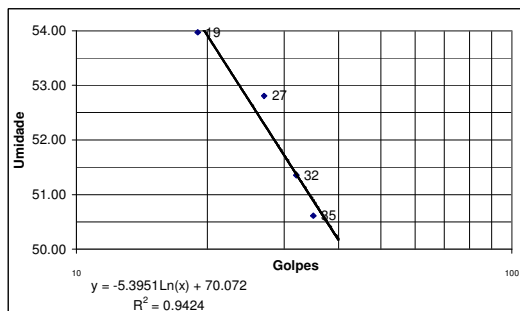


LIMITE DE PLASTICIDADE								
Determinação	1	2	3	4	5	6	7	
Cápsula	29	69H	6	5				
Massa Bruta Úmida (g)	10.70	10.44	8.27	9.30				
Massa Bruta Seca (g)	10.63	10.36	8.19	9.23				
Tara da Cápsula (g)	10.30	10.04	7.85	8.91				
Massa de Água (g)	0.08	0.08	0.08	0.08				
Massa do Solo Seco (g)	0.33	0.32	0.34	0.32				
Umidade (%)	23.85	23.53	23.89	24.29				
Média (%)	22.70			A		25.09		
Intervalo (%)	23.85			23.53		23.89		
Umidade no intervalo (%)	22.69707911			A		25.08624534		
Nova Média (%)	23.89							
Novo Intervalo (%)	22.69707911			A		25.08624534		
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	23.89							

UMIDADE	%
LIMITE DE LIQUIDEZ	51 %
LIMITE DE PLASTICIDADE	24 %
INDICE DE PLASTICIDADE	27 %
INDICE DE CONSISTENCIA	%

**c) Amostra A3**

PROCEDENCIA DO SOLO:		A3-Topo da encosta						
LIMITE DE LIQUIDEZ								
Determinação	1	2	3	4	5	6	7	
Cápsula	28	6	16A	76H				
Massa Bruta Úmida (g)	17.62	17.20	17.23	16.98				
Massa Bruta Seca (g)	14.49	14.44	14.66	14.57				
Tara da Cápsula (g)	8.70	9.19	9.60	9.87				
Massa de Água (g)	3.13	2.77	2.56	2.41				
Massa do Solo Seco (g)	5.79	5.24	5.06	4.69				
Umidade (%)	53.97	52.80	50.61	51.35				
Golpes	19	27	35	32				

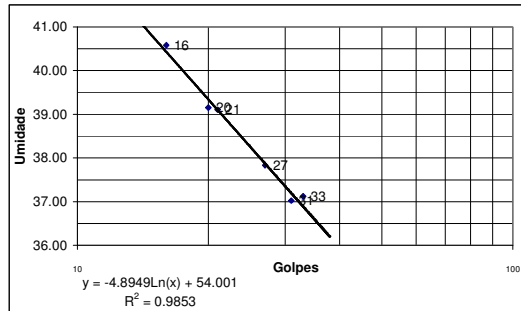


LIMITE DE PLASTICIDADE								
Determinação	1	2	3	4	5	6	7	
Cápsula	P27	13	W8	P31				
Massa Bruta Úmida (g)	9.99	10.56	11.15	10.23				
Massa Bruta Seca (g)	9.88	10.47	11.05	10.16				
Tara da Cápsula (g)	9.55	10.17	10.76	9.95				
Massa de Água (g)	0.11	0.10	0.10	0.07				
Massa do Solo Seco (g)	0.32	0.30	0.29	0.21				
Umidade (%)	34.58	32.77	34.49	34.15				
Média (%)	32.30			A		35.70		
Intervalo (%)	34.58			32.77		34.49		
Umidade no intervalo (%)	32.29782082			A		35.69759143		
Nova Média (%)	34.00							
Novo Intervalo (%)	32.29782082			A		35.69759143		
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	34.00							

UMIDADE	%
LIMITE DE LIQUIDEZ	53 %
LIMITE DE PLASTICIDADE	34 %
INDICE DE PLASTICIDADE	19 %
INDICE DE CONSISTENCIA	%

d) Amostra B1

PROCEDENCIA DO SOLO:		B1- Pé da encosta (Perto da casa)						
		LIMITE DE LIQUIDEZ						
Determinação		1	2	3	4	5	6	7
Cápsula		P21	P31	P27	76H	64	56	
Massa Bruta Úmida (g)		19.43	17.81	17.95	22.13	18.14	18.96	
Massa Bruta Seca (g)		16.75	15.67	15.58	18.82	15.61	16.20	
Tara da Cápsula (g)		9.67	9.92	9.55	9.88	9.13	9.40	
Massa de Água (g)		2.68	2.14	2.36	3.31	2.53	2.76	
Massa do Solo Seco (g)		7.08	5.75	6.04	8.94	6.48	6.80	
Umidade (%)		37.83	37.12	39.15	37.02	39.10	40.58	
Golpes		27	33	20	31	21	16	

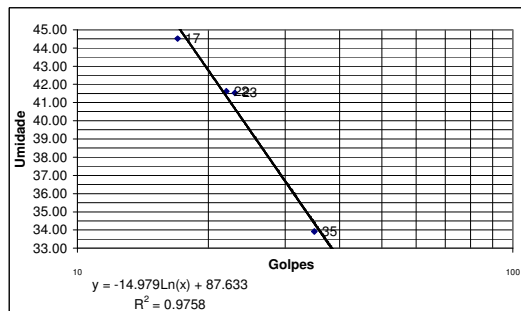


		LIMITE DE PLASTICIDADE				
Determinação		1	2	3	4	5
Cápsula		52	73	1	P05	
Massa Bruta Úmida (g)		8.35	9.54	11.08	10.95	
Massa Bruta Seca (g)		8.26	9.45	10.98	10.85	
Tara da Cápsula (g)		7.93	9.12	10.60	10.47	
Massa de Água (g)		0.09	0.10	0.11	0.10	
Massa do Solo Seco (g)		0.33	0.33	0.37	0.38	
Umidade (%)		28.00	28.79	28.42	26.98	
Média (%)		26.65				28.05
Intervalo (%)		A				29.45
Umidade no intervalo (%)		28.00	28.79	28.42	26.98	
Nova Média (%)		28.05				
Novo Intervalo (%)		26.64518113				29.44993704
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)		28.05				

UMIDADE		%
LIMITE DE LIQUIDEZ	38	%
LIMITE DE PLASTICIDADE	28	%
INDICE DE PLASTICIDADE	10	%
INDICE DE CONSISTENCIA		%

e) Amostra B2

PROCEDENCIA DO SOLO:		B2- Meia encosta (Perto da casa)						
		LIMITE DE LIQUIDEZ						
Determinação		1	2	3	4	5	6	7
Cápsula		85	6	26	64			
Massa Bruta Úmida (g)		17.22	16.08	17.90	16.08			
Massa Bruta Seca (g)		14.64	13.66	15.35	14.04			
Tara da Cápsula (g)		8.84	7.85	7.82	9.13			
Massa de Água (g)		2.58	2.42	2.55	2.04			
Massa do Solo Seco (g)		5.80	5.81	7.53	4.92			
Umidade (%)		44.51	41.62	33.92	41.53			
Golpes		17	22	35	23			

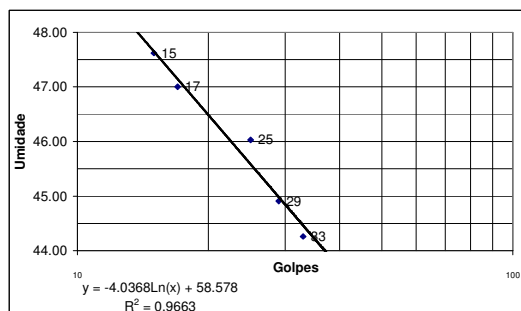


		LIMITE DE PLASTICIDADE				
Determinação		1	2	3	4	5
Cápsula		49	52	P3	19	
Massa Bruta Úmida (g)		8.02	8.41	9.66	8.50	
Massa Bruta Seca (g)		7.95	8.32	9.54	8.41	
Tara da Cápsula (g)		7.65	7.91	9.00	8.02	
Massa de Água (g)		0.06	0.09	0.12	0.09	
Massa do Solo Seco (g)		0.31	0.40	0.54	0.39	
Umidade (%)		20.59	23.02	21.79	22.25	
Média (%)		20.82				21.91
Intervalo (%)		A				23.01
Umidade no intervalo (%)		21.79				22.25
Nova Média (%)		22.02				
Novo Intervalo (%)		20.91821572				23.12013316
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)		22.02				

UMIDADE		%
LIMITE DE LIQUIDEZ	40	%
LIMITE DE PLASTICIDADE	22	%
INDICE DE PLASTICIDADE	18	%
INDICE DE CONSISTENCIA		%

f) Amostra B3

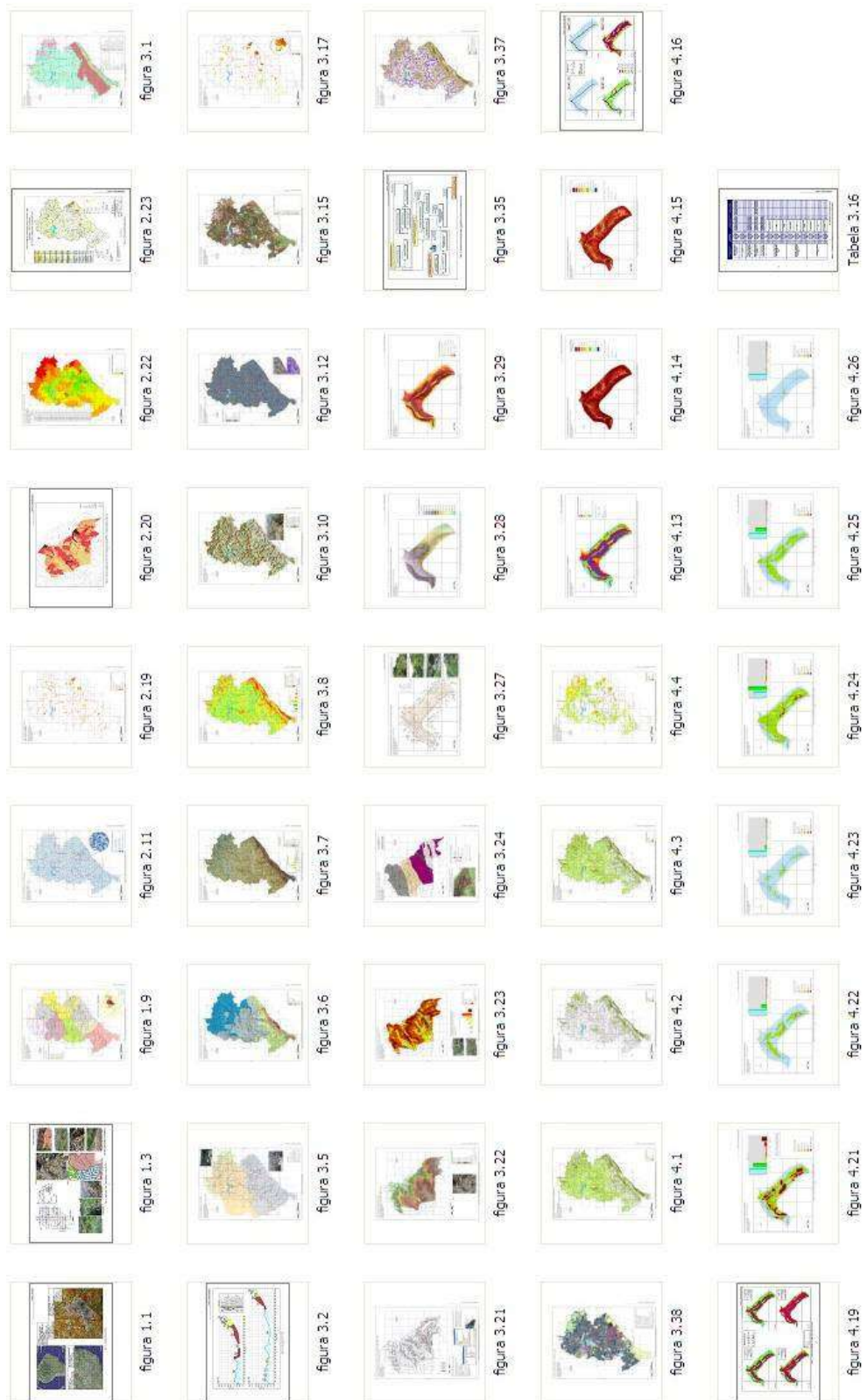
PROCEDENCIA DO SOLO:		B3 - Alto da encosta						
		LIMITE DE LIQUIDEZ						
Determinação		1	2	3	4	5	6	7
Cápsula		28	18	84	3	7		
Massa Bruta Úmida (g)		14.32	16.59	17.87	16.99	13.62		
Massa Bruta Seca (g)		12.38	14.70	15.32	14.79	11.66		
Tara da Cápsula (g)		8.06	10.43	9.78	10.17	7.49		
Massa de Água (g)		1.94	1.89	2.55	2.20	1.96		
Massa do Solo Seco (g)		4.32	4.27	5.54	4.62	4.17		
Umidade (%)		44.91	44.26	46.03	47.62	47.00		
Golpes		29	33	25	15	17		



		LIMITE DE PLASTICIDADE				
Determinação		1	2	3	4	5
Cápsula		20	16	14	51	44
Massa Bruta Úmida (g)		11.05	9.53	9.84	10.76	9.82
Massa Bruta Seca (g)		10.81	9.32	9.64	10.54	9.59
Tara da Cápsula (g)		10.08	8.67	9.06	9.90	8.88
Massa de Água (g)		0.24	0.21	0.20	0.22	0.23
Massa do Solo Seco (g)		0.73	0.65	0.58	0.64	0.71
Umidade (%)		32.88	32.31	34.48	34.38	33.33
Média (%)		31.80				33.48
Intervalo (%)		A				35.15
Umidade no intervalo (%)		32.88	32.31	34.48	34.38	33.33
Nova Média (%)		33.48				
Novo Intervalo (%)		31.80134435				35.14885428
LIMITE DE PLASTICIDADE (%)		33.48				

UMIDADE		%
LIMITE DE LIQUIDEZ	46	%
LIMITE DE PLASTICIDADE	33	%
INDICE DE PLASTICIDADE	12	%
INDICE DE CONSISTENCIA		%

# ANEXO III – DVD COM IMAGENS EM FORMATOS JPG E PDF



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)