

NEY LYZANDRO TABALIPA

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE VERTENTES DA BACIA DO RIO LIGEIRO,
PATO BRANCO, PARANÁ**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, Curso de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori.
Co-Orientadores: Prof. Dr. Ney Augusto Nascimento e Profa. Dra. Chisato Oka Fiori

**CURITIBA
2008**

T112m Tabalipa, Ney Lyzandro

Estudo da Estabilidade de Vertentes da Bacia
do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná/Ney
Lyzandro Tabalipa; orientador
Alberto Pio Fiori. – Curitiba, 2008.
243p. il.

Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná.

1. Estabilidade de Taludes. 2. Escorrem-
mentos. 3. Área de Riscos. I. Título.

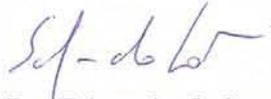
CDD 22ª 551

TERMO DE APROVAÇÃO

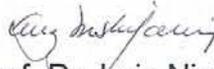
Ney Lyzandro Tabalipa

“ESTUDO DA ESTABILIDADE DE VERTENTES DA BACIA DO RIO
LIGEIRO, PATO BRANCO, PARANÁ”

Tese de Doutorado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Geologia, com área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos Professores:



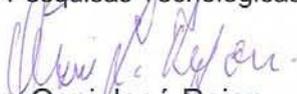
Prof. Dr. Eduardo Salamuni
Universidade Federal do Paraná



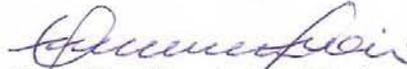
Prof. Dr. Luiz Nishiyama
Universidade Federal de Uberlândia



Prof. Dr. Omar Yazbek Bitar
Instituto de Pesquisas Tecnológicas



Prof. Dr. Osni José Pejon
Universidade de São Paulo



Prof. Dr. Alberto Pio Fiori
Universidade Federal do Paraná
Presidente

Curitiba, 17 de dezembro de 2008.

***Dedico este trabalho aos meus pais
Ney e Rosení, à minha esposa
Cândida, às minhas irmãs Cristina e
Carminha e sobrinhos Maria
Eduarda, Lucca e Rodrigo.***

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alberto Pio Fiori pela orientação, incentivo ao longo da realização deste trabalho.

A Profa. Dra. Chisato Oka Fiori pelas valiosas contribuições durante as aulas e pesquisa de campo.

Ao Prof. Dr. Ney Augusto Nascimento pela co-orientação e críticas construtivas na execução de várias etapas desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio de bolsa de estudos, durante o período do Doutorado Sandwich.

Ao Prof. Dr. Luigi Carmignani da Università Degli Studi di Siena – Itália, pela orientação no estágio de doutorado

Ao Centro di Geotecnologie (CGT) de San Giovanni Valdarno pela oportunidade de realização do estágio de doutorado.

Aos amigos Simone Kozciak, Sandro Humphreys e Yuri Humphreys pelo auxílio durante o estágio e por tornarem menos difíceis os momentos longe da família e dos amigos.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio na qualificação profissional e aos colegas da UTFPR, que tornaram possível meu afastamento no período de realização deste trabalho; em especial ao professor Volmir Sabbi pelo auxílio na obtenção das informações sobre o Município de Pato Branco e pelas boas conversas no decorrer do trabalho.

Ao amigo Giovanni Giannetto e família pela acolhida durante a convivência no Centro di Geotecnologia (CGT).

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) por possibilitar a utilização do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) na análise de Solos.

Ao Instituto Tecnológico SIMEPAR pelo fornecimento dos dados meteorológicos.

Ao Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes por disponibilizar o Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar – LabESed para a análise de solos.

Aos amigos Daniel Paredes, Luiz Carlos Zen e Sarita Pavin,, pelo auxílio durante a pesquisa.

Aos docentes e técnicos do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela contribuição à minha formação.

Aos amigos da Pós Graduação em Geografia, pelas longas conversas e discussões sobre o assunto.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente, de alguma forma, contribuíram para levar a diante esta pesquisa.

RESUMO

Este trabalho emprega um modelo matemático associado a técnicas de mapeamento temático em ambiente SIG, o qual gera um procedimento voltado ao estudo dos fatores de segurança na estabilidade de encostas. O principal objetivo deste trabalho é analisar a estabilidade das vertentes da bacia hidrográfica do rio Ligeiro no município de Pato Branco - PR, para caracterizar os fatores de segurança dessa área, aplicando um método voltado ao levantamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa. A análise para determinação dos fatores de segurança foi efetuada através de método determinístico, baseado no conceito de equilíbrio limite. O modelo matemático adotado baseia-se na distribuição das forças atuantes em uma vertente infinita, e foi considerada a influência da cobertura vegetal sobre as encostas, a inclinação e orientação das vertentes, a presença da água no solo e os índices físicos e as propriedades mecânicas de cada solo. O presente estudo envolveu a caracterização geotécnica em campo, coletas de amostras de solo para ensaios de caracterização geotécnica em laboratório, e trabalhos de escritório. As variáveis atuantes no processo de movimentos de massa, que fazem parte do modelo matemático adotado, foram inseridas em mapas temáticos produzidos pelo GIS adotado: mapa de solos, mapa de declividade, mapa de uso e ocupação do solo e orientação das vertentes. Como resultado da interação de todos os parâmetros, obteve-se valores de Fator de Segurança para cada vertente. As técnicas de Sensoriamento Remoto e SIG apresentaram-se eficientes na interpolação dos mapas temáticos e na elaboração dos mapas de Fatores de Segurança das encostas. A análise dos dados mostra que a presença da vegetação é um fator positivo para o aumento do índice de segurança das vertentes, não havendo região instável onde existe vegetação. Constatou-se, nesse estudo, que as áreas mais suscetíveis a escorregamentos estão associadas a encostas com solos do tipo cambissolo e neossolo. Observou-se também que as encostas direcionadas para norte e sul apresentaram uma maior redução do Fator de Segurança em relação às demais, pela ocorrência de ventos com maiores velocidades nesses sentidos. De acordo com os resultados alcançados no presente estudo, verifica-se que a bacia do rio Ligeiro apresenta áreas com instabilidade, susceptível a escorregamentos, como consequência dos fatores ambientais (pluviosidade e ventos), do meio físico (tipo de solos, declividade e orientação das encostas) e da ocupação antrópica desordenada das encostas, com remoção da vegetação.

Palavras-chave: Área de Risco. Escorregamento. Estabilidade. Vertentes. Fator de Segurança.

ABSTRACT

This work is the use of a mathematical model associated with the use of thematic mapping techniques in GIS environment, creating a procedure back to the study of the factors of safety in the stability of slopes. The main objective of this study is to analyze the stability of slopes in the basin of River Ligeiro in the city of Pato Branco – PR, to characterize the factors of safety of this area, applying a method aimed at mapping areas of susceptible to mass movements. The analysis to the determination of the safety rates was done through deterministic methodology, based on the concept of balance limit. The used mathematical model is based on the distribution of forces acting on an infinite dimension, the influence of vegetation cover on slopes, the inclination, the orientation of strands, the presence of water in the soil, the physical indexes and mechanical properties of each soil were considered. This study involved field geotechnical characterization, collecting samples of soil for testing the geotechnical characterization in the laboratory, and office work. The variables working in the process of mass movements and forming part of the used mathematical model, were incorporated into thematic maps produced by GIS adopted: pedologic map, map of use and occupation of the soil, slope and orientation map of the strands. As a result of the interaction of all parameters were obtained values of factor of security for each side. The Remote Sensing and GIS techniques showed to be efficient to interpolate thematic maps and to prepare the maps with the Factors of Safety of slopes. The data analysis shows that vegetation is a positive factor for the increase in the index of safety, once no unstable region was found in the presence of vegetation. It was through this study that the areas most likely to slip are associated with the soil type Cambisol and Neosol. It was also observed that the slopes directed to North and South had a greater reduction of Factor of Security related to others, because the occurrence of winds with higher speeds in these directions. According to the results achieved in this study, it appears that the basin of River Ligeiro shows areas with instability, likely to slip, as a result of environmental factors (rainfall and winds), the physical environment (type of soil, slope and orientation of hillsides) and the occupation of disorderly manmade slopes, with removal of vegetation.

Key words: Risk Area. Landslides. Stability. Slopes. Factor Security.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 –	SINAIS QUE EVIDENCIAM A PRESENÇA DE RASTEJO	17
FIGURA 02 –	ESQUEMA DE CORRIDA DE LAMA (<i>earthflow</i>)	18
FIGURA 03 –	ESCORREGAMENTOS ROTACIONAIS (<i>slumps</i>)	21
FIGURA 04 –	ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS	23
FIGURA 05 –	ESCORREGAMENTOS EM CUNHA	24
FIGURA 06 –	TOMBAMENTO DE BLOCOS, ROLAMENTO DE MATAÇÕES E QUEDA	26
FIGURA 07 –	DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA (P) EM SUAS COMPONENTES TANGENCIAL (PSEI) E NORMAL (PCOSI) E A FORÇA DE RESISTÊNCIA (R)	53
FIGURA 08 –	FORÇAS ATUANTES EM UM TALUDE DE TERRA, COM UMA CAMADA DE SOLO DE PROFUNDIDADE Z	54
FIGURA 09 –	FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARALELO À SUPERFÍCIE DO TALUDE NATURAL	55
FIGURA 10 –	FORÇAS ATUANTES EM UM TALUDE, COM FLUXO DE AGUA F_p = FORÇA DE PERCOLAÇÃO	56
FIGURA 11 –	PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DE UMA VERTENTE INFINITA SEM COBERTURA VEGETAL, COM ALTURA DO LENÇOL FREÁTICO (h_2) E FLUXO SUBSUPERFICIAL PARALELO À DECLIVIDADE DO TERRENO	58
FIGURA 12 –	PRINCIPAIS FATORES DA VEGETAÇÃO QUE INFLUENCIAM NA ANÁLISE DE VERTENTES E FORÇAS ATUANTES	60
FIGURA 13 –	LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO NO ESTADO DO PARANÁ E NA E NA REGIÃO SUDOESTE	66
FIGURA 14 –	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO – PR	67
FIGURA 15 –	ESQUEMA MOSTRANDO A ASSOCIAÇÃO DO NOVO NÍVEL DE INFORMAÇÃO COM OS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA.....	86
FIGURA 16 –	CARTA DE DRENAGEM DO SUDOESTE DO PARANÁ, COM A LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	88
FIGURA 17 –	DETALHES DO RIO LIGEIRO EM DIFERENTES PONTOS DE SEU CURSO.....	89
FIGURA 18 –	CARTA DE DRENAGEM COM DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CLASSIFICAÇÃO DOS CANAIS FLUVIAIS	91
FIGURA 19 –	CARTA CLIMÁTICA DO SUDOESTE DO PARANÁ	93

FIGURA 20 – CARTA DE PRECIPITAÇÃO DO SUDOESTE DO PARANÁ	95
FIGURA 21 – CARTA DE TEMPERATURAS DO SUDOESTE DO PARANÁ	100
FIGURA 22 – CARTA DO RELEVO DO SUDOESTE DO PARANÁ	108
FIGURA 23 – CARTA DE VEGETAÇÃO DO SUDOESTE DO PARANÁ	122
FIGURA 24 – MODELO NUMÉRICO DO TERRENO DA ÁREA ESTUDADA E ENTORNO	130
FIGURA 25 – MAPA HIPSOMÉTRICO	132
FIGURA 26 – MAPA DE DECLIVIDADE	134
FIGURA 27 – MAPA DE ORIENTAÇÃO DAS ENCOSTAS	136
FIGURA 28 – MAPA GEOLÓGICO DO SUDOESTE DO PARANÁ	138
FIGURA 29 – MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA ÁREA ESTUDADA	140
FIGURA 30 – MAPA DOS PONTOS DESCRITOS E AMOSTRADOS	142
FIGURA 31 – TELA DO SOFTWARE ARCMAP COM O MAPA DE RECONHECIMENTO DOS SOLOS DO SUDOESTE	144
FIGURA 32 – MAPA DE SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO	147
FIGURA 33 – COLETA DAS AMOSTRAS NA POSIÇÃO VERTICAL	157
FIGURA 34 – DETALHES DA COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS PARA ENSAIO DE CISLHAMENTO DIRETO, (A) MOLDAGEM E NIVELAMENTO DA AMOSTRA E (B) VEDAÇÃO DA AMOSTRA COM PARAFINA	157
FIGURA 35 – DETALHES DA AMOSTRA COLETADA PARA O ENSAIO DE PERMEABILIDADE	158
FIGURA 36 – DETALHES DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA REALIZADO: PENEIRAMENTO(A) SEDIMENTAÇÃO POR PIPETAGEM (B) SECAGEM DAS AMOSTRAS (C) E DIVISÃO DAS AMOSTRAS (D)	160
FIGURA 37 – DETALHE MOSTRANDO O APARELHO UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ EM LABORATÓRIO	162
FIGURA 38 – ETAPAS DO ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE, MOSTRANDO A PREPARAÇÃO DO SOLO E A CONFECÇÃO DOS ROLOS COM MEDIDAS DE ESPESSURA E COMPRIMENTOS CONFORME CILINDRO METÁLICO PADRÃO	162
FIGURA 39 – SEQÜÊNCIA DO ENSAIO DE CISLHAMENTO	165
FIGURA 40 – SEQÜÊNCIA DA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE REALIZADO NO LABORATÓRIO DE SOLOS DO LAME	166
FIGURA 41 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NATURAL SEM VEGETAÇÃO.....	178
FIGURA 42 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NÃO SATURADO SEM VEGETAÇÃO	179

FIGURA 43 –	MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO SATURADO SEM VEGETAÇÃO	180
FIGURA 44 –	MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NATURAL COM VEGETAÇÃO.....	181
FIGURA 45 –	MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NÃO SATURADO COM VEGETAÇÃO	182
FIGURA 46 –	MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO SATURADO COM VEGETAÇÃO	183
FIGURA 47 –	DELIMITAÇÃO DA BACIA DO RIO LIGEIRO EM 3D, MOSTRANDO VEGETAÇÃO PRESERVADA EM ENCOSTAS DE GRANDE DECLIVIDADE ..	197
FIGURA 48 –	DIVISÃO DE BAIRROS DO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO	199
FIGURA 49 –	DETALHE DA ÁREA DE ESTUDO, MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO FATOR DE SEGURANÇA	201
FIGURA 50 –	DETALHE DO BAIRRO BONATO	202
FIGURA 51 –	DETALHE DO BAIRRO INDUSTRIAL (F_3 SEM VEGETAÇÃO)	204
FIGURA 52 –	DETALHE DO BAIRRO INDUSTRIAL	205
FIGURA 53 –	DETALHE DOS MAPAS DO BAIRRO BELA VISTA	206
FIGURA 54 –	OCUPAÇÃO NO BAIRRO BELA VISTA	207
FIGURA 55 –	DETALHE DO BAIRRO JARDIM FLORESTA, NOS DIVERSOS MAPAS	208
FIGURA 56 –	BAIRRO JARDIM FLORESTA	209
FIGURA 57 –	DETALHE DE CONSTRUÇÕES PRÓXIMAS AO RIO LIGEIRO, NO BAIRRO BORTOT EM TRÊS ÉPOCAS DIFERENTES, 2006 (A); 2002 (B); 2000 (C)	210
FIGURA 58 –	ÁREAS DE CORTE E ATERRO APRESENTANDO VÁRIAS EROSÕES EM SULCOS	211
FIGURA 59 –	OCUPAÇÃO DE ÁREAS SEM A DEVIDA ATENÇÃO A EXIGÊNCIAS LEGAIS, TÉCNICAS OU AMBIENTAIS.....	213
FLUXOGRAMA 01 –	FLUXOGRAMA PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO	70
FLUXOGRAMA 02 –	CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL	74

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 – CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE ENCOSTAS.....	12
QUADRO 02 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS TÍPICAS DA SERRA DO MAR.....	14
QUADRO 03 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS GRANDES GRUPOS DE PROCESSOS DE ESCORREGAMENTO NO <i>LATO SENSU</i>	15
QUADRO 04 – FATORES DE SEGURANÇA DETERMINÍSTICOS E AS RESPECTIVAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DO TALUDE	49
QUADRO 05 – DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE CADA INTERVALO DE FATOR DE SEGURANÇA, CONSIDERANDO FS DE ESTABILIDADE DETERMINADO PELO DNER (1996) – FS = 1,5 COMO PADRÃO	78
QUADRO 06 – HIERARQUIZAÇÃO DOS CANAIS DE DRENAGEM DA ÁREA DE ESTUDO ..	92
QUADRO 07 – VALORES ATRIBUÍDOS A PRESSÃO DE ARRASTO DO VENTO (σ_{ve}) NA COBERTURA VEGETAL, EM RELAÇÃO A CADA TIPOLOGIA DE VEGETAÇÃO	106
QUADRO 08 – COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ	114
QUADRO 09 – CÁLCULO DAS ÁREAS PARA OS INTERVALOS DE DECLIVIDADE E PRINCIPAIS INDICAÇÕES	133
QUADRO 10 – VALORES ATRIBUÍDOS AOS PARÂMETROS DE COBERTURA VEGETAL (σ_{ve}), (S_r), (T) EM RELAÇÃO A CADA TIPOLOGIA VEGETAL	135
QUADRO 11 – CLASSES DE SOLOS QUE OCORREM NA REGIÃO DE ESTUDO COM SUAS INCLUSÕES	146
QUADRO 12 – ÁREA CORRESPONDENTE A CADA CLASSE DE SOLO	148
QUADRO 13 – PROFUNDIDADE DE COLETA DAS AMOSTRAS PARA CISLHAMENTO DIRETO E DIMENSÕES DOS COLETORES	157
QUADRO 14 – ENSAIOS REALIZADOS E NORMALIZAÇÃO UTILIZADA	159
QUADRO 15 – CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA (SUCS)	173
QUADRO 16 – CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS SEGUNDO CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA (SUCS)	173
QUADRO 17 – PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DAS AMOSTRAS DE SOLOS RELACIONADAS À CLASSIFICAÇÃO SUCS	174
QUADRO 18 – DEFINIÇÃO DAS CLASSE DE CADA INTERVALO DE FATOR DE SEGURANÇA, CONSIDERANDO FS DE ESTABILIDADE DETERMINADO PELO DNER (FS= 1,5) COMO PADRÃO	177

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 –	PRECIPITAÇÃO MÉDIA EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005	96
GRÁFICO 02 –	PRECIPITAÇÃO ANUAL EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005	97
GRÁFICO 03 –	GRÁFICO DO ÍNDICE MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS MENSIS DE PRECIPITAÇÃO NA ESTAÇÃO PATO BRANCO PERÍODO 1979 – 2005 ...	98
GRÁFICO 04 –	TEMPERATURA MÉDIA EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005	101
GRÁFICO 05 –	TEMPERATURA MÉDIA MÍNIMA E MÁXIMA EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005	102
GRÁFICO 06 –	DIREÇÃO E VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1997/2005	106
GRÁFICO 07 –	MÉDIA MENSAL DA UMIDADE RELATIVA DO AR EM PATO BRANCO/PARANÁ – 1979/2005	107
GRÁFICO 08 –	REPRESENTAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA COM APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES 23, 24 E 25	188
GRÁFICO 09 –	REPRESENTAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA COM APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES 05, 07 E 13	190

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 –	CLASSES DE DECLIVIDADE RELACIONADAS AOS DIFERENTES TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	36
TABELA 02 –	PRECIPITAÇÃO MÉDIA EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005	96
TABELA 03 –	PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM PATO BRANCO – PARANÁ - 1979/2005	97
TABELA 04 –	1979/2005 PRECIPITAÇÃO MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA, PERÍODO – 1979/2005	98
TABELA 05 –	TEMPERATURA MÉDIA EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005	101
TABELA 06 –	TEMPERATURA MÁXIMA, MÉDIA E MÍNIMA EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005	102
TABELA 07 –	SENTIDO E VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1997/2005	104
TABELA 08 –	SENTIDO E VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1997/2005	105

TABELA 09 –	UMIDADE RELATIVA DO AR (%) MÉDIA MENSAL, EM PATO BRANCO/PARANÁ – 1979/2005	106
TABELA 10 –	DIAGRAMA DE RELEVO DA ÁREA DE ESTUDO	110
TABELA 11 –	DESCRIÇÃO DOS SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO FEITA <i>IN LOCO</i>	148
TABELA 12 –	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO E PIPETAGEM DOS PONTOS AMOSTRADOS EM CAMPO	168
TABELA 13 –	RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO	169
TABELA 14 –	CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS SEGUNDO ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IAEG, 1979)	169
TABELA 15 –	VALORES DE COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO DAS AMOSTRAS	170
TABELA 16 –	ÍNDICES FÍSICOS DAS AMOSTRAS DE SOLO OBTIDOS EM ENSAIOS NO LAME	170
TABELA 17 –	VALORES DE PESO ESPECÍFICO SUBMERSO γ_{SUB} E PESO ESPECÍFICO SATURADO γ_{SAT} E PESO ESPECÍFICO NATURAL (γ_{NAT}) PARA CADA SOLO ESTUDADO	171
TABELA 18 –	VALORES DE PESOS ESPECÍFICOS DO SOLO (γ_{NAT} , γ_{SUB} , γ_{SAT}) E OS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO ENCONTRADOS NOS ENSAIOS	171
TABELA 19 –	COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE (K) DOS SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO	172
TABELA 20 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO NITOSSOLO	184
TABELA 21 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO CAMBISSOLO	184
TABELA 22 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO LATOSSOLO	184
TABELA 23 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO NEOSSOLO	185
TABELA 24 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA, COM SOLO NITOSSOLO	185
TABELA 25 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA, COM SOLO CAMBISSOLO	185
TABELA 26 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA, COM SOLO LATOSSOLO	185
TABELA 27 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA, COM SOLO NEOSSOLO	185
TABELA 28 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA, COM SOLO NITOSSOLO	186

TABELA 29 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA, COM SOLO CAMBISSOLO	186
TABELA 30 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA, COM SOLO LATOSSOLO	186
TABELA 31 –	FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTES COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA, COM SOLO NEOSSOLO	186
TABELA 32 –	FATOR DE SEGURANÇA DAS ÁREAS COM VEGETAÇÃO APLICANDO AS EQUAÇÕES 23, 24 E 25	188
TABELA 33 –	FATOR DE SEGURANÇA DAS ÁREAS SEM VEGETAÇÃO APLICANDO AS EQUAÇÕES 05, 07 E 13	189
TABELA 34 –	FATOR DE SEGURANÇA DAS ÁREAS COBERTAS POR FLORESTAS, SOLO DO TIPO NITOSSOLO E DECLIVIDADE DE 10%, VARIANDO CONFORME A ORIENTAÇÃO DA ENCOSTA	192
TABELA 35 –	ÁREA CORRESPONDENTE A CADA CLASSE DE SOLO	192
TABELA 36 –	VALOR DAS ÁREAS INSTÁVEIS EM RELAÇÃO AO TIPO DE SOLO, DEPENDENDO DA SATURAÇÃO DO SOLO	192
TABELA 37 –	CLASSES DE USO DO SOLO DA BACIA DO RIO LIGEIRO	194
TABELA 38 –	USO DO SOLO DA BACIA SEM CONSIDERAR ÁREAS DE DEPÓSITOS ALUVIONARES E CORPO D'ÁGUA	194
TABELA 39 –	QUANTIDADE EM PORCENTAGEM DE CADA USO DO SOLO QUE APRESENTAM $FS < 1,5$ EM CADA NÍVEL DE SATURAÇÃO DO SOLO	195
TABELA 40 –	RELAÇÃO ENTRE AS CLASSES DE SOLOS, SEU USO E VALORES DE INSTABILIDADE	196

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	–	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANELL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	–	Coodenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEFET/PR	–	Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná
CGT	–	<i>Centro di GeoTecnologie - Università degli Studi di Siena</i>
CPRM	–	Companhia de Recursos Minerais
CPT	–	<i>Cone Penetration Test</i>
DCPT	–	Dinamic Cone Penetration Test
DNER	–	Departamento Nacional de estradas de Rodagem
DTM	–	<i>Digital Terrain Model</i>
EMBRAPA	–	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	–	<i>Environmental Systems Research Institute, Inc.</i>
FAT	–	<i>Feature Attribute Table</i>
GPS	–	Sistema de Posicionamento Global
IAEG	–	<i>International Association of Engineering Geology</i>
IAP	–	Instituto Ambiental do Paraná
IAPAR	–	Instituto Agrônômico do Paraná
IBAMA	–	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	–	Índice de Desenvolvimento Humano
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPARDES	–	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
LABESED	–	Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar
LACTEC	–	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAME	–	Laboratório de Materiais e Estruturas
MINEROPAR	–	Minerais do Paraná SA
MNT	–	Modelo Numérico de Terreno
NBR	–	Norma Brasileira
RADAM	–	Projeto RADAMBRASIL

SEAB –	Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Paraná
SEMA –	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SIG –	Sistema de Informação Geográfica
SIMEPAR –	Sistema Meteorológico do Paraná
SPT –	Standard Penetration Test
SUCS –	Sistema Unificado de Classificação de Solos
SUDERHSA –	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
SUS –	Sistema Único de Saúde
TIN –	<i>Triangulate Irregular Network</i>
TOPOGEO –	Laboratório de Topografia e Geoprocessamento
UFPR –	Universidade Federal do Paraná
USCS –	<i>Unified Soil Classification System</i>
UTFPR –	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTM –	Coordenada Universal Transversal de Mercator

ϕ -	ângulo de atrito interno do solo
ψ -	cisalhamento angular
γ_a -	peso específico da água
γ_{nat} -	peso específico natural do solo
σ_r -	esforço normal
τ_r -	esforço tangencial
γ_{sat} -	peso específico do solo saturado
γ_{sub} -	peso específico do solo submerso
b -	índice de confiabilidade
c -	coesão
c_μ -	coesão não drenada
cm -	centímetro
e _{max} -	índice de vazios máximo
e _{min} -	índice de vazios mínimo
e _{nat} -	índice de vazios natural
F_{ve} -	força exercida pelo vento nas árvores
F_s -	fator de segurança

h_1 -	espessura do solo não saturado
h_2 -	espessura do solo saturado
i -	ângulo de inclinação da vertente
IP -	Índice de Plasticidade
Kg/cm² -	Quilograma / cm ²
Km -	Quilômetro
KN -	Quilo Newton
KPa -	Quilo Pascal
l -	litro
LL -	Limite de Liquidez
m -	metro
m² -	metro quadrado
m³ -	metro cúbico
mm -	milímetro
MN -	Mega Newton
Na -	Nível d'água
°C -	graus Celsius
P_a -	peso das árvores sobre o solo;
pol -	polegada
P_r -	probabilidade de ruptura
s -	segundo
S_r -	contribuição da raiz para a coesão do solo;
t -	tonelada
t_r -	resistência a tração da raiz
Z -	espessura do solo;

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO.	01
1.1 OBJETIVOS	04
1.1.1 Objetivo Geral	04
1.1.2 Objetivos Específicos	04
CAPÍTULO 2	
MOVIMENTOS DE MASSA: CONCEITOS E MÉTODOS DE ANÁLISE	05
2.1 MOVIMENTOS DE MASSA	07
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA	11
2.2.1 Rastejo	16
2.2.2 Corridas	17
2.2.3 Escorregamentos	19
2.2.3.1 Escorregamentos Rotacionais (<i>Slumps</i>)	20
2.2.3.2 Escorregamentos Translacionais (<i>Translational Landslide</i>)	21
2.2.3.3 Escorregamentos em Cunha	23
2.2.4 Quedas (<i>Falls</i>)	24
2.3 VARIÁVEIS CONDICIONANTES AO MOVIMENTO DE MASSA	27
2.3.1 Geologia	28
2.3.2 Pedologia	29
2.3.2.1 Resistência dos Solos	30
2.3.2.2 Índices Físicos do Solo	32
2.3.3 Geomorfologia	33
2.3.4 Cobertura Vegetal	36
2.3.5 Clima	41
2.3.6 Ação Antrópica	43
2.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTENTES	46
2.4.1 Método Determinístico	47
2.4.1.1 Fator de Segurança (<i>Fs</i>)	48
2.4.1.2 Teoria do Equilíbrio-Limite	50
2.4.2 Método Probabilístico	50
2.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTENTES	51
2.5.1 Forças Atuantes em uma Encosta	51
2.5.1.1 Vertente Natural	55
2.5.1.2 Vertente Saturada	55
2.5.1.3 Vertente Não Saturada	57
2.5.2 Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes	59
CAPÍTULO 3	
MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	65
3.2 MATERIAIS	68
3.2.1 Dados Cartográficos	68
3.2.2 Dados de Sensoriamento Remoto	68
3.2.3 Equipamentos e <i>Softwares</i>	69
3.2.3.1 Equipamentos	69

3.2.3.2 Softwares	69
3.3 MÉTODOS	70
3.3.1 Elaboração de base cartográfica digital	71
3.3.2 Classificação Geotécnica dos Solos da Área Estudada	72
3.3.3 Classificação da Imagem Digital	73
3.3.4 Determinação de Fator de Segurança	77
3.3.4.1 Parâmetros Morfológicos	78
3.3.4.2 Parâmetros Pedológicos	78
3.3.4.3 Fator de Segurança Sem Cobertura Vegetal	79
3.3.4.4 Fator de Segurança Com Cobertura Vegetal	80
a) Pressão exercida pelo peso das Árvores (σ_a)	81
b) Força do Vento atuando na Copa das Árvores (F_{ve})	82
c) Contribuição da Raiz para Coesão do Solo (S_r)	82
d) Tensão suportada pelas Raízes na Resistência do Solo à Ruptura (T)	83
3.3.5 Geração de Mapas de Fator de Segurança	84
CAPÍTULO 4	
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	87
4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA REGIONAL	87
4.1.1 Bacia Hidrográfica do rio Ligeiro	87
4.1.1.1 Análise da Bacia Hidrográfica	92
4.1.2 Clima	92
4.1.2.1 Pluviosidade	94
4.1.2.2 Temperatura	99
4.1.2.3 Ventos	103
4.1.2.4 Umidade	106
4.1.3 Relevo (Geomorfologia)	107
4.1.4 Geologia	110
4.1.4.1 Grupo São Bento	114
4.1.4.2 Formação Serra Geral	114
4.1.5 Solos	115
4.1.5.1 Latossolos	115
4.1.5.2 Nitossolo	117
4.1.5.3 Cambissolos	118
4.1.5.4 Neossolo	119
4.1.5.5 Gleissolos (Depósitos Aluvionares)	120
4.1.6 Vegetação	122
4.2 CONTEXTO SOCIOECONÔMICO DA REGIÃO	124
4.2.1 Aspectos populacionais	125
4.2.2 Infra-estrutura Urbana	125
4.2.3 Lixo Urbano	126
4.2.4 Rede de Transporte	126
4.2.5 Educação	126
4.2.6 Saúde	127
4.2.7 Atividades Produtivas	128
CAPÍTULO 5	
RESULTADOS E DISCUSSÃO	129
5.1 CONFECÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS	129
5.1.1 Modelo Numérico do Terreno (MNT)	129

5.1.2 Mapa Hipsométrico	131
5.1.3 Mapa de Declividade	133
5.1.4 Mapa de Orientação das Encostas	135
5.1.5 Mapa Geológico	137
5.1.6 Mapa de Uso e Ocupação da Área	139
5.1.7 Pontos Descritos e Amostragem do Solo	141
5.1.8 Mapas de Solos	143
5.2 DESCRIÇÃO DOS SOLOS	148
5.2.1 Coleta de Amostras Indeformadas de Solo	156
a) Amostra para Ensaio de Cisalhamento Direto	156
b) Amostra para Ensaio de Permeabilidade	158
5.2.2 Coleta de Amostras Deformadas de Solo	158
5.2.3 Ensaios de Laboratório	158
5.2.3.1 Análise granulométrica	159
5.2.3.2 Teor de Umidade (w)	161
5.2.3.3 Limites de Atterberg	161
a) Limite de Liquidez (LL)	161
b) Limite de Plasticidade (LP)	162
c) Índice de Plasticidade (IP)	163
5.2.3.4 Ensaios de Cisalhamento Direto	163
5.2.3.5 Ensaios de Permeabilidade	165
5.3 CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS DA ÁREA ESTUDADA	168
5.3.1 Análise Granulométrica	168
5.3.2 Limites de Atterberg e Teor de Umidade.....	169
5.3.3 Ensaios de Cisalhamento Direto	170
5.3.4 Ensaios de Permeabilidade	172
5.3.5 Classificação Geotécnica	173
5.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA	174
5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	184
5.5.1 Análise dos Resultados da Equação de Fatores de Segurança (F_s).....	184
5.5.2 Correlação entre o Fator de Segurança e os Parâmetros Geoambientais..	190
5.5.2.1 Correlação entre Declividade e Fator de Segurança	190
5.5.2.2 Correlação entre Orientação das Encostas e Fator de Segurança	191
5.5.2.3 Correlação entre Pedologia e Fator de Segurança	192
5.5.2.4 Correlação entre Uso e Cobertura do Solo e Fator de Segurança	194
5.5.3 Análise das Áreas Susceptíveis a Escorregamentos	197
CAPÍTULO 6	
CONCLUSÕES	214
REFERÊNCIAS	220
ANEXOS	235

INTRODUÇÃO

O uso e a ocupação do solo no Brasil vêm ocorrendo sem a adequada consideração dos condicionantes geológicas e geotécnicas, acarretando inúmeros desastres, principalmente em áreas urbanas.

Essa ocupação, muitas vezes estimulada por interesses econômicos, realiza-se de forma desordenada, levando-a a usos inadequados e diminuindo a qualidade de vida da população existente no local.

Acompanhando essa ocupação desenfreada, que desconsidera os fatores fisiográficos da área, surgem inúmeros problemas, como erosões e assoreamentos, escorregamentos, enchentes, recalques de solo, esgotamento dos recursos hídricos, contaminação por disposição incorreta de resíduos, entre outros, que consomem grandes recursos, além de, muitas vezes, colocarem em risco a vida da população local. Os escorregamentos nas encostas são de grande preocupação no Brasil devido a maior possibilidade de perdas de vidas e vultosos prejuízos econômicos.

A estabilidade de uma encosta, em seu estado natural, está condicionada, simultaneamente, a três fatores principais: características morfológicas, características geológicas (pedologia e estruturas das rochas) e ao ambiente fisiográfico onde se insere (clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, etc). A alteração natural ou artificial dessas condicionantes pode, facilmente, resultar em mudança na condição de estabilidade.

Os escorregamentos podem ser definidos como todo e qualquer movimento que envolva materiais terrosos ou rochosos que, por qualquer causa, processos ou velocidades, sofrem deslocamentos induzidos pelo agente gravidade. Podem envolver solo, solo e rocha ou apenas rocha, sendo o principal deflagrador não

exclusivamente antrópico do processo a água da chuva que se infiltra e encharca o solo, aumentando o grau de saturação e a pressão dos solos e reduzindo sua resistência pela perda de coesão, contribuindo, assim, para a instabilização das encostas.

Após a ocorrência de escorregamento, além da perda de qualidade de vida da população afetada, o Poder Público assume o ônus de recuperação e estabilização do terreno e na eventual introdução de melhorias urbanas, no setor habitacional atingido, compromete-se muito tempo e dinheiro, com resultados quase sempre longe dos ideais.

A aceleração da expansão urbana tem ocorrido com quase total desconsideração dos fatores fisiográficos, movidos, praticamente, por razões especulativas do mercado e que vêm ignorando as reais potencialidades e limitações das áreas ocupadas ou a serem ocupadas. Isso gera a ocupação inadequada de regiões e de locais extremamente problemáticos, tais como: áreas propícias ao desenvolvimento de escorregamentos ou erosões intensas, vertentes sujeitas ao surgimento de boçorocas, áreas de inundação, dentre outras.

Um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência de acidentes geológicos nas áreas urbanas é o uso do solo sem a adequada consideração das condicionantes geológico-geotécnicas e geomorfológicas, para a caracterização do meio físico, resultando em prejuízos à população e ao poder público.

A região Sudoeste do Paraná, e em especial o município de Pato Branco, é carente de informações e de estudos sobre o meio físico e, os poucos encontrados, são datados de muitos anos.

Pato Branco, como a maioria dos demais municípios brasileiros, não tem apresentado um planejamento urbano adequado, fazendo com que os efeitos da degradação ambiental sejam constatados em diversas áreas do município, causados, principalmente, pela ocupação desordenada e pela não consideração das condicionantes geológico-geotécnicas na utilização de seu espaço territorial.

Outro fator que merece ser mencionado é o crescimento da população do município de Pato Branco na última década e, seguindo uma tendência nacional, ocorreu com grande concentração de pessoas na área urbana, seja por um crescimento natural da população ou por migrações das áreas rurais.

O Censo do IBGE de 1991 mostrava que 77,96% dos habitantes de Pato Branco residiam na área urbana, enquanto que em 2000 os valores passaram para

91,27%. Atualmente, a população urbana já ultrapassou os 96% do total de habitantes do município.

O município de Pato Branco não possui registros de grandes movimentos de massa gravitacionais do tipo escorregamento até o momento, mas a cada dia que passa, novas áreas com declividade acentuada estão sendo desmatadas e ocupadas pela expansão urbana. Muitas vezes, essa ocupação se faz sem nenhum critério técnico ou de planejamento, tornando possível a ocorrência de algum tipo de acidente em futuro próximo.

A intervenção antrópica na área de estudo está alterando as características originais dos terrenos, deixando o solo desnudo e podendo acelerar os processos de escorregamento. Além disso, o uso urbano inadequado dos morros, tem provocado erosão paulatina dessas áreas, causando assoreamento dos cursos d'água e favorecendo o surgimento de enchentes e inundações.

Para auxiliar a tomada de decisões para o planejamento, uma das preocupações deste trabalho foi a produção de informações que caracterizassem o meio físico por meio da geração de vários mapas temáticos.

Este trabalho será pressuposto para o governo municipal conhecer as características principais do meio físico, tornando possível a tomada de decisões em relação ao uso do solo com uma menor probabilidade de ocorrência de degradações ou impactos negativos ao meio ambiente.

Os estudos realizados poderão prevenir o surgimento de problemas geológicos, servindo como ferramenta de subsídio ao desenvolvimento planejado da cidade, criando medidas preventivas e orientando o uso e a ocupação do solo de determinada área sob planejamento.

Cabe ressaltar a importância de a sociedade tomar conhecimento das informações produzidas nessa pesquisa e participar na elaboração e manutenção de medidas de proteção do meio ambiente, para auxiliar na tomada de decisões e definir os rumos do desenvolvimento municipal, com a consciência de que os recursos do meio físico não são infinitos e inesgotáveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é analisar a estabilidade das vertentes da bacia do rio Ligeiro no município de Pato Branco – Pr, para caracterizar os fatores de segurança dessa área, aplicando um método voltado ao levantamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa, que possibilite a cartografia dos diferentes fatores de segurança das encostas aos escorregamentos, associados às técnicas de SIG.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar a equação de fatores de segurança das encostas, baseado em modelos matemáticos que analisem o potencial de instabilidade das encostas, acopladas à utilização de técnicas de tratamento de dados em ambiente SIG;
- Gerar mapa de fatores de segurança das encostas, a partir do cruzamento das informações armazenadas no banco de dados do SIG que será criado;
- Avaliar as condições atuais de ocupação da área urbana de Pato Branco – PR relacionando tais condições às suas características geológicas e ambientais, levantando eventuais problemas gerados pela inadequação de ocupação;
- Caracterizar geotecnicamente em campo e em laboratório a área em estudo, identificando o conjunto dos elementos constituintes da paisagem como: uso e ocupação do solo, relevo, geologia, precipitação, tipos de solos entre outros;

MOVIMENTOS DE MASSA: CONCEITOS E MÉTODOS DE ANÁLISE

Neste capítulo discutem-se alguns conceitos básicos relacionados a movimento de massas e o método utilizado para analisá-los. O enfoque abordou as considerações de autores diversos sobre a importância dos estudos de estabilidade de vertentes, a classificação e condicionantes aos movimentos de massa.

A importância do estudo é ampla, tendo em vista que a humanidade convive com estes tipos de acidentes geológicos desde a Antiguidade, resultando em grandes prejuízos, tanto materiais como de vidas humanas. Os movimentos em taludes e encostas têm causado, principalmente nas últimas duas décadas, acidentes em várias cidades brasileiras, muitas vezes com mais de uma dezena de vítimas fatais. Mas a questão no Brasil não é nova, uma vez que existem relatos tratando de escorregamentos nas encostas de Salvador, Bahia, datados da época do Império.

Augusto Filho (1994), afirma que em um único evento de escorregamento ocorrido em janeiro de 1967 na serra das Araras, RJ, houve 1.200 mortes.

Enquanto que Amaral *et al.* (1993) apresentam a quantia de cerca de 7,1 milhões de dólares com gastos associados à execução de obras de contenção de encostas no Rio de Janeiro, no período de 1988 a 1991.

Brabb (1991) estima em milhares de mortes e dezenas de bilhões de dólares de prejuízos por ano, relacionados à deflagração de escorregamentos no mundo inteiro.

Além destes, outros tantos processos semelhantes vêm sendo deflagrados com frequências ao longo dos anos, em todas as partes do mundo, mostrando a necessidade do aprofundamento no estudo desses eventos. Um aspecto positivo foi

percebido por Wolle (1985) que observou uma intensificação, dentro da Geologia de Engenharia, da investigação do comportamento geotécnico dos solos tropicais, inclusive no campo da estabilidade de taludes e encostas.

Já Augusto Filho e Virgili (1998) alegam que a pesquisa voltada à estabilidade de taludes e encostas naturais acumula extenso desenvolvimento técnico-científico, envolvendo diferentes áreas do conhecimento, tais como, Engenharia Civil e de Minas, Geografia, Geologia, Geologia de Engenharia, Geomorfologia, Mecânica dos Solos e das Rochas.

A análise de vertentes, visando o estudo da estabilidade de taludes, leva em conta o equilíbrio das forças atuantes, que tendem a movimentar uma massa de solo ou de rocha e as forças resistentes a esse movimento. As condições de estabilidade são dadas por um fator de segurança que representa a razão das forças resistentes e as forças mobilizantes.

Conforme Kozciak (2005) há diversas formas de cálculo de fatores de segurança, desde a mais simples, envolvendo apenas o ângulo de atrito e a inclinação das vertentes, até as mais complexas, envolvendo o papel da vegetação, propriedades mecânicas e físicas do solo, presença de água, de planos de fraqueza pré-existentes e formas de superfície de ruptura, entre outros.

Diversos autores têm se dedicado ao assunto, contudo tratam simplesmente da questão do ponto de vista de sua aplicação a problemas localizados, onde a falta de estabilidade está ameaçando obras de engenharia.

Grande parte dos métodos propostos por Carrara *et al.* (1991); Barros, *et al.* (1992); Guzzetti *et al.* (1999), visam a definição de áreas críticas a deslizamentos, ou seja, áreas de maior susceptibilidade à ocorrência do processo. Outros estudos, por sua vez, buscam caracterizar o risco envolvido englobando tanto a possibilidade de ocorrência do processo quanto os danos recorrentes.

No presente estudo, as análises para determinação do fator de segurança (F_s) são baseadas no conceito de equilíbrio-limite, onde o fator de segurança crítico é igual à unidade. Baseado nisso, neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos mais representativos embasando o desenvolvimento do trabalho, relacionados aos tipos de movimentos de massa gravitacionais, principalmente no que se refere à caracterização desses processos quanto aos aspectos conceituais.

Segundo Augusto Filho e Virgili (1998) os taludes ou as encostas naturais são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos

(solo e rocha), originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos. Podem apresentar modificações antrópicas, tais como cortes, desmatamentos, introdução de cargas, etc. O termo encosta é mais empregado em estudos de caráter regional. Talude de corte é entendido como um talude originado de escavações antrópicas diversas. Talude artificial refere-se ao declive de aterros construídos a partir de materiais de diferentes granulometrias e origens.

De maneira geral, as classificações modernas baseiam-se na combinação de critérios de velocidade, direção e recorrência dos deslocamentos; natureza do material instabilizado, (solo, rocha, detritos), sua textura, estrutura e conteúdo d'água; geometria das massas movimentadas e modalidade de deformação do movimento.

A importância das classificações, sob o ponto de vista da aplicação, corresponde à possibilidade de se associar cada tipo de movimento de encosta a um conjunto de características (profundidade, raio de alcance, material instabilizado, potencial destrutivo, etc.). Estas características, em conjunto com o entendimento dos condicionantes, permitem formular modelos fundamentais para orientar a proposição de medidas preventivas e corretivas.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

As encostas de regiões montanhosas, situadas no meio tropical úmido brasileiro são palco de movimentos coletivos de solos e rochas, destacam-se os escorregamentos, devido à sua grande importância de risco geológico às atividades humanas e prejuízos econômicos.

Este fato, em princípio decorre da própria dinâmica de evolução das encostas, quando as massas de solo, formadas a partir da progressiva alteração das rochas que compõem tais vertentes, atingem espessuras que podem ser consideradas críticas para a estabilidade (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Para Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) como a evolução das encostas é muito lenta para ser observada, as deduções são baseadas em suposições que não podem ser testadas, enquanto não se dispõe de um método para datar as superfícies antigas.

Segundo Kozciak (2005) a formação e dinâmica do relevo relacionam-se à interação de variáveis endógenas (tipo e estrutura das rochas e as atividades

tectônicas), como exógenas (variáveis climáticas, atuação da fauna e flora, etc.). Como parte dessa dinâmica, ocorrem os processos de vertentes, entre os quais, os movimentos de massa, envolvendo o desprendimento e transporte de solo e/ou material rochoso vertente abaixo.

Conforme Borchardt (2005), como vertente ou encosta entende-se toda superfície inclinada de maciços terrosos, rochosos ou que possua a mistura de ambos, originada por processos naturais de cunho geológico e geomorfológico diverso, ou artificial, construído pelo homem.

Para Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) as paisagens compreendem vertentes ou encostas com declividades e formas muito variadas. As mudanças de forma dessas encostas estão relacionadas aos processos dominantes de intemperismo, erosão e escorregamentos.

Segundo Fiori (1995), o movimento de massa representa um importante papel no desenvolvimento de vertentes no Sul do Brasil pelo fato de estar ligado a condições climáticas úmidas e a um intenso processo de intemperismo das rochas.

A mobilização de material deve-se à sua condição de instabilidade, pela atuação da gravidade, podendo ser acelerada sob a ação de outros agentes, como água.

O termo escorregamento tem sido comumente utilizado no sentido de abranger todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independentemente da diversidade de processos, causas, velocidades, formas e demais características (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Segundo Augusto Filho (1994), os escorregamentos consistem em movimentos rápidos de massas de solo ou rocha geralmente bem definidos quanto à sua forma, cujo centro da gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude natural ou artificial. As principais características deste tipo de movimento de massa são as seguintes: existência de poucos planos de deslocamento; velocidade média (m/h) a altas (m/s); pequenos a grandes volumes de material deslocado; geometria planar, circular ou em cunha.

Cunha *et al.* (1991) consideram os escorregamentos como processos marcantes na evolução das encostas, caracterizando-se por movimentos rápidos, limites laterais e profundidade bem definida. Os escorregamentos podem movimentar solos, solos e rochas ou apenas rochas, ocorrendo isoladamente no

tempo e no espaço (escorregamentos esparsos), ou simultaneamente (escorregamentos generalizados), afetando áreas consideráveis das encostas.

Rodrigues (2002) complementa que esses movimentos são induzidos pela aceleração gravitacional, exceto aqueles nos quais o material é carregado diretamente por meio de agente transportador. São influenciados pela litologia, hidrogeologia, geologia, estrutural, topografia, clima, vegetação, sísmica, antrópicos e erosão.

Já para Kozciak, (2005), a força da gravidade origina tensões cisalhantes e normais dentro da massa de solo ou de rocha, que atuam principalmente ao longo de planos inclinados. O esforço cisalhante, responsável pela movimentação da massa, aumenta com a inclinação e altura da vertente, com o peso específico do solo e com a quantidade de água que se infiltra e se acumula no solo.

Ahrendt (2005) define os escorregamentos como uma consequência da deformação cisalhante podendo ocorrer ao longo de uma ou mais superfícies, vindo abranger materiais rochosos ou solo.

Os taludes ou encostas naturais são definidos, segundo Augusto Filho e Virgili (1998) como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou misto (solo e rocha), originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos. A análise e o controle de estabilizações de taludes e encostas têm seu amplo desenvolvimento com as grandes obras civis modernas, em paralelo à consolidação da Engenharia e da Geologia de Engenharia.

Nesse sentido Guidicini e Nieble (1983) complementam afirmando que os movimentos de massas têm sido objeto de amplos estudos em vários países, não apenas pela sua importância como agentes atuantes na evolução das formas de relevo, mas também em função de suas implicações práticas e do ponto de vista econômico.

Segundo Rodrigues e Lopes (1998), os taludes naturais e artificiais podem ser afetados por problemas de caráter geológico-geotécnico, gerando diversos tipos de instabilizações, quando há falta do necessário conhecimento do meio físico, levando a projetos inadequados e construções deficientes.

De acordo com Bloom (1988), as encostas mudam constantemente, tendendo, porém para um estado central, em equilíbrio com os processos atuantes, para manter a configuração mais eficiente possível.

Os escorregamentos são acidentes geológicos, bastante comuns nas áreas urbanas, e podem ser definidos como todo e qualquer movimento que envolva materiais terrosos ou rochosos que, por qualquer causa, processos ou velocidades, sofrem deslocamentos induzidos pela gravidade.

Esses acidentes são os resultados da deflagração e evolução de processos de alteração do meio físico, induzidos ou acelerados pelo uso e ocupação do solo.

Nesse sentido, Augusto Filho *et al.* (1995) descreve que os riscos geológicos podem ser entendidos como uma circunstância ou situação de perigo, perda ou dano, social e econômico, causada por uma condição geológica ou por uma possibilidade de ocorrência de processo geológico, induzido ou não. Sua ocorrência está intimamente ligada à ocupação indevida de áreas consideradas de risco, por falta de planejamento prévio ou desconhecimento geotécnico.

O processo de urbanização provoca modificações nas encostas, tais como: desmatamentos, cortes, aterros, construções, execução de vias, alterações no escoamento das águas, entre outras. Essa ação antrópica, juntamente com fenômenos naturais, tais como a formação da própria rocha e toda sua história geológica, intemperismo, erosão, precipitação, cobertura vegetal, etc., pode conduzir a situações de instabilização das encostas e escorregamentos, gerando graves problemas socioeconômicos.

Apesar das causas naturais, por si só, detonarem processos de degradação ambiental, a ocupação humana desordenada, aliada às condições naturais de risco, pode provocar desastres, que envolvem, muitas vezes, prejuízos materiais e perdas humanas.

Predominam no Brasil os riscos geológicos do tipo exógeno, associados aos processos da dinâmica superficial. Os acidentes associados a estes processos apresentam geralmente um condicionante antrópico, isto é, são induzidos ou potencializados por intervenções nos terrenos, executados de maneira errada pelo homem (OGURA, 1995).

São muitos os casos de escorregamentos de encostas em cidades brasileiras, muitos deles resultando em mortes de pessoas, destruição de casas, pontes e vias.

De acordo com Augusto Filho e Virgili (1998), são os seguintes os principais condicionantes dos escorregamentos e processos correlatos na dinâmica ambiental brasileira:

- Características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico;
- Características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas/talude, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (xistosidade, fraturas, etc.);
- Características geomorfológicas, com destaque para inclinação, amplitude e forma de perfil das encostas (retilíneo, côncavo e convexo);
- Regime das águas de superfície e subsuperfície;
- Características do uso e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros concentração de água pluvial e servida, etc.

Segundo os autores citados, na maioria dos processos de instabilização de encostas e taludes, atuam mais de um condicionante, agente, causa ou fator, concomitantemente. O homem, no entanto, constitui o mais importante agente modificador da dinâmica de encostas, produzindo as principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos:

- Remoção da cobertura vegetal;
- Lançamento e concentração de águas servidas;
- Vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas;
- Execução de cortes com geometria inadequada (altura e inclinação);
- Execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação);
- Lançamento de entulho e lixo nas encostas;
- Vibrações produzidas por tráfego pesado, explosões, etc.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Na tentativa de unificar a linguagem relacionada a movimentos de massa, Cruden *et al.* (1994) elaboraram um glossário chamado *Multilingual Landslide Glossary*, onde definiram escorregamento como sendo todo o deslocamento de rocha, solo e detritos, direcionados encosta abaixo.

Dentre as várias terminologias e conceituações utilizadas para definir estes movimentos de massa, há a proposta por Varnes (1978), cujos critérios incluem:

velocidade, direção e recorrência dos deslocamentos; natureza do material instabilizado; textura, estrutura e conteúdo d'água dos depósitos; geometria das massas movimentadas e a modalidade de deformação do movimento.

A classificação proposta por Varnes (1978), embora antiga e bastante simplificada é a mais aceita internacionalmente, sendo adotada pelo IAEG (*International Association of Engineering Geology*) e é apresentada no quadro 1, a seguir.

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			ROCHA	SOLO (ENGENHARIA)	
				GROSSEIRO	FINO
QUEDAS			de Rocha	de Detritos	de Terra
TOMBAMENTOS			de Rocha	de Detritos	de Terra
ESCORREGAMENTOS	ROTACIONAL	poucas unidades	Abatimento de Rochas	Abatimento de Detritos	Abatimento de Terra
			de Blocos Rochosos	de Blocos de Detritos	de Blocos de Detritos
	TRANSLACIONAL	muitas unidades	de Rocha	de Detritos	de Terra
EXPANSÕES LATERAIS			de Rocha	de Detritos	de Terra
CORRIDAS / ESCOAMENTOS			de Rocha (rastejo profundo)	de Detritos	de Terra
				rastejo de solos	
COMPLEXOS			Combinação de dois ou mais tipos de movimentos		

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE ENCOSTAS

FONTE: VARNES (1978)

As complexidades dos critérios de análise e as ilimitadas possibilidades de adoção de enfoques na análise do fenômeno conduziram a uma grande proliferação de sistemas de classificação referente a movimentos de massa.

Diversos autores propuseram classificações de movimento de massas, entretanto nem todas podem ser utilizadas no meio físico brasileiro.

A primeira sistemática apresentado em nível nacional é a de Freire (1965) em seu trabalho "Movimentos Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática".

Num quadro, este autor procura apresentar, de forma sintética, o assunto, classificando os movimentos de solo e rocha em três tipos fundamentais: a) escoamentos b) escorregamentos e c) subsidências.

Os escoamentos correspondem às deformações ou movimentos contínuos, com ou sem superfície definida de ruptura. São classificados os movimentos em dois tipos: corridas e rastejo. Os escorregamentos correspondem a um deslocamento

finito, além de superfície nítida de ruptura, sendo classificados também em dois tipos: escorregamentos rotacionais e translacionais. As subsidências correspondem a um deslocamento finito ou deformação contínua, de direção vertical, sendo classificadas em três tipos: subsidências propriamente ditas, recalques e desabamentos.

De maneira geral, as classificações modernas baseiam-se na combinação de critérios básicos de velocidade, direção e recorrência dos deslocamentos; natureza do material instabilizado, solo, rocha, detritos, depósitos etc., sua textura, estrutura e conteúdo d'água; modalidade de deformação do movimento (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

Segundo Hutchinson (1988), a diversidade de fatores que interferem no processo de movimentos de massa gravitacionais resulta numa variedade de tipos e processos que impossibilitam uma total discretização de tipos na classificação. O autor propõe uma classificação em que são considerados os movimentos do tipo recuo, rastejo, fraturamento de taludes, escorregamentos, movimentos de detritos em forma de fluxo, tombamentos, quedas e movimentos complexos de taludes.

Vargas (1999), em estudos na Serra do Mar, classificou os escorregamentos observados em:

1. Rastejo (*creep*) – movimento lento de camadas superficiais de solo, encosta abaixo, com velocidades muito pequenas, de alguns milímetros por ano, acelerado por ocasião das chuvas e desacelerado em épocas de seca.

2. Escorregamentos verdadeiros – referem-se a deslizamentos de volumes de solos ao longo de superfícies de rupturas bem definidas, cilíndricas ou planares. São, a rigor, os únicos que podem ser submetidos à análise estáticas, do tipo métodos de equilíbrio-limite.

3. Deslizamento de tálus – os tálus, detritos de escorregamentos antigos, encontram-se, em geral saturados e podem sofrer deslizamentos, sob a ação conjunta da gravidade e das pressões neutras. A massa de material escoia como se fosse um fluido ou líquido viscoso, sem a existência de uma linha de ruptura bem definida. Os tálus secos, não alimentados por água subterrânea, podem ser estáveis.

4. Deslocamentos de blocos de rochas – em algumas encostas naturais ocorrem blocos ou lascas de rochas intactos, resistentes ao intemperismo, que podem sofrer

queda livre por ocasião de chuvas intensas e prolongadas, provocam erosão e solapamento do material junto as suas bases.

5. *Avalanche* ou fluxo de detritos (*debrisflows*) – são fenômenos classificados como desastres naturais, pelo seu alto poder destrutivo e pelos danos que podem provocar. São movimentos de massa que se desenvolvem em períodos muito curto, e ocorrem em geral, após longos períodos de chuva.

Wolle (1988) divide os processos de instabilização em classes e subclasses, conforme o quadro 2.

CLASSES	SUBCLASSES	
ESCORREGAMENTOS	Escorregamentos translacionais (planares)	Provocados pela elevação de um nível de água preexistente
		Provocados pela infiltração, sem nível de água
	Escorregamentos rotacionais	
	Escorregamentos provocados por desconfinamento	
ESCORREGAMENTO EM ROCHAS E SAPROLITOS	Quedas de blocos	
	Rolamento de matacões	
	Deslizamento de blocos e lascas	
	Escorregamentos estruturados	Em rocha fraturada
		Em saprólitos
ESCOAMENTOS LENTOS E MUITO LENTOS	Rastejamento de massas de tálus (colúvio)	
	Rastejo em solo superficial nas encostas	
	Rastejo profundo em rochas	

QUADRO 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS TÍPICAS DA SERRA DO MAR

FONTE: WOLLE (1988)

Augusto Filho (1994) apresenta uma sistemática de classificação, relativamente genérica, mas que resume os principais grupos de processos de instabilização pesquisados para a elaboração de Cartas de Risco de Escorregamento no Brasil. Almeida Filho *et al.* (2001) complementa ainda que, nesta sistemática, os tipos de escorregamentos são definidos em função da forma e do tamanho do processo, bem como o tipo de material (solo, rocha) mobilizado. Estes processos atuam essencialmente nas áreas de encostas com altas declividades, nas montanhas, serras e escarpas.

Essa classificação apresenta os processos agrupados em quatro grandes classes: rastejo (*creep*), escorregamentos (*slides*) quedas (*falls*) e corridas (*flows*), conforme o quadro 3.

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO/MATERIAL/GEOMETRIA
RASTEJOS (<i>CREEP</i>)	Vários planos de deslocamento (internos)
	Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas, e decrescentes com a profundidade
	Solos, depósitos, rocha alterada / fraturada
	Geometria indefinida
ESCORREGAMENTOS (<i>SLIDES</i>)	Poucos planos de deslocamentos (externo)
	Velocidades médias (m/h) a altas (m/s)
	Pequenos a grandes volumes de material
	Geometria e materiais variáveis
	Planares ou translacionais: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza.
	Circulares ou rotacionais: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas
QUEDAS (<i>FALLS</i>)	Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
	Sem plano de deslocamento
	Movimentos tipo queda livre ou plano inclinado
	Velocidades muito altas (vários m/s)
	Material rochoso
	Pequenos e médios volumes
	Geometria variável
Rolamento de matacão – tombamento	
CORRIDAS (<i>FLAWS</i>)	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimento)
	Movimento semelhante a um líquido viscoso
	Desenvolvimento ao longo das drenagens
	Velocidade média a altas
	Mobilização de solo, rocha, detritos e água
	Grandes volumes de material
	Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

QUADRO 3 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS GRANDES GRUPOS DE PROCESSOS DE ESCORREGAMENTO NO *LATO SENSU*

FONTE: AUGUSTO FILHO (1994)

2.2.1 Rastejos

Segundo Guidicini e Nieble (1983), rastejos são movimentos lentos e contínuos de material de encostas com limites, via de regra, indefinidos. Podem envolver grandes massas de solo e a movimentação é provocada pela ação da gravidade.

Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) complementam que os rastejos consistem no movimento descendente, lento e contínuo da massa de solo de um talude. Corresponde a uma deformação de caráter plástico, cuja geometria não é bem definida e que também não apresenta o desenvolvimento de uma superfície definida de ruptura.

Já para Guimarães e Spada (1997), o rastejo é um movimento descendente, lento e contínuo, desencadeado por uma tensão constante aplicada durante longos períodos de tempo sobre a massa de solo de um talude.

No entanto, Guidicini e Nieble (1983) comentam que as variações térmicas e a umidade podem afetar o deslocamento das massas, em função do processo de contração e expansão do manto de intemperismo. Mesmo assim, sua movimentação é praticamente imperceptível (cm/ano), sendo que as taxas de deslocamento decrescem gradualmente com a profundidade do manto de intemperismo.

Este tipo de processo não apresenta uma superfície de ruptura marcante, tanto que sua identificação dá-se pela mudança na verticalidade das árvores, postes, muros, etc. Neste sentido, Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) afirmaram que esses processos são detectados através de indícios indiretos, como o “embarrigamento” de árvores, deslocamentos de muros e outras estruturas, pequenos abatimentos ou degraus na encosta (figura 1).

Os rastejos afetam horizontes superficiais de solo, horizontes de transição solo/rocha, e até mesmo rocha alterada e fraturada, em profundidades maiores. Quanto ao tipo de material, considera-se o rastejo em solo superficial de encosta e rastejo em massa de tálus.

Os rastejos podem causar danos significativos nas fundações de pilares de pontes, viadutos e em taludes e encostas adjacentes a obras civis. Além disso, os rastejos podem evoluir para escorregamentos, servindo como um indicador para movimentos mais rápidos.

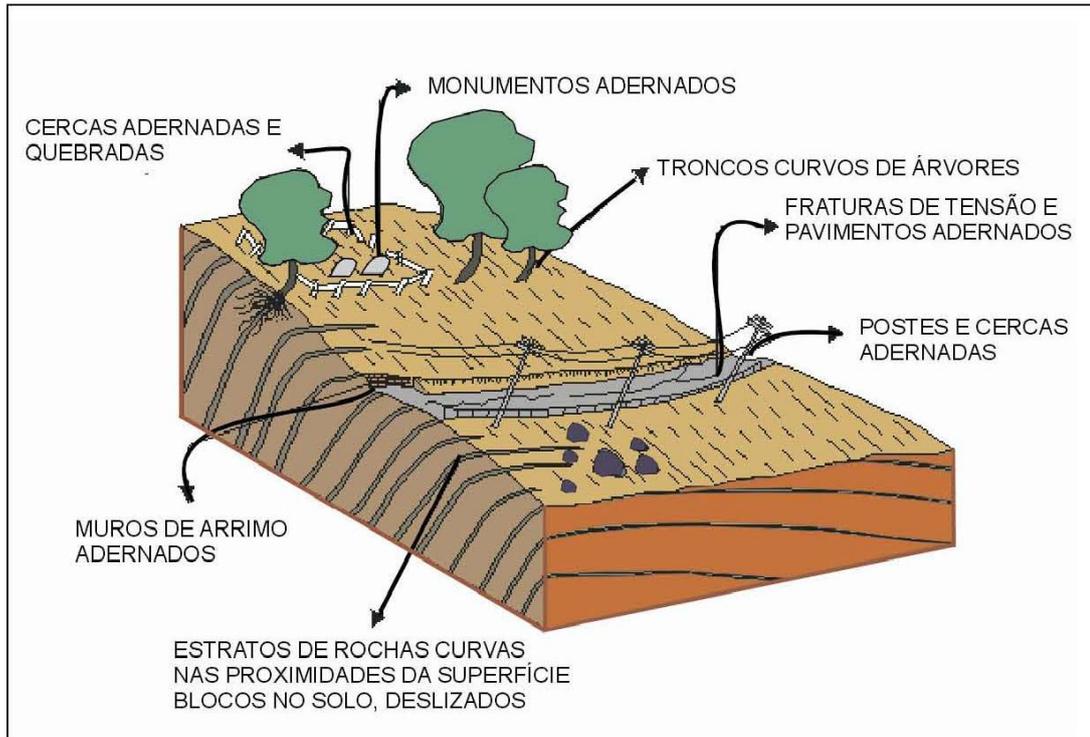


FIGURA 1 – SINAIS QUE EVIDENCIAM A PRESENÇA DE RASTEJO

FONTE: Modificada de BLOOM (1988) *apud* INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998).

2.2.2 Corridas

As corridas são movimentos gravitacionais de massas de grandes dimensões, que se deslocam na forma de escoamento rápido. Caracterizam-se por uma dinâmica híbrida, regida pela mecânica dos sólidos e dos fluidos, pelo grande volume de material mobilizado e pelo extenso raio de alcance que possuem (até alguns quilômetros), resultando num grande potencial destrutivo (INFANTI Jr. e FORNASARI FILHO, 1998).

Para Guidicini e Nieble (1983), corridas são formas rápidas de escoamento, de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionadas pela perda de atrito interno, em virtude da destruição da estrutura, em presença de excesso de água.

São movimentos rápidos (m/s), nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos, formados por grandes volumes de rochas, solos e detritos (AUGUSTO FILHO, 1994). As corridas estão geralmente associadas à concentração excessiva dos fluxos de água superficiais, provenientes de precipitações anômalas, que deflagram, em algum ponto da encosta, um processo de fluxo contínuo de material terroso (KOZCIAK, 2005).

As corridas de massa recebem diferentes denominações, dependendo das características do material mobilizado (textura, conteúdo d'água) e das velocidades de deslocamento do processo (figura 2).

Segundo Selby (1982) outros termos estão associados às corridas, variando conforme a viscosidade (presença de água) e o tipo de material mobilizado, como por exemplo, as corridas de terra (*earthflows*), cujo material predominante também é o solo, mas com teor menor de água; as corridas de lama (*mudflows*), consistindo de solo com alto teor de água; e os fluxos de detritos (*debrisflows*), cujo material predominante é grosseiro, envolvendo fragmentos de rocha de vários tamanhos.

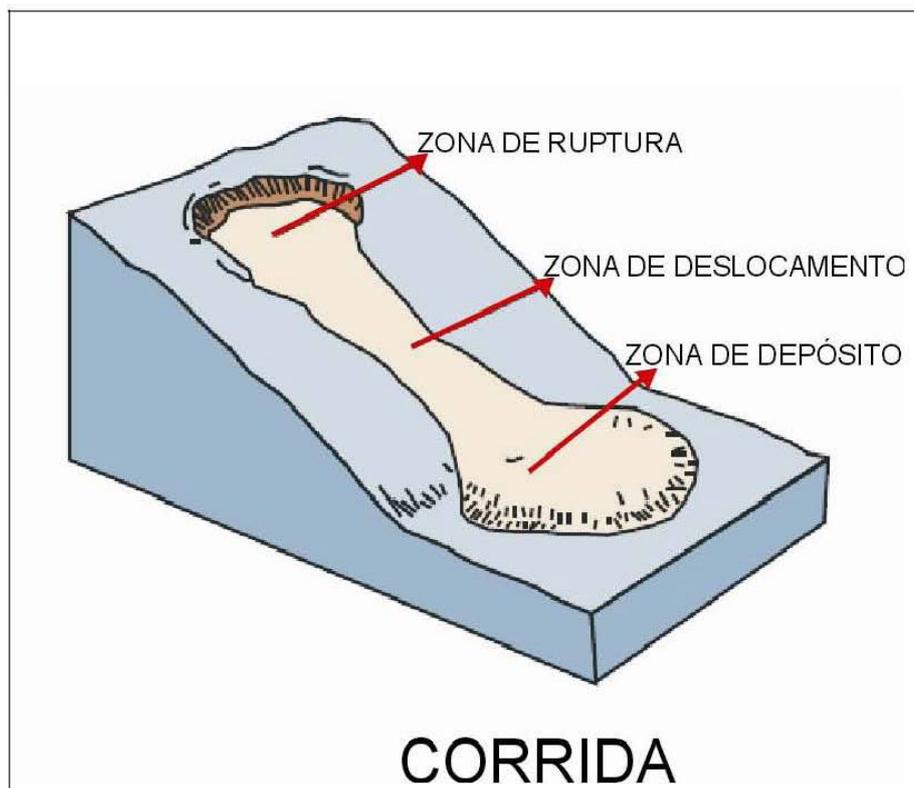


FIGURA 2 – ESQUEMA DE CORRIDA DE LAMA (*earthflow*)

FONTE: Modificada de INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998)

Apesar de serem mais raras de ocorrer, as corridas produzem estragos maiores que os escorregamentos e, ao atingir um curso d'água, o material deslocado ganha velocidade e fluidez, passando a se comportar como uma corrida.

Podem ser identificados dois mecanismos básicos da geração para as corridas de massa:

- Origem primária: formação das corridas a partir da desestruturação total do material mobilizado de escorregamentos nas encostas;
- Origem secundária: formação das corridas nas drenagens principais a partir da remobilização de detritos acumulados no leito e por barramentos naturais, acrescidos do material de escorregamentos nas encostas e de grandes volumes de água gerados em picos de cheias nas drenagens.

O processo de corrida de massa está associado à dinâmica de evolução das vertentes de relevos montanhosos, e, portanto, é natural que mostre certa recorrência ao longo do tempo. Todavia, a ocupação de encostas (pelos diferentes tipos de atividade modificadora) sem determinados critérios técnicos pode antecipar e ampliar o processo. Corridas associadas a rupturas de aterro, em cabeceiras de drenagem, apresentando greides suaves e depósitos de argila orgânica, também têm sido responsáveis por alguns acidentes importantes.

2.2.3 Escorregamentos

Guidicini e Nieble (1983) citam que os escorregamentos (*slides*) são movimentos rápidos (m/h a m/s), de curta duração, com planos de ruptura bem definido, permitindo a distinção entre o material transportado e o não-transportado.

O processo dá-se em função de um conjunto de fatores, elevadas declividades, altos índices de pluviosidade, antropismo, etc., que contribuem para a desestabilização das encostas.

Em virtude da massa transportada e da geometria do plano de ruptura, os escorregamentos classificam-se em rotacionais e translacionais (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Escorregamento são movimentos rápidos, de duração relativamente curta, de massa de terreno geralmente bem definida quanto ao seu volume cujo centro de gravidade se desloca para fora do talude. (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Ainda para os mesmos autores, são muitas as causas ou agentes que conduzem ao aparecimento de escorregamentos, entretanto para que ocorra um escorregamento é necessário que a relação entre a resistência média ao cisalhamento do solo ou da rocha e as tensões médias de cisalhamento na superfície potencial de movimentação tenha decrescido, de um valor inicial maior que 1 até a unidade, no instante do escorregamento.

A velocidade máxima do movimento depende da inclinação da superfície de escorregamento, da causa inicial de movimentação e da natureza do terreno.

Conforme Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), os escorregamentos consistem no movimento rápido de massas de solo ou rocha, geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude (natural, de corte ou aterro).

O mecanismo de deformação envolvido nestes processos apresenta um regime diferente do rastejo, ocorrendo por aumento das tensões atuantes ou queda da resistência, em períodos relativamente curtos, ou combinações destes mecanismos que levam os terrenos, que constituem os taludes e encostas naturais, a rupturas por cisalhamento.

2.2.3.1 Escorregamentos Rotacionais (*Slumps*)

Os escorregamentos rotacionais possuem superfícies de deslizamentos curvas, sendo comum a ocorrência de uma série de rupturas combinadas e sucessivas. Estão associadas a aterros, pacotes de solo ou depósitos mais espessos, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas (INFANTI Jr. e FORNASARI FILHO, 1998).

Conforme Guidicini e Nieble (1983) o escorregamento rotacional de solo é um fenômeno verificado nas encostas brasileiras mobilizando geralmente o manto de alteração (figura 3). São movimentos catastróficos, causados pelo deslizamento súbito do solo residual que recobre a rocha, ao longo de uma superfície qualquer de ruptura, ou em toda a extensão da própria superfície da rocha. É a separação de certa massa de material de terreno, delimitada de um lado pelo talude e de outro lado por uma superfície contínua de ruptura.

Apresentam uma superfície de ruptura côncava, sobre a qual ocorre um movimento rotacional do manto de alteração. Basicamente, estão associados a pacotes de solos espessos e homogêneos, de rochas argilosas ou cristalinas intensamente fraturadas. Para Fernandes e Amaral (1996) a gênese dos escorregamentos rotacionais está frequentemente vinculada a cortes na base das vertentes, sejam artificiais (implementação de estradas) ou naturais (erosão pluvial).

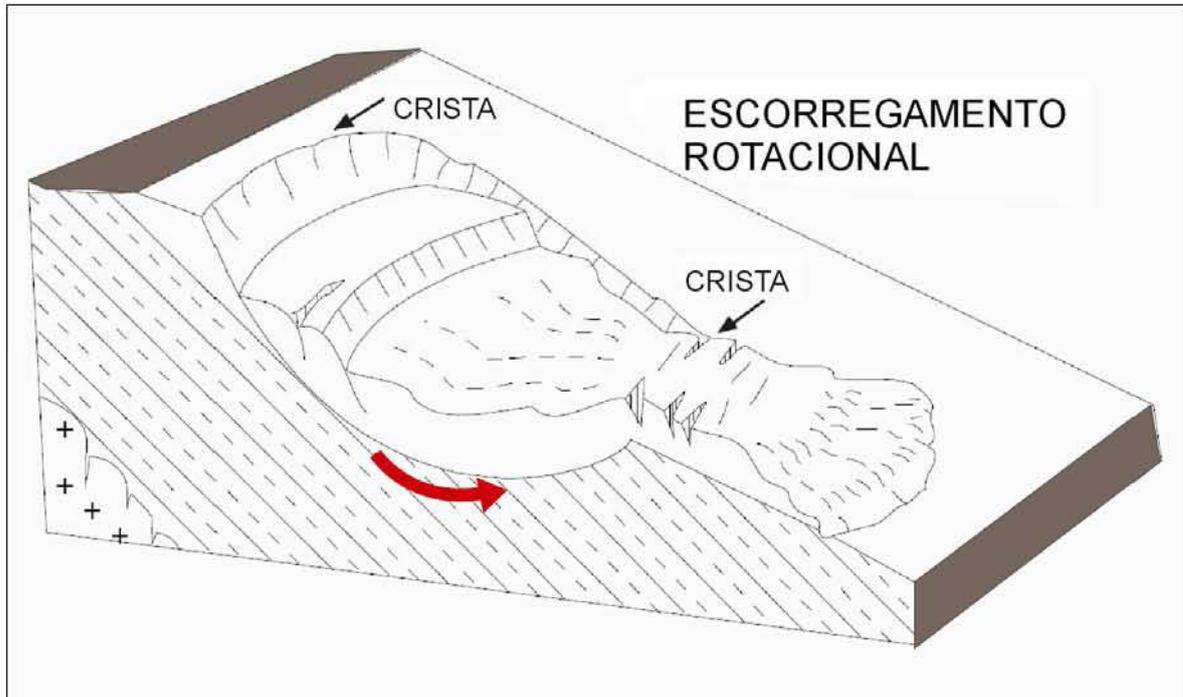


FIGURA 3 - ESCORREGAMENTOS ROTACIONAIS (*slumps*)

FONTE: Modificado de INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998)

Segundo Borchardt (2005), estes escorregamentos ocorrem preferencialmente ao longo de superfícies internas de deslizamentos; envolvem apenas uma ou poucas unidades lito/pedológicas e geram uma superfície curva com concavidade voltada para cima. A massa deslocada tende a restaurar seu equilíbrio após algum tempo de movimentação.

Como este tipo de escorregamento ocorre preferencialmente em materiais homogêneos, sua incidência é comum em barragens de terra e aterros em geral do que em taludes naturais, onde a heterogeneidade do solo envolvido proporciona deslizamentos de forma mais complexa.

2.2.3.2 Escorregamentos Translacionais (*Translational Landslide*)

Os escorregamentos translacionais de solo são processos muito repetitivos nas encostas serranas brasileiras, envolvendo solos superficiais, freqüentemente até o contato com a rocha subjacente, alterada ou não. Também ocorrem em taludes, mobilizando solo saprolítico, saprolitos e rochas, sendo condicionados por estruturas planares desfavoráveis à estabilidade, relacionados a feições geológicas diversas,

tais como: foliação, xistosidade, fraturas, falhas, etc. (INFANTI Jr. e FORNASARI FILHO, 1998).

Segundo Guidicini e Nieble (1983) se massas de solos ou rochas possuírem anisotropias acentuadas em seu interior, eventuais escorregamentos que nelas ocorram irão provavelmente apresentar plano de movimentação condicionado a tais anisotropias. Estes movimentos podem ocorrer em taludes mais abatidos e extensos, diferentemente dos escorregamentos rotacionais que surgem em taludes íngremes e possuem extensão relativamente limitada.

Nos solos ocorrem movimentos ao longo da superfície plana, em geral preexistente e condicionada a alguma feição estrutural do substrato. O movimento é de curta duração, velocidade elevada, grande poder de destruição. A superfície de escorregamento começa a aparecer no topo da área sujeita à movimentação, na forma de uma linha de destaque ou fendas.

Escorregamentos translacionais de solo ocorrem, em geral, dentro do manto de alteração, cuja espessura está condicionada pela natureza da rocha, pelas condições climáticas, tipo de drenagem e inclinação das encostas. Como o manto de alteração brasileiro pode atingir espessuras muito elevada, o afloramento de rochas é mais raro nesse ambiente, passando a ser comum em encostas com inclinação superior a 40° (PICHLER, 1957).

Os escorregamentos translacionais surgem geralmente em solo pouco desenvolvido, em encostas com elevadas declividades, associados à períodos de pluviosidade intensa ou de longa duração que saturam as camadas do solo, deflagrando a desagregação e o transporte do mesmo (AUGUSTO FILHO, 1994).

Fernandes e Amaral (1996) citam que estes tipos de movimentos são compridos e rasos, em que o plano de ruptura encontra-se, geralmente, em profundidade rasas que variam entre 0,5 m e 5,0 m. Além disso, conforme estes autores, as rupturas tendem a ocorrer rapidamente devido ao aumento da poro-pressão positiva durante os eventos pluviométricos (figura 4).

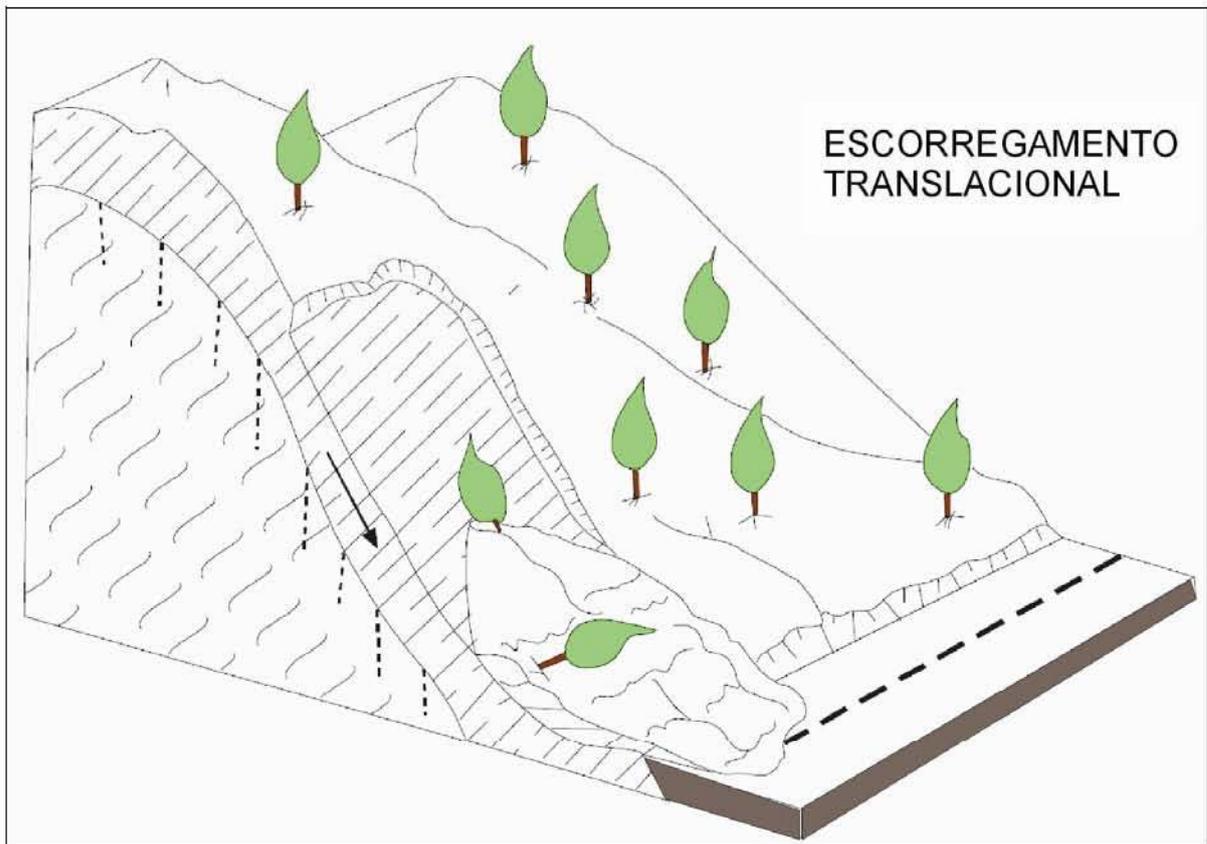


FIGURA 4 - ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS (*translational landslide*)

FONTE: Modificado de INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998)

2.2.3.3 Escorregamentos em Cunha

Os escorregamentos em cunha estão associados a saprolitos e maciços rochosos, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos (figura 5). Estes processos são mais comuns em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (INFANTI Jr. e FORNASARI FILHO, 1998).

Nestes escorregamentos, a massa de solo apresenta grande deformação e é rompida por cisalhamento. Progride indefinidamente sobre uma superfície plana enquanto a inclinação desta permite, ou ainda, enquanto a resistência ao cisalhamento permanecer menor do que as forças atuantes (BORCHARDT, 2005).

Esses fenômenos recorrentes de escorregamentos de grandes proporções estão associados a períodos de intensa pluviosidade. Lopes (1986) analisou as

encostas da Serra do Mar em termos evolutivos, relacionando características geológicas e geomorfológicas às condições de estabilidade do perfil da encosta. O autor demonstra como as encostas côncavas, que já foram palco de escorregamentos no passado, constituem o novo perfil de equilíbrio do maciço. Por outro lado, as encostas convexas, onde a taxa de intemperismo ultrapassa a de erosão, tendem a se aproximar da ruptura, adquirindo forma côncava para restabelecer o perfil de equilíbrio.

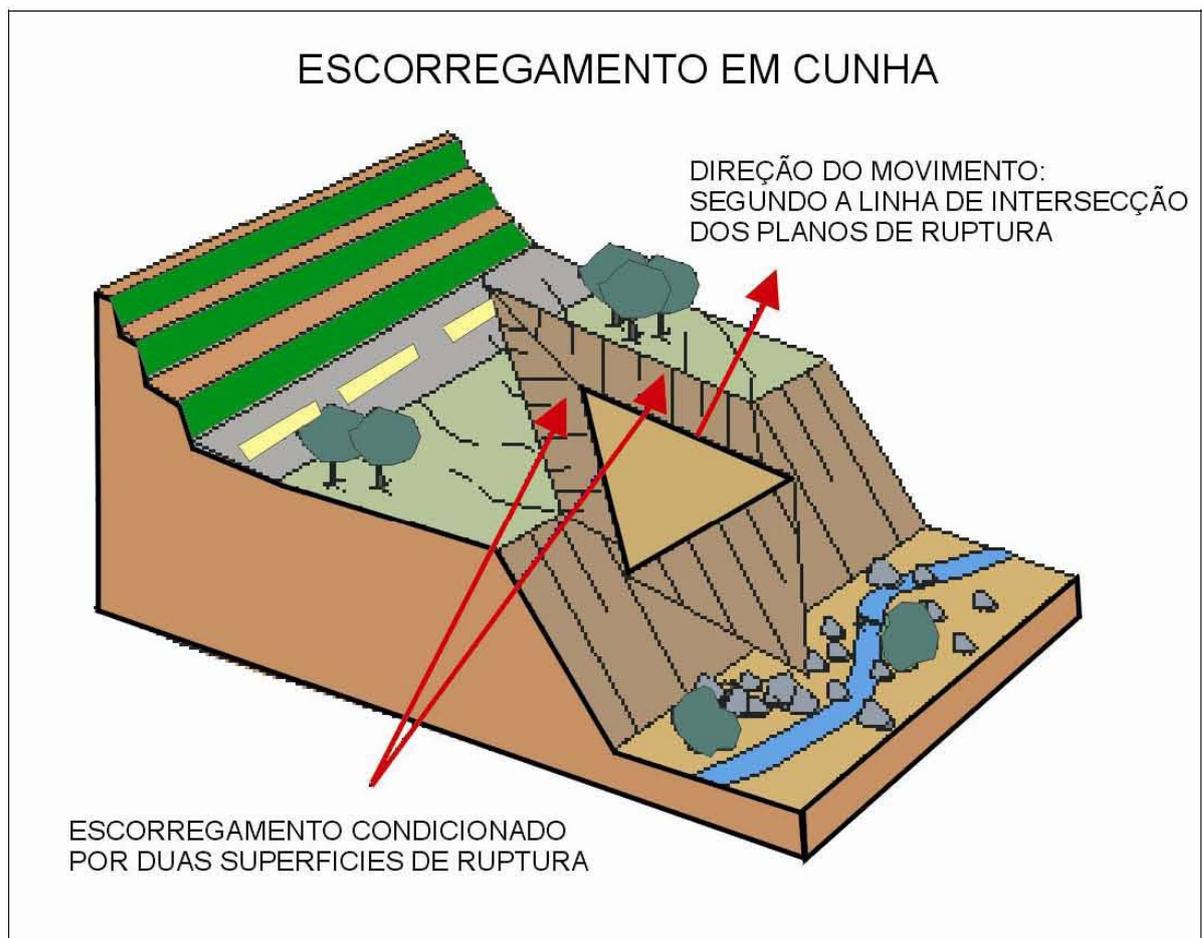


FIGURA 5 – ESCORREGAMENTOS EM CUNHA

FONTE: Modificado de INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998)

2.2.4 Quedas (*Falls*)

Em penhascos verticais, ou taludes muito íngremes, blocos de rocha, deslocados do maciço por intemperismo caem por ação da gravidade. Este é um dos mecanismos de formação de depósito de tálus. Uma queda de bloco é assim

definida por uma ação de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação (GUIDICINI e NIEBLE 1983). O processo é bastante comum no avanço remontante de cachoeiras e mais comum ainda como mecanismo de destruição de penhascos de borda marítima.

São movimentos desenvolvidos em declives com ângulos próximos a 90°, atingindo velocidades muito altas (m/s). Dá-se pelo desprendimento de blocos e/ou de lascas de rochas caindo em queda livre, rolamento ou tombamento sob efeito da gravidade (AUGUSTO FILHO, 1994). A ocorrência de blocos é favorecida pelas descontinuidades nas rochas (fraturas e bandamentos), associadas à presença de agentes químicos e físicos, que favorecem o intemperismo esferoidal, isolando as rochas e matacões na superfície de encostas (FERNANDES e AMARAL, 1996).

Segundo Kozciak (2005), não são comuns os movimentos puros de qualquer desses tipos, usualmente há uma mistura deles, com variável dose de importância relativa entre uns e outros e, ainda, uma passagem gradacional em tempo e ou espaço de uns para outros. A definição dos movimentos é dificultada pela semelhança existente entre os processos, principalmente entre os escorregamentos (*slides*) e os fluxos de detritos (*debrisflows*) oriundos do manto de intemperismo. Ambos os fenômenos apresentam características semelhantes em relação à forma, à velocidade, ao material e ao volume transportado. Além do que, também estão associados à participação intensa da água.

Borchardt (2005) complementa que este tipo de movimento envolve massas de solo de qualquer proporção, e ocorre principalmente por queda livre, rolamento ou salto do material ao longo de superfícies com pouco ou nenhum deslocamento cisalhante. A velocidade do movimento varia de rápida a extremamente rápida.

Conforme Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) os processos de movimentos de blocos rochosos consistem nos deslocamentos, por gravidade, de blocos de rocha, podendo ser classificados em vários tipos, conforme a seguir (figura 6).

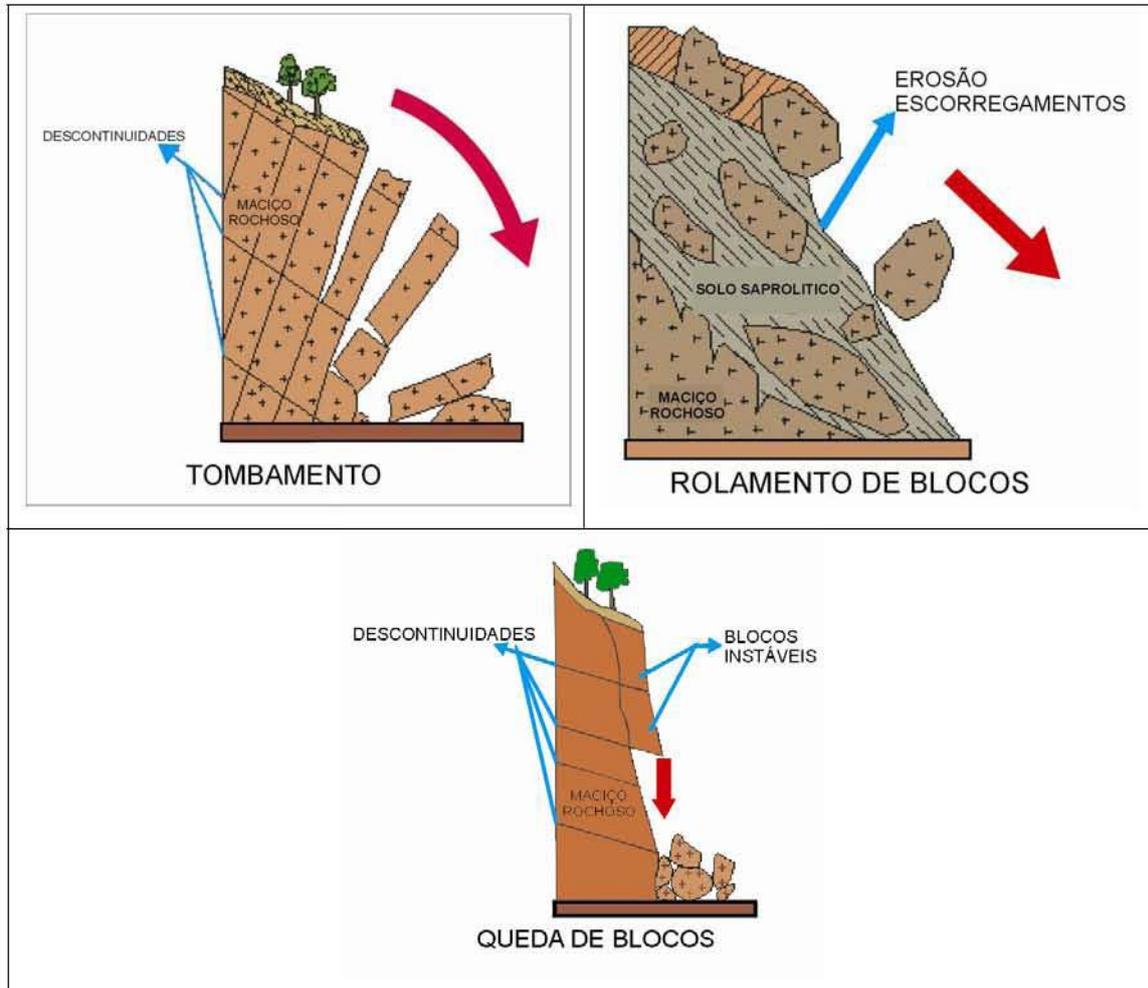


FIGURA 6 – TOMBAMENTO DE BLOCOS, ROLAMENTO DE MATAÇÕES E QUEDA.

FONTE: Modificado de INFANTI JR. e FORNASARI FILHO (1998)

- Queda de blocos: envolve materiais rochosos de volume e litologia diversos, que se destacam de taludes ou encostas íngremes e se deslocam em movimentos tipo queda livre;
- Tombamento de blocos: movimento que se dá pela rotação dos blocos rochosos, condicionado pela presença de estruturas geológicas no maciço rochoso, com grande mergulho;
- Rolamento de blocos: corresponde a movimento de blocos rochosos ao longo de superfícies inclinadas. Esses blocos, geralmente, encontram-se parcialmente imersos em matriz terrosa, destacando-se dos taludes e encostas por perda de apoio;
- Desplacamento: consiste no desprendimento de lascas ou placas de rocha que se formam a partir de estruturas (xistosidade, acamamento, etc.), devido às variações térmicas, ou por alívio de tensão. O desprendimento pode se dar em queda livre ou por deslizamento ao longo de uma superfície inclinada.

2.3 VARIÁVEIS CONDICIONANTES AO MOVIMENTO DE MASSA

De forma genérica, pode-se afirmar que a deflagração das instabilizações de taludes e encostas é controlada por uma cadeia de eventos, muitas vezes de caráter cíclico, com origem na formação da própria rocha e toda sua história geológica e geomorfológica subsequente, como movimentos tectônicos, intemperismo, erosão, ação antrópica, etc. (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

Apesar disso, é quase sempre possível estabelecer um conjunto de condicionantes que atuam de forma mais direta e imediata na deflagração destes processos.

Augusto Filho e Virgili (1998) apontam como os principais condicionantes dos escorregamentos e processos correlatos na dinâmica ambiental brasileira, o seguinte:

- Características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico;
- Características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas;
- Características geomorfológicas, com destaque para inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas;
- Regime das águas de superfície e subsuperfície;
- Características de uso do solo e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial e servida, etc.

Sob o ponto de vista da Geologia de Engenharia, alguns dos condicionantes listados anteriormente têm particular importância, pois se referem diretamente às características geológico-geotécnicas, sendo discutidos com mais detalhes a seguir.

Zuquete (1988) apresenta em seus estudos, uma listagem de atributos que estão diretamente relacionados aos movimentos de massa gravitacionais, e que devem ser considerados, respeitando-se a escala, as características da região e a finalidade do trabalho.

Guidicini e Nieble (1976) utilizam a terminologia de agentes e causas de instabilização para discutir esses condicionantes, entendendo como causa o modo de atuação de um determinado agente na instabilização de um talude ou encosta. Os agentes deflagradores são subdivididos em predisponentes e efetivos. Os

agentes predisponentes referem-se a um conjunto de características naturais intrínsecas dos terrenos, nos quais os movimentos vão ocorrer. Os agentes efetivos são diretamente responsáveis pelo desencadeamento das instabilizações do talude ou da encosta, incluindo a ação antrópica.

Varnes (1978) discute os principais condicionantes e mecanismos de deflagração dos escorregamentos, reconhecendo os fatores que aumentam as solicitações e os que diminuem a resistência dos terrenos, com os respectivos fenômenos naturais e antrópicos a que estão associados.

Deve-se salientar que as variáveis relacionadas aos processos de instabilização de encostas atuam de forma integrada e, portanto, não devem ser analisadas isoladamente.

As principais variáveis condicionantes de escorregamento podem ser agrupadas, de forma geral, em seis grandes condicionantes: geologia, pedologia, geomorfologia, cobertura vegetal, clima e ação antrópica.

2.3.1 Geologia

A Geologia é a ciência natural que, através das ciências exatas e de todas as suas ferramentas, investiga o meio natural do planeta, permitindo conhecer o nosso habitat e, por conseqüência, exercer de modo responsável as ações humanas de ocupar, utilizar e controlar os materiais e os fenômenos naturais.

Dessa forma, um estudo envolvendo o meio ambiente, não seria completo se não fosse considerada a geologia da região pesquisada. É de fundamental importância a caracterização do tipo litológico, determinando seu grau de alteração e sua resistência mecânica. Quanto ao grau de alteração, pode-se dizer, de modo geral que, quanto mais alterado estiver o material, maior o potencial de ocorrência de movimentos de massa. E quanto à resistência da rocha, esse atributo está diretamente relacionada com o tipo litológico e com o grau de alteração (RODRIGUES, 2002).

Lepsch (2002) menciona que a litologia, mesmo exercendo um “papel passivo” à ação climática e orgânica, influencia no tipo de solo (material mineral), como também nas suas características intrínsecas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, cor, granulometria, etc.).

As características estruturais que representam os pontos de menor resistência e descontinuidade desempenham papel fundamental na infiltração e circulação da água, e, conseqüentemente, atuam como caminhos preferenciais de alteração (FIORI, 1995). No processo de instabilização das vertentes, os principais fatores condicionantes estão intimamente vinculados ao tipo de rocha e às características estruturais, tais como as falhas, fraturas, foliações e inclinação das camadas.

2.3.2 Pedologia

Os climas tropicais e subtropicais impõem características próprias aos processos de intemperismo. Estudos sobre solos demonstram que sua origem e evolução sofrem influência do clima (chuvas e temperatura), materiais de origem, organismos vegetais e animais, relevo e tempo (SALOMÃO e ANTUNES, 1998).

Em climas tropicais, os processos de laterização podem induzir à formação de macroestruturas e características particulares dos solos, quanto aos parâmetros de resistência, índice de plasticidade, textura, etc., que resultam em comportamentos diferenciados em relação aos solos de clima temperado.

Dessa forma, pode-se dizer que a temperatura e a precipitação pluviométrica são os aspectos climáticos mais importantes no desenvolvimento pedológico.

Como resultado típico deste processo, há mantos de cobertura superficial de grandes espessuras, com a formação de zonas de diferentes resistências, permeabilidades e outras características que se relacionam diretamente com os mecanismos de escorregamentos e processos correlatos.

Uma série de parâmetros e propriedades do solo influencia direta ou indiretamente sua susceptibilidade aos movimentos de massa e ao tipo de mecanismo da instabilização atuante.

A investigação do comportamento geotécnico dos solos lateríticos e saprolíticos tropicais vem se intensificando dentro da Geologia de Engenharia, inclusive no campo da estabilidade de taludes e encostas (WOLLE, 1985).

Nesse sentido, Fiori e Carmignani (2001) declaram que, solos podem influenciar e sofrer a ação dos processos erosivos, em virtude da sua textura, estrutura, permeabilidade e densidade.

O arranjo espacial das partículas no solo, que corresponde à sua estrutura, também influencia no direcionamento e na velocidade de infiltração da água. Além disso, pode interferir no aumento ou na diminuição da força de atrito nas camadas detríticas (FIORI, 1995).

A porosidade e a permeabilidade são inversamente proporcionais à densidade, que representa a relação entre o volume e a massa total do solo (FIORI e CARMIGNANI, 2001).

A condutividade hidráulica do solo, em termos específicos de deslizamentos, assume importância tanto na recarga de água superficial (velocidade e infiltração), quanto na geração de descontinuidades hidráulicas no interior do perfil de alteração, os quais poderão atuar localmente como camadas de impedimentos ao fluxo vertical, favorecendo, conseqüentemente a geração de elevadas poro-pressões positivas (FERNANDES *et al.*, 2001).

Segundo Kozciak (2005), a drástica diminuição da condutividade hidráulica favorece a geração de fluxos d'água subsuperficiais, com forte componente lateral, diminuindo a resistência ao cisalhamento nas zonas de contato. Além disso, a presença de grande quantidade de água aumenta o peso específico do solo, favorecendo o deslocamento da massa pela ação da gravidade.

Outro aspecto a ser destacado é que, apesar de vários modelos de mecanismos de ruptura em solos os tratar como meio relativamente homogêneo, na prática isto não ocorre.

Outros dois parâmetros do solo que devem ser levados em consideração na análise de movimentos de massa são: a resistência dos solos e os índices físicos.

2.3.2.1 Resistência dos Solos

Para Guidicini e Nieble (1983) as propriedades mais significativas dos materiais, na discussão de problemas de estabilidade, são o ângulo de atrito e a coesão de solos e rochas, que podem ser facilmente obtidos em laboratório por meio do ensaio de cisalhamento direto.

Em determinados casos quando a coesão for igual a zero, a resistência ao cisalhamento só dependerá das características de atrito, ocorrendo o deslizamento quando o ângulo de inclinação do plano superar o ângulo de atrito interno. A presença de água numa encosta atua principalmente na redução da coesão do solo

e na indução do surgimento da pressão de percolação e desta forma, diminuindo a resistência ao cisalhamento.

A ruptura dos solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento. A resistência ao cisalhamento pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do mesmo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo (PINTO, 2002).

Conforme Kozciak (2005) o ângulo de atrito e a coesão, parâmetros determinantes da resistência ao cisalhamento, variam bastante, dependendo da gênese e das características dos solos. A coesão possui uma parcela relacionada à capilaridade, denominada coesão aparente, que varia com o grau de saturação do solo, comportamento que tem papel importante no mecanismo dos escorregamentos.

Para Francis e Rocha (1998) a avaliação feita com relação à resistência ao cisalhamento, é definida em função dos parâmetros c (coesão) e ϕ (ângulo de atrito) das discontinuidades e a relação entre a resistência que pode ser mobilizada e o esforço a que ela estará submetida é chamado de coeficiente de segurança. Os valores de Fator de Segurança são definidos em função do nível dos estudos e da responsabilidade da estrutura ou dos riscos envolvidos.

Segundo o critério de Coulomb, a resistência ao cisalhamento (δa) do solo, ao longo de um plano de deslizamento qualquer, se compõe basicamente de três componentes: a coesão (c), o atrito entre as partículas constituintes do solo (ϕ) e o esforço normal ao plano de escorregamento (σ_n) e se relacionam entre si segundo a equação:

$$\delta a = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (01)$$

onde (c) é a coesão e (ϕ) o ângulo de atrito interno do solo.

O ângulo de atrito interno é o ângulo máximo que um determinado material pode assumir sem que haja rompimento de seu estado inercial. Pode ser definido como o ângulo cuja tangente constitui a razão entre as forças de resistência ao

deslizamento, ao longo do plano da encosta, com as componentes das forças favoráveis ao movimento, exercidas sobre este plano.

Sob a denominação genérica de atrito interno de um solo, inclui-se não só o atrito físico entre as partículas, que se pode traduzir como a maior ou menor facilidade de deslizamento de uma partícula em relação à outra, como também o atrito fictício proveniente do entrosamento das partículas (BARATA, 1994).

A coesão, por outro lado, é uma força exercida entre as partículas como resultado das atrações intermoleculares (forças de Van Der Waals) que agem nos pontos de mais próximo contato e das repulsões eletrostáticas dos íons dispersos na dupla camada que envolve as partículas coloidais.

Segundo Caputo, (1988) a coesão é uma característica típica de solos muito finos (argilas e siltes), distinguindo-se a coesão aparente, resultante da pressão capilar da água contida no solo, agindo como uma pressão externa de sucção, e a coesão verdadeira, devido às forças eletroquímicas de atração de partículas de argila e dependendo de fatores como a física do solo e a química coloidal.

2.3.2.2 Índices Físicos do Solo

Uma massa de solo pode ser considerada como um conjunto de partículas sólidas e espaços vazios de tamanhos e formas variadas que, por sua vez, podem estar preenchidos com água, ar ou ambos.

As quantidades de água e ar podem variar e a evaporação pode fazer diminuir a quantidade de água, substituindo-a por ar, e a compressão do solo pode provocar a saída de água e ar, reduzindo o volume de vazios. O solo, no que se refere às partículas que o constituem, permanece o mesmo, mas seu estado se altera. As diversas propriedades do solo dependem do estado em que se encontra. Quando diminui o volume de vazios, por exemplo, a resistência aumenta.

O ângulo de atrito e a coesão, parâmetros determinantes da resistência ao cisalhamento, variam bastante, dependendo da gênese e das características dos solos. A coesão possui uma parcela relacionada à capilaridade, denominada coesão aparente, que varia com o grau de saturação do solo, comportamento que tem papel importante no mecanismo dos escorregamentos em material terroso.

Uma série de outros parâmetros e propriedades dos solos influencia, direta ou indiretamente, suas suscetibilidades aos movimentos de massa e ao tipo de

mecanismo da instabilização atuante. Entre eles destacam-se: peso específico, porosidade, índice de vazios, etc.; mineralogia; granulometria; plasticidade, atividade, permeabilidade, compressibilidade e história de tensões.

Para identificar o estado do solo, segundo Pinto (2002) empregam-se índices que correlacionam os pesos e os volumes das três fases. Estes índices são os seguintes:

- Umidade - relação entre o peso da água e o peso dos sólidos;
- Índice de vazios - relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas;
- Porosidade - relação entre o volume de vazios e o volume total;
- Grau de saturação - relação entre o volume de água e o volume de vazios;
- Peso específico dos sólidos (γ_s) - é uma característica dos sólidos. Relação entre peso das partículas sólidas e seu volume;
- Peso específico da água (γ_a) - Embora varie um pouco com a temperatura, adota-se sempre igual a 10 kN/m³;
- Peso específico natural (γ_n) - Relação entre o peso total do solo e seu volume total;
- Peso específico aparente seco (γ_d) - Relação entre o peso dos sólidos e o volume total;
- Peso específico aparente saturado (γ_{sat}) - peso específico do solo se viesse a ficar saturado e se isso ocorresse sem variação de volume;
- Peso específico submerso (γ_{sub}) - é o peso específico efetivo do solo quando submerso. É igual ao peso específico natural menos o peso específico da água.

2.3.3 Geomorfologia

As características geomorfológicas (formas e dinâmicas do relevo), geológicas (tipos litológicos, modos de ocorrência, estruturas, processos geodinâmicos externos e internos) e geotécnicas (características dos terrenos, propriedades dos solos e rochas) do meio físico são os principais fatores que, para um determinado tipo climático, condicionam os reflexos decorrentes da ocupação do

solo.

Nas áreas urbanas, especialmente, o meio físico é o componente ambiental que, mesmo alterado em suas características e processos originais, persiste interagindo e condicionando grande parte dos problemas do ambiente construído (PRANDINI *et al.*, 1995).

As formas de relevo de uma determinada área têm grande influência no seu processo de ocupação, e são, geralmente, bastante alteradas pelo mesmo.

De acordo com Christofolleti (1991) percebe-se com clareza a significância dos estudos geomorfológicos em sua inter-relação com outros elementos do sistema ambiental e sua relevância para as atividades humanas.

A topografia de uma área pode influir no processo de urbanização. Por exemplo, terrenos com grandes declividades são considerados não apropriados para ocupação urbana, devido aos problemas de instabilidade além de outros.

Algumas vezes, consegue-se vencer obstáculos relacionados à uma topografia não favorável, mas isso é feito com movimentação de terra e outras ações antrópicas, causando impactos adversos à paisagem ou prejuízos à qualidade do meio ambiente.

Segundo Kozciak (2005), os atributos de relevo, associados principalmente com a morfologia e a morfometria, interferem diretamente nas atividades erosivas, e são, geralmente, obtidas por meio das formas das encostas, das diferenças de declividade dos terrenos, da orientação das encostas e da altimetria.

Com relação à forma das encostas, 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, favorecendo a condição de saturação dos horizontes pedológicos (FERNANDES *et al.*, 2001).

Selby (1985) destaca também as encostas retilíneas como áreas onde predominam processos erosionais de grande velocidade, como os fluxos rasos de detritos (*shallow debrisflows*).

Bonuccelli (1999) apresenta um estudo baseado na elaboração de uma matriz com variações na forma vertical e longitudinal das encostas, a fim de avaliar quais seriam as situações mais ou menos favoráveis à ocorrência de movimentos de massa, além de analisar a influência da forma longitudinal, composição entre as formas, tanto em perfil quanto longitudinal.

A orientação das encostas fornece informações sobre as que se encontram mais expostas às variáveis climatológicas, como por exemplo, vento e insolação (DAI e LEE, 2002). Estes mesmos autores comentam que a orientação das encostas afeta indiretamente a resistência ao cisalhamento em virtude de estar intimamente relacionada à presença de umidade e de cobertura vegetal. Além disso, as precipitações pluviométricas estão condicionadas à direção predominante dos ventos, ou seja, a quantidade de chuva será maior nas encostas expostas a estes eventos atmosféricos.

Segundo Infanti Jr e Fornasari Filho (1998) a inclinação contribui com o incremento da atuação da força gravitacional sobre a cobertura de solo. Quanto maior a declividade maior será a componente vertical da gravidade, principal responsável pela tendência da água e do solo ou rochas se deslocarem dos pontos mais altos para os mais baixos.

A declividade fornece a medida de inclinação da vertente em relação à superfície horizontal. A velocidade de deslocamento de material e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional à declividade (KOZCIAK, 2005). Esta variável tem grande importância nos processos geomorfológicos, condicionando cursos de água e deslocamento de colúvio.

Assim, pode-se deduzir que regiões com alta densidade de drenagem e alta declividade apresentam maior número de pontos favoráveis a riscos de escorregamentos, como já indicado por TUTTLE (1970), TRICART (1972) e THOMAS (1979).

A declividade acima de 30° apresenta riscos de deslizamentos mais frequentes. Acima de 60°, o regolito é menos espesso e, teoricamente, diminuiria o risco de escorregamentos, mas fenômenos desse tipo já foram verificados em áreas cujo manto de regolito era pouco espesso, principalmente ao redor de cabeceiras de drenagem e em épocas de pluviosidade elevada, tomando exposta a rocha base (FERNANDES e AMARAL, 1996).

O atributo declividade, considerado para avaliação da maior ou menor possibilidade de ocorrência de movimentos de massa gravitacionais, deve sempre estar associados aos outros atributos existentes na área.

Sidle *et al.* (1985) apresentam uma associação de classes de declividade relacionadas a alguns tipos de movimentos de massa gravitacionais (tabela 01)

TABELA 01 - CLASSES DE DECLIVIDADE RELACIONADAS AOS DIFERENTES TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAL	CLASSES DE DECLIVIDADE	
	GRAUS	PERCENTAGEM
Rastejo em solo	1,3 a 25	2,8 a 55,5
Escoamentos rápidos em solos	4 a 20	8,8 a 44,4
Escorregamentos rotacionais	7 a 18	15,5 a 40
Escoamentos rápidos em solos e detritos sobrejacentes a rocha	> 25	> 55,5

FONTE: Modificado de SIDLE *et al.* (1985)

2.3.4 Cobertura Vegetal

Diversos autores ressaltam a importância da vegetação, no meio ambiente que, além da importância do ponto de vista paisagístico, possui outras finalidades, tais como: a recreação, proteção da erosão, preservação das margens de cursos d'água, barreiras contra a poluição do ar e acústica, corredores de circulação do ar, entre outras.

Nesse sentido, Guidicini e Nieble (1983) afirmam que existe um consenso generalizado de que as florestas desempenham um papel importante na proteção do solo e que o desmatamento pode propiciar não somente o aparecimento da erosão, mas também de movimentos coletivos de solos.

Para Rodrigues e Lopes (1998) o revestimento vegetal é o meio mais simples e eficiente de proteção de taludes contra a erosão e das águas da chuva e vento.

De um modo geral, as florestas atuam na redução da intensidade dos agentes climáticos no maciço natural, favorecendo a estabilidade das encostas e proteção dos solos. As partes aéreas da vegetação atuam interceptando e protegendo o solo dos raios solares, ventos e chuvas. Em relação à água da chuva, a vegetação age como um amortecedor ao impacto das gotas no solo, prevenindo contra a erosão e favorecendo a infiltração da água. Também proporciona a retenção e a eliminação de parte desta em forma de vapor, diminuindo assim, o volume de água que atinge o terreno e o escoamento superficial.

Segundo Guerra (1995), no nível de dossel, a cobertura vegetal reduz a quantidade de energia que chega ao solo durante uma chuva. Além do que, retém

parte do volume de água precipitada nos diversos componentes do edifício vegetal, liberando-o para a atmosfera por evapotranspiração durante e após as chuvas.

Guidicini e Nieble (1983) especificaram a ação dos diversos componentes da cobertura florestal da seguinte forma:

1. O conjunto das copas e demais partes aéreas da floresta atuam interceptando e defendendo o maciço da ação dos raios solares, dos ventos e da chuva, evitando bruscas mudanças de temperatura e umidade do solo da encosta. Ainda auxiliam na retenção de substancial volume de água da chuva, através do molhamento da ampla superfície de folhagem, galhos, troncos etc.

2. Os detritos vegetais, em contínua acumulação no terreno da floresta, atuam hidráulicamente immobilizando boa parte da água que atinge o terreno, e frenando o escoamento superficial, em condições de máxima pluviosidade, evitando processos erosivos que possam comprometer a estabilidade.

3. O sistema radicular promove a estabilização das encostas, conferindo um acréscimo substancial de resistência ao cisalhamento, distribuindo na encosta as tensões originadas em pontos críticos e retirando parte da água destinada a infiltração no maciço.

Neste sentido, Guerra (1995) complementa que as raízes ao se decomporem, deixam diversas cavidades tubulares que aumentam a infiltração e melhoram a aeração do solo.

Rodrigues (2002) relacionou os efeitos da vegetação favoráveis à proteção das encostas:

1) atuação sobre fatores hidrológicos e climáticos no maciço natural:

- Intercepta e retém, ainda que temporariamente, parcela da água precipitada nas partes aéreas (folhas, flores, galhos), evitando que atinja rapidamente a superfície do terreno; ou seja, promove a diminuição do escoamento superficial;

- Elimina a água retida na forma de vapor, através da absorção e da evapotranspiração, evitando que esse volume de água se infiltre no terreno;

- Os detritos vegetais em contínua acumulação na superfície do terreno (serrapilheira), promovem a retenção e imobilização de parte da água que alcança a superfície, diminuindo momentaneamente a infiltração, bem como o refreamento do escoamento superficial em condições de máxima pluviosidade.

2) atuação sobre a mecânica dos movimentos de massa e erosões:

- Obstrução e retenção de massas movimentadas à montante e a conseqüente diminuição da área atingida pelos processos;
- Raízes e troncos aumentam a rugosidade do terreno, diminuindo a velocidade do escoamento superficial;
- O sistema radicular produz estruturação ou reforço do solo, aumentando sua resistência ao cisalhamento; além disso, retém as partículas do solo no terreno, diminuindo a susceptibilidade a erosão;
- Para raízes mais profundas, que atingem substratos mais resistentes, aparece o efeito de ancoragem das camadas superficiais das encostas;
- A extração (ou absorção) de parcela da água disponível pelas raízes diminui o teor de umidade, podendo reduzir a poro-pressão.

Segundo Nogueira e Uehara (1998) a cobertura vegetal influencia a distribuição da água da chuva pelos fenômenos de interceptação, escoamento pelos troncos e retenção na serrapilheira, a cobertura de restos orgânicos que cobre o solo. A parcela que atinge o solo é a que se infiltra. A água retida pela vegetação é a que sofre evaporação, enquanto, da parcela infiltrada, parte será extraída pelas raízes através do fenômeno da transpiração, outra parte poderá atingir o lençol freático.

Fiori e Borchardt (1997) complementam que, no solo, a serrapilheira tem uma atuação significativa, pois a interceptação da chuva, além de reduzir o efeito *splash*, também evita a compactação do solo e diminui a velocidade do escoamento superficial.

Prandini *et al.* (1976) admitem que o escoamento superficial seja desprezível nas condições de florestas densas e que a cobertura vegetal também dificulta a penetração profunda da água no maciço.

Augusto Filho (1994) atribui como efeitos favoráveis a redistribuição da água da chuva e o acréscimo da resistência do solo devido à presença das raízes (reforço mecânico e escoramento).

Mas para Nogueira e Uehara (1998) não se deve generalizar tal comportamento, dado que os fatores intervenientes, como solo, relevo, substrato geológico, clima, flora e fauna, são muitos e variáveis no espaço e tempo, devendo ser estudado especificamente, em cada região, o papel da cobertura vegetal.

O desmatamento de uma encosta gera uma série de efeitos que reduzem o coeficiente de segurança dessa mesma encosta, pois cessa a proteção realizada pelas partes aéreas da floresta, reduz os efeitos mecânicos do sistema radicular por deterioração dos tecidos vegetais, e faz com que os efeitos climáticos ocorram diretamente sobre o solo. Pode ainda gerar uma elevação do lençol freático, como consequência da eliminação da atividade de evapotranspiração da cobertura vegetal, com possíveis reflexos no grau de saturação do solo superficial e aumento do peso.

Segundo Vargas (1999) os efeitos do desflorestamento sobre a estabilidade dos taludes das encostas naturais é questão muito discutida, principalmente devido ao seu caráter interdisciplinar. Não há dúvida de que há a evidência da degradação da cobertura vegetal coincidir com escorregamentos generalizados das encostas, mas há também casos observados de grandes escorregamentos, deflagrados por chuvas violentas, em regiões cobertas por florestas. Nesses casos, a terra e os blocos de rochas carregavam consigo enormes troncos de árvores.

Bishop e Stevens (1964) ao investigarem áreas no sudeste do Alaska, verificaram um grande aumento na frequência dos escorregamentos e na área por eles afetada, após a derrubada de árvores. Eles afirmam que os escorregamentos são devidos à deterioração e destruição gradual do sistema de raízes. Esse sistema cria uma malha que amarra os blocos e estrutura os solos, mergulhando a níveis inferiores. Com o desaparecimento da floresta, em curto espaço de tempo, este reforço sobre a resistência irá desaparecer.

Dessa maneira, os processos de instabilização de taludes e encostas tendem a se acelerar algum tempo após o desmatamento. Logo em seguida à retirada das árvores, existe um acréscimo na estabilidade das encostas devido à eliminação dos efeitos negativos como sobrecarga, efeito alavanca, etc. Contudo, este acréscimo de estabilidade tende a se perder com o tempo, com o apodrecimento das raízes e a eliminação do efeito de redistribuição de água de chuva.

Nesse sentido, Kozciak (2005) afirma que a remoção da sobrecarga e, conseqüentemente, a eliminação da ação dos ventos sobre a vegetação, aumentam de imediato a segurança de uma vertente. Mas, ao cabo de um determinado tempo, ocorre novamente o incremento da instabilidade em virtude do apodrecimento do sistema radicular e da eliminação da redistribuição da água da chuva. Este intervalo

de tempo irá depender da densidade de raízes, tamanho, resistência à tração, forma das mesmas e tipo de vegetação.

No entanto, é necessário destacar que, com relação aos movimentos coletivos de massa, existem algumas divergências sobre o papel da vegetação na estabilidade das encostas.

Prandini *et al.* (1976) citam que 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. Por outro lado, como efeitos desfavoráveis da cobertura vegetal, mencionam o efeito alavanca, pela ação dos ventos, o efeito cunha, pela penetração das raízes em fendas e a sobrecarga vertical devido ao peso da vegetação.

Gray e Leiser (1982) atribuem os seguintes efeitos favoráveis e desfavoráveis da cobertura vegetal em relação à estabilidade das encostas:

1. Efeitos favoráveis:

- Redistribuição da água proveniente das chuvas: as copas das árvores impedem, em parte, o impacto direto da chuva na superfície do terreno, retardando e diminuindo a quantidade efetiva de água infiltrada no solo. Além disso, a evapotranspiração também retira água do solo;
- Acréscimo da resistência ao solo devido às raízes: as raízes da vegetação de porte arbóreo podem aumentar a sua resistência pelo reforço mecânico e pelo escoramento (raízes pivotantes e profundas);

2. Efeitos desfavoráveis:

- Efeito alavanca: força cisalhante transmitida pelos troncos das árvores ao terreno, quando suas copas são atingidas por ventos;
- Efeito cunha: pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais do solo ou rocha;
- Sobrecarga vertical: causada pelo peso das árvores, que pode haver um efeito benéfico, ou não, na estabilidade, tendo em vista a inclinação das encostas e as características do solo;
- A retirada prolongada da água do solo pelas plantas pode gerar um ressecamento excessivo da encosta, com a formação de fendas e

fissuras de tração, que podem permanecer no solo e desse modo elevar a sua capacidade de infiltração e saturação do solo;

Fiori e Borchardt (1997) analisando o comportamento e as influências da vegetação na estabilidade das encostas da Serra do Mar no litoral paranaense verificaram que o efeito positivo da vegetação nos índices de segurança é maior em vertentes pouco inclinadas, diminuindo gradativamente com o aumento da declividade.

2.3.5 Clima

O estudo do clima é fundamental para a compreensão dos processos atuantes na superfície terrestre. As relações entre os parâmetros climáticos e a dinâmica superficial são conhecidas e enfatizadas em vários trabalhos abordando aspectos relativos à degradação dos solos.

Segundo Moreira e Pires Neto (1998) o relevo da superfície da Terra é o resultado da interação entre a litosfera, a atmosfera e a hidrosfera, ocorrendo a troca de matéria e energia que, ao longo do tempo e do espaço, condicionam a evolução de diferentes feições do relevo.

Na estabilidade de taludes o fator climático mais importante a ser considerado é a precipitação pluvial, uma vez que quase todos os escorregamentos registrados estão associados a episódios de elevada pluviosidade.

Para Moreira e Pires Neto (1998), os movimentos de massa caracterizam-se por um conjunto de processos que deslocam solos e rochas pela vertente e podem ser contínuos, episódicos ou catastróficos. Normalmente estão associados às chuvas intensas e, sujeitos a uma série de condicionantes e agentes deflagradores.

Augusto Filho e Virgili (1998) afirmam que as chuvas atuam como o principal agente não-antrópico na deflagração de escorregamentos no Brasil. Os grandes acidentes relacionados a esses processos ocorreram durante o período chuvoso, variando de região para região.

Nesse sentido, Mota (1999) observou que na maioria das grandes cidades brasileiras, precipitações muitas vezes de pequena intensidade provocam sérios problemas de inundações e escorregamentos, com prejuízos sociais e materiais para a população.

Para Guidicini e Nieble (1983), no Brasil, é de conhecimento generalizado a vinculação dos escorregamentos à ocorrência de chuvas intensas. Tais chuvas acarretam, com certa frequência, erosão intensa e escorregamentos, não raro de caráter catastrófico.

Guidicini e Iwasa (1976) citam que episódios de chuva intensa, superiores a aproximadamente 12% da pluviosidade média anual, tendem a provocar escorregamentos. Para que tais episódios atinjam o caráter de catástrofe é preciso que superem a 20% da pluviosidade média anual. Segundo os autores, quando os níveis de pluviosidade são muito 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 intensas.

A associação entre a deflagração dos escorregamentos e os índices pluviométricos tem levado alguns pesquisadores a tentarem estabelecer correlações empíricas, probabilísticas ou físico-matemáticas entre a pluviosidade e os movimentos de massa.

Os estudos de Tatizana *et al.* (1987) sobre os escorregamentos da Serra do Mar demonstram a contribuição das chuvas para o desencadeamento desse processo. Esses autores estabeleceram uma correlação, através de uma curva de traçado exponencial, entre escorregamentos e índices pluviométricos na Serra do Mar, na área do município de Cubatão (SP).

Guidicini e Iwasa (1976) estabeleceram uma correlação, entre chuva e escorregamentos, pioneira em nível nacional. Eles propuseram faixas de periculosidade para deflagração dos escorregamentos a partir dos coeficientes do ciclo e do episódio, utilizando o registro pluviométrico acumulado até a data do episódio de chuva intensa, o registro pluviométrico do próprio episódio e a média anual de pluviosidade da região. As análises feitas por esses autores permitiram concluir que eventos pluviométricos superiores a 20% da pluviosidade média anual são indicativos de alta possibilidade de deflagração de escorregamentos significativos.

A ocorrência de elevada pluviosidade é condição necessária, mas nem sempre suficiente para o desencadeamento de escorregamento. As chuvas não representam senão um dos aspectos a serem considerados na tentativa de análise de condições que conduzam ao aparecimento de escorregamentos.

A intensidade das chuvas é extremamente importante para o entendimento dos processos morfogenéticos, sendo que ela pode variar significativamente durante uma mesma precipitação. Chuvas de mesma intensidade, porém com duração diferente, terão ações erosivas diferenciadas, tanto maiores quanto mais longa a precipitação (RODRIGUES, 1982).

As chuvas relacionam-se diretamente com a dinâmica das águas de superfície e subsuperfície e, portanto, influenciam a deflagração dos processos de instabilização de taludes e encostas (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998)

Fiori (1995) menciona que, dentre as principais formas de atuação da água no solo, destacam-se: o aumento do grau de saturação, reduzindo a coesão; a elevação da lâmina d'água, facilitando o encontro com a frente de saturação; o estabelecimento de fluxo subterrâneo nas zonas de contatos entre o manto de alteração e a rocha sã; aumento do peso da massa detrítica; incremento de pressões hidrostáticas em planos de descontinuidades estruturais de rochas e solos (fendas e trincas).

A dinâmica das águas de subsuperfície é uma das principais responsáveis pela deflagração dos movimentos de encosta, atuando tanto no aumento das solicitações, como na redução da resistência dos terrenos (INFANTI Jr e FORNASARI FILHO, 1998).

No entanto, Wolle e Carvalho (1989) comentam que a ação combinada de chuva precedente e de chuva intensa de curta ou média duração também são as maiores responsáveis pela deflagração de escorregamentos em meio tropical úmido.

Os índices pluviométricos críticos para a deflagração dos escorregamentos variam com o regime de infiltração no terreno, a dinâmica das águas subterrâneas no maciço e o tipo de instabilização.

Segundo Moreira e Pires Neto (1998), as chuvas intensas durante e ao final da estação chuvosa, quando os solos estão saturados, são decisivos para elevar as pressões nos poros acima de valores críticos e provocar escorregamentos.

2.3.6 Ação Antrópica

Nas cidades, as construções de obras alteram o meio pelo fato de substituir uma região de vegetação por concreto, tornando o solo impermeável, forçando as águas da chuva a escoarem superficialmente, redundando em alterações nas

propriedades do solo, clima, entre outros. Sabe-se que a vegetação desempenha um papel importante na defesa natural do solo e que o desmatamento pode dar início a processos de degradação, como escorregamentos e erosões.

O processo de ocupação do solo urbano, influenciado pelo grande crescimento populacional, tem demonstrado não obedecer a qualquer critério de planejamento em relação aos recursos naturais e ao bem-estar da população.

O planejamento urbano deve partir das limitações e das potencialidades dos recursos naturais pertencentes aos meios físico, biótico e condições sócioeconômicas.

O conceito atual de planejamento territorial é bem mais completo, abrangente e integrado, devendo envolver os aspectos econômicos, sociais, físico-territoriais, ecológicos e administrativos (MOTA, 1999).

A inclusão dos aspectos ambientais no planejamento territorial vem sendo defendida já há algum tempo, uma vez que o ambiente urbano é formado por dois sistemas intimamente inter-relacionados: o “sistema natural”, composto de meio físico e biológico (solo, vegetação, animais, água, etc.) e o sistema antrópico, consistindo do homem e de suas atividades.

O uso do solo urbano sem a adequada consideração das condicionantes geológico-geotécnicas e geomorfológicas, para a caracterização do meio físico e a ocupação sem critérios, muitas vezes por falta de informações básicas, é um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência de acidentes geológicos nas áreas urbanas, trazendo prejuízos à população e ao poder público.

O conhecimento das características geotécnicas de uma área urbana é necessário para orientar o uso do solo da mesma. Assim, podem ser identificadas áreas de riscos (sujeitas a deslizamentos), terrenos suscetíveis à erosão, e locais com lençol freático elevado.

O homem constitui o mais importante agente modificador da dinâmica das encostas. O avanço das diversas formas de uso e ocupação, para áreas naturalmente suscetíveis aos movimentos gravitacionais de massa, acelera e amplia os processos de instabilização (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

Segundo Kozciak (2005) a atuação do homem pode interferir no ritmo da evolução natural das encostas, acelerando ou diminuindo os movimentos de massa gravitacionais, conforme a interação ocorrida.

Cassetti (1991) cita que, a partir do momento em que o ser humano

apropria-se de uma vertente tendo-a como suporte ou recurso, o que se dá através dos desmatamentos, cortes e aterros, altera suas relações processuais morfodinâmicas, aumentando a ação dos processos erosivos.

Wolle *et al.* (1977) também citam que os desmatamentos e aberturas de cortes tendem a acelerar fortemente as ocorrências de escorregamentos, desencadeando fenômenos menos superficiais, capazes de atingir o maciço rochoso em maiores profundidades. Além dos efeitos causados pela remoção da cobertura vegetal, como já mencionado, os cortes em encostas, quando mal planejados, geram condições propícias à ocorrência de escorregamentos.

Nunes *et al.* (1990) e Nakazawa e Cerri (1990) afirmam que mais de 90% dos escorregamentos verificados no grande acidente de Petrópolis, (RJ), em 1988, que resultou em 171 mortes, foram induzidos pela ocupação desordenada das encostas do município. Já em Santa Catarina as enchentes e escorregamentos ocorridos em 2008, deixaram um saldo de 135 mortes e mais de 32.853 desalojados, conforme dados da Defesa Civil Catarinense.

Ainda, nesse sentido, Fernández *et al.* (1999) analisando o processo de ocupação da Tijuca (RJ), verificaram que a elevada frequência de escorregamentos está intimamente relacionada com o aumento dos cortes para a construção de barracos e outros fatores (esgoto, fossas, etc.), em encostas íngremes situadas no sopé de afloramentos rochosos.

É possível considerar que as principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos são:

- Remoção da cobertura vegetal;
- Lançamento e concentração de águas servidas;
- Vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas;
- Execução de cortes com geometria inadequada (altura e inclinação);
- Execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação);
- Lançamento de entulho e lixo nas encostas;
- Vibrações produzidas por tráfego pesado, explosões, etc.

Segundo Carvalho e Prandini (1998) as áreas de declividade acentuada e variável podem ter seus respectivos espaços de implantação definidos com critérios

apropriados, para que funcionem como áreas de reservas de cobertura vegetal, áreas de lazer, ou ocupação de baixa densidade, dependendo de cada caso.

2.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTENTES

A análise de estabilidade envolve um conjunto de procedimentos visando a determinação de um índice ou de uma grandeza que permita quantificar o quão próximo da ruptura um determinado talude ou uma encosta se encontra, num determinado conjunto de condicionantes atuantes, tais como: pressões neutras, sobrecargas, geometria, natureza do terreno, etc.

Os pesquisadores brasileiros vêm desenvolvendo trabalhos referentes à estabilidade de vertentes há mais de cinquenta anos, sendo que no início, as técnicas utilizadas estavam vinculadas a problemas particulares, gerando modelos determinísticos e probabilísticos aplicáveis a lugares considerados de comportamento homogêneo. No entanto, em escala regional o ambiente natural se apresenta heterogêneo pela grande variabilidade das propriedades geotécnicas de cada terreno, sendo necessário estabelecer métodos que considerassem essas diferenças.

Com a finalidade de solucionar esta dificuldade, têm sido gerados muitos tipos de análise de estabilidade de vertentes que levam à identificação do evento perigoso e dos possíveis mecanismos que possam produzir a instabilidade, além de considerar os parâmetros possivelmente envolvidos nestes processos.

Indiferente do método escolhido pelo pesquisador, Morgenstern (1995) sugere alguns procedimentos os quais considera imprescindíveis em qualquer análise de estabilidade, e que são os seguintes:

- Caracterização de campo: consiste na determinação das condições geológicas e hidrogeológicas atuantes, e na distribuição dos materiais em campo;
- Identificação dos tipos de materiais inconsolidados ou rochas: pode ser feito através da caracterização de material em campo ou em ensaios de laboratório;
- Verificação das condições de drenagem: inclui a observação de possível poropressões que possam ser geradas a curto e longo prazo, caracterizando a utilização de tensões efetivas ou totais;

- Características geométricas do talude: tentativa de identificação da localização, orientação e forma de ruptura potencial ou existente, principalmente quando é observada a existência de descontinuidades.

A opção do método que melhor se aplica a certa situação está muito sujeita ao tamanho da área em discussão, do tempo para realizar o estudo, da disponibilidade de informações existentes e dos recursos financeiros disponíveis.

Com o desenvolvimento da computação, os métodos de análise de estabilidade ficaram disponíveis em vários *softwares* executáveis em computadores portáteis, facilitando sua difusão e utilização. Apesar da importância da análise da estabilidade, dentro do estudo de taludes e encostas, deve-se sempre ter mente que a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos com os métodos dependem do correto entendimento dos agentes, causas, geometria, etc. do escorregamento analisado.

2.4.1 Métodos Determinísticos

Os métodos determinísticos consideram a existência de uma condição de equilíbrio ótima com a qual é possível comparar o estado em que o talude se encontra. Esta condição é chamada de “equilíbrio-limite”, e tem por objetivo diagnosticar quantitativamente o quão próximo da ruptura aquele se encontra, sendo expressa por um coeficiente chamado Fator de Segurança (F_s).

Conforme Westen *et al.* (1997) este método baseia-se nos modelos hidrológicos e de estabilidade, levando em consideração informações detalhadas das encostas baseadas nos princípios de mecânica dos solos.

O Fator de Segurança é calculado pelo quociente entre a resistência do terreno e as forças motoras, ao longo da superfície de movimentação.

A adoção de um determinado valor de F_s , num projeto visando à implantação ou contenção de taludes, depende de vários fatores, entre os quais se destacam as conseqüências potenciais associadas à instabilização do talude (área urbana, mineração, estrada, etc.), a dimensão do mesmo, a heterogeneidade do maciço investigado, a base de dados utilizada, etc.

Os métodos determinísticos são de utilização predominante por profissionais da área de geotecnia, embora bastante criticados pelo alto grau de simplificação.

Desta forma, Fernandes *et al.* (2001) explicam que o bom desempenho do método depende integralmente da qualidade e quantidade dos dados coletados.

A grande vantagem atribuída por Mostyn e Small (1987) a este método é a facilidade de aplicação.

Um aspecto básico destes métodos reside na seleção adequada dos valores dos parâmetros envolvidos no cálculo do F_s (pressões neutras, ângulo de atrito, coesão, peso específico, etc.).

Para conferir maior credibilidade ao método, eliminando a subjetividade, faz-se uso de informações geotécnicas reais com as quais se compara e avalia o resultado alcançado.

A utilização de banco de dados digitais em ambiente *GIS* é outro grande aliado na aplicação de métodos determinísticos, pois permite lidar com uma gama de informações muito grande e processá-las a fim de gerar mapas que auxiliem na visualização e interpretação de áreas mais ou menos instáveis.

2.4.1.1 Fator de Segurança (F_s)

O Fator de Segurança indica o grau de estabilidade de uma vertente, e ainda a superfície de ruptura crítica, quando este fator for mínimo. Trata-se de um valor adimensional que resulta da razão entre as forças resistentes ao movimento e as solicitantes do mesmo, conforme a relação abaixo:

$$F_s = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças solicitantes}} \quad (02)$$

Por esta definição clássica, observa-se que, quando as forças forem de igual valor, tem-se um Fator de Segurança unitário, representando a situação limite de equilíbrio onde se igualam as forças resistentes e as solicitantes do movimento. Quando $F_s < 1$, significa que as forças solicitantes excederam às de resistência, e nesta situação o talude é considerado instável. Do contrário, quando o numerador for maior que o denominador, o F_s será maior que 1, denotando condição estável e estabilidade no sistema (quadro 04)

FATOR DE SEGURANÇA (F_s)	CONDIÇÃO DO TALUDE
$F_s < 1,0$	Talude instável; caso o talude venha a ser implantado (corte ou aterro) nestas condições, deverá sofrer ruptura.
$F_s = 1,0$	Condição limite de estabilidade associada à iminência de ruptura; também condição adotada geralmente nos cálculos de retroanálise.
$F_s > 1,0$ (pouco maior)	Condição estável; quanto mais próximo de 1,0 for o F_s , mais precária e frágil será a condição de estabilidade do talude.
$F_s \gg 1,0$ (muito maior)	Condição estável; quanto maior for o F_s , menores serão as possibilidades do talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas (percolação; d'água, etc.).

QUADRO 04 – FATORES DE SEGURANÇA DETERMINÍSTICOS E AS RESPECTIVAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DO TALUDE

FONTE: CARVALHO (1991)

Uma abordagem alternativa para os procedimentos em análises de estabilidade de taludes, conhecidos como análise probabilística, procura reconhecer as incertezas e variabilidades básicas dos parâmetros no modelo de cálculo selecionado. Os valores dos parâmetros (resistência, pressão d'água, estrutura geológica, etc.) são definidos estatisticamente, pelas distribuições de probabilidade. Desta forma, o desempenho do talude analisado ficará definido sob enfoque probabilístico, sendo expresso como a probabilidade de ruptura do mesmo.

Londe *et al.* (1965) sugerem a utilização dos seguintes fatores de minoração de resistências e majoração de solicitações nos cálculos de estabilidade de taludes rochosos: $F_s = 1,5$ para coesão (minoração); $F_s = 1,2$ para a tangente do ângulo de atrito ($tg\phi$ - minoração); $F_s = 2,0$ para pressões d'água (majoração); e $F_s = 1,0$ para pesos e outras forças.

Para os taludes das rodovias brasileiras, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) adota que o Fator de Segurança determinado deverá resultar em um valor maior que 1,5 para a encosta seja considerada estável, DNER (1996).

2.4.1.2 Teoria do Equilíbrio-Limite

A teoria do equilíbrio-limite baseia-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, considerada como um corpo rígido plástico, estando a mesma na iminência de entrar em processo de escorregamento (MASSAD, 2003). Os métodos de análise que se baseiam nesta teoria partem do conhecimento das forças atuantes num solo e determinam as tensões de cisalhamento induzidas para, através de equações de equilíbrio, compará-las com a resistência ao cisalhamento. Normalmente são aplicadas em vertentes naturais.

Para que um talude esteja em perfeito estado de equilíbrio-limite, é necessário apresentar as seguintes características:

- Solo com comportamento rígido-plástico, isto é, que se rompe bruscamente, sem deformar-se;
- Equações de equilíbrio-estático válidas até a iminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico;
- Fator de segurança (F_s) constante ao longo da linha de ruptura, ignorando-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

2.4.2 Método Probabilístico

O métodos probabilístico se aplicam aos casos onde se tenha um conhecimento empírico a respeito do comportamento do solo, ou seja, quando se dispõe de ensaios de laboratório ou experiências práticas com o solo local.

Para Miranda (2005) os métodos probabilísticos permitem a incorporação racional ao projeto da variabilidade dos parâmetros do solo. Isto viabiliza a otimização do projeto, permitindo que o engenheiro decida a probabilidade de ruptura admissível para o projeto, apresentando uma estrutura eficiente para a incorporação lógica e sistemática das incertezas.

Segundo Guedes (1997), os métodos probabilísticos, aplicados a geotecnia, quantificam as incertezas inerentes ao fator de segurança determinístico, através do índice de confiabilidade (b), exprimindo o quanto o fator de segurança é confiável e, além disso, fornece também outro parâmetro para a quantificação da segurança a probabilidade de ruptura (Pr).

Para Costa (2005), nas análises probabilísticas de taludes, uma das principais medidas probabilísticas da segurança será quando a probabilidade de ruptura (Pr) apresentar a probabilidade do fator de segurança menor que 1,0. Se estivermos nos referindo a probabilidade de desempenho insatisfatório, ela será definida como a possibilidade do valor da função de desempenho exceder o estado limite.

Conforme El-Ramly (2001), os métodos de análise probabilística de estabilidade de taludes são baseados nos mesmos princípios dos métodos determinísticos (como modos de ruptura e equilíbrio limite). Contudo, eles apresentam a vantagem de poder considerar quantitativamente as diversas origens de incerteza. Os resultados vão além do fator de segurança, pois se podem obter o desempenho mais provável e a variabilidade potencial devidos às incertezas envolvidas.

A quantificação da confiabilidade de um talude é sempre relativa, pois existem infinitas fontes de incertezas em uma análise determinística e apenas algumas delas são possíveis de serem consideradas nas análises probabilísticas.

As análises de confiabilidade envolvem o uso dos procedimentos estatísticos e probabilísticos na análise de segurança de projetos geotécnicos. Estes procedimentos incluem a quantificação das incertezas e a avaliação das probabilidades de ruptura ou desempenho insatisfatório, calculando o risco de maneira racional.

Para Fell (1994), a probabilidade de escorregamentos pode ser determinada através da análise probabilística baseada na geometria do escorregamento, na resistência ao cisalhamento do solo e na poro-pressão. Também pode ser determinada através do uso de dados históricos de rupturas, de precipitação e uso de informações geomorfológicas e geotécnicas, observando a natureza do deslizamento da massa para estimar as probabilidades.

2.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE VERTENTES

2.5.1 Forças Atuantes em uma Encosta

A dinâmica natural da evolução das encostas gera, frequentemente, a ocorrência de movimentos coletivos de solos e rochas, genericamente chamados

escorregamentos. Os solos se acumulando continuamente devido à ação do intemperismo sobre as rochas podem atingir espessuras críticas para a estabilidade. A partir daí, podem ocorrer movimentos de massa isolados ou de ocorrências simultâneas afetando regiões inteiras.

É notório, que existe um estreito vínculo entre chuvas intensas e escorregamentos, havendo diversas causas que fazem com que a água da chuva seja considerada o elemento desencadeador dos fenômenos de instabilidade.

Aos fatores climáticos, entretanto, devem ser somados outros, que têm grande importância na estabilidade de taludes, como a forma e inclinação das encostas, natureza da cobertura vegetal, características dos solos e das rochas, ações antrópicas de ocupação, entre outros.

Do ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força distintos: forças pelo peso dos materiais, forças pelo escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. No estudo da estabilidade de taludes deve-se, necessariamente, considerar o equilíbrio entre essas forças, uma vez que as duas primeiras se somam, e tendem a movimentar a massa de solo encosta abaixo, enquanto a última atua como um freio a essa movimentação.

A teoria considera que as forças que induzem o movimento são balanceadas pelas forças resistentes ao mesmo.

As condições de estabilidade são apresentadas por um fator de segurança representando a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e a resultante das forças favoráveis ao movimento. Enquanto as forças favoráveis ao movimento não ultrapassarem as forças resistentes ao movimento, o solo não se moverá. A razão entre estas duas forças é o Fator de Segurança (F_s), ou seja:

$$F_s = \text{Forças resistentes} / \text{Forças favoráveis} \quad (03)$$

A análise do equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir ao movimento, são balanceadas pelas forças resistentes. Decompondo estas forças, conforme mostrado com um bloco apoiado em uma superfície inclinada de ângulo (i), na figura 7, identificam-se os vetores que atuam em prol do movimento, os quais são P_{seni} e P_{cosi} , e a direção do vetor da força resistente (R).

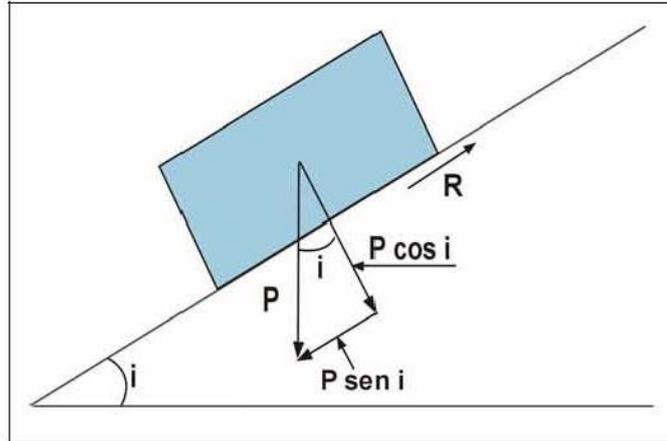


FIGURA 7 – DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA (P) EM SUAS COMPONENTES TANGENCIAL ($P \text{ sen } i$) E NORMAL ($P \text{ cos } i$) E A FORÇA DE RESISTÊNCIA (R).

FONTE: FIORI e CARMIGNANI (2001)

O bloco apoiado sobre um plano inclinado de um ângulo (i), é solicitado por seu próprio peso (P), sendo que a componente tangencial ($P \text{ sen } i$) tende a causar o movimento. A componente normal, atuante perpendicularmente à base do bloco ou à superfície de escorregamento é igual a ($P \text{ cos } i$).

A força resistente à movimentação (R) é dada por $R = \tau A$, onde (τ) é a resistência ao cisalhamento do contato bloco-plano inclinado e (A) é a área da base do bloco. Pela lei de Coulomb, $\tau = c + \sigma_n \text{tg } \phi$, onde (c) a coesão e (ϕ) o ângulo de atrito interno, no contato bloco/superfície de apoio.

Na condição de equilíbrio-limite, e com $c = 0$, o Fator de Segurança é igual a unidade, pois o ângulo de inclinação (i) do plano de movimento é igual ao ângulo de atrito interno (ϕ). Valores de (F_s) maiores que a unidade, e, portanto, com $i < \phi$, indicam que as forças resistentes são maiores que as forças solicitantes, e desta forma, o talude estará em equilíbrio. Por outro lado, valores de (F_s) menores que a unidade, e, portanto, com $i > \phi$, indicam que as forças solicitantes são maiores que as resistentes, estando o maciço em desequilíbrio. Resumidamente pode-se dizer que uma encosta está em equilíbrio quando $i \leq \phi$, ou seja:

$$F_s = \frac{\text{tg } \phi}{\text{tgi}} \quad (04)$$

Para a execução deste estudo, considerou-se que os taludes analisados são de extensão ilimitada. A expressão talude de extensão ilimitada é utilizada para

designar taludes de grande extensão, constituídos por um solo homogêneo e apresentando as mesmas características físicas em qualquer ponto no seu interior.

O termo talude infinito é usado para designar um talude constante com extensão ilimitada que possui condições e propriedades do solo constantes em qualquer distância abaixo da superfície do talude (TAYLOR, 1948).

Por simplificação, o solo pode ser considerado homogêneo, mas um talude infinito consiste em várias camadas de diferentes tipos de solo dispostas umas sobre as outras desde que paralelas à superfície do talude. A ruptura, quando ocorre, é do tipo planar, com linha crítica situada na interface entre duas camadas com características físicas distintas.

Do ponto de vista prático, qualquer talude de grande extensão, e com perfis de solos essencialmente do mesmo tipo, pode ser considerado como um talude de extensão ilimitada (DUNN, ANDERSON e KIEFER, 1980).

Para Massad (2003) taludes infinitos consistem em taludes de encostas naturais que se caracterizam pela sua grande extensão, centenas de metros, e pela reduzida espessura do manto de solo, de alguns metros.

A figura 8 representa as forças atuantes em um talude de terra, com uma camada de solo de profundidade Z . As forças deverão estar em equilíbrio na condição de equilíbrio-limite.

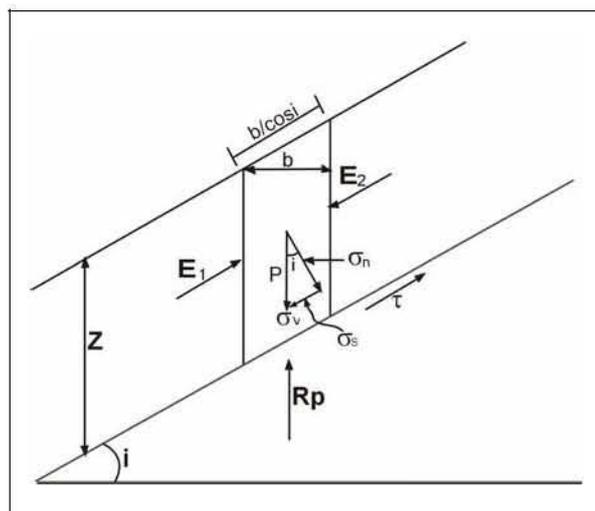


FIGURA 8 – FORÇAS ATUANTES EM UM TALUDE DE TERRA, COM UMA CAMADA DE SOLO DE PROFUNDIDADE Z

FONTE: FIORI e CARMIGNANI (2001)

Para $c \neq 0$, o fator de segurança é dado por $Fs = \tau / \sigma_s$, onde $\tau = c + \sigma_n \cdot \text{tg} \phi$,

$$\sigma_s = \gamma_{nat} \cdot Z \cdot \cos i \cdot \text{sen} i \text{ e } \sigma_n = \gamma_{nat} \cdot Z \cdot \cos^2 i.$$

2.5.1.1 Vertente Natural

Considerando a vertente natural, como sendo aquela seca, após um longo período sem chuvas, tem-se $h1 = Z$ e $h2 = 0$, e assim, substituindo na equação (05) temos:

$$F_S = \frac{C + Z \cdot \gamma_{nat} \cdot \cos^2 i \cdot \text{tg} \phi}{Z \cdot \gamma_{nat} \cdot \text{sen} i \cdot \cos i} \quad (05)$$

2.5.1.2 Vertente Saturada

A análise é similar ao apresentado anteriormente, contudo levando-se em consideração os efeitos da percolação de água dentro do talude, que induz ao surgimento da força de percolação e da pressão neutra, com linhas de fluxo paralelas à superfície do talude, conforme é representado na figura 9, situação que ocorre na parte inferior de taludes naturais. A rede hidrográfica não precisa, necessariamente, ocupar toda a profundidade do solo, mas a porção que atravessa é considerada saturada. Desta forma, o fluxo em uma vertente divide-se em dois componentes: superficial e subsuperficial.

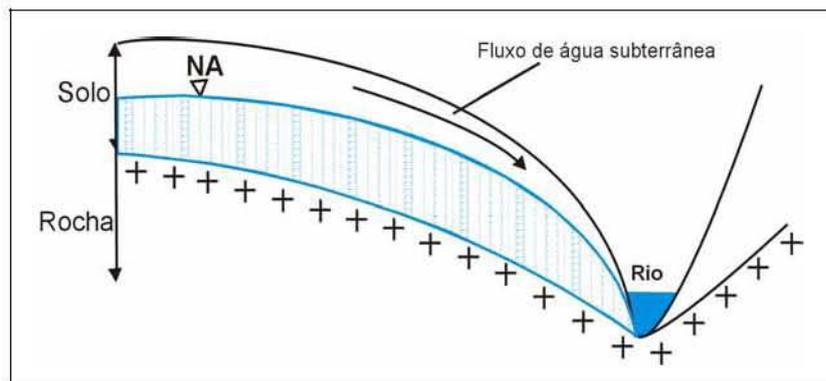


FIGURA 9 – FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARALELO À SUPERFÍCIE DO TALUDE NATURAL
 FONTE: FIORI e CARMIGNANI (2001)

Neste caso, consideram-se as vertentes como infinitas, compostas por solos homogêneos e que a rede de fluxo da água subsuperficial corre paralela à superfície do terreno, com linhas equipotenciais perpendiculares à mesma.

Admite-se que tanto a espessura do solo como a condutividade hidráulica do mesmo determina a capacidade deste em conduzir a água à jusante através da vertente.

A água que precipita sobre uma bacia de drenagem, se infiltra no solo e, quando este atinge o grau de saturação, inicia-se o processo de escoamento superficial. Admite-se que o fluxo é direcionado paralelamente à declividade, sendo a espessura e condutividade hidráulica do solo que determinam a capacidade do mesmo para conduzir a água à jusante através da encosta (KOZCIAK, 2005).

A pressão de percolação resulta da ação da água infiltrada no solo, que ao se movimentar induz, por atrito viscoso, pressões de arraste nos grãos do solo, na direção do movimento. Essa pressão depende da altura do nível de água do solo atingindo um valor máximo no final de um período chuvoso, devido ao acúmulo de infiltrações de várias chuvas, e um valor mínimo, no final do período seco.

A figura 10 representa a decomposição das forças atuantes sobre um talude de espessura (Z), inclinação (i), e com rede de fluxo de água em toda sua profundidade. Por este esquema, é possível perceber as forças que induzem o movimento, que são: a tensão cisalhante (σ_s), derivada da decomposição da pressão vertical (σ_v) e exercida pelo peso próprio do solo (P); e a pressão de percolação (σ_p). A tensão normal (σ_n) é anulada por uma força de sentido contrário e de igual intensidade, conforme enunciado pela 3ª Lei de Newton. A força se opõe ao movimento, definida por Coulomb (τ), resulta da força de atrito (F_a).

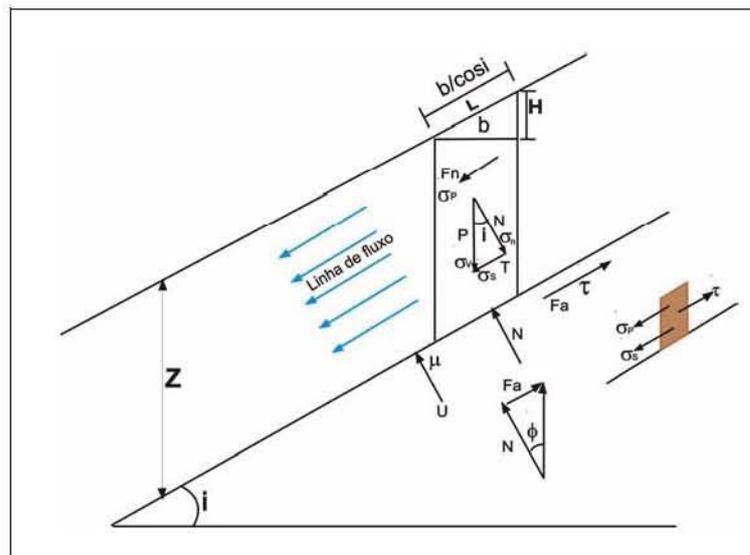


FIGURA 10 – FORÇAS ATUANTES EM UM TALUDE, COM FLUXO DE ÁGUA F_p = FORÇA DE PERCOLAÇÃO

FONTE: FIORI e CARMIGNANI (2001)

A ausência de vegetação implica numa situação de máximo potencial de instabilidade devido à exposição direta e total do solo às chuvas. Neste caso, a vertente está submetida apenas ao peso próprio.

Em se tratando de um sistema com presença de água, é necessário ajustar os valores das tensões atuantes eliminando-se de cada uma delas, a força exercida pela pressão neutra (μ). Assim, a força (P) é reduzida a um valor efetivo (P_e) quando eliminado dela o peso exercido pela coluna de água, como rege o Empuxo de Arquimedes. Uma vez que a força (P) determina as tensões (σ_v) e (σ_n), essas também são modificadas pela ação da água, assumindo valores efetivos (σ_{ve}) e (σ_{ne}) e, conseqüentemente, a tensão cisalhante também se torna efetiva (σ_{se}).

A força de percolação exercida pela rede de fluxo de água (F_p) considera a inclinação da vertente (i), o volume de solo percolado e o peso específico da água (γ_a). A tensão de percolação (σ_p) resulta da distribuição desta força pela área (F_p/A), e se torna efetiva (σ_{ve}) quando considerado o efeito da poro-pressão. Uma vez que esta pressão está diretamente relacionada com a altura do nível de água no solo. Seu valor máximo será atingido geralmente no final de períodos de chuvosos, quando do acúmulo de infiltrações de várias chuvas, e seu valor mínimo será estabelecido ao final de períodos secos, quando o nível freático alcança valores reduzidos.

Com estas definições e sabendo-se que o Fator de Segurança é dado pela razão entre as tensões que atuam no sentido de impedir o movimento e as que são favoráveis a ele, pode-se reajustar a relação para a seguinte equação abaixo:

$$FS = \frac{\tau}{\sigma_{pe} + \sigma_{se}} \quad (06)$$

Substituindo-se os valores das tensões para simular uma situação onde o solo esteja totalmente saturado, ou seja, $h_1 = 0$ e $h_2 = Z$, tem-se:

$$FS = \frac{C + \gamma_{sub} \cdot Z \cdot \cos^2 i \cdot \text{tg} \phi}{\gamma_{sat} \cdot Z \cdot \text{sen} i \cdot \cos i} \quad (07)$$

2.5.1.3 Vertente Não Saturada

No caso do nível freático se encontrar a uma profundidade menor que a espessura total do solo, atingindo uma altura (h_2) acima do plano de escoamento, a vertente não estará saturada, como mostra a figura 11.

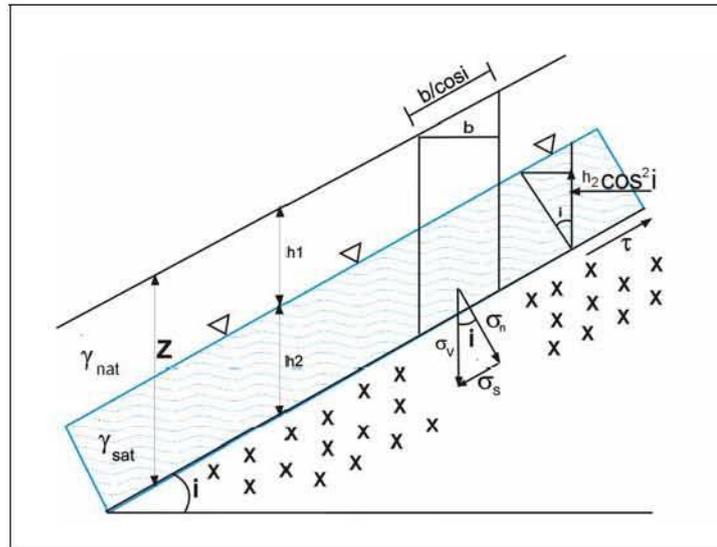


FIGURA 11 – PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DE UMA VERTENTE INFINITA SEM COBERTURA VEGETAL, COM ALTURA DO LENÇOL FREÁTICO (h_2) E FLUXO SUBSUPERFICIAL PARALELO À DECLIVIDADE DO TERRENO.

FONTE: FIORI e CARMIGNANI (2001)

No cálculo das tensões efetivas, tem-se que:

$$\sigma_{ve} = (h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub}) \cos i \quad (08)$$

$$\sigma_{ne} = (h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub}) \cos^2 i \quad (09)$$

$$\sigma_{se} = (h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub}) \sen i \cos i \quad (10)$$

A pressão de percolação é dada por:

$$\sigma_p = h_2 \gamma_a \sen i \cos i \quad (11)$$

A equação de Coulomb é igual a:

$$\tau = C + \sigma_{ne} \operatorname{tg} \phi \quad (12)$$

Substituindo os valores das equações (10), (11) e (12) na equação (06), obtém-se:

$$F_S = \frac{C + (h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub}) \cos^2 i \operatorname{tg} \phi}{(h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub} + h_2 \gamma_a) \sen i \cos i} \quad (13)$$

Este modelo matemático tem por base a distribuição das forças atuantes em um talude de extensão infinita, e foram consideradas como variáveis, a inclinação do terreno, os índices físicos e propriedades mecânicas do solo (coesão, ângulo de

atrito, pesos específicos), a presença da água (peso do solo saturado e altura do lençol freático).

Para um ponto qualquer situado em um prisma da vertente com as características aqui consideradas, admitindo-se o valor do peso específico natural do solo (γ_{nat}) igual ao saturado (γ_{sat}), conforme proposto por Chowdhury (1978) as forças solicitantes de movimento resultarão da soma das tensões atuantes na região sem água com as tensões calculadas para a porção saturada, fazendo com que a equação (14) se simplifique para:

$$FS = \frac{c + (\gamma_{sat} - \frac{h_2}{Z} \gamma_a) Z \cos^2 i \tan \phi}{Z \gamma_{sat} \cos i} \quad (14)$$

Onde:

c = coesão;

γ_{sat} = peso específico do solo saturado;

h_2 = espessura do solo saturado;

Z = espessura do solo;

γ_a = peso específico da água;

i = ângulo de inclinação da vertente;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

2.5.2 Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes

Existe um consenso generalizado de que as florestas desempenham importante papel na proteção do solo e que o desmatamento pode promover, não só a erosão, mas também movimentos coletivos de solo. Além da relação entre escorregamentos e períodos de alta pluviosidade, que é inegável, o desmatamento e outras formas de interferência antrópica estão sendo reconhecidos como processos desencadeadores de tais fenômenos.

Quando a influência da cobertura vegetal é considerada na avaliação da estabilidade de encostas, alguns aspectos podem ser quantificados e inseridos no modelo matemático analisado anteriormente. Deve-se passar a considerar a força de arrasto vento atuando nas copas das árvores, desde que esse sople no sentido da inclinação da vertente, a resistência do sistema solo-raiz, o peso da cobertura vegetal e a tensão suportada pelas raízes na resistência do solo à ruptura.

$$\sigma_{ve} = C \left(\frac{\rho \mu_a^2}{2} \right) \quad (16)$$

C é o coeficiente de arrasto, possuindo valores de 0,30 e 0,15 kPa,

ρ é a densidade do ar (0,00123 g/cm³)

μ_a é velocidade do vento em Km/h

A força que é acrescida em uma encosta derivada da pressão exercida pelo vento sobre a copa das árvores (σ_{ve}) só é relevante quando a velocidade dos ventos de uma localidade excede a 40 Km/h, conforme estimado por Styczen e Morgan (1995).

b) Contribuição da raiz para a coesão do solo (S_r)

Em oposição à pressão do vento na copa das árvores, a coesão do solo é aumentada na região do contato solo-raiz, reforçando a resistência ao cisalhamento num valor equivalente à variável definida como (S_r).

As raízes da vegetação integram o solo para produzir um material composto atuando como fibras de resistência relativamente alta, que também aumentam a resistência do solo ao cisalhamento.

Para avaliar a contribuição na resistência ao cisalhamento do solo pelas raízes é necessário considerar a interação solo-raiz, onde as raízes podem ser tratadas como se fossem elementos flexíveis e elásticos, de resistência relativamente elevada, envoltos no solo e que levam a um aumento da resistência contra eventuais escorregamentos nas encostas (WALDRON, 1977).

Wu *et al.* (1979) verificaram em testes de campo que o comprimento das raízes, perpendiculares à zona de cisalhamento, podem alcançar 15cm a mais do que seu comprimento original antes de ocorrer a ruptura da raiz.

A partir das relações trigonométricas do modelo de cisalhamento simples de um sistema solo-raiz (Fiori e Carmignani, 2001), tem-se:

$$\sigma_r = t_r \cos \psi \quad (17)$$

$$\tau_r = t_r \sin \psi \quad (18)$$

Onde:

σ_r é o esforço normal

τ_r é o esforço tangencial

t_r é a resistência à tração da raiz

ψ é cisalhamento angular

A contribuição das raízes para o aumento da resistência do solo ao cisalhamento S_r foi estimada a partir da equação de Coulomb descrita em (Fiori e Carmignani, 2001), dada por:

$$S_r = \tau_r + \sigma_r \operatorname{tg} \phi \quad (19)$$

Substituindo, na equação acima, as equações 18 e 19, tem-se:

$$S_r = t_r (\cos \psi \operatorname{tg} \phi + \operatorname{sen} \psi) \quad (20)$$

Segundo Wu et. al. (1979) a expressão $(\cos \psi \operatorname{tg} \phi + \operatorname{sen} \psi)$ é próxima a 1,2 para um ângulo ψ entre 48° e 71°, podendo, dessa forma, reescrever a fórmula como $S_r = 1,2t_r$. Já o valor de t_r deverá se situar entre 4,2 e 5,5 kPa com uma média de 4,9 kPa. A partir da substituição do valor médio de t_r encontrado por Wu et al. (1979) na equação acima, obtém-se $S_r = 5,9$ kPa.

c) Peso das árvores (σ_a)

O peso das árvores pode ser obtido a partir do número de árvores por unidade de área da vertente. A pressão (σ_a) exercida sobre a vertente pelo peso das árvores é obtida dividindo-se o peso das árvores (P_a) pela área de abrangência das respectivas raízes. Alguns pesquisadores estimaram valores para (σ_a), sendo encontrados valores de 5,2 kPa (Wu et al., 1979); 2,5 kPa (Bishop e Steves, 1964) e de 3,0 kPa na Serra do Mar (Wolle e Pedrosa, 1981). O efeito do aumento do peso só tem expressão em se tratando de árvores, uma vez que o peso de gramíneas e arbustos é comparativamente insignificante. A sobrecarga advinda do peso das árvores aumenta as forças mobilizantes em uma vertente, mas ao mesmo tempo, aumenta a resistência do solo devido às raízes.

A pressão que a cobertura vegetal (σ_a) exerce sobre a vertente deriva do seu peso (P_a) e, é dada por:

$$\sigma_a = P_a \cos i \quad (21)$$

Para a região da Serra do Mar Wolle e Pedrosa (1981) determinaram os valores da pressão (σ_v) em torno de 3,0 kPa.

d) Tensão das raízes

Sabendo que a vegetação exerce sua maior influência junto à superfície do solo onde a densidade das raízes é geralmente maior, e o solo é relativamente mais fraco e considerando o aumento de coesão do solo em função da densidade das raízes, pode-se analisar a influência da tensão suportada pelas raízes na resistência do solo à ruptura.

O efeito máximo na resistência a ruptura ocorre quando a resistência à tensão das raízes é totalmente mobilizada e, quando sob deformação, o comportamento das raízes e do solo são compatíveis. Isto requer raízes com elevada rigidez ou módulo de tensão para mobilizar uma resistência suficiente do solo contra a ruptura. A ruptura das raízes ocorre quando sua resistência à tensão é excedida. (FIORI e CARMIGNANI, 2001).

O efeito da resistência à tensão é limitado em vegetação que apresenta raízes pouco profundas, uma vez que podem ser facilmente arrancadas do solo pela perda de ligação entre raiz e solo, antes que o pico de resistência à tensão seja atingido (WALDRON e DAKESSIAN, 1981). O efeito da tensão é mais pronunciado em árvores, cujas raízes penetram diversos metros no solo e, especialmente se percorrem caminhos tortuosos em torno de pedras e outras raízes, que fornece um bom ancoramento. Por outro lado, o efeito da resistência das raízes é reduzido em locais onde o solo está sob compressão, em vez de tensão, como acontece no sopé de vertentes. Nesse caso, a ruptura das raízes pode ocorrer por flexão.

Assim, considerando-se a força de tensão (T ; kN/m) das raízes atuando na base do plano de deslocamento, o esforço resistente total (τ_t) ao movimento é igual a:

$$\tau_t = \tau + T \cos \theta \quad (22)$$

Segundo Styczen e Morgan (1995), o valor médio de T gira em torno de 5 kN/m.

Utilizam-se os parâmetros para determinar o Fator de Segurança abordado nas equações 05, 07 e 13, mas incluindo os parâmetros de cobertura vegetal, quais sejam: contribuição da raiz para a coesão do solo, e a tensão a que são submetidas as raízes como forças resistentes ao movimento; força do vento atuando sobre a copa das árvores, como força solicitante; o peso das árvores tanto como força resistente como solicitante. A equação para determinar o Fator de Segurança de uma vertente seca (onde $h_1 = Z$ e $h_2 = 0$), é dada por:

$$F_S = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{nat} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \cos \theta}{[(Z \cdot \gamma_{nat} + P_a) \text{sen} i + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (23)$$

Quando a vertente não está totalmente saturada e o nível do lençol freático tem a mesma espessura do solo ($h_1 = h_2$) a equação será dada por:

$$F_S = \frac{(C_s + S_r) + [(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \cos \theta}{[(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + h_2 \cdot \gamma_a + P_a) \text{sen} i + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (24)$$

No caso de chuva intensa, onde o solo encontra-se saturado, ($h_1=0$ e $h_2=Z$), ou seja, o nível do lençol freático atinge toda a espessura do solo. Assim, a equação 24 pode ser reorganizada:

$$F_S = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \cos \theta}{[(Z \cdot \gamma_{sub} + Z \cdot \gamma_a + P_a) \text{sen} i + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (25)$$

Onde:

c = coesão;

S_r = contribuição da raiz para a coesão do solo;

h_1 = espessura do solo não saturado;

γ_{nat} = peso específico natural do solo;

h_2 = espessura do solo saturado;

γ_{sub} = peso específico do solo submerso;

P_a = peso das árvores sobre o solo;

γ_a = peso específico da água;

i = ângulo de inclinação da vertente;

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

ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dentro desse capítulo é inicialmente apresentada a localização da área de estudo, passando na seqüência para a demonstração dos materiais e métodos utilizados na pesquisa. Na metodologia empregada são detalhadas as etapas dos trabalhos para a determinação dos fatores de segurança das vertentes da área estudada.

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de 44 Km² compreende o alto e o médio curso da bacia do rio Ligeiro e localiza-se no interior do perímetro urbano do município de Pato Branco, entre as coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator), em quilômetros, 7.092 a 7.104N e 328 a 338E.

A distância da sede do município a Curitiba é de aproximadamente 433 km, (figura 13). O acesso à área, partindo de Curitiba na direção Sudoeste, pode ser efetuado através da rodovia BR-476 que liga Curitiba a Horizonte. A partir de Horizonte, segue-se pela BR-280, em direção oeste, passando por Palmas, Clevelândia, Mariópolis e Pato Branco.

Outro acesso à área, também partindo de Curitiba, pode ser efetuado pela rodovia BR-277 que une Curitiba a Três Pinheiros, segue-se pela BR-158, em sentido Sudoeste até Pato Branco. Essas rodovias são pavimentadas e em bom estado de conservação.

O município de Pato Branco possui uma área de aproximadamente 539,12 Km² e é sede de uma das 10 Mesorregiões Administrativas do Estado do Paraná,

(IBGE, 2000). Pato Branco é limitado a Norte e a Nordeste pelo Município de Coronel Vidua, a Leste por Honório Serpa, a Sudeste por Mariópolis, ao Sul e Sudoeste por Vitorino, a Oeste por Bom Sucesso do Sul e a Noroeste por Itapejara do Oeste.

A população da cidade está estimada em mais de 66 mil habitantes, sendo mais de 96% da população do município de Pato Branco reside no meio urbano (IBGE, 2007). Economicamente, a principal atividade desenvolvida no Município é no setor de serviços.

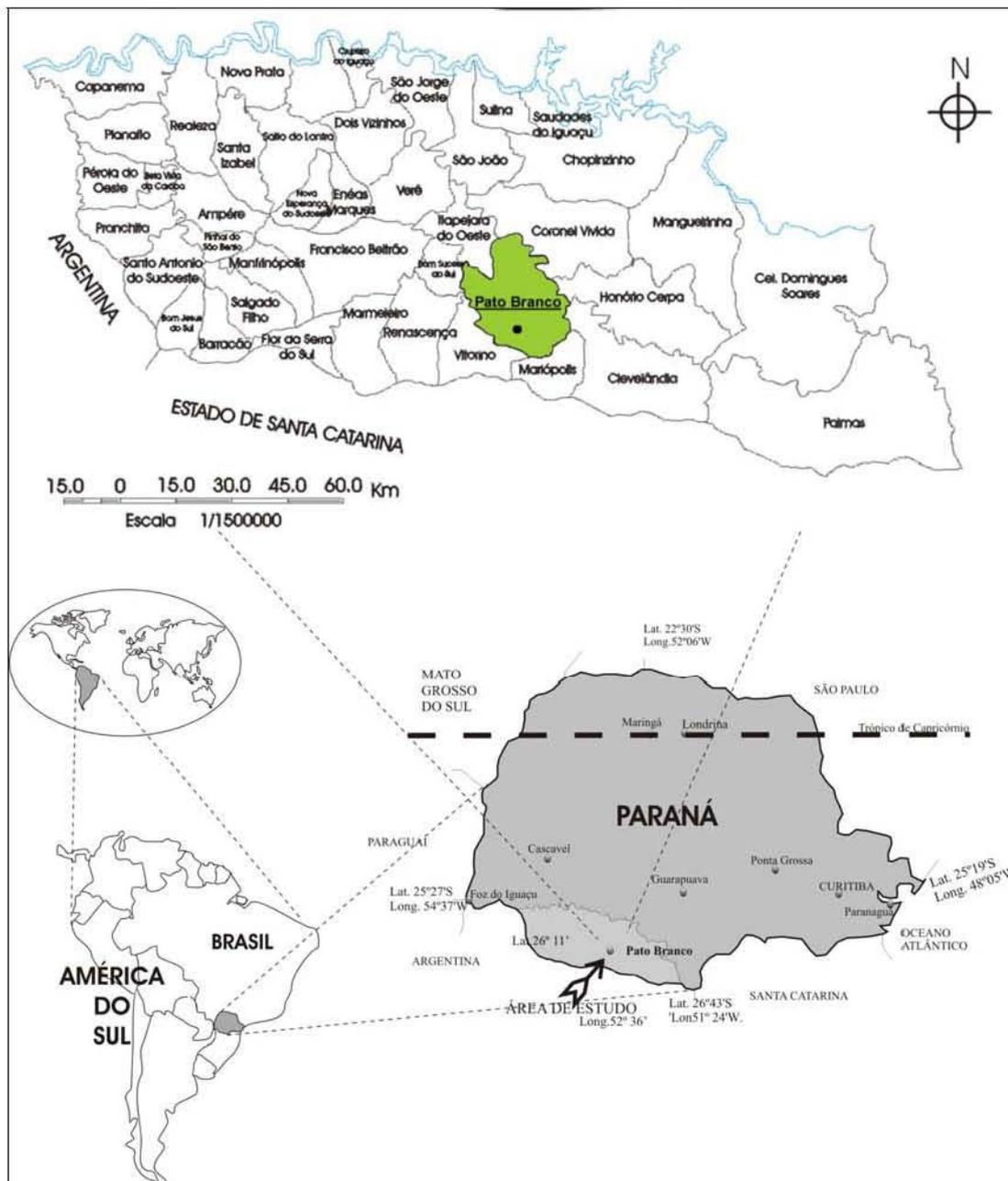


FIGURA 13 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO NO ESTADO DO PARANÁ E NA REGIÃO SUDESTE.

FONTE: Tabalipa (2005)

A área estudada (figura 14), localizada inteiramente dentro do perímetro urbano de Pato Branco está contida nas Folhas Topográficas SG.22-Y-A-III-2 (PATO BRANCO) e SG.22-Y-A-III-4 (MARIÓPOLIS), escala 1:50.000, articulações MI – 2862/2, MI – 2862/4, respectivamente, confeccionadas pelo Exército Brasileiro (1980).

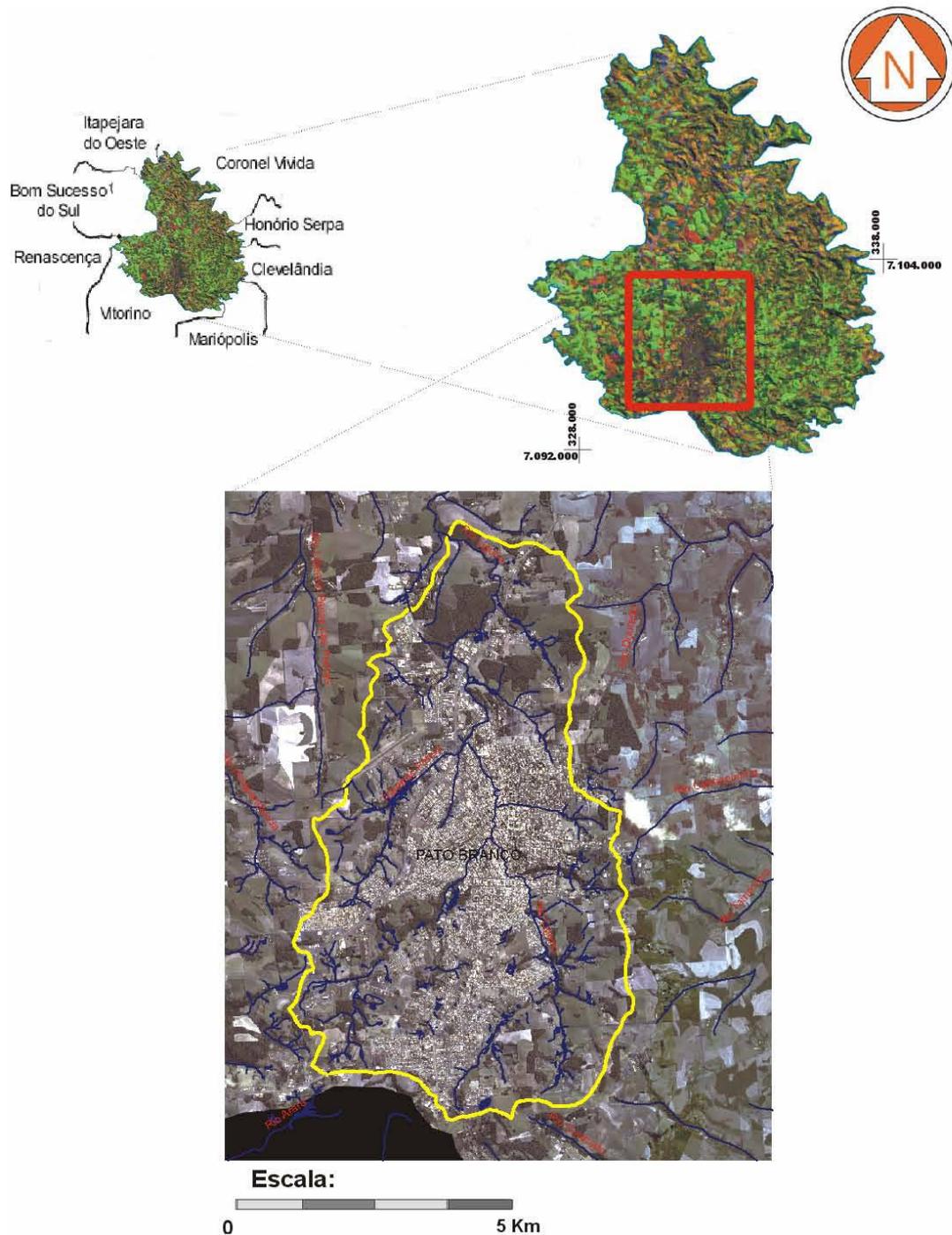


FIGURA 14 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO – PR
 FONTE: Tabalipa (2005)

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Dados Cartográficos

Para a execução deste trabalho, realizou-se um levantamento bibliográfico em diversas instituições, como por exemplo, Minerais do Paraná (MINEROPAR), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), Instituto Ambiental do Paraná (IAP), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERSHA), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Centro di Geotecnologie dell'Università degli Studi di Siena - Itália (CGT) e Prefeitura Municipal de Pato Branco.

Para extração das informações básicas, tais como curvas de nível, vias de acesso, rede de drenagem, principais pontos cotados, entre outros, foram utilizadas: as cartas topográficas, na escala 1:50.000, "Pato Branco" e "Mariópolis" (Folha SG.22-Y-A-X-III-4) da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército, (1980), a Base Planialtimétrica do Perímetro Urbano de Pato Branco, na escala 1:10.000.

3.2.2 Dados de Sensoriamento Remoto

- Fotografias aéreas de 1953 em escala 1:25.000 pertencente a mapoteca da SEMA;
- Fotografias aéreas de 1976 em escala 1:70.000 pertencente a mapoteca da SUDERSHA;
- Fotografias aéreas de 1980 em escala 1:25.000 pertencente a mapoteca do IAP;
- Fotografias aéreas de 1995 em escala 1:10.000 pertencente a mapoteca do CEFET-PR;

- Imagem do satélite QuickBIRD resolução espacial – 0,60m – em quatro bandas multiespectrais (Pan: 450 - 900 nm, Blue: 450 - 520 nm, Green: 520 - 600 nm e Red: 630 - 690 nm) dezembro de 2005.

3.2.3 Equipamentos e *Softwares*

Os equipamentos e *softwares* utilizados na execução deste projeto pertencem ao TOPOGEO – Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, LABESD – Laboratório de Estudos Sedimentológicos do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas, e Laboratório de GIS e Cartografia Digital do Departamento de Ciências da Terra do Centro di Geotecnologia da Università degli Studi di Siena - Itália e são apresentados a seguir:

3.2.3.1 Equipamentos

- Estereoscópio de bolso marca Wild;
- “Global Positioning System” - GPS, marca Garmin E-trex Vista;
- Câmera fotográfica digital, marca Sony, modelo P-93;
- Perfuratriz de solo mecanizada marca SYL (d=20 cm e prof. 6 m);
- Perfurador de solo manual marca Cinfer.
- Equipamentos de laboratório para análise granulométrico e geotécnico;
- Microcomputador 1GHZ, memória RAM de 500 M bytes, disco rígido de 100 G bytes, CD-ROM, monitor de vídeo colorido de 17”;
- Impressora HP 1120 professional series;

3.2.3.2 *Softwares*

- ArcGIS 9.2; ERDAS; SRING 4.2;
- AutoCAD 2006;
- MS Windows XP; MS Office 2003;
- Corel Draw 11;
- Acrobat PDF.

3.3 MÉTODOS

Para a determinação dos fatores de segurança das vertentes da área de estudo os trabalhos se desenvolveram conforme o fluxograma 01.



FLUXOGRAMA 01: FLUXOGRAMA PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO.

3.3.1 Elaboração de base cartográfica digital

A base cartográfica digital foi criada na escala 1:10.000 sendo inserida num banco de dados geográfico (*personal geodatabase*), em que se armazenaram todas as informações geográficas sobre esta pesquisa, delimitando exatamente, o espaço geográfico da área de trabalho e suas propriedades cartográficas.

A criação deste Banco de Dados Geográfico tornou possível a conversão dos dados vetoriais em níveis de informação (*feature class*), para utilização no *software ArcGIS*, módulo ArcMap, separando-se os níveis de trabalho (orografia e hidrografia) e elementos topográficos pontuais, lineares e poligonais, relativo à área do alto e médio curso da bacia do rio Ligeiro. A organização destas informações permitiu a elaboração de diferentes mapas temáticos e o processamento e interpretação de imagens de satélite, a criação de Modelo Numérico do Terreno e a integração de informações a partir da combinação de mapas e tabelas, que auxiliaram na elaboração deste estudo.

O projeto contendo as informações das propriedades cartográficas foi definido nas projeções Universal Trasversa de Mercator – UTM, Datum Vertical: IMBITUVA – SC e Datum Horizontal: SAD 69 – MG, com coordenadas planas e retângulo envolvente definido por $X1 = 328.000,00$, $X2 = 338.000,00$, $Y1 = 7.092.000,00$ e $Y2 = 7.104.000,00$ totalizando uma área total de 120 Km^2 , com distância vertical = 12 Km e distância horizontal = 10 Km, de forma que toda a bacia estudada estivesse abrangida no interior desse retângulo.

Os dados coletados derivam da digitalização de Cartas Topográficas da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército, Folha topográfica MI – 2862/2, Pato Branco, DSG (1981) e Folha topográfica MI – 2862/4, Mariópolis, DSG (1980), e da base planialtimétrica existente da área de estudo. Após a finalização da base digital, procedeu-se a criação do Modelo Numérico do Terreno e a respectiva Carta de Declividade. Já os dados Pedológicos, Geomorfológicos, Geológicos foram compilados de mapas pré-existentes em MINEROPAR (2006), EMBRAPA (1974) e no trabalho de TABALIPA (2002), adaptados por meio de trabalhos de campo e da interpretação das imagens de satélite, e fotografias aéreas em meio digital.

Para a caracterização do solo, além da fotointerpretação de fotografias aéreas do ITCF (1980), foram realizados vários levantamentos de campo, com coleta de amostras para a realização de ensaios em laboratório.

Foram utilizados os *Subsets* das imagens de 2005 (segmento da imagem original) do satélite QUICKBIRD para a análise e classificação do uso do solo. A partir da classificação destas imagens confeccionou-se o Mapa de Uso e Ocupação do Solo.

A partir daí, com a caracterização e classificação dos solos realizadas, dados do clima levantados, realizou-se a aplicação de modelos matemáticos tendo em vista a análise do potencial de instabilidade das encostas, através de técnicas de tratamento de dados em ambiente SIG.

Por fim, geraram-se os mapas de índices de segurança das encostas, a partir da extração das informações armazenadas no banco de dados do SIG. Essas informações foram fornecidas pelos mapas temáticos de solo, declividade, uso e ocupação do solo, orientação das vertentes e de informações das tabelas de dados obtidos pela aplicação das equações de fatores de segurança, para cada unidade de solo.

3.3.2 Classificação Geotécnica dos Solos da Área Estudada

Com a finalidade de completar o reconhecimento da área estudada realizaram-se várias visitas a campo, descrevendo os perfis dos solos, coletando-se amostras de solo para laboratório, esclarecendo dúvidas sobre os alvos observados nas imagens de satélite e nas fotografias aéreas, para o seu mapeamento.

Em Mecânica dos Solos, o solo, normalmente, é classificado, em sistemas que tem por finalidade sua qualificação quanto as suas propriedades físicas importantes no desempenho deste como material de construção ou de suporte em obras de engenharia.

Segundo Seraphim (1995), no Brasil, são utilizados os sistemas de classificação introduzidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), ambos inspirados nos sistemas americanos *Unified Soil Classification System* (USCS) e o *American Association of State Highway and Transportation Officials*. (AASHTO)

A utilização desses sistemas requer sempre a execução de uma série de ensaios de laboratório, que, em primeiro estágio de estudo do solo, nem sempre são necessários, possíveis e/ou convenientes.

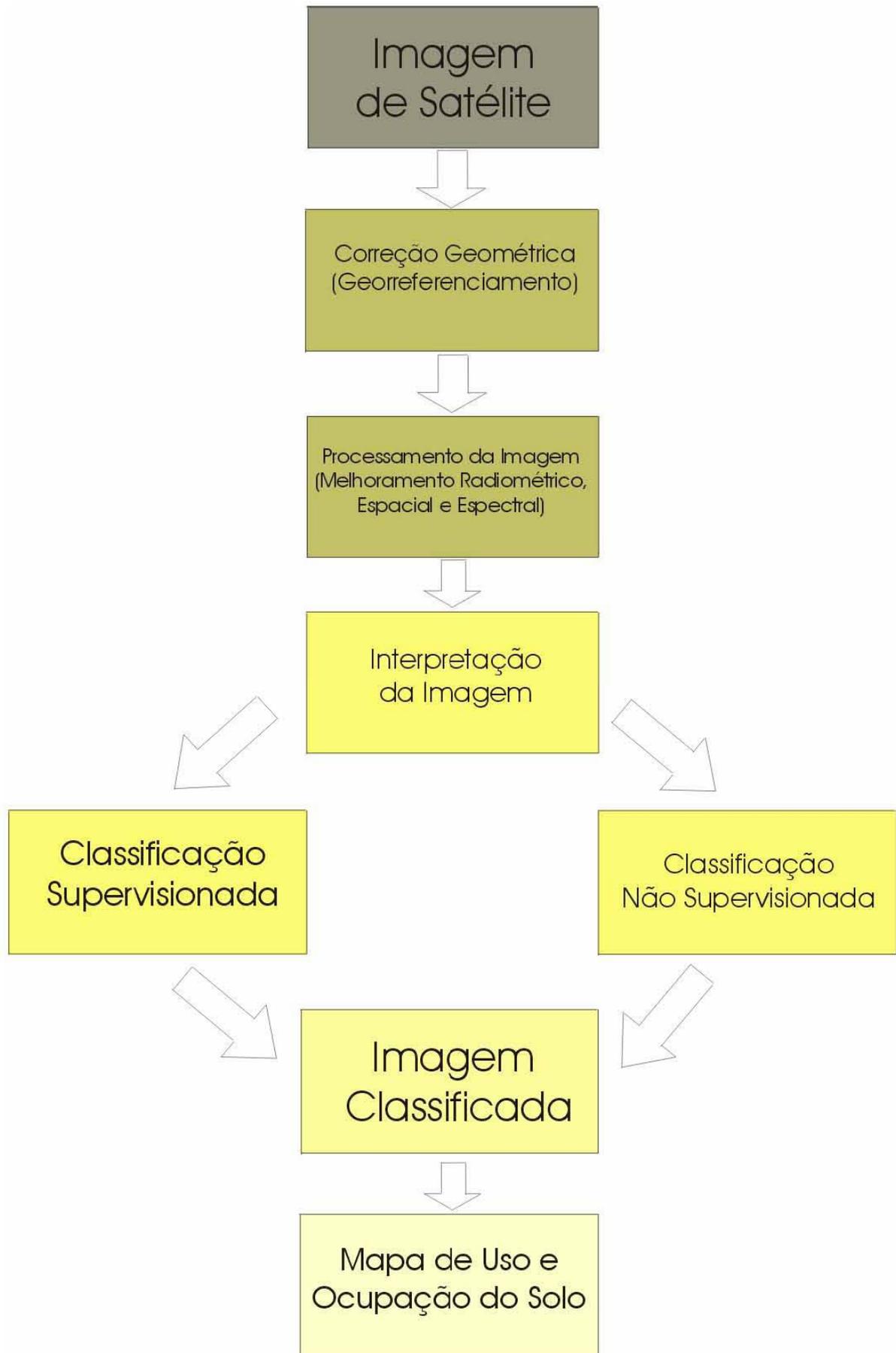
Para determinar o comportamento geotécnico que cada tipo de solo da bacia estudada possui, fez-se uma classificação *in situ* dos solos, possibilitando assim a mais aproximada do solo no campo. Na seqüência, para se conhecerem as propriedades físicas de cada tipo de solo, realizou-se ensaios em laboratório com amostras de solos deformadas e indeformadas que incluíram: Análise Granulométrica, Teor de Umidade, Limites de Atterberg (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade), Cisalhamento Direto (para obter peso específico aparente, coesão e ângulo de atrito interno) e de Permeabilidade.

3.3.3 Classificação da Imagem Digital

A Classificação da Imagem Digital é uma técnica de tratamento digital de imagens destinada à extração de informações a partir de dados de Sensoriamento Remoto.

O processamento e a interpretação das imagens de satélite foram realizados utilizando os softwares ERDAS IMAGINE 8.7 e *ArcGIS*. Da interpretação das imagens foram confeccionadas as cartas de uso e ocupação do solo do ano de 2005, visando conhecer os diferentes padrões de ocupação da área em estudo, em especial, selecionar as áreas onde ainda existem remanescentes florestais.

As seqüências dos trabalhos realizados nesta fase estão descritos no fluxograma 02.



FLUXOGRAMA 02 – CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL

Neste trabalho utilizaram-se imagens do satélite QuickBird, resolução espacial – 0,60m – em quatro bandas multiespectrais (Pan: 450 - 900nm, Blue: 450 - 520nm, Green: 520 - 600nm e Red: 630 - 690nm) datada de dezembro de 2005. A cena adquirida pela Prefeitura Municipal cobre todo o município de Pato Branco.

Na tentativa de encontrar a melhor classificação da imagem em questão, executaram-se dois métodos de classificação de imagem no *Software* ERDAS Imagine. (a) o primeiro chamado de classificação supervisionada, o operador individualiza a firma espectral de categoria, e sucessivamente o algoritmo dedicado a marcar cada *pixel* na imagem com o tipo de cobertura do solo com o qual sua assinatura espectral coincide ou é mais similar. (b) o segundo método é a classificação não supervisionada, o processo não requer inicialmente informações sobre a classe de interesse. Apenas examina os dados e os divide automaticamente no agrupamento espectral natural mais comum, presente nos dados. O operador é quem, sucessivamente, identificará estes *clusters* e atribuirá a cada um desses, as classes de cobertura reconhecidas.

a) Classificação Supervisionada da Imagem de Satélite

O procedimento de classificação supervisionada no *software* ERDAS, consiste, basicamente, em selecionar várias amostras na imagem de mesma classe espectral, e depois de um bom número de seleções feitas executa-se a união de todas as amostras coletadas informando o seu nome (área urbanizada, área agrícola, floresta, campo, capoeira, corpo d'água, etc); este procedimento vai se repetindo até associar toda a imagem às classes criadas previamente.

Como a imagem do município de Pato Branco estava dividida em vários arquivos, e a área de estudo estava ocupando 2 arquivos ou duas imagens, foi necessário fazer inicialmente um mosaico das imagens para uni-las, possibilitando o trabalho na área como um todo.

Uma vez obtido o mosaico, o próximo passo foi fazer um *subset* da imagem, ou seja, um recorte na imagem, selecionando um retângulo com as dimensões da área de estudo.

Agora com o *subset* já pronto, ocorreu a classificação da imagem, sendo definidas as seguintes classes de uso a partir de uma adaptação do IBGE (2006):

- Área urbanizada
- Área agrícola
- Floresta
- Campo
- Capoeira
- Corpo d'água

b) Classificação Não Supervisionada

Ainda no mesmo *software*, existe a possibilidade de realizar a classificação de forma não supervisionada, onde não se requer a disponibilidade de informação externa para marcar os *pixels* das diversas classes ou prescindir do conhecimento de pontos de amostras da área em exame. Em geral, trata-se de analisar o espaço dos dados de modo a reagrupar as classes espectrais baseando-se somente nas informações numéricas contidas nestes. Este processo chama-se clusterização e baseia-se no reagrupamento estatístico dos *pixels* de uma imagem segundo um critério de proximidade recíproca.

Após a classificação da imagem pode ocorrer o surgimento de áreas não representativas ou *pixels* indesejáveis, sendo necessário a execução de uma filtragem na imagem para eliminar detalhes sem importância.

Ao final da classificação da imagem por estas duas formas, tanto uma, quanto outra não apresentaram resultados satisfatórios, tendo em vista a grande resolução da imagem, o que gerou uma infinidade de *pixels* indesejáveis, que mesmo após várias filtrações consecutivas não ofereceram um resultado aceitável.

Uma vez que a qualidade do produto final não foi a esperada, ou seja, existiu a ocorrência de um grande conflito entre as classes pelo detalhamento existente na imagem, mesmo após várias filtrações a classificação não apresentou um bom aspecto, optou-se então pela realização de uma nova classificação, agora com o *Software ArcGIS*, módulo ArcMap que, apesar de muito mais trabalhosa e demorada, o resultado apresentou uma qualidade muito superior às classificações anteriores.

No ArcMap foi realizada a digitalização de todas as classes de uso e ocupação do solo diretamente sobre a imagem de satélite, o que se mostrou

trabalhoso, mas importante no reconhecimento da área, uma vez que todas as formas de ocupação foram revistas e analisadas várias vezes durante a digitalização.

Na seqüência, realizou-se uma checagem em campo para verificar a conformidade das classes de uso do solo geradas com a existente no local. Finalmente os vetores digitalizados foram transformados em polígonos, já com as informações sobre o tipo de uso de cada um no banco de dados.

3.3.4 Determinação de Fator de Segurança

O modelo matemático adotado no trabalho teve por base a distribuição das forças atuantes em um talude de extensão infinita, avaliando a influência da vegetação, clima, da água e das propriedades físicas e mecânicas do solo, através do Fator de Segurança.

O método quantitativo realiza a análise de risco em função da determinação de valores numéricos de fatores de segurança, que permitem a quantificação do risco de escorregamento em encostas, considerando-se os índices físicos e as propriedades mecânicas do solo, além de alguns parâmetros da vegetação tais como: sistema solo-raiz, peso das árvores e a atuação da força do vento nas copas das árvores.

Para a aplicação do método quantitativo na presente pesquisa, utilizou-se a análise do equilíbrio das forças atuantes em uma encosta, através da aplicação da equação de Fatores de Segurança (F_s).

Os Mapas de Fatores de Segurança das encostas foram gerados, inicialmente, a partir da interpolação dos mapas temáticos (declividade, mapa de uso e ocupação do solo, orientação da encosta e mapa de solos), observando a suscetibilidade de cada tipo de solo, ao escorregamento, através dos resultados obtidos pela equação de Fatores de Segurança. A integração dos dados realizou-se em ambiente SIG, tendo como ferramenta o *software ArcGIS*, módulo ArcMap.

Para a confecção do mapa de índices de segurança das encostas, foram utilizadas nove classes de intervalo de Fator de Segurança, conforme Borchardt (2005), sendo estas as seguintes (quadro 05):

INTERVALOS DE F_s	CLASSES	DIAGNÓSTICO
$0 < F_s < 1$	1	Instabilidade
$1 \leq F_s < 1,5$	2	
$1,5 \leq F_s < 2$	3	Estabilidade crítica
$2 \leq F_s < 3$	4	Boa estabilidade
$3 \leq F_s < 4$	5	Alta estabilidade
$4 \leq F_s < 5$	6	Excelente estabilidade
$5 \leq F_s < 8$	7	
$8 \leq F_s < 10$	8	
$F_s \geq 10$	9	

QUADRO 05: DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE CADA INTERVALO DE FATOR DE SEGURANÇA, CONSIDERANDO F_s DE ESTABILIDADE DETERMINADO PELO DNER (1996) – FS = 1,5 COMO PADRÃO.

FONTE: BORCHARDT (2005)

Calculou-se o F_s para as vertentes com base nos atributos geotécnicos (c e ϕ) determinados em laboratório. Embora estes atributos sejam definidos para solos coletados a uma profundidade média de 1,5m, considerou-se, para efeito de cálculo, o mesmo valor para todas as condições de saturação consideradas.

3.3.4.1 Parâmetros Morfológicos

A geomorfologia condiciona a ocorrência de escorregamentos em função dos parâmetros morfométricos, com destaque para a declividade e orientação das vertentes.

A inclinação contribui com o incremento da atuação da força gravitacional sobre a cobertura do solo, quanto maior a declividade, maior será a componente vertical da gravidade.

Para abordar esse parâmetro, foram gerados os mapas de declividade e orientação das vertentes da área em estudo, a partir do MNT (Modelo Numérico do Terreno). O primeiro foi gerado pela função *SLOPE*, enquanto o segundo foi feito com a função *ASPECT* ambas do ArcMap, que utilizam os dados topográficos (curvas de nível, pontos cotados, e hidrografia) na sua elaboração.

3.3.4.2 Parâmetros Pedológicos

Uma série de parâmetros e propriedades do solo influencia direta ou indiretamente sua susceptibilidade aos movimentos de massa. Para analisar os parâmetros e propriedades dos solos da área de estudo, primeiramente fez-se uma caracterização dos tipos do solo da área.

Considerando que os solos vão constituir uma das principais variáveis na aplicação da equação de fatores de segurança das encostas e que os processos do meio físico, tais como erosão, escorregamento, assoreamento, contaminação, colapsos, recalques, etc., ocorrem predominantemente nos solos, fez-se uma descrição mais detalhada dos mesmos.

Neste trabalho, os parâmetros pedológicos foram obtidos por meio da caracterização feita em campo e em laboratório, bem como das informações retiradas das bibliografias e mapas pré-existentes, organizando todas essas informações no banco de dados criado que, ao final, possibilitou a elaboração do Mapa de Solos.

Já em relação com a saturação do solo e observando-se as informações existentes nos laudos de sondagens *SPT* realizadas no alto e médio curso da bacia do rio Ligeiro, optou-se por considerar três possibilidades: o solo natural, ou quase totalmente seco ($h_2=0$); o solo não saturado, para uma saturação de 50% ($h_2 = Z/2$); e considerar o solo saturado onde (h_2) é igual a (Z), indiferente da espessura do solo. O critério adotado foi o de conhecer o Fator de Segurança na situação mais crítica de saturação do solo.

Fez-se (γ_{sat}) = (γ_{nat}), pois as camadas de solo obedecem aos critérios estabelecidos por Chowdhury (1978), os quais são camada homogênea de solo saturado posicionado acima do limite superior normalmente atingido pelo lençol freático.

A massa específica da água (ρ_a), a uma temperatura de 20° C, é considerada igual a 1 g/cm³, e seu peso específico (γ_a) equivale a 10kN/m³.

3.3.4.3 Fator de Segurança Sem Cobertura Vegetal

Como foi discutido anteriormente quando a vegetação é levada em consideração na avaliação da estabilidade de um talude, sua influência pode ser adicionada às forças favoráveis ao movimento ou às forças resistentes ao movimento, dependendo de cada caso.

Nas áreas em situação de ausência de cobertura vegetal, aplicaram-se as equações 05, 07 e 13, cujas variáveis receberam os seguintes valores: (c) específico

de cada solo determinado por cisalhamento direto, em kPa; $(\rho a) = 1\text{g/cm}^3$; $(\rho nat) =$ massa específica natural de cada solo calculado em laboratório, em g/cm^3 .

Considerou-se a saturação do solo em 0%, 50% e 100%; $Z = m$ e (ϕ) em graus, específico de cada solo, também determinados nos ensaios de cisalhamento.

O ângulo (i) do talude assumiu os mesmos intervalos estipulados para o mapa de solos e, com base no mapa de declividade, variando de 5% a 80%.

3.3.4.4 Fator de Segurança Com Cobertura Vegetal

Em um ambiente de densa cobertura florestal, a quantidade de água que escoar na superfície do terreno corresponde apenas a uma pequena parcela do total da precipitação. Parte da água da chuva fica armazenada nas copas das árvores, sendo perdida pela evaporação e evapotranspiração.

Quando a chuva excede a capacidade de retenção pelas folhas da vegetação, a água atinge o solo atravessando as copas, onde uma parte da água fica armazenada na camada composta pelos detritos orgânicos da mata, e outra parte infiltra-se no solo e nas rochas.

A densidade das raízes da vegetação de certo modo, também ajuda nesse processo de infiltração.

Em uma paisagem em que o equilíbrio ecológico foi rompido pelo homem, o fluxo de escoamento da água na superfície do terreno é maior, devido a uma rápida saturação do solo. Este desprovido da cobertura vegetal permite uma excessiva infiltração de água no subsolo até ser atingido o ponto crítico do deslizamento e possibilidade da formação de erosão.

Tendo estes fatores em mente, pode-se dizer que a vegetação, principalmente a floresta, reduz o fluxo de água na superfície, retardando o escoamento superficial. Nas regiões de cobertura vegetal removida, o escoamento superficial aumenta consideravelmente, facilitando a capacidade erosiva, sendo mais freqüente nas áreas de altas declividades com elevado índice pluviométrico.

Opondo-se a diversos autores que consideravam a cobertura vegetal como um fator primordial na contenção de escorregamentos, FIORI e BORCHARDT (1997), propõem um importante estudo sobre o papel negativo que a vegetação pode desempenhar no índice de segurança das encostas. De acordo com o trabalho realizado pelos autores na região de Guaraqueçaba, litoral do Paraná, averiguou-se

que em situação de rajadas de vento de 90 Km/h, atuando no sentido da inclinação da vertente, a presença de vegetação situada em solos residuais, passa a contribuir negativamente na estabilidade de vertentes.

Para analisar a influência da cobertura vegetal na estabilidade de vertentes, primeiramente distinguiram-se os tipos vegetais presentes na área de estudo. Conforme o Mapa de Uso do Solo, a área de estudo apresenta vegetação do tipo campo, capoeiras e remanescentes florestais.

Importante frisar que as equações do Fator de Segurança que consideram a cobertura vegetal (equações 23, 24 e 25), foram aplicadas apenas nas áreas vegetadas com capoeiras e remanescentes florestais, sendo que o restante da área foi calculado pelas equações que não consideram a cobertura vegetal.

a) Pressão exercida pelo Peso das Árvores (σ_a)

O peso das árvores pode ser obtido a partir do número de árvores por unidade da área de vertente. A pressão σ_a exercida pelo peso das árvores sobre uma encosta de inclinação (i), é obtida multiplicando o peso das árvores P_a pela área de abrangência das raízes.

$$\sigma_a = P_a \cdot \cos i$$

Vários valores de σ_a foram calculados por pesquisadores, sendo estes valores encontrados em torno de 2,5 kPa (Bishop e Stevens, 1964); 5,2 kPa (Wu et al., 1979) e de 3,0 kPa na Serra do Mar (Wolle e Pedrosa, 1981). A implicação do acréscimo do peso é considerado apenas para árvores, uma vez que o peso de gramíneas e arbustos é comparativamente muito inferior. A sobrecarga decorrida do peso das árvores aumenta as forças mobilizantes em uma vertente, mas ao mesmo tempo, majora a resistência do solo devido às raízes.

Uma média desse valor foi atribuída de acordo com o porte das árvores de cada tipologia, como é apresentado no quadro 14, lembrando que este valor modifica conforme a inclinação da vertente.

Para efeito de cálculo, no presente trabalho, considerou-se uma média de 3,6 kPa para florestas e 2,0 kPa para capoeiras, conforme Kozciak (2005).

b) Força do Vento Atuando na Copa das Árvores (F_{ve})

A força exercida pelo vento sobre as árvores (F_{ve}) é transmitida ao solo, e a pior situação é quando o vento sopra no mesmo sentido da inclinação da encostas, devendo esta força ser adicionada às forças favoráveis ao movimento. É determinada através da razão entre a pressão exercida pelo vento (σ_{ve}), nas copas das árvores, com a área da vertente ($l/\cos i$), tendo-se:

$$F_{ve} = \frac{\sigma_{ve}}{\cos i}$$

A sobrecarga advinda do peso das árvores aumenta as forças mobilizantes em uma vertente, mas ao mesmo tempo, aumenta a resistência do solo devido às raízes.

A tensão de tração provocada pela ação do vento sobre as árvores pode atuar como uma força favorável ao escorregamento.

Análises feitos por Styczen e Morgam *apud* Fiori e Borchardt (1997) revelam que a força do vento somente tem significado para o aumento das forças favoráveis ao movimento, quando este sopra na direção do declive da encosta a partir de uma velocidade de 40Km/h.

Neste estudo, ao invés de usar dados de ventos de bibliografias ou de pesquisadores, optou-se por fazer uma análise nos ventos na região, baseado nos dados fornecidos pelo SIMEPAR (2005).

Dessa forma, consideraram-se os diferentes valores dependendo da direção do vento, para fins de cálculo, na aplicação da equação que determina a pressão de arrasto do vento.

c) Contribuição da Raiz para Coesão do Solo (S_r)

Wu et al. (1979), verificaram que o comprimento da raiz perpendicular à zona de cisalhamento, poderá alcançar um comprimento de cerca 15 cm a mais que

a espessura da zona de cisalhamento, antes de ocorrer a ruptura da raiz. Os autores consideram ainda que a espessura de uma zona de cisalhamento, em escorregamento de solo, deverá se situar entre 7,5 e 30 cm. Desta forma, o cisalhamento angular no momento da ruptura da raiz deverá variar entre 71° e 48°, respectivamente.

A partir de relações trigonométricas extraídas de modelo de um sistema solo/raiz, sujeito a cisalhamento simples, (Fiori e Carmignani, 2001), tem-se que:

$$S_r = 5,9 \text{ kPa}$$

A contribuição da raiz na resistência ao cisalhamento do solo atua como uma força resistente na equação de Fator de Segurança. Segundo Wu et al (1979), o valor de S_r pode ser estimado em 5,9 kPa nos tipos de florestas e nas áreas de vegetação rupreste e campos, quando estes apresentavam-se em solos com profundidade até 1,50m. Esses valores não devem ser levados em conta se o plano potencial de escorregamento se situar em profundidades superiores dos valores acima citados.

Estudos desenvolvidos por O'Loughlin (1984), indicam que gramíneas e pequenos arbustos podem exercer um efeito significativos de reforço do solo até uma profundidade de 0,75 – 1,5 m, enquanto as árvores podem aumentar a resistência dos solo a profundidade de 3 m ou mais, dependendo da morfologia das raízes. Os sistemas de raízes levam a um aumento da resistência do solo, não só pelo aumento da coesão, devido a ação de ligamento nas fibras que compõem o solo, como também pela adesão das partículas de solo nas raízes.

d) Tensão Suportada pelas Raízes na Resistência do Solo à Ruptura (T)

Como já foram visto, os sistemas de raízes levam a um aumento da resistência do solo, não só pelo aumento da coesão devido à ação de ligamento nas fibras que compõem o solo, como também pela adesão das partículas de solo nas raízes.

O efeito da resistência à tensão é limitado em vegetação que apresenta raízes pouco profundas, pois estas podem ser facilmente arrancadas do solo pela perda de ligação entre raiz e solo, antes que o pico de resistência à tensão seja

atingido (WALDRON e DAKESSIAN, 1981). O efeito da tensão é mais pronunciado em árvores, cujas raízes penetram diversos metros no solo e, especialmente se percorrem caminhos tortuosos em torno de pedras e outras raízes, o que fornece um bom ancoramento. Por outro lado, o efeito da resistência das raízes é minimizado em locais onde o solo está sob compressão, em vez de tensão, como acontece no sopé das vertentes. Nesse caso, a ruptura das raízes pode ocorrer por flexão.

Sabendo que a vegetação exerce sua maior influência junto à superfície do solo, onde a densidade das raízes é geralmente maior, e o solo, relativamente mais fraco, e considerando o aumento da coesão do solo como uma função da densidade das raízes, pode-se analisar a influência da tensão suportada pelas raízes na resistência do solo à ruptura. Segundo Styczem e Morgan (1995), o valor médio de T gira em torno de 5 kN/m.

3.3.5 Geração de Mapas de Fator de Segurança

Os valores de Fator de Segurança foram obtidos para a área do alto e médio curso da bacia do rio Ligeiro a partir da aplicação do modelo matemático adotado, através de operações matemáticas e correlações espaciais entre mapas temáticos, utilizando Sistemas de Informação Geográficas.

Um dos aspectos fundamentais de um SIG são as funções que realizam análises espaciais, elaboração e modelação dos dados, partindo da informação georreferenciada armazenada no banco de dados, criando assim um novo nível de informação.

Os mapas temáticos utilizados no presente estudo, para análise do índice de Fator de Segurança foram: solos, vegetação, uso do solo, declividade, orientação de vertentes. Estes mapas foram processados em ambiente *GIS* através do *software ArcGIS*, módulo *ArcMap*, e organizados como *coverages* poligonais, sendo sobrepostos com operação de análise espacial (*Intersect – overlay*), e criado, então, um novo nível de informação, onde cada polígono é o resultado da intersecção de todos os polígonos de *input*. Na seqüência os parâmetros geotécnicos levantados foram inseridos no banco de dados produzido e associados aos novos níveis de informação gerados, de forma que cada polígono criado estivesse relacionado aos dados geotécnicos.

Um aspecto fundamental de tal operação é a possibilidade de conservar todos os atributos informativos da FAT (*Feature Attribute Table*) da *coverage* original (mapas temáticos) na tabela de *coverage* resultante, onde são recalculados somente os atributos específicos de área e perímetro dos novos polígonos criados na intersecção.

Nesta nova *coverage* criada, foram atribuídos novos itens (colunas) onde cada polígono passou a ter o resultado das equações aplicadas. Trabalhou-se diretamente com o *tool standart* de cálculo *ArcGIS*, módulo *ArcMap Spatial Analyst*. Foi utilizada a sintaxe compatível com o *map calculator* para aplicação da equação.

A ferramenta consiste em aplicar a equação e obter como *output* um novo item com valores de F_s , que pode ser reclassificado ou rearranjado da forma que melhor convém. A figura 15 apresenta um esquema de todo o trabalho realizado para o cálculo dos índices de Fator de Segurança, mostrando a sobreposição dos mapas e posterior associação do novo nível de informação gerado com o banco de dados onde estavam armazenadas as informações dos parâmetros geotécnicos.

A rotina descrita na figura 15 foi repetida para os vários níveis de saturamento do solo. Descartaram-se outras possibilidades de níveis de saturação devido à semelhança de F_s diagnosticada.

O cálculo do F_s não foi realizado nas áreas com cobertura pedológica do tipo Gleissolos (Depósitos Aluvionares), uma vez que não apresentando risco e estão localizadas em áreas planas.

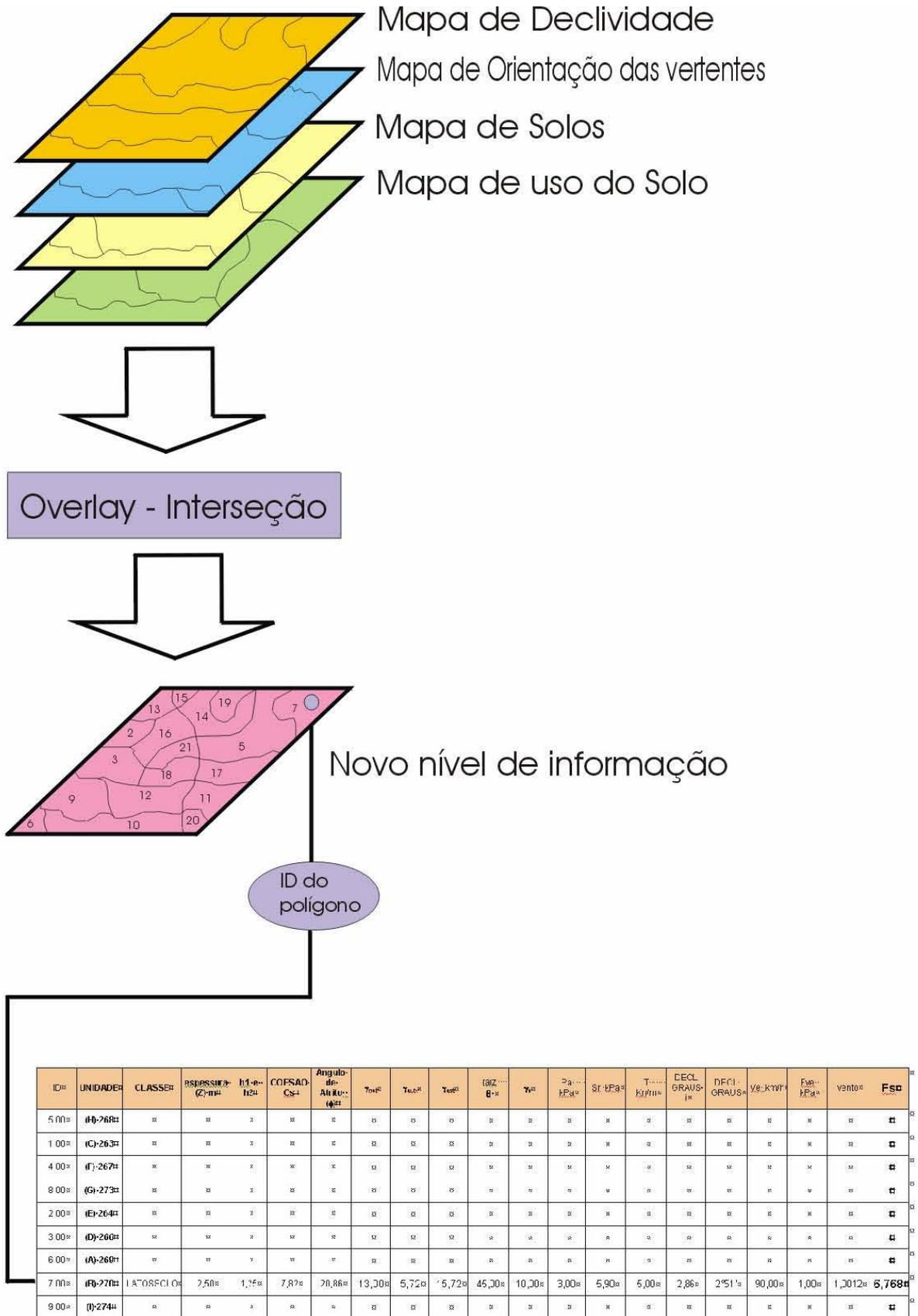


FIGURA 15 – ESQUEMA MOSTRANDO A ASSOCIAÇÃO DO NOVO NÍVEL DE INFORMAÇÃO COM OS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA.

FONTE: MODIFICADO DE KOZCIAK (2005)

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

No decorrer desse capítulo é apresentada uma descrição da área de estudo, sendo subdividida em caracterização fisiográfica regional e contexto socioeconômico do município, onde são detalhadas as características do meio físico, do clima e dos aspectos socioeconômicos da região.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA REGIONAL

Este item foi organizado a partir da compilação de dados bibliográficos e de várias observações feitas em campo. Consideraram-se a forma de relevo com base em sua origem, estrutura, natureza das rochas, clima da região e as diferentes forças endógenas e exógenas que, de modo geral, atuam como fatores construtores e destruidores do relevo terrestre, segundo proposta de Guerra e Guerra (1997). Neste critério incluem-se fatores referentes à hidrografia, clima, geomorfologia, geologia e solos.

4.1.1 Bacia Hidrográfica do rio Ligeiro

A expressão bacia hidrográfica, segundo Guerra e Guerra (1997), refere-se a um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, com uma hierarquização na rede e um escoamento de água que flui dos pontos mais altos para os mais baixos.

O Sudoeste do Paraná é drenado pela bacia hidrográfica do rio Iguaçu, que é o maior complexo hidrográfico do Paraná. São inúmeros os seus afluentes, mas para este trabalho é importante conhecer o grande sistema do rio Chopim, pois os

rios que atravessam a área pertencem integralmente à bacia deste rio, sendo seus tributários da margem esquerda, conforme figura 16.

O alto e médio curso da bacia hidrográfica do rio Ligeiro, objeto do estudo é uma sub-bacia do rio Chopim, sendo balizada ao norte pelo arroio Gramado, afluente direto pela margem direita. O estudo executado é importante para o planejamento urbano do município de Pato Branco, uma vez que toda a área urbana está localizada no seu interior.

Os rios localizados na área estudada se classificam geneticamente como conseqüentes, ou seja, aqueles cujo curso foi determinado pela declividade do terreno. Já em relação aos padrões de drenagem, com base no critério geométrico, conforme conceito formulado por Christofolletti (1980), a rede fluvial pode ser classificada como drenagem dendrítica ou arborescente.

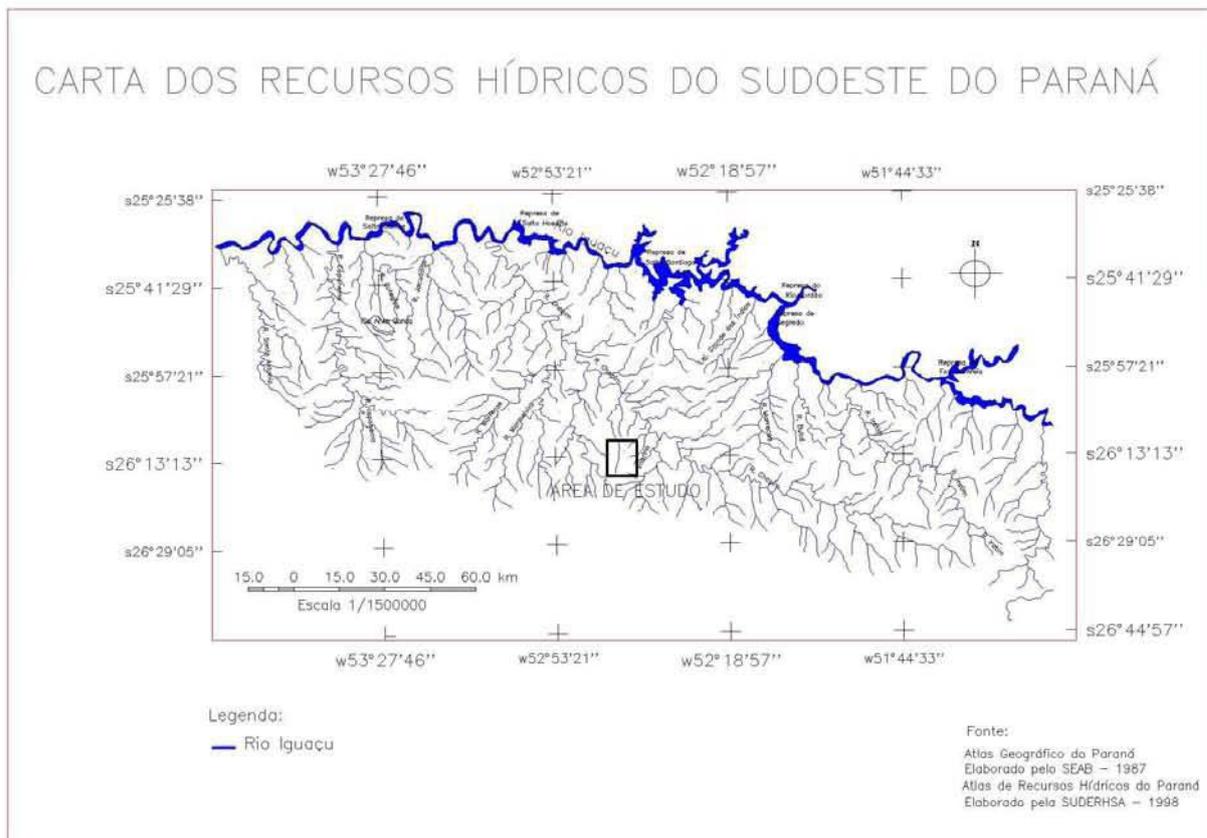


FIGURA 16 – CARTA DE DRENAGEM DO SUDOESTE DO PARANÁ, COM A LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA.

FONTE: SUDERHSA (1998)

O leito do rio Ligeiro tem uma largura média de 5m, preenchido por uma lâmina de água cuja espessura varia de poucos centímetros até cerca de 0,5 m, sendo a direção preferencial deste rio NNW-SSE (figura 17).



FIGURA 17: DETALHES DO RIO LIGEIRO EM DIFERENTES PONTOS DO SEU CURSO
 FONTE: Tabalipa (2007)

A figura 17 - A, apresenta a região da nascente do rio Ligeiro, já formando um considerável volume de água, apresentando vegetação rasteira e declividade suave, porém a nascente já se encontra bastante degradada, sem mata ciliar para sua sustentação. A remoção da vegetação está deixando o solo exposto contribuindo para o surgimento de pequenos processos de erosão e assoreamento

da drenagem natural da área. Logo nas imediações observou-se ocupações irregulares que estão lançando esgoto e lixo diretamente sobre o rio, contaminando suas águas.

A figura 17 - B mostra a área próxima a nascente rio Ligeiro, onde se percebe pontos de degradação ambiental devido a ocupações irregulares que utilizam o rio para esgotamento sanitário e deposição de resíduos sólidos ao longo de seu curso, uma vez que essa região não é servida de rede de esgoto e de coleta de lixo. Observou-se, ainda que as áreas próximas à nascente possuem pouca mata ciliar e a água tem aspecto barrento devido ao processo erosivo formado a partir da retirada da mata. Inicia-se logo na sua cabeceira o processo de poluição e degradação ambiental, sendo visível a contaminação da água do rio, o surgimento de pontos de assoreamento e a falta de infraestrutura das residências existentes nas imediações.

A figura 17 - C apresenta o espaço do médio curso, na parte central da cidade onde o rio apresenta-se parcialmente descaracterizado, sendo em vários pontos canalizado, retificado e ocupando galerias subterrâneas em algumas partes da cidade. A área do seu entorno encontra-se totalmente urbanizada, sem cumprir a legislação ambiental quanto aos recuos e mata ciliar, não adotando a faixa de preservação mínima, existindo inclusive construções sobre seu leito.

A figura 17 - D mostra também o médio curso do rio, na parte central da cidade apresentando em alguns pontos a mata ciliar bem conservada e poucas construções próximas ao seu curso.

A figura 17 - E apresenta um ponto a jusante na área estudada, onde é possível ver construções ocupando o leito do rio que está servindo para despejo de água servida das casas, uma vez que algumas destas não possuem sistema de coleta de esgoto.

A figura 17 - F mostra o aspecto do rio após sair da área urbana, onde se situa o baixo curso do rio apresenta um relevo suave, composto por planícies aluvionares, apresentando um ambiente natural mais preservado.

As águas desta bacia dirigem-se para o norte, correndo em direção a uma região de relevo mais suave e com menores altitudes, atravessando a parte central da cidade, onde em vários trechos já estão canalizados conforme é mostrado na figura 18.

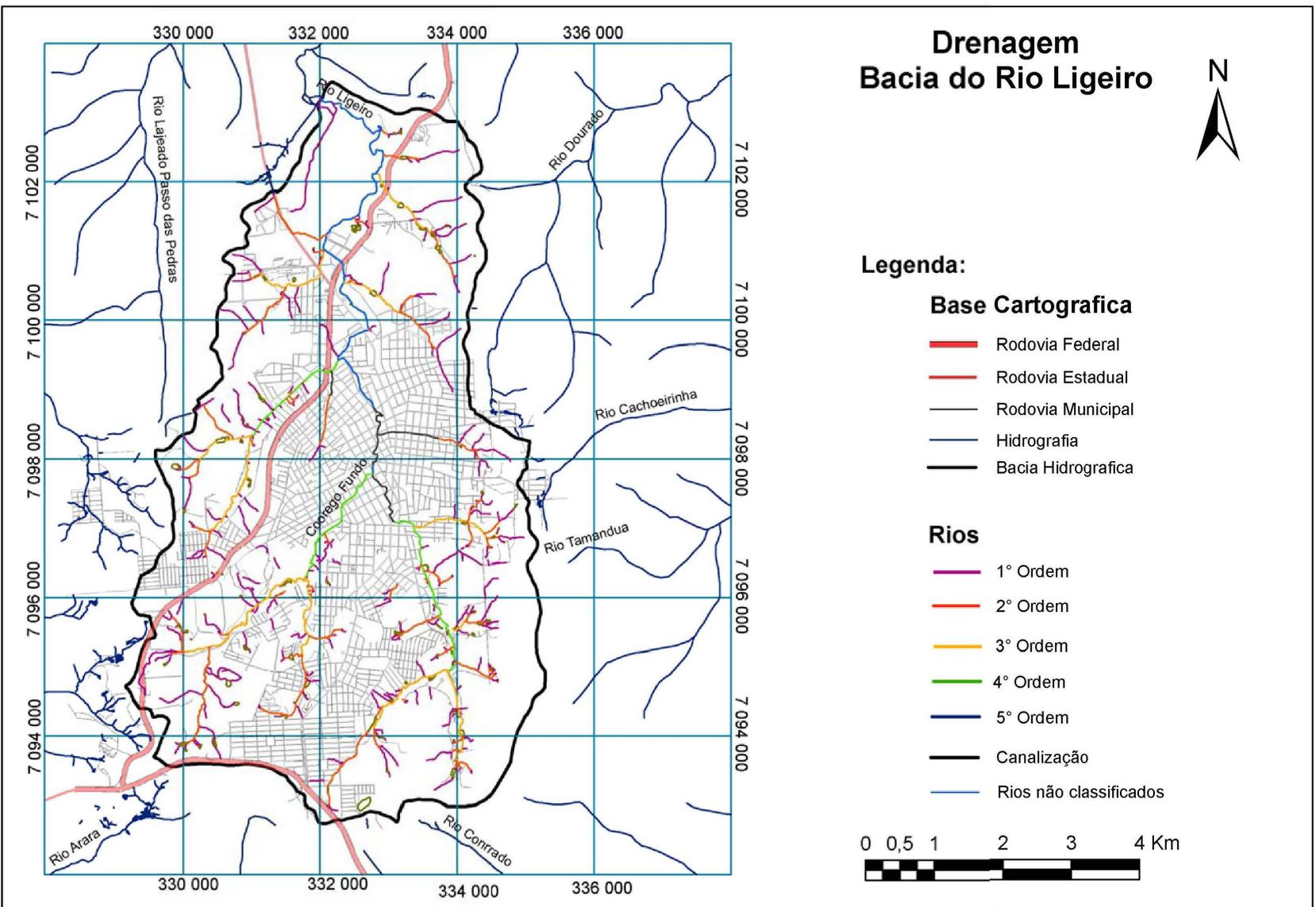


FIGURA 18 – CARTA DE DRENAGEM COM DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CLASSIFICAÇÃO DOS CANAIS FLUVIAIS.

FONTE: Tabalipa (2007)

4.1.1.1 Análise da Bacia Hidrográfica

A área de estudo se apresenta acentuadamente drenada, sendo tributários da margem esquerda do rio Chopim, nível de base local.

Para facilitar o estudo dessa bacia, foi realizada a hierarquização fluvial, onde os canais foram organizados em 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordens dependendo da relação entre a confluência de seus tributários, conforme foi mostrado na figura 18 e no quadro 6, abaixo.

Os dados vetoriais foram incorporados no banco de dados do ArcMap em uma categoria temática. Essa categoria continha classes baseadas na morfologia da Strahler (1952), sendo a identificação visual das mesmas efetuada por diferenças de cores das linhas.

Bacia Hidrográfica	Área da Bacia (Km ²)	Segmentos de 1ª ordem	Segmentos de 2ª ordem	Segmentos de 3ª ordem	Segmentos de 4ª ordem	Segmentos de 5ª ordem
rio Ligeiro	43,99	125	52	11	3	1

QUADRO 6 – HIERARQUIZAÇÃO DOS CANAIS DE DRENAGEM DA ÁREA DE ESTUDO

FONTE: Tabalipa (2007)

4.1.2 Clima

Toda a área de estudo acha-se sujeito às bruscas mudanças climáticas, por estar condicionado à ação das massas de ar intertropicais quentes que atenuam o efeito das massas polares frias. Obedecendo à classificação de Köppen, o clima da área se identifica como sendo do tipo Cfb, conforme a figura 19.

C – Mesotérmico;

f – Temperado Úmido;

b – Verão brando, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C.

A área de estudo encontra-se sob influência de um clima chuvoso, mesotérmico, úmido a superúmido sem estação seca, com verões frescos e geadas severas e bastante freqüentes no inverno. Os meses que apresentam temperaturas mais baixas são julho e agosto quando os índices médios registrados oscilam entre 6 e 8° C e, não raras vezes, as médias das mínimas são inferiores a 0°C. O mês mais quente é janeiro, cuja temperatura média esta em torno dos 22° C.

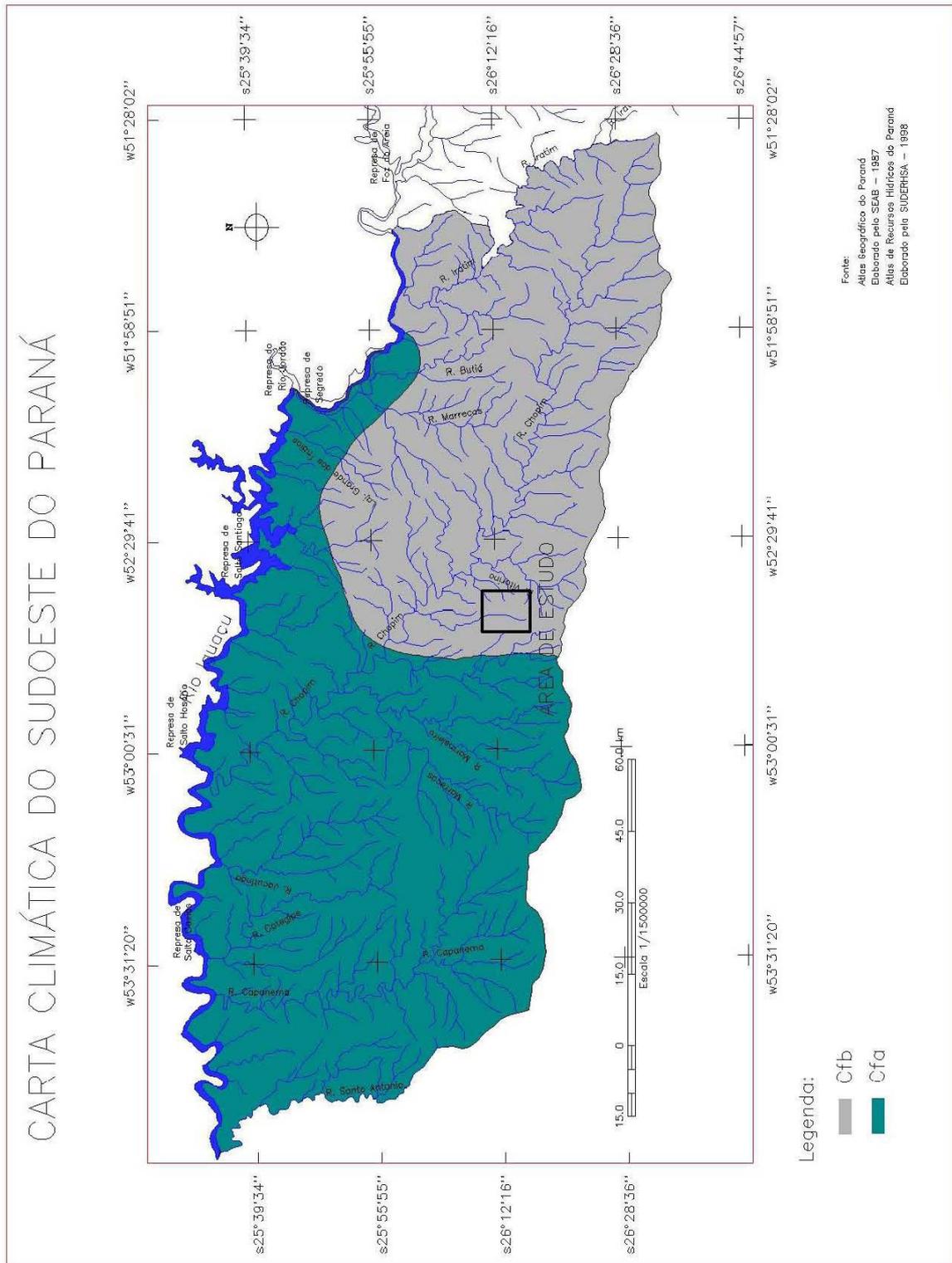


FIGURA 19 – CARTA CLIMÁTICA DO SUDOESTE DO PARANÁ
 FONTE: SUDERHSA (1998)

Trata-se de um clima tipicamente subtropical úmido, com chuvas bem distribuídas ao longo de todo ano, isto é, sem uma estação seca definida, mas com

um verão, outono, inverno e primavera sensivelmente perceptíveis. O clima da cidade é também influenciado pela altitude moderada da região e também pela continentalidade (em razão da distância em relação ao litoral).

Para se conhecer o clima da área de estudo detalhadamente, solicitou-se ao Instituto Tecnológico SIMEPAR os dados meteorológicos da estação climatológica de Pato Branco armazenados no banco de dados daquela instituição.

O SIMEPAR é uma instituição comprometida com o apoio ao desenvolvimento técnico-científico, econômico e social do Paraná e do Brasil, para os quais contribui com a geração de dados e informações de natureza hidrológica, meteorológica e ambiental. A disseminação pública e gratuita dos dados meteorológicos históricos do SIMEPAR é parte integrante deste apoio, e de sua política de responsabilidade social.

4.1.2.1 Pluviosidade

No que se refere às precipitações pluviométricas da área em estudo, os dados comprovam que a oferta hídrica é bem elevada, sendo um pouco mais pronunciado nos meses de primavera e verão, caindo relativamente nos meses de outono e inverno, com máxima em outubro e mínimas em agosto.

A média de precipitação anual para o período de 1979 a 2005 na bacia é de 2.109,79mm/ano (estação Pato Branco - código ANELL 26075241 - ponto de coordenadas geográficas 26° 06' 59" de latitude Sul e 52° 40' 59" de longitude Oeste e altitude de 721,80).

O gráfico 1 mostra os índices pluviométricos multianuais médios para o período de 1979 a 2005. O mês mais chuvoso no período foi outubro, e aquele com menor índice pluviométrico para todo o período considerado foi agosto.

O conhecimento dos índices pluviométricos é essencial para o planejamento urbano, uma vez que estes índices são utilizados em projetos de drenagem urbana e de estabilidade de encostas, contribuindo assim para a redução de prejuízos à população e à municipalidade decorrentes de enchentes e escorregamentos (tabela 3 e gráfico 2).

A Carta de Precipitação Anual do Sudoeste do Paraná, produzida pela SEAB em 1987 (figura 20), indica que, na área estudada, a pluviosidade média

anual varia entre 1750mm à 2000mm, mas observou-se através dos dados analisados que a precipitação média anual em Pato Branco, ficou acima de 2100 como mostra a tabela 2.

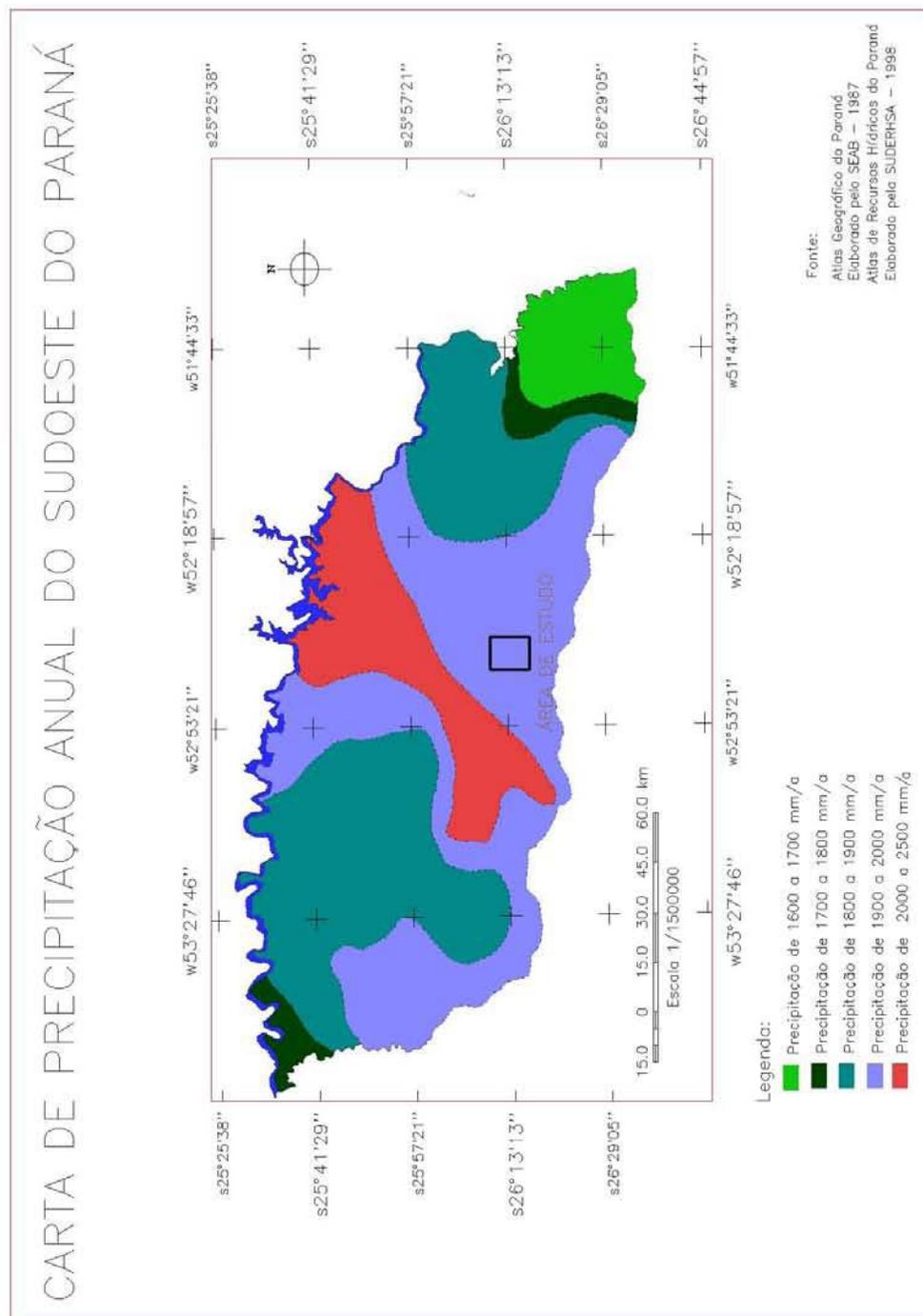


FIGURA 20 – CARTA DE PRECIPITAÇÃO DO SUDOESTE DO PARANÁ
FONTE: SUDERHSA (1998)

Outro aspecto importante que pode ser analisado nesta tabela, é que o trimestre mais chuvoso – outubro, novembro, dezembro, possui 29,93% do total da

precipitação anual, enquanto o menos chuvoso – julho, agosto, setembro concorre com 20,51% do total precipitado, demonstrando existir uma distribuição uniforme da precipitação durante o ano.

• **Precipitação** - A precipitação em Pato Branco, no período de 1979 a 2005, teve a seguinte caracterização:

TABELA 2 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA EM PATO BRANCO/PARANÁ – 1979/2005.

Meses	PATO BRANCO (mm)
Janeiro	184,13
Fevereiro	175,20
Março	139,71
Abril	172,66
Mai	203,81
Junho	170,24
Julho	146,36
Agosto	105,26
Setembro	181,11
Outubro	250,35
Novembro	191,56
Dezembro	189,41
Total	2.109,79

FONTE: Tabalipa (2007)

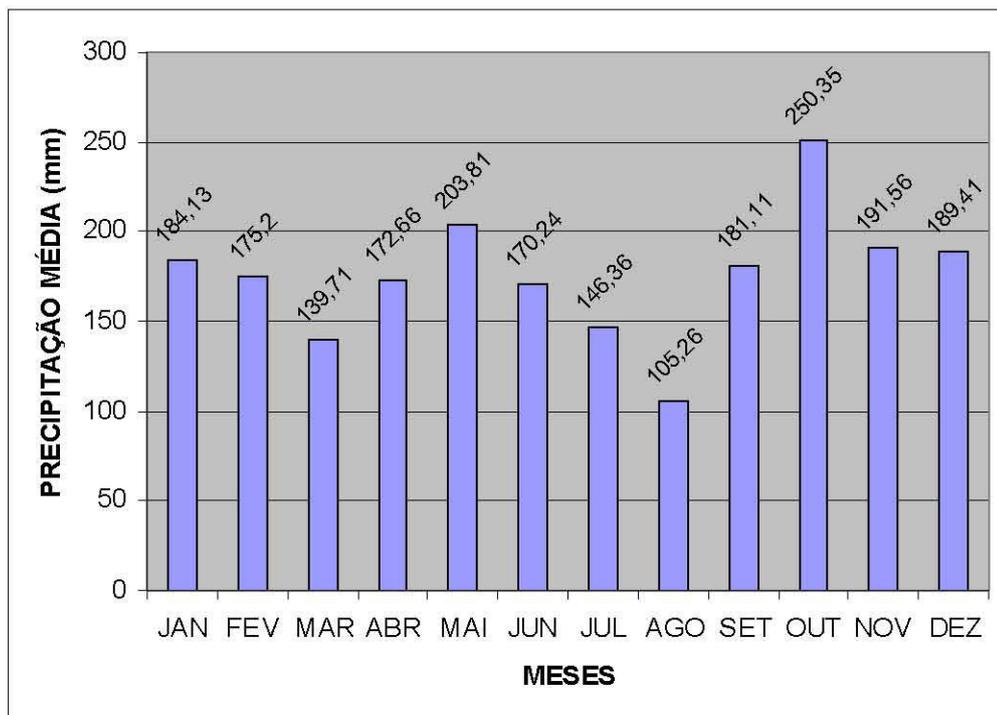


GRÁFICO 1 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL EM PATO BRANCO/PARANÁ – PERÍODO 1979/2005.

FONTE: Tabalipa (2007)

TABELA 3 - PRECIPITAÇÃO EM PATO BRANCO/PARANÁ - 1979/2005.

Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
1979	55,20	155,00	62,50	179,00	437,40	20,70	102,70	167,30	203,10	404,10	203,70	174,00	2.164,70
1980	270,50	90,80	123,10	45,80	160,70	63,10	190,60	172,70	156,40	181,10	158,70	306,60	1.920,10
1981	92,60	108,40	109,30	262,70	25,90	120,70	14,40	63,30	80,50	153,40	388,70	383,10	1.803,00
1982	40,70	316,10	97,30	33,40	100,00	376,90	251,30	132,40	85,20	291,90	572,90	116,50	2.414,60
1983	132,20	283,70	340,30	192,50	565,00	194,60	722,70	53,10	298,00	170,90	192,90	174,70	3.320,60
1984	194,70	146,70	179,70	229,90	73,10	229,70	86,10	252,60	152,60	97,30	194,40	145,10	1.981,90
1985	17,70	261,50	84,50	218,20	71,90	69,00	87,80	40,20	114,40	271,50	91,20	82,50	1.410,40
1986	268,20	252,00	142,00	266,40	259,80	58,20	73,60	128,80	232,80	130,40	183,50	161,20	2.156,90
1987	145,20	143,60	201,20	221,20	377,20	145,60	95,30	127,00	59,20	183,10	201,60	179,80	2.080,00
1988	133,80	127,40	19,30	228,70	261,20	196,90	12,20	8,30	39,80	166,20	27,00	184,00	1.404,80
1989	436,50	201,90	117,70	95,60	80,20	73,10	187,00	153,10	258,60	238,70	87,50	126,20	2.056,10
1990	466,10	112,40	72,60	375,90	226,60	324,60	169,60	243,10	331,20	322,00	260,80	187,10	3.092,00
1991	113,70	56,20	58,30	258,40	34,90	320,00	73,30	43,80	116,00	221,10	140,80	282,20	1.718,70
1992	177,40	214,90	187,00	166,20	453,70	227,60	146,80	190,40	127,40	166,10	162,30	112,60	2.332,40
1993	319,60	109,30	96,80	64,20	346,20	185,00	200,40	17,70	288,50	202,00	102,90	207,50	2.140,10
1994	102,20	341,00	56,40	89,80	309,90	218,50	182,20	24,40	143,90	259,00	290,70	232,00	2.250,00
1995	231,10	111,60	150,90	178,60	16,20	143,90	114,70	34,80	242,20	181,30	69,40	94,90	1.569,60
1996	324,90	228,10	299,70	28,80	73,20	231,80	135,70	90,50	207,70	461,90	179,00	230,90	2.492,20
1997	174,70	300,20	67,30	101,20	227,50	282,30	110,20	29,90	234,50	364,80	278,70	305,50	2.476,80
1998	196,50	237,70	268,00	512,20	176,00	83,10	131,00	320,00	346,90	381,30	62,50	267,80	2.983,00
1999	173,70	153,60	69,80	196,40	126,60	187,70	116,00	6,80	94,00	181,70	85,00	249,00	1.640,30
2000	118,00	190,00	180,80	141,00	117,20	120,80	133,90	120,30	266,30	305,80	138,80	218,40	2.051,30
2001	178,60	254,60	100,80	109,20	132,80	175,80	140,00	67,80	164,80	155,60	195,80	71,20	1.747,00
2002	208,60	51,60	139,00	75,80	293,20	73,00	95,40	110,80	199,40	352,20	362,40	247,00	2.208,40
2003	95,80	191,00	125,00	87,00	79,80	133,20	75,60	40,40	97,20	189,80	184,60	242,80	1.542,20
2004	136,60	63,00	365,40	136,40	204,60	115,40	178,40	41,80	104,40	354,40	278,40	103,40	2.082,20
2005	166,80	28,00	57,40	167,40	272,00	225,20	124,80	160,80	245,00	371,80	77,80	28,00	1.925,00

FONTE: SIMEPAR (2005)

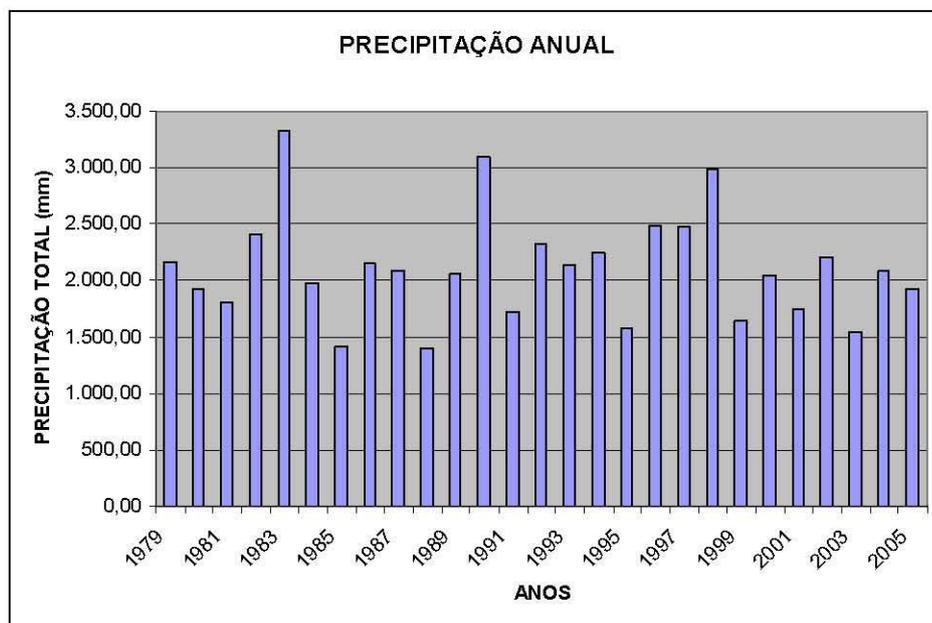


GRÁFICO 2 – PRECIPITAÇÃO ANUAL EM PATO BRANCO/PARANÁ - 1979/2005.

FONTE: Tabalipa (2007)

Pela análise da tabela 3, foi possível evidenciar o elevado índice pluviométrico na área da bacia, com média superior a 2100mm, podendo ocorrer episódios de chuvas intensas que atingem uma precipitação média mensal (mês de outubro), no período 1979 – 2005, de até 250mm.

Na tabela 4 e no gráfico 3 são apresentados dados descritivos dos valores de precipitação mínimo e máximo absolutos e o valor médio da estação durante um período médio de 27 anos. Importante perceber a ocorrência de um máximo de 722,70mm no mês de julho. Este valor refere-se ao ano de 1983, onde se tem registro de grandes inundações na cidade de Pato Branco.

TABELA 4 – PRECIPITAÇÃO MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA – PERÍODO 1979/2005.

meses	mínimo	médio	máximo
JAN	17,70	184,13	466,10
FEV	28,00	175,2	341,00
MAR	19,30	139,71	365,40
ABR	28,80	172,66	512,20
MAI	16,20	203,81	565,00
JUN	20,70	170,24	376,90
JUL	12,20	146,36	722,70
AGO	6,80	105,26	320,00
SET	39,80	181,11	346,90
OUT	97,30	250,35	404,10
NOV	27,00	191,56	388,70
DEZ	28,00	189,41	383,10

FONTE: Tabalipa (2007)

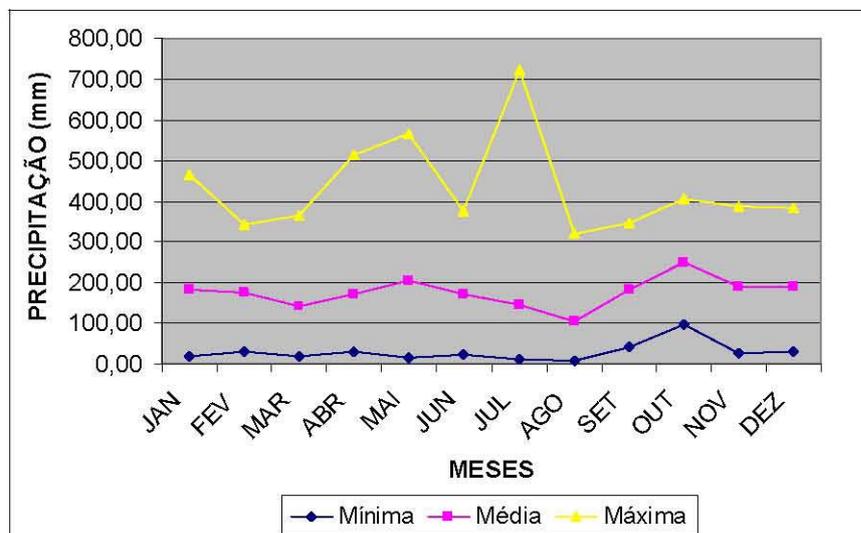


GRÁFICO 3 – GRÁFICO DOS ÍNDICES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS MENSIS DE PRECIPITAÇÃO NA ESTAÇÃO PATO BRANCO – PERÍODO 1979/2005.

FONTE: Tabalipa (2007)

A precipitação é um importante fator no controle do ciclo hidrológico e, portanto, da regulação das condições geomorfológicas de uma determinada região, e a quantidade relativa de precipitação, seus regimes sazonais ou diários e a intensidade das chuvas individuais são algumas das características que afetam a natureza e a magnitude do trabalho geomorfológico em bacias de drenagem.

Sabe-se que a água da chuva é considerada como um importante fator de desenvolvimento dos fenômenos de instabilidade em encostas, existindo um grande vínculo entre chuvas intensas e escorregamentos. Diversas são as causas que levam a esse resultado, como aumento do grau de saturação do solo, trazendo a conseqüente perda da coesão aparente; o desenvolvimento de pressão neutra ou de poros no interior do solo; o aumento do peso do solo pelo acréscimo do grau de saturação; o desenvolvimento de pressões hidrostáticas sobre a massa de solo ou pelo acúmulo de água em fendas ou trincas; aumento de percolação pelo ao aumento do fluxo subterrâneo da água, entre outros.

Para Caputo (1988), as causas de um escorregamento estão relacionadas ao aumento do peso do talude e à diminuição da resistência ao cisalhamento do material. A manifestação ao mesmo tempo desses fatores na estação chuvosa ou pouco depois, em que a saturação aumenta o peso específico do material e o excesso de umidade, reduz a resistência ao cisalhamento pelo aumento da pressão neutra. Isso explica a ocorrência da maioria dos escorregamentos nos períodos de grande precipitação pluviométrica.

Conforme visto anteriormente existem diversos trabalhos que apresentam estudos de correlação entre a pluviosidade e os escorregamentos. Entretanto, deve-se estar sempre atento para o fato de que a precipitação é um dos fatores a ser levado em consideração, mas não o único para que ocorra o escorregamento. Este é ocasionado também por uma combinação de diversos outros fatores como pedológico, geológico, geomorfológico e biológico.

4.1.2.2 Temperatura

Na região abrangida pela figura 21, a sul do rio Iguaçu, as temperaturas mais elevadas se localizam a Noroeste da região, já as mais baixas aparecem a Sudeste dessa, conforme é mostrado na figura 21.

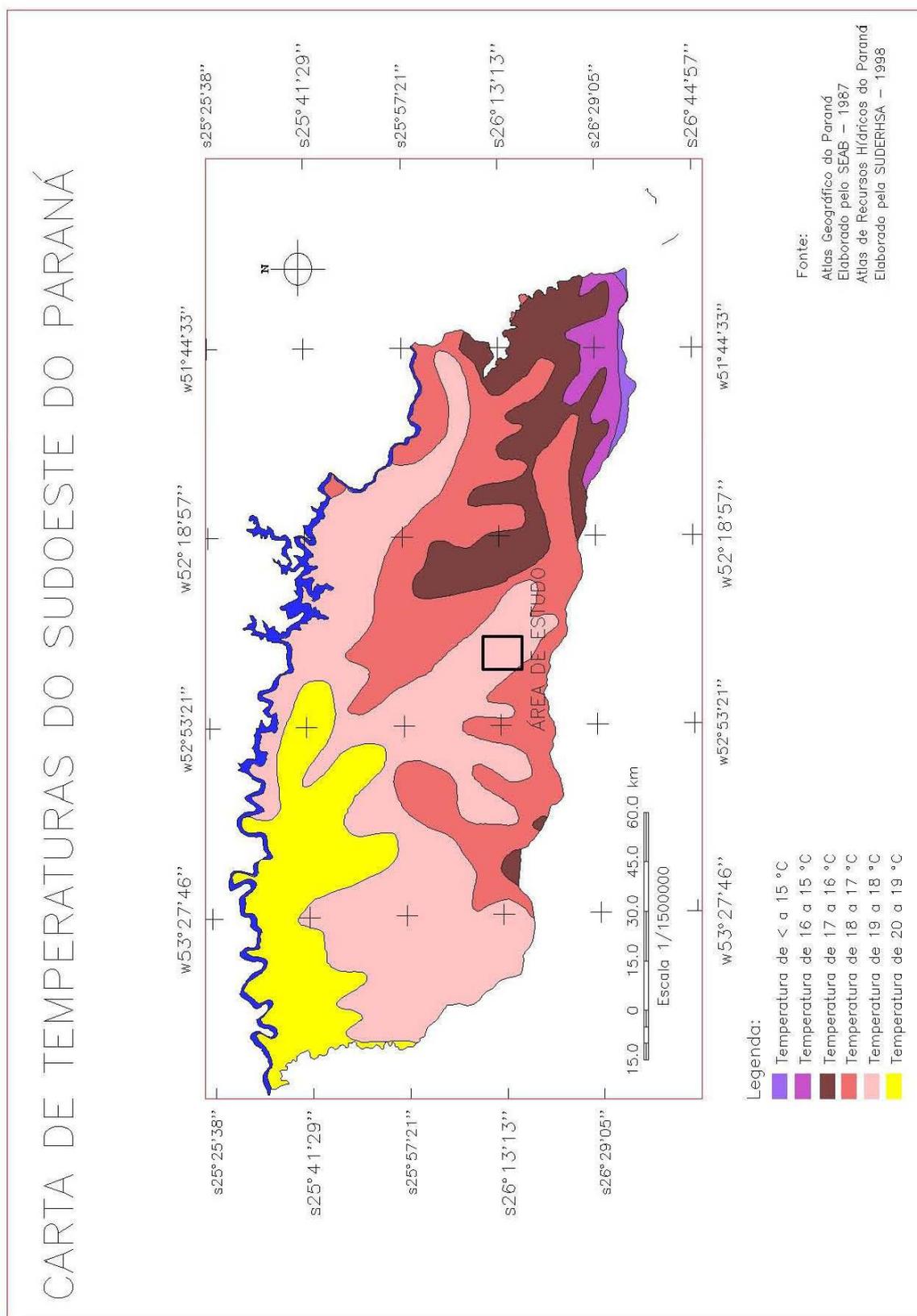


FIGURA 21 – CARTA DE TEMPERATURAS DO SUDOESTE DO PARANÁ.
FONTE: SUDERHSA (1998)

Na Carta também é possível verificar que a área de estudo tem sua temperatura média variando de 18° C a 19° C, embora em medições feitas na área obtiveram-se valores entre 14° C e 22° C, conforme tabela 5 e gráfico 4.

TABELA 5 – TEMPERATURAS MÉDIAS MENSAIS EM PATO BRANCO/PARANÁ – 1979/2005.

Meses	JAN	FEV	MAR	ABR.	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura Média	22,53	22,08	21,47	19,1	15,82	14,52	14,23	16,21	16,89	19,39	20,93	22,06

FONTE: SIMEPAR (2005)

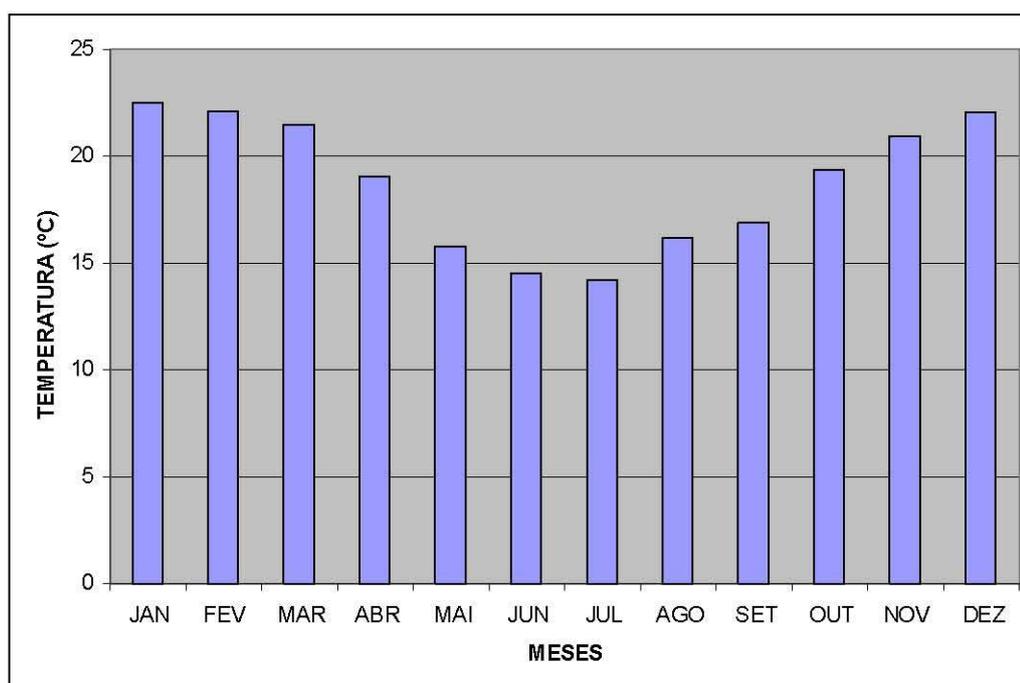


GRÁFICO 4 - TEMPERATURAS MÉDIAS MENSAIS EM PATO BRANCO/PARANÁ – 1979/2005.

FONTE: Tabalipa (2007)

Para determinação das temperaturas médias da bacia no período de 1979 a 2005, foram utilizados os dados do SIMEPAR, referentes à estação de Pato Branco (tabela 6 e gráfico 5).

Temperaturas Extremas:

- -4 C em Julho de 2000.
- +36,7C em Março de 2005.

TABELA 6 – TEMPERATURAS MÁXIMAS, MÉDIAS E MÍNIMAS MENSIS EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005.

Meses	Temperatura média máxima (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura média mínima (°C)
Janeiro	27,4	22,53	18,97
Fevereiro	26,81	22,08	18,87
Março	26,46	21,47	18,3
Abril	23,85	19,1	15,69
Mai	20,58	15,82	12,65
Junho	19,19	14,52	11,36
Julho	19,08	14,23	10,9
Agosto	21,29	16,21	12,56
Setembro	21,96	16,89	13,03
Outubro	24,35	19,39	15,52
Novembro	26,03	20,93	16,92
Dezembro	27,03	22,06	18,25

FONTE: SIMEPAR (2005)

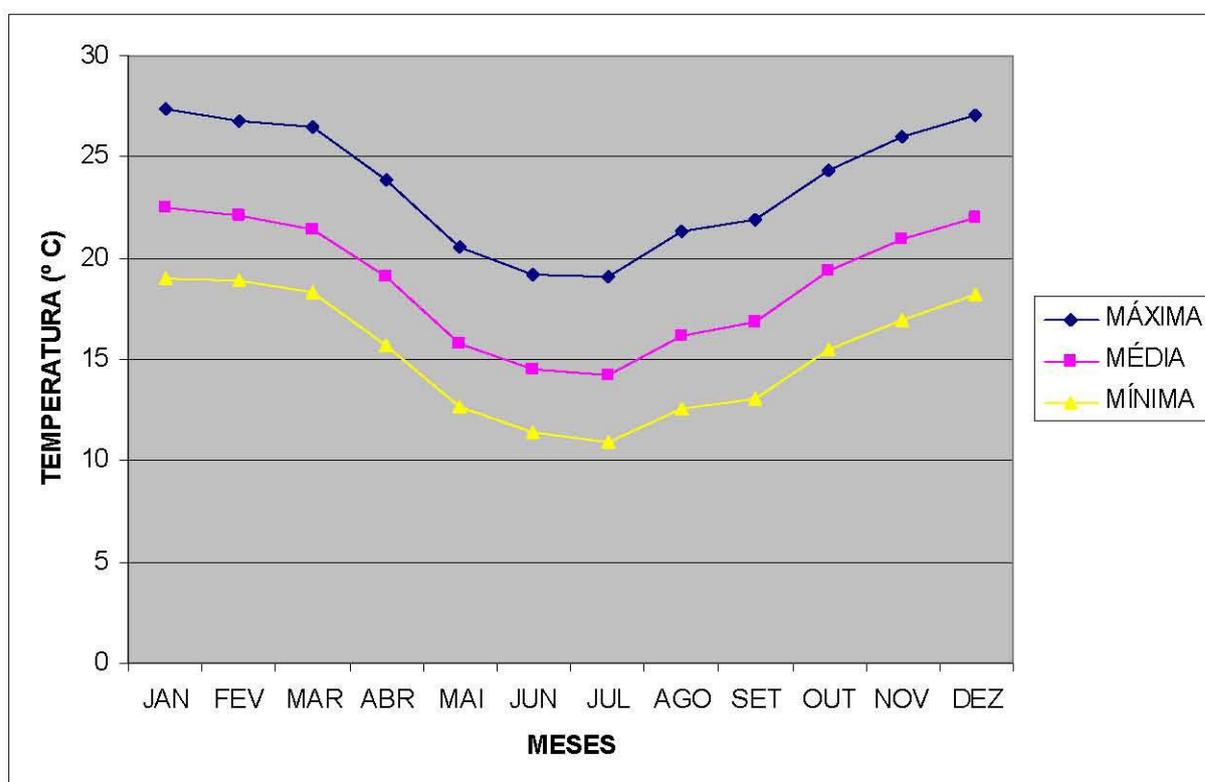


GRÁFICO 5 – TEMPERATURAS MÉDIAS MÍNIMAS E MÁXIMAS MENSIS EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1979/2005.

FONTE: Tabalipa (2007)

4.1.2.3 Ventos

Embora a relação entre escorregamentos e períodos de alta pluviosidade seja inegável e que existe um consenso de que as florestas desempenham importante papel na proteção das encostas, em determinados casos a influência da vegetação poderá ser prejudicial à estabilidade. Segundo Fiori *et al.* (1997) a força do vento exercida sobre a cobertura vegetal é transmitida ao solo e, se o vento soprar no sentido da inclinação da vertente, essa força deverá ser adicionada às forças mobilizantes.

Dessa forma, o vento deve ser estudado detalhadamente, para se conhecer se ele poderá influenciar ou não no surgimento de escorregamento. Além deste fato, sabe-se que o vento é um agente de grande importância no ambiente, uma vez que atua no transporte e dispersão de poluentes da atmosfera, melhorando a qualidade do ar, age na troca de calor, etc.

Importante recordar que a velocidade do vento torna-se relevante em relação a escorregamentos quando atinge valores superiores a 40 km/h, conforme Styczen e Morgan (1995) e pode favorecer o movimento da encosta, mas para que isto seja possível deve soprar no mesmo sentido da inclinação da encosta.

Os dados sobre os ventos utilizados no trabalho, foram fornecidos pelo SIMEPAR (2005). Obtiveram-se as medições das velocidades dos ventos feitas na estação climatológica de Pato Branco nos últimos 9 anos (1997 – 2005). Estes dados informam dia, mês e ano, velocidade do vento a cada hora em m/s, sentido que o vento sopra em ângulo (0 – 360°). Como desta forma os dados não poderiam ser utilizados nas equações do cálculo do Fator de Segurança das Encostas, os dados foram transformados em km/h, através de uma rotina criada no *software EXCELL*, e que alteraram o sentido do vento de ângulo para direção de bússola (Norte, Sul, Leste, etc), tornando possível calcular a velocidade média dos ventos nos diferentes sentidos e o tempo em porcentagem que o vento sopra numa determinada direção (tabela 7).

TABELA 7 – SENTIDO E VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1997/2005.

Sentido	1997		1998		1999		2000		2001	
	Vel Média (Km/h)	Sentido (%)								
NORTE	11,63	12,77	10,08	11,33	10,55	7,65	10,57	12,26	9,85	11,92
NORDESTE	10,25	11,76	9,18	8,77	10,00	7,35	8,93	9,37	9,42	9,92
LESTE	9,44	14,90	8,90	11,98	9,82	10,85	8,36	11,86	8,92	12,63
SUDESTE	10,45	20,87	10,27	22,98	11,25	23,65	9,87	23,05	9,85	24,37
SUL	10,46	19,30	9,95	21,75	11,02	23,85	9,92	21,80	9,60	20,23
SUDOESTE	10,07	6,22	9,38	7,38	10,28	8,85	9,58	8,06	9,56	6,67
OESTE	8,30	3,43	8,78	4,56	9,44	4,50	8,36	4,22	8,79	3,55
NOROESTE	9,00	4,77	9,16	5,97	8,98	4,35	9,34	5,85	9,19	5,81
CALMARIA	0,00	5,99	0,00	5,28	0,00	8,95	0,00	3,52	0,00	4,90

Sentido	2002		2003		2004		2005		%	vel.Km/h
	Vel Média (Km/h)	Sentido (%)								
NORTE	10,85	12,22	10,54	12,14	9,26	9,65	11,03	9,85	11,09	10,48
NORDESTE	9,50	10,70	9,24	9,10	9,22	10,17	9,29	9,98	9,68	9,45
LESTE	8,72	13,35	7,99	10,35	8,86	12,97	8,65	12,84	12,41	8,85
SUDESTE	10,02	23,93	9,62	22,50	9,61	22,96	10,00	23,14	23,05	10,10
SUL	9,93	20,63	10,04	22,58	9,43	22,78	10,65	21,52	21,60	10,11
SUDOESTE	9,23	7,01	9,26	8,20	8,91	7,71	10,14	7,39	7,50	9,60
OESTE	8,06	3,30	8,63	3,97	7,85	3,66	8,51	3,29	3,83	8,52
NOROESTE	9,41	5,01	8,91	5,37	8,23	5,01	9,25	4,43	5,17	9,05
CALMARIA	0,00	3,87	0,00	5,80	0,00	5,09	0,00	7,56	5,66	0,00

FONTE: SIMEPAR (2005)

De acordo com a tabela 8 a maior concentração de ventos e velocidades médias estão nos sentidos SUDESTE (23,05% do total) e SUL (21,60% do total).

Através das planilhas elaboradas foi possível saber que os sentidos NORTE e SUL concentram os ventos mais fortes na área, apesar de ser freqüente a existência de ventos elevados em outras direções (gráfico 6).

Optou-se em calcular a velocidade e o sentido dos ventos na região, ao invés de adotar valores encontrados nas literaturas e que são iguais para todas as direções. Desta forma, buscou-se reduzir a subjetividade e o erro em relação aos ventos.

TABELA 8 – SENTIDO E VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS EM PATO BRANCO – PARANÁ – 1997/2005.

Sentido	vel.Km/h	%
NORTE	10,48	11,09
NORDESTE	9,45	9,68
LESTE	8,85	12,41
SUDESTE	10,10	23,05
SUL	10,11	21,60
SUDOESTE	9,60	7,50
OESTE	8,52	3,83
NOROESTE	9,05	5,17
CALMARIA	0,00	5,66

FONTE: SIMEPAR (2005)

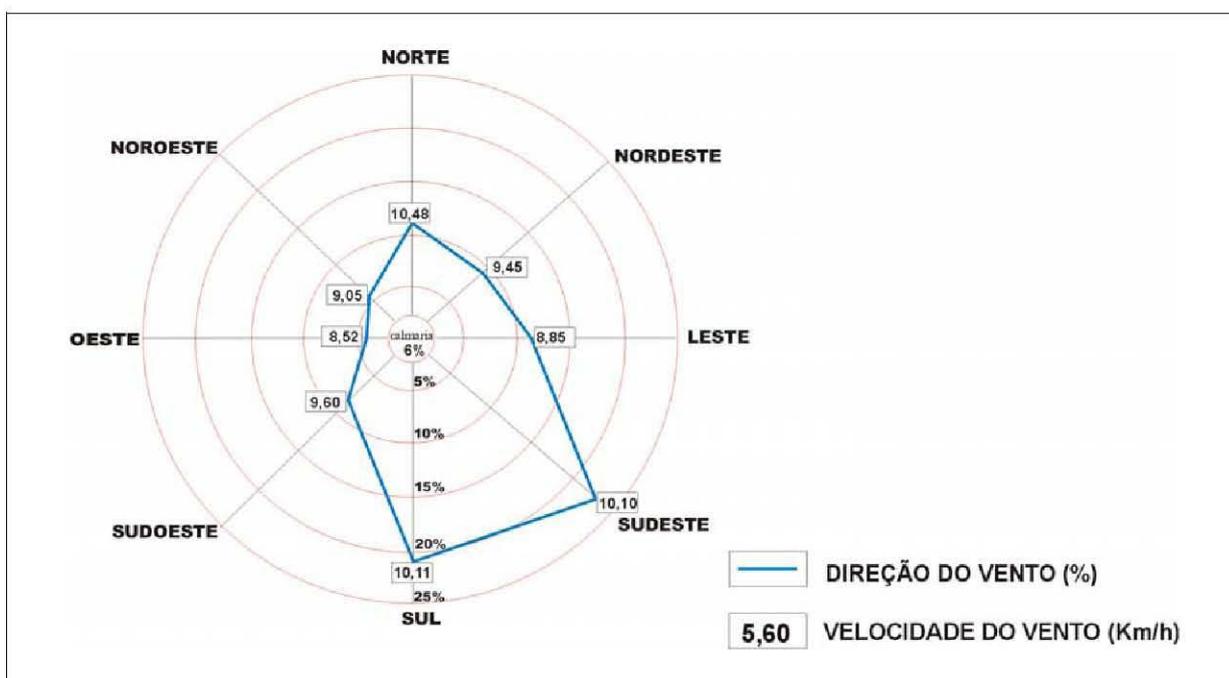


GRÁFICO 6 – DIREÇÃO E VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS NA ÁREA DE ESTUDO – PERÍODO 1997/2005.

FONTE: Tabalipa (2007)

No levantamento realizado, os maiores picos encontrados foram de 70km/h no sentido NOROESTE; 60km/h no sentido SUL; 56km/h no sentido NORTE; 52km/h no sentido SUDOESTE; 48km/h no sentido OESTE; 42km/h no sentido LESTE; 40km no sentido SUDESTE e 35km/h no sentido NORDESTE.

Assim, esses valores foram atribuídos as tipologias de vegetação constituídas por árvores altas (superiores a 20m), conforme quadro 07.

TIPO DE VEGETAÇÃO	σ_{ve}
Floresta	70 Km/h – 0,6270 60 Km/h – 0,4428 56 Km/h – 0,3857 52 Km/h – 0,3326 48 Km/h – 0,2834 42 Km/h – 0,2170 40 Km/h – 0,1968 35 Km/h – 0,1507
Capoeira	70 Km/h – 0,6270 60 Km/h – 0,4428 56 Km/h – 0,3857 52 Km/h – 0,3326 48 Km/h – 0,2834 42 Km/h – 0,2170 40 Km/h – 0,1968 35 Km/h – 0,1507

QUADRO 07 – VALORES ATRIBUÍDOS A PRESSÃO DE ARRASTO DO VENTO NA COBERTURA VEGETAL (σ_{ve}), EM RELAÇÃO À CADA TIPOLOGIA DE VEGETAÇÃO.

4.1.2.4 Umidade

A umidade relativa do ar segundo Maack (1968) para a região está em torno de 85%, mas especificamente na área de estudo, no período de 1979/2005 encontrou-se um valor médio anual de 74,18% (tabela 9).

TABELA 9 – UMIDADE RELATIVA DO AR (%) MÉDIA MENSAL, EM PATO BRANCO/PARANÁ – 1979/2005.

ANO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	total
1979	63,10	68,20	69,60	75,80	78,00	71,10	74,30	71,90	66,80	73,90	67,10	77,30	71,43
1980	69,40	75,70	75,90	72,60	79,00	68,60	71,80	75,30	67,90	69,40	68,30	79,20	72,76
1981	77,50	79,70	71,40	72,90	74,40	77,50	62,70	66,10	62,80	70,50	73,00	76,00	72,04
1982	63,40	80,70	73,50	69,80	72,10	84,10	74,60	75,10	69,40	73,20	83,10	71,70	74,23
1983	74,80	78,20	75,20	81,70	86,90	83,90	85,40	67,70	74,10	71,40	72,50	71,40	76,93
1984	80,30	77,60	77,60	79,00	80,60	78,60	74,60	74,70	60,60	61,00	77,60	71,00	74,43
1985	64,30	80,80	77,50	80,50	72,70	73,00	69,80	68,30	71,30	65,80	60,10	59,30	70,28
1986	70,50	79,90	76,80	80,70	81,50	72,80	73,60	73,10	67,60	62,40	69,50	74,50	73,58
1987	77,20	79,80	67,60	82,60	81,20	72,40	73,20	72,20	69,90	72,90	65,20	72,70	73,91
1988	73,90	76,60	68,10	78,40	84,30	77,80	63,60	58,40	58,70	61,60	55,60	64,30	68,44
1989	83,80	82,00	75,50	77,40	75,20	79,50	69,50	70,40	73,90	66,90	66,70	69,50	74,19
1990	84,30	75,90	77,30	82,90	75,40	77,90	77,70	66,30	72,10	74,50	76,10	69,90	75,86
1991	64,90	63,30	70,30	75,90	75,30	79,30	68,60	66,80	65,20	69,20	62,20	75,00	69,67
1992	71,00	77,10	81,90	78,50	82,80	77,30	76,90	74,40	72,20	70,30	69,40	67,40	74,93
1993	81,90	79,60	79,10	77,70	75,70	77,30	73,70	61,60	76,90	71,00	62,60	73,70	74,23
1994	71,60	84,70	74,00	76,80	82,70	75,50	68,70	59,50	65,70	75,50	71,80	70,80	73,11

1995	84,40	79,30	76,20	74,70	73,70	77,90	72,80	63,20	65,30	68,20	63,60	69,00	72,36
1996	78,90	81,80	81,60	75,80	71,30	79,20	69,60	64,40	71,30	77,90	70,40	77,90	75,01
1997	77,40	83,90	73,10	68,30	72,70	77,80	73,70	67,40	70,80	78,20	77,70	76,00	74,75
1998	79,30	84,00	83,70	82,50	76,70	74,70	77,60	82,10	80,10	74,60	66,10	71,20	77,72
1999	74,93	79,58	76,31	78,87	77,71	87,34	83,43	62,63	63,02	75,18	63,69	74,04	74,73
2000	80,11	83,89	83,41	78,36	83,34	85,23	76,05	72,53	86,58	80,56	72,19	71,34	79,47
2001	78,95	81,41	77,41	69,29	79,52	77,66	73,20	67,59	71,87	69,08	72,23	71,48	74,14
2002	74,90	75,14	77,20	74,80	80,76	78,82	78,45	74,73	69,10	76,23	74,83	78,65	76,13
2003	76,32	80,39	78,12	70,85	69,57	81,49	72,64	62,76	65,00	69,51	68,69	73,30	72,39
2004	78,84	74,91	73,05	82,16	91,35	85,58	83,43	68,85	70,20	71,80	69,50	72,00	76,81
2005	83,86	71,37	72,48	85,66	83,18	91,87	80,65	72,40	84,66	88,15	68,49	69,10	79,32
média	75,55	78,35	75,70	77,20	78,43	78,67	74,08	68,90	70,11	71,81	69,19	72,14	

FONTE: SIMEPAR (2005)

Os valores médios de umidade do ar estão expressos no gráfico 7.

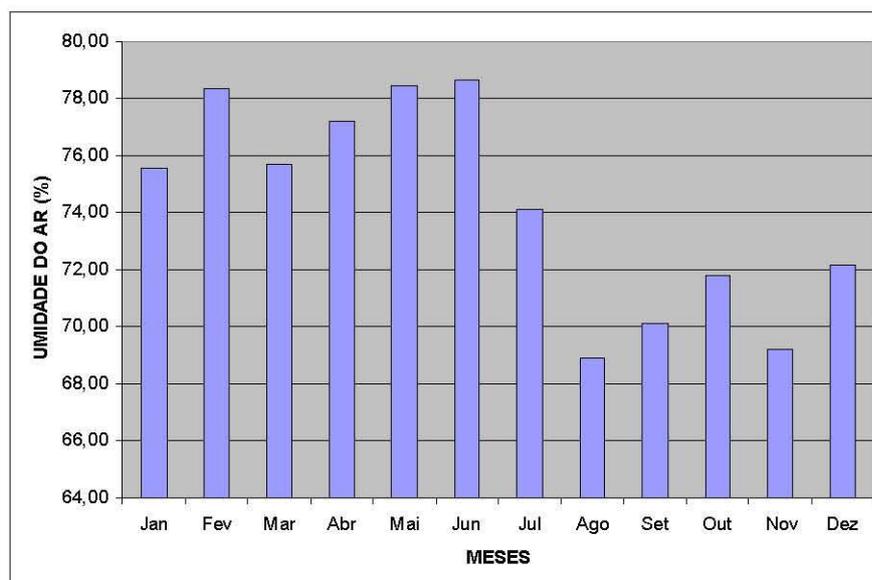


GRÁFICO 07 – MÉDIA MENSAL DA UMIDADE RELATIVA DO AR EM PATO BRANCO/PARANÁ – 1979/2005.

FONTE: Tabalipa (2007)

4.1.3 Relevo (geomorfologia)

A área estudada está compreendida entre as altitudes variando entre 600 (mínima) e 1000m (máxima), apresenta uma topografia de relevo suavemente ondulado com vales em “V” abertos na porção leste, sendo que, na faixa oeste, predominam as superfícies levemente aplainadas (figura 22). As formas predominantes são topos alongados, vertentes convexas, modeladas em rochas da Formação Serra Geral (MINEROPAR/UFPR, 2006).

O aspecto geral da região com alguns vales encaixados, planaltos sendo trabalhados pela erosão fluvial remontante, a rede de drenagem dissecando os

declives originalmente suaves, permite classificá-la geomorfologicamente, como situada nos primórdios do estágio de maturidade.

A topografia resulta da sobreposição de sucessivos derrames basálticos e ácidos. De fato, as discontinuidades físicas desses derrames, determinam as formas mais comuns de relevo, principalmente na área de ocorrência de basaltos, ou seja, patamares nas zonas de diaclasamento horizontal ou de contato entre os derrames, encostas abruptas nas zonas intermediárias dos derrames e uma sucessão de patamares, delineando um relevo escalonado (*trapps*).

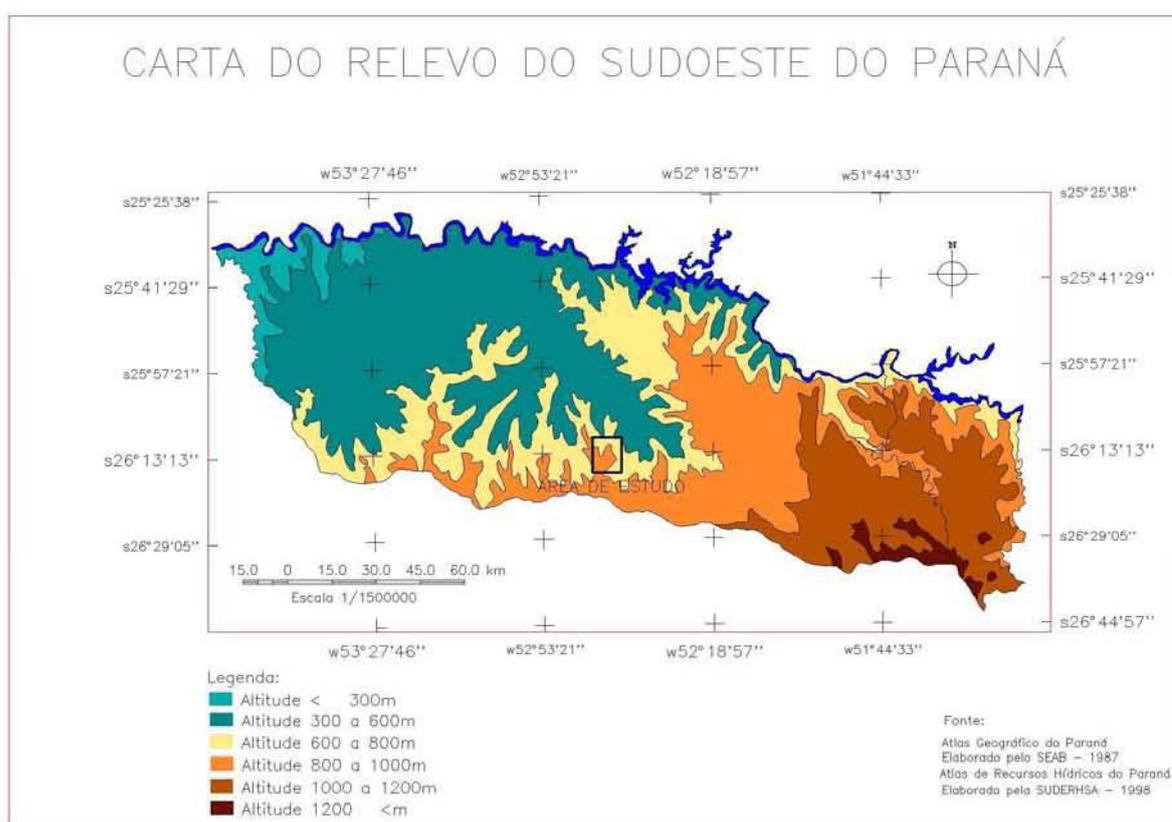


FIGURA 22 – CARTA DO RELEVO DO SUDOESTE DO PARANÁ.

FONTE: SUDERHSA (1998)

Em relação às características fisiográficas, a cidade de Pato Branco está localizada no Terceiro Planalto Paranaense ou Planalto do *Trapp* do Paraná, que se caracteriza pela grande uniformidade geológica e pela presença de extensos derrames vulcânicos básicos. Pertence ao bloco das vertentes do planalto de Palmas, situadas ao sul do rio Iguaçu, é considerada como a região fisiográfica paranaense menos complexa, tanto pelas suas formas, quanto pela sua estrutura,

sendo determinado pelas formas de mesetas recortadas do nível geral dos derrames.

A paisagem é bastante uniforme, determinada pelas formas de mesetas e patamares. A erosão fluvial determinou a formação de um relevo de altas declividades, entre 25% e 50%, em certos locais da região.

A Região Sudoeste apresenta uma topografia pouco elevada na sua porção noroeste, com altitudes de até 300m, elevando-se à medida que se direciona para sudeste podendo atingir altitudes acima de 1200m.

A área de estudo está localizada na porção Centro Sul da Região Sudoeste com altitudes entre 600 e 1000m e apresenta uma topografia mais elevada ao sul, sendo o ponto mais alto localizado no bairro Gralha Azul, próximo a PR 280, com altitudes de até 930m. Conforme se caminha para o norte, as altitudes médias tornam-se cada vez menores chegando a 680m próximo ao Trevo do Patinho na BR 158.

O relevo desta área é marcado por uma homogeneidade morfológica decorrente do predomínio de feições planas e onduladas. Apresenta terrenos com declividade de 0 a 10% em mais de 44% da área total, sendo considerados aptos ao uso agrícola (lavoura e pastagem), permitindo a utilização de mecanização em concordância com as normas técnicas de uso e conservação dos solos. Nesta categoria estão ainda incluídas as áreas inundáveis, que apresentam limitações para o uso agrícola. O relevo ondulado, que ocorre em mais de 42% da área estudada, com declividade de 10 a 20%, está distribuído por toda a região (tabela 10). Tais relevos são considerados aptos para agricultura não-mecanizada e reflorestamento, apresentando restrições ao uso de mecanização agrícola devido à vulnerabilidade erosiva.

Em aproximadamente 13% da área analisada o relevo é fortemente ondulado com declividade entre 20 a 50%. Apresenta áreas inaptas para agricultura mecanizada e com restrições severas para agricultura não-mecanizada, bem como restrições moderadas ao uso do solo para pecuária e reflorestamento.

TABELA 10 - DIAGRAMA DE RELEVO DA ÁREA DE ESTUDO.

Tipo	Declividade (%)	Relação ao total (%)
Plano	0 à 05	21,78
Suave ondulado	05 à 10	22,60
Ondulado	10 à 20	42,64
Forte ondulado	20 à 50	12,33
Montanhoso	> 50	0,65

FONTE: Tabalipa (2007)

O relevo na área de estudo é relativamente acidentado, com declividades superiores a 30% e amplitude altimétrica elevada. A área é bem drenada, encontram-se aqui as cabeceiras dos cursos formadores do rio Ligeiro, ou seja, grande parte dos canais de primeira ordem, com densidade hidrográfica alta e padrão de drenagem do tipo dendrítico a subparalelo, estando, a maioria deles, encaixado em vales em forma de “V”.

O centro da bacia inclui as partes baixas das vertentes onde ocorreram processos de acumulação de sedimentos provenientes das partes altas geralmente por transporte fluvial ou gravidade. Nestas áreas, os solos aparecem mais profundos e desenvolvidos sob condição de declividade geralmente baixa, mas podendo em certos casos atingir até 40% de declividade.

A cobertura vegetal está preservada apenas nas áreas de grande declividade que apresentam dificuldade para ocupação urbana.

4.1.4 Geologia

A evolução geológica da área estudada pode ser entendida a partir do Cretáceo Superior, quando o intenso magmatismo de caráter fissural, depositou sobre a Formação Botucatu, o espesso pacote de derrames basálticos da Formação Serra Geral, episódio datado em torno de 120 milhões de anos.

A emissão da seqüência de rochas ácidas/intermediárias (Membro Nova Prata), formada por derrames sucessivos, intercalada na parte superior da Formação Serra Geral, indica que esta ocorreu antes do término das manifestações vulcânicas básicas, a partir de um sistema de geoclases crustais, próximas à área das atuais ocorrências (HIDROSERVICE, 1981).

Por sua maior viscosidade, provavelmente a sua distribuição lateral tenha sido limitada, concentrando-se predominantemente, ao longo dos condutos vulcânicos.

Posteriormente a esta emissão, houve a reincidência do vulcanismo básico, representado por sucessivos derrames, recobrando as rochas ácidas/intermediárias, estando o Membro Nova Prata intercalado nos basaltos. Simultaneamente a esses fenômenos de efusão de lavas básicas, ácidas e intermediárias, continuaram ativos os processos sedimentares, depositando-se entre esses derrames, sedimentos provavelmente eólicos. Houve também o surgimento de dique de diabásio associado ou posterior ao evento magmático básico que corta as camadas de rochas ácidas e básicas já consolidadas. O vulcanismo básico está associado ao aparecimento de geoclasses profundas que atingiram a parte superior do manto.

Resumidamente pode-se concluir que a geologia da região estudada, de acordo com a abordagem anterior e o Mapa Geológico do Brasil elaborado pela CPRM (1996), assim se enquadra:

JK β sg – Rochas basálticas do Grupo São Bento, Formação Serra Geral. As rochas são efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços e amigdalóides, com intercalações de arenito e rochas vulcânicas ácidas, ambas atravessadas por diques e sills de diabásio.

Os compartimentos são cortados por diques de diabásio na direção SE-NW relacionados com Arco de Ponta Grossa e com vulcanismo continental toleítico da Bacia do Paraná (TOMAZONI, 2003).

A constituição geológica da área é relativamente simples, representado pelas rochas basálticas da Formação Serra Geral, que recobrem inteiramente a área mapeada, sendo formadas por derrames de lavas do grande vulcanismo fissural ocorrido durante a Era Mesozóica, que na testa da escarpa apresentam espessuras de 50 a 200 m, atingindo mais para oeste 1.100 à 1.750m.

O substrato é constituído por rochas do Grupo São Bento, Formação Serra Geral do Jurássico-Cretáceo, que engloba as rochas correlacionadas com o *Trapp* basáltico toleítico que encobre extensas áreas do Brasil Meridional.

A Formação Serra Geral era tradicionalmente conhecida como de típica ocorrência de rochas básicas, entretanto Leinz (1949) constatou um tipo de rocha diferente dos basaltos, definindo um tipo petrográfico ácido.

Este tipo de rocha tem muitas vezes, linhas de fraqueza verticais, características da mesma, em formas angulares poliédricas.

Muitas vezes, a erosão e decomposição seletivas fazem ressaltar na topografia as unidades de derrames, formando verdadeiras escarpas representadas por áreas com declividade acima de 20%.

Na área de estudo os basaltos afloram nos cortes de estrada e na forma de blocos e matacões a meia encosta associados aos declives mais acentuados dos terrenos.

Os tipos litológicos predominantes na área são os basaltos da Formação Serra Geral, que corresponde a um conjunto de derrames de lavas que repousam discordantemente sobre a Formação Botucatu. Caracterizam-se por serem rochas de coloração cinza média a preta, com textura variando de fanerítica média a afanítica.

No Mesozóico, todo o Sul do Brasil foi marcado, no início, por movimentos tectônicos. A espessura dos sedimentos pré-vulcânicos no Sudoeste do Paraná, encontra-se de 2.200m no extremo sudeste, a 3.400m na porção Noroeste. ALMEIDA (1964) *apud* PICCIRILO e MELFI (1988).

Conforme Olivatti (1982) os derrames de basalto, que sobrepuseram a camada de sedimentos pré-vulcanicos atingiram no Sudoeste do Paraná, espessura 200m no extremo sudeste, a 800m na porção extremo Norte central.

Numa porção mais a leste da área de estudo, afloram sedimentos pré-magmáticos da seqüência estratigráfica da Bacia do Paraná, formando o substrato sedimentar para a deposição da Formação Serra Geral, ou seja, o Grupo Paraná, Super Grupo Tubarão. Grupo Passa Dois e São Bento, além das intrusivas associadas (quadro 08).

Era	Períodos	Grupo	Formação				
				Membro	Características Litológicas	Ambiente de deposição	
Cenozóica	Quaternário				Sedimentação quaternária		
	Terciário		Paranaíba		Formação das bacias sedimentares terciárias		
Mesozóica	Cretáceo	São Bento	Serra Geral	Nova Prata	Derrames de basalto toleíticos, com intercalações de arenitos e siltitos eólicos ("intertrapps") e de derrames de rochas intermediárias ácidas. "Sills" de diabásios também são comuns	Vulcanismo de fissura em clima árido.	
	Jurássico		Botucatu		Arenitos finos a médios, avermelhados, bimodais, com grãos foscos e bem arredondados, e estratificações cruzadas de médio a grande porte. Localmente ocorrem arenitos conglomeráticos, siltitos e argilitos.	Predominantemente eólico. Subordinadamente torrencial e lacustre.	
	Triásico		Pirambóia		Arenitos, arenitos lamínicos, lamitos e argilitos arenosos, esbranquiçados, amarelados e avermelhados. Localmente ocorrem arenitos conglomeráticos, com seixo de argila.	Continental Fluvial e lacustrino.	
Paleozóica	Permiano	Passa Dois	rio do Rastro	Morro Pelado	Arenitos finos, avermelhados e arroxeados, com intercalações de argilitos e siltitos, também avermelhados e arroxeados.	Deposição fluvial em planície deltáica	
				Serrinha	Arenitos muito finos, esverdeados, com intercalações subordinadas de lamitos cinza-esverdeado, siltitos e argilitos vermelhos e ocasionalmente calcários.	Deposição subaquosa na frente deltáica.	
			Estrada Nova	Teresina	Alternância de folhelhos cinza-escuro e esverdeados com siltitos cinza-claro e intercalações de arenitos muito finos, cinza-claro, e calcários colíticos e coquina no topo da sequência.	Deposição subaquosa no pró-delta.	
				Serra Alta	Argilitos, folhelhos e siltitos cinza-escuro a pretos, com lentes e concreções carbonáticas, muito rica em fósseis.	Marinho – mar raso do tipo epinerítico	
			Irati	Assistência	Folhelho preto pirobetuminoso, folhelhos e argilitos cinza-escuro a pretos e calcários creme a cinza-escuro, por vezes dolomíticos	Marinho – mar raso do tipo epinerítico, com restrições formando lagunas, onde se depositaram os folhelhos pirobetuminosos	
				Taquaral	Siltitos e folhelhos cinza-escuro e cinza-claro-azulado.		
		Super Grupo Tubarão	Grupo Guatá	Palermo		Siltitos arenosos, cinzas (amarelos e esverdeados quando alterados), ocorrendo, localmente, arenitos finos a médios, no topo, e, concreções e nódulos de sílex na base.	Marinho transgressivo de plataforma de águas rasas
					rio Bonito	Siderópolis	Finas camadas de arenito finos a muito finos, cinza-escuro, intercalados com leitos de argilitos, folhelhos carbonosos e ocasionalmente de carvão.
				Paraguassu		Siltitos e folhelhos cinza-médio e esverdeados, com níveis de calcários argilosos e subordinadamente de arenitos finos.	Marinho transgressivo
				Triunfo		Arenitos médios e grosseiros, com intercalações subordinadas de arenitos muito finos, siltitos, folhelhos carbonosos, leitos de carvão e conglomerados	Flúvio-deltáico
					Grupo Itarar	rio do Sul	

Carbonífero			Mafra	Arenitos esbranquiçados, amarelos e vermelhos, com intercalações de diamictitos, ritmitos, argilitos várvidos, conglomerados e argilitos.	Marinho e continental com influência glacial
			Campo do Tenente	Argilitos castanho-avermelhados, com intercalações de ritmitos e diamictitos de matriz arenosa e na porção basal com intercalações de arenitos amarelos.	Continental lacustrino, com influência glacial
Devoniano	Paraná		Ponta Grossa	Folhelhos argilosos, micromicáceos, cinzentos, localmente betuminosos e folhelhos siltico-arenosos, com siltitos e arenitos muito finos subordinados	Infranerítico regressivo. Nerítico infranerítico
			Furnas	Arenitos brancos e cinzas, médios a grosseiros geralmente com matriz caolítica e com níveis de arenito conglomerático e/ou conglomerado na base. Níveis de arenitos mais finos a até silito podem ocorrer intercalados	Marinho de águas rasas e costeiro.

QUADRO 08 – COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ

FONTE: Adaptado de CPRM – Projeto rio Segredo – Relatório Final – Olivatti (1982)

4.1.4.1 Grupo São Bento

De acordo com a classificação adotada pela Hidroservice (1981) o Grupo São Bento compreende duas unidades de rochas bem distintas, individualizáveis no campo.

Embora todas elas sejam de natureza ígnea efusiva, puderam ser separadas em dois conjuntos distintos: o primeiro proveniente de sucessivos derrames de lavas de natureza básica, denominado Formação Serra Geral e o segundo de derrames de natureza intermediária e ácida informalmente denominada de Membro Nova Prata.

Estratificamente as rochas ácidas/intermediárias encontram-se intercaladas às de natureza básicas.

4.1.4.2 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral representa um dos derrames vulcânicos continentais mais importante da Terra. Cobre aproximadamente 1.200.000 km², ou seja, 75% da Bacia do Paraná, abrangendo o Brasil meridional, parte do Paraguai, Norte da Argentina e Uruguai ocidental (PICCIRILO e MELFI, 1988). O volume total calculado de vulcanismo, baseado em uma espessura média de lava de 660m, é 790.000 km³ (BELLIENI *et al.*, 1983).

Corresponde a um conjunto de derrames de lavas básicas que repousam de forma discordantemente sobre a Formação Botucatu.

Acreditava-se que o vulcanismo da Serra Geral, possuía composição homogênea, notando-se apenas pequenas variações entre as rochas dos diversos derrames, mas é representado na realidade por tipos de rochas diferentes, sendo os basaltos toleíticos 90% do volume, os andesitos toleíticos, 7% do volume e riolitos-riodacitos, 3% do volume. (BELLIENI *et al.*, 1983).

4.1.5 Solos

Para a descrição dos solos levaram-se em questão as várias condições ambientais que determinam as características peculiares de cada solo, tais como: relevo, declividade, cobertura vegetal, clima e materiais de origem.

A alteração das rochas basálticas, associada ao clima da região, deu origem aos solos, nos quais os mais profundos ocupam áreas mais aplainadas e suavemente onduladas, enquanto as superfícies de maiores declividades são ocupadas por solos rasos.

A caracterização e descrição, contidos na seqüência, foram fundamentadas em dados de solos dos levantamentos realizados pela Embrapa (1974) e (1984), ambos elaborados pelo convênio SUDESUL – EMBRAPA – IAPAR e adaptados para a nova classificação adotada pela Embrapa a partir de 1999. Assim sendo, as formas de relevo são bastante variáveis e a elas estão, normalmente, condicionados os tipos de solos encontrados, dentre os quais se ressaltam cinco tipos: Latossolos (Roxo Álico), ocupando relevo suave ondulado e ondulado; Nitossolo (Terra Roxa Estruturada) em relevo ondulado; Cambissolo (Distrófico) em relevo forte ondulado e Neossolo (Solos Litólicos Distróficos ou Álicos) em relevo montanhoso, solos pouco profundos e muito suscetíveis à erosão e Gleissolos (Depósitos Aluvionares), todos originários da meteorização do material litológico (MAACK, 1968).

4.1.5.1 Latossolos

São caracterizados por sua formação a partir de rochas eruptivas básicas, com horizonte B latossólico e não hidromórficos. São de coloração vermelho escuro, muito profundos e friáveis, porosos e acentuadamente drenados. Têm seqüência de horizontes A, B, C, com baixa diferenciação de horizontes e transições, usualmente,

difusas ou graduais. A textura dos horizontes A e B é muito argilosa, ocasionando um baixo gradiente textural (EMBRAPA, 1984).

Possuem um avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo (salvo minerais pouco alteráveis). Os solos são, virtualmente, destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo, e têm capacidade de troca baixa de cátions.

Conforme Embrapa (1974), em distinção às cores mais escuras do horizonte A, o horizonte B tem aparência mais viva, as cores variando desde amareladas, ou mesmo bruno-acinzentadas, até vermelho-escuro-acinzentadas, nos matizes 2,5YR a 10YR, dependendo da natureza, forma e quantidade dos constituintes, segundo condicionamento de regime hídrico e drenagem do solo, dos teores de ferro na rocha de origem e se a hematita é herdada dele ou não. No horizonte C, comparativamente menos colorido, a expressão cromática é bem variável, mesmo heterogênea, dada a natureza mais saprolítica.

A maior parte da classe é composta por solos muito profundos, normalmente com mais de 2m de espessura, não sendo rara, entretanto, a ocorrência de solos com mais de 5m de profundidade.

O horizonte A apresenta estrutura pequena e/ou média granular, fraca ou moderadamente desenvolvida; enquanto no horizonte B, é comum a ocorrência de estruturas fracas, de tamanho médio, em blocos subangulares e/ou forte ultrapequena granular. Apesar da grande estabilidade da estrutura, o grau que une os agregados nos horizontes inferiores do perfil é muito fraco, mesmo em solo seco, transformando os torrões, com muita facilidade, em material pulverulento.

Os solos desta classe ocupam, freqüentemente, superfícies de declives suaves, comumente entre 2 e 8%, tornando-se propícios a uma intensa mecanização. De maneira menos intensa, existem solos que ocorrem em relevos com declives entre 8 e 15%, sendo raras as ocorrências de declividades superiores a 15%.

O grau de consistência do perfil vai de macio, quando seco, muito friável ou friável, quando úmido e plástico e pegajoso, com o solo molhado. O horizonte C é constituído por mistura de solo do B com rocha em decomposição.

4.1.5.2 Nitossolos

Compreende solos constituídos por material mineral, não hidromórfico, com horizonte B com baixa capacidade de troca de cátions, textura argilosa ou muito argilosa, estrutura em blocos subangulares, angulares ou prismática moderada ou forte, com superfície dos agregados reluzente, relacionada à cerosidade e/ou superfícies de compressão (LEMOS et al, 1984).

São profundos, bem drenados, de coloração variando de vermelho a brunada predominantemente cauliniticos, com baixo gradiente textural, ricos em sesquióxidos de ferro e alumínio e derivados de rochas eruptivas básicas. São características marcantes desses solos, a abundância de minerais pesados, muitos dos quais atraídos por um ímã comum.

Devido à pequena variação de cor e de textura ao longo de perfil, as transições entre os subhorizontes são graduais ou difusas, tornando-se muito difícil a identificação dos mesmos (EMBRAPA, 1984). A textura do horizonte A é argilosa, ou muito argilosa, enquanto no horizonte Bt, via de regra é muito argilosa. Apresenta seqüência de horizontes A/B/C/R. A estrutura do horizonte A é do tipo granular, com 0 a 30cm de profundidade, com cor bruno-avermelhado-escuro, pequena e média granular, macio, friável, plástico e muito pegajoso, transição clara e plana moderada e fortemente desenvolvida.

O horizonte B, com profundidade de 30 a 120 cm, possui cor bruno-avermelhado-escuro, muito argiloso, estrutura de moderada a forte, blocos subangulares, serosidade moderada, de comum a abundante, plástico e muito pegajoso, transição gradual e plana. O horizonte B/C, possui 120 a 140cm.

Como o solo úmido é firme quando molhado, o grau de consistência varia de muito plástico a ligeiramente plástico, e de muito pegajoso a ligeiramente pegajoso, com a plasticidade e a pegajosidade diminuindo, em geral, dos horizontes superiores para os inferiores (EMBRAPA, 1984).

Esses solos ocorrem em áreas de relevo ondulado, com 8 a 20% de declividade ou em relevo forte ondulado, com 20 a 40% de declive. Menos freqüentemente, ocupam superfícies de declive suaves ou, em casos extremos, em superfícies com mais de 40% de declive.

4.1.5.3 Cambissolos

Compreendem solos minerais não hidromórficos, com horizontes B câmbico, o qual corresponde, em grande parte, à definição de *cambic horizon* (Soil Taxonomy, 1975), pouco desenvolvidos, com pedogênese pouco avançada e evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo, ausência, ou quase ausência, da estrutura da rocha, cromas mais fortes, matizes mais vermelhos ou conteúdo de argila mais elevados que os horizontes subjacentes. São constituídos por material mineral, com horizonte B geralmente rasos, subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que, em qualquer dos casos, não satisfaçam os requisitos estabelecidos de enquadramento nas classes Vertissolos, Plintossolos ou Gleissolos. Têm seqüência de horizonte A ou hístico, Bi, C, com ou sem R.

Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro. Assim, a classe comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho escuro, e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal. Compreende solos medianamente profundos, com seqüência de horizontes A, (B), C e R, com transição clara entre os horizontes e derivados de materiais relacionados a rochas de composição e natureza bastante variáveis.

Conforme Embrapa (1974), esses solos apresentam certo grau de evolução, porém não o suficiente para meteorizar completamente minerais primários de mais fácil intemperização, como feldspato, mica, hornblenda, augita e outros e não possuem acumulações significativas de óxidos de ferro, húmus e argilas, que permitam identificá-los como possuindo B textural ou B podzol.

Essa classe é composta por solos pouco evoluídos, possivelmente pela topografia acidentada ou ao material de origem bastante resistente ao intemperismo, ou às superfícies geomórficas tão jovens, que o tempo de atuação dos processos pedogenéticos não foi suficiente para uma intemperização mais profunda do solo. Isto explica a presença de minerais primários menos resistentes ao intemperismo nas frações areia grossa e fina e os altos teores de silte.

São características marcantes desses solos os altos teores de silte, presença de minerais primários, menos resistentes ao intemperismo, em percentagem superior a 4% nas frações areia grossa e fina ou presença de

pequenos fragmentos de rocha, pequena profundidade do solo e menor conteúdo de argila no horizonte B do que no A.

Mesmo possuindo boas características físicas, tais como as relacionadas à porosidade, permeabilidade, drenagem e flocculação das argilas, esses solos são bastante susceptíveis a problemas geotécnicos, especialmente nas áreas de topografia acidentada (EMBRAPA, 1984).

Na área de estudo os Cambissolos estão associados a um substrato de basalto e os perfis de solos observados em campo atingem no máximo espessura de 1 m.

Ocorre em relevo montanhoso de vertentes íngremes, com declividades superiores a 20%, as quais estão sujeitas à erosão.

A cobertura vegetal é basicamente do tipo capoeiras e está mais preservada nos topos de morros.

4.1.5.4 Neossolos

Compreende solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, com pequena expressão dos processos pedogenéticos em consequência da baixa intensidade de atuação desses processos que ainda não conduziram a modificações expressivas do material originário que, a partir de uma profundidade variando entre 20 e 80 cm, apresentam rochas consolidadas pouco ou nada meteorizadas de características do próprio material.

Para Embrapa (1984), esse conceito abrange desde solos com horizonte A, diretamente sobre a camada rochosa, até solos com horizonte B relativamente desenvolvido, porém pouco espesso. A designação aqui empregada é extensiva também a solos que não apresentam rochas consolidadas próximas à superfície, porém com grande quantidade de cascalhos, calhaus e matações, pouco ou nada decompostos.

As características morfológicas desses solos restringem-se, praticamente, as do horizonte A, o qual varia, normalmente, entre 15 e 40 cm de espessura, cor bruno avermelhado-escuro; argiloso, estrutura fraca média granular e fraca pequena blocos subangulares; macio, friável plástico e pegajoso; transição clara e plana (EMBRAPA, 1984).

Essa classe admite diversos tipos de horizontes superficiais, incluindo o horizonte O ou H hístico, com menos de 30cm de espessura quando sobrejacente à rocha ou a material mineral.

Alguns solos têm horizontes B com fraca expressão dos atributos (cor, estrutura ou acumulação de minerais secundários e/ou colóides), não se enquadrando em qualquer tipo de horizonte B diagnóstico.

O horizonte C, com profundidade de 35 a 70 cm, é composto por rochas em decomposição.

Segundo Embrapa (1974), são solos rasos com alta erodibilidade, pois as chuvas aliadas a alta declividade dos terrenos, provocam o carreamento do mesmo e impedem o desenvolvimento de cobertura vegetal. Estes solos ocorrem nas partes mais elevadas e com relevo mais acidentado que estão sobre embasamento de granito. Originam um solo raso, pouco evoluído, composto por material detrítico grosso, estando em certos locais a rocha exposta.

Devido às características supracitadas e por ocorrerem em locais de topografia acidentada, normalmente em relevo forte ondulado e montanhoso, este tipo de solo está sujeito a queda de blocos e erosão, cujo processo impede o acúmulo de sedimentos em superfície, exigindo o cuidado de restringir a área apenas à preservação da vegetação natural.

Os neossolos são encontrados em altitudes que variam desde 50m até mais de 1.000m e ocupam uma pequena faixa nos topos de morros. Nestes solos existe dificuldade da ocupação urbana, uma vez que, a implantação da infra-estrutura enterrada é trabalhosa e elevado custo.

4.1.5.5 Gleissolos (Depósitos Aluvionares)

Na área no mapa de solos estão cartografados os depósitos de sedimentos recentes que ocupam as áreas de fundo de vale. Estes depósitos são formados predominantemente por sedimentos imaturos e inconsolidados.

São depósitos compostos por partículas argilosas e arenosas, desagregadas dos solos formados sobre as rochas basálticas, com proporções variáveis de matéria orgânica de coloração castanha a cinza escura, com espessuras que atingem até 3m.

São incluídos, nesta classe, os sedimentos recentes de textura argilosa a arenosa, inconsolidados, transportados pelas águas pluviais e enxurradas, depositados nos fundos de vales. São constituídos por sedimentos provenientes da decomposição das rochas basálticas, carregados para as drenagens pelas águas das chuvas. Não chegam a desenvolver um perfil típico de solos aluviais ou hidromórficos pelo extremo dinamismo de transporte das partículas. Localmente, desenvolve-se uma camada superficial, pouco espessa, de solos orgânicos não discriminados.

Os processos de transporte e formação dos depósitos aluvionares iniciam-se pelo impacto das gotas de chuva sobre os solos desprotegidos das vertentes das drenagens, desagregando as partículas mais finas. A ação do escoamento superficial lava a superfície do terreno, como um todo, arrastando as partículas liberadas para a calha fluvial. Com a progressiva perda de energia, estas partículas são depositadas no leito e nas margens dos rios. Esse processo constitui a chamada erosão laminar e a consequência direta do mesmo é o assoreamento do leito dos rios, bueiros e canalizações pluviais, com influência no equilíbrio hidrológico da área, promovendo enchentes e inundações, principalmente em áreas urbanas onde a degradação é mais acentuada.

No perímetro urbano de Pato Branco os depósitos aluvionares ocorrem principalmente ao longo do rio Ligeiro e seus afluentes, formando planície aluvionar, funcionando como reguladora da vazão e do equilíbrio hidrológico. São depósitos pouco espessos, de sedimentos inconsolidados, com níveis argilosos que, se solicitados a cargas em fundações, aterros e construções, mostram-se propícios a adensamento e compressividade, o que impõe restrições à ocupação pelos problemas de recalque em obras de engenharia. Esses depósitos ocupam áreas de relevo plano nas baixadas, nível freático raso ou aflorante, e dificuldade de escoamento pela ausência de declividade, agravando o problema de assoreamento das drenagens e enchentes (MINEROPAR, 2006).

As áreas com depósitos aluvionares constituem também áreas de recarga de aquíferos.

4.1.6 Vegetação

A exploração predatória da madeira associada ao aproveitamento intenso dos solos pela agricultura e mais raramente na pecuária, provocou grande devastação dos tipos de vegetação originais da área, bem como modificação no aspecto natural da vegetação ainda existente, através da retirada das espécies nobres.

Desta forma, o que resta da vegetação original são capões isolados, geralmente nas encostas íngremes e nas matas de galerias, testemunhos das antigas florestas subtropicais mostradas na figura 23.

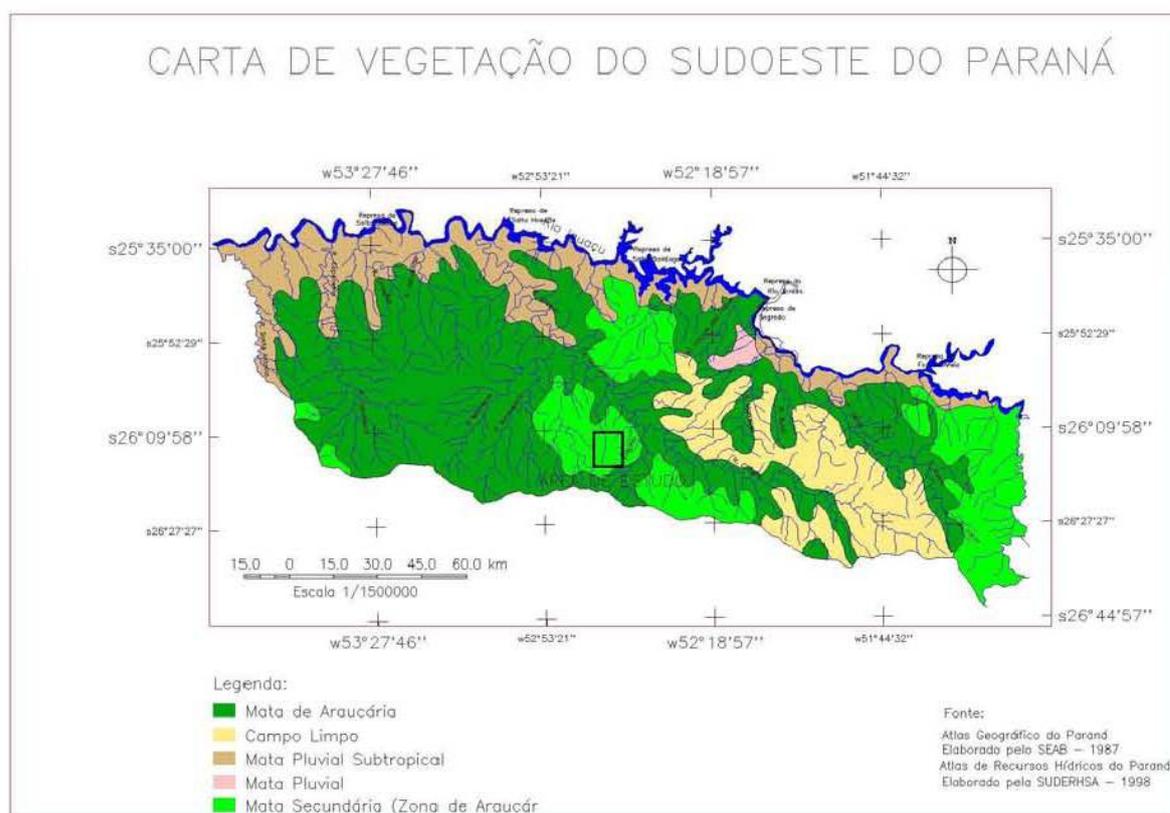


FIGURA 23 – CARTA DE VEGETAÇÃO DO SUDOESTE DO PARANÁ

FUNTE: SUDERHSA (1998)

Na área de estudo, segundo a classificação do Projeto RADAM, a floresta primária, do tipo Floresta Ombrófila Mista também conhecida como "floresta de araucária", é um ecossistema com chuva durante o ano todo, normalmente em altitudes elevadas, e que contém espécies pertencentes às angiospermas, mas também às coníferas. Encontrado no Brasil principalmente nos Estados de Santa Catarina e Paraná, fazem parte do bioma mata atlântica.

A região das araucárias inicia-se no primeiro planalto, imediatamente a oeste da Serra do Mar, e estende-se pelos segundo e terceiro planaltos do Estado do Paraná, com associações florísticas da araucária. Essa região insere-se nas partes mais altas das montanhas do Sul, nos planaltos, onde ocorrem até altitudes médias de 800m, e em alguns poucos lugares que ultrapassam 1.000m. O limite inferior destas matas situa-se até 500m nos estados do Sul. Nestas florestas, coexistem representantes da flora tropical e temperada do Brasil, sendo dominadas, no entanto, pelo pinheiro do Paraná (*Araucária angustifolia*).

A mesma vegetação foi classificada de forma diversa por George Eiten (1983), que desconhecia a proposta elaborada pelo RADAM BRASIL e apresentou uma nova classificação da vegetação brasileira. Pela sua classificação, na área de estudo, a vegetação pertence a Floresta Subtropical Perenifolia que se caracteriza por ser mais resistente ao frio e menos exuberante que as florestas tropicais. Segundo o Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná, EMBRAPA (1984), que adotou esta metodologia, as árvores são geralmente de porte médio havendo, no entanto, locais com domínio de indivíduos de grande porte e de grande diâmetro.

Esta floresta em geral, apresenta três níveis ou estratos, sendo o superior constituído por araucária, imbuia, cedro, canela e outras espécies de grande porte; o médio por pimenteira, erva-mate, caroba, bracatinga e outras; e o inferior por ervas, arbustos e gramíneas EMBRAPA (1984).

Na área de estudo, a floresta secundária ocupa a maior parte da área de vegetação florestal. Ela substitui a vegetação primária após sua destruição e é constituída predominantemente por maciços de bracatinga com aspecto de perenifolia.

Os desmatamentos ocorridos, pela ocupação do território e da exploração seletiva de algumas espécies vegetais de interesse econômico, associados às atividades agrícolas praticadas, determinaram uma grande redução nos recursos florestais, sendo que atualmente restam apenas 3,43% da cobertura florestal original em todo o município.

4.2 CONTEXTO SOCIOECONÔMICO DA REGIÃO

A cidade de Pato Branco se destaca na microrregião como um centro de serviços com ênfase nos setores da saúde e da educação (IPARDES, 2004). A partir de 1996, Pato Branco buscou variar sua economia através de incentivos fiscais a empresas dos setores de informática e eletroeletrônico, o que resultou na criação de um pequeno centro tecnológico industrial. A agricultura também representa uma importante fatia na economia do município com destaque para a soja e o milho. A existência de uma instituição federal de ensino superior, a UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (antigo CEFET/Pr - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná) enfatiza o caráter de pólo regional provedor de serviços do município.

A cidade fundada em 1952, quando se desmembrou de Clevelândia, possui uma área total de 539,415 km² e população superior a 66 mil habitantes, com mais de 90% de residentes no meio urbano (IBGE, 2007). A ocupação e exploração da área foram iniciadas nos primeiros anos do século XX, quando a mesma participou do ciclo de extrativismo intenso da madeira e da erva-mate presentes em todo o Estado do Paraná. Mais especificamente a partir dos anos 20, assistiu-se também à instalação da agricultura em pequenas áreas, com vistas à produção de alimentos, conduzida por nativos, que se utilizavam do sistema pousio, dada a grande disponibilidade de terras férteis.

Os anos 50 foram marcados pelo início da colonização da região por grandes levas de colonos catarinenses e gaúchos que, utilizando-se o sistema de produção da policultura combinado à criação de suínos, substituíram, progressivamente, a prática do pousio pelas colheitas anuais.

No período que compreende as décadas de 50 e 60, a região passou por grande transformação na sua base produtiva, com a introdução de novas práticas de cultivo a partir da expansão da cultura da soja.

A industrialização da agricultura foi intensa mesmo naquelas áreas onde o relevo não permitia. A soja e o milho passaram a ocupar grandes extensões de terra e possibilitaram a implantação de indústrias de ração, que vieram a subsidiar a produção e industrialização da carne de aves.

Segundo o IPARDES (2004), a produção de soja e milho no município é de respectivamente 39.750 e 37.900 toneladas. A produção de aves é de 1.727.922 de

cabeças (IBGE, 2000). Adotando a classificação socioeconômica estabelecida a partir dos estratos de área, observa-se que o município tem mantido sua característica de local da agricultura familiar no Sudoeste, tendo em vista que a maior parte de seus estabelecimentos agrícolas possuem área inferior a 50 hectares.

4.2.1 Aspectos populacionais

Segundo o Censo Demográfico do IBGE (1991) – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a população era composta por 43.406 pessoas, das quais 77,96% viviam nas áreas urbanas e apenas 22,04% na zona rural. Em 2000 a população total passa a ser de 62.234 pessoas, das quais 91,27% são da área urbana e 8,73% da zona rural. Assim, verifica-se que o processo de urbanização se acentuou e teve como um dos fatores contribuintes o processo migratório.

Outra constatação é que a população rural decresceu também em números de habitantes, em 1991 a população do campo era de 12.269 pessoas, passando para apenas 5.428 pessoas em 2000.

4.2.2 Infra-estrutura Urbana

O grau de urbanização do município em 2000 era de 91,28% e nesse ano a cidade obteve o terceiro maior IDH do Estado 0,849. A taxa de pobreza que mede o percentual de famílias com renda familiar mensal *per capita* até $\frac{1}{2}$ salário mínimo, em relação ao número total de famílias residentes no município, foi de 14,6%.

Conforme IPARDES (2004) a rede de esgoto atinge 48,70% dos domicílios da área urbana e 35,53% no meio rural. O sistema de abastecimento de água atende praticamente todo o perímetro urbano, atingindo 96,69% das residências na área urbana, enquanto que meio rural este valor cai para 3,76%. Um grave problema verificado no município foi a falta de mata ciliar na captação de água da Sanepar, onde produtores rurais para obter uma maior colheita, fazem o plantio até a margem do rio, facilitando assim a contaminação da água que a população do município consome.

4.2.3 Lixo urbano

O lixo urbano de Pato Branco é coletado pela Prefeitura Municipal, que atende a sede do município. Existe áreas com coletas regulares, irregulares e sem nenhuma coleta. O sistema de coleta atinge 97,15% das residências na área urbana e apenas 6,88% no meio rural. As áreas com coleta irregulares estão em locais mais distantes, onde os caminhões passam esporadicamente.

Os resíduos sólidos urbanos são coletados e lançados a céu aberto em área denominada lixão, localizado junto a BR 158, próximo ao trevo da Catani.

O sistema de coleta seletiva é precário, e a população ainda não criou o hábito de fazer a separação do lixo em casa, uma vez que, mais de 34% do lixo coletado é formado por materiais recicláveis e que não deveriam ser lançados no lixão (TABALIPA, 2005).

4.2.4 Rede de transporte

Praticamente todo o perímetro urbano do município encontra-se pavimentado, sendo que as áreas sem pavimentação ocorrem principalmente na zona rural.

O único meio de transporte coletivo no setor urbano é o ônibus, mas o trajeto dos ônibus não atinge as áreas mais distantes, nem os bairros situados nas partes altas da cidade, fazendo com que a população percorra um longo caminho até o ponto mais próximo. Pato Branco conta com uma estação rodoviária que dispõe de linhas para a capital e municípios vizinhos, bem como para outros estados. Possui também um aeroporto com pista asfaltada para aeronaves de pequeno porte.

4.2.5 Educação

Pato Branco é o maior pólo educacional do Sudoeste do Paraná. Com 95 escolas, sendo 81 públicas e 14 particulares situadas, na maioria, na zona urbana. No município existem 40 estabelecimentos de pré-escola (31 públicos e 9 privados), 44 estabelecimentos de ensino fundamental (43 públicos e 1 privado) e 11 estabelecimentos de ensino médio (7 públicos e 4 privados) (IPARDES, 2004).

A taxa de freqüência a escola ou creche em 2000 foi 11,44% de 0 a 3 anos, 65,11% de 4 a 6 anos, 97,76% de 7 a 14 anos, 80,36% de 15 a 17 anos, 46,27% de 18 a 22 anos e 8,95% para mais de 22 anos.

Também se deve destacar o ensino superior, com uma Universidade Tecnológica Federal e duas faculdades particulares, sendo um pólo de atração regional para estudantes que desejam fazer um curso de nível superior. Além do ensino superior, Pato Branco é o município da região que apresenta a melhor oferta de cursos profissionalizantes no segundo grau.

Conforme o censo demográfico de 2000, a taxa de analfabetismo global no município é de 6,8%, fazendo com que o município possua um dos menores índices de analfabetismo da região (IBGE, 2000).

4.2.6 Saúde

A oferta de cuidados à saúde em Pato Branco compreende serviços hospitalares e ambulatoriais prestados por instituições públicas e privadas.

A rede hospitalar vinculada a rede SUS de Pato Branco é composta por dois hospitais na sede do município. Apenas um hospital possui uma unidade de pronto-socorro especializado para atendimentos de emergência, em regime de 24 horas.

Estes hospitais ofertam 131 vagas. Este total equivale a 2,1 leitos por mil habitantes. Comparando-se este dado com o parâmetro da necessidade de leitos do Ministério da Saúde, que é de 2,32 leitos por mil habitantes, verifica-se a insuficiência dos mesmos, que se torna mais grave, uma vez que a cidade atrai doentes de toda região em busca de melhores tratamentos.

A rede ambulatorial pública está sob gerência da Prefeitura Municipal através da Secretaria de Saúde. Com relação aos indicadores de saúde a mortalidade geral é em torno de 9,13 por mil habitantes, enquanto a natalidade geral fica em torno de 18,34%.

Quanto as quatro principais causas de morte, observou-se, em 2004, que 21,9% foram do aparelho circulatório, 16,7% neoplasias, 15,8% causas externas e 14,0% a doenças do aparelho respiratório.

4.2.7 Atividades Produtivas

Verifica-se a liderança econômica de Pato Branco no Sudoeste do Estado, o qual possui maior dinâmica na geração de renda, com uma taxa de atividade da população economicamente ativa de 60,60%, sendo o setor de serviços com 44,70% o que apresenta maior participação (IPARDES, 2004).

A agropecuária, em nível municipal, concentra 11,60% da população economicamente ativa. Já a indústria, abrange 22,30% dessa mesma população.

As atividades do setor de comércio crescem a cada ano e concentra 20,50% da população economicamente ativa. Esse setor atende a um mercado regional que extrapola o município. Em termos de total produzido pelos ramos de atividade, o setor de serviços produz 50,28%, seguindo da indústria com 35,32% e agricultura com 14,40%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, nesse capítulo são apresentados os resultados e discussões obtidas pela pesquisa. A abordagem deste capítulo está subdividido inicialmente em elaboração de mapas temáticos, pontos descritos e ensaios realizados. Na seqüência, faz-se a classificação geotécnica dos solos, a aplicação do método adotado, finalizando com a análise dos resultados encontrados.

5.1 CONFECÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS

5.1.1 Modelo Numérico do Terreno (MNT)

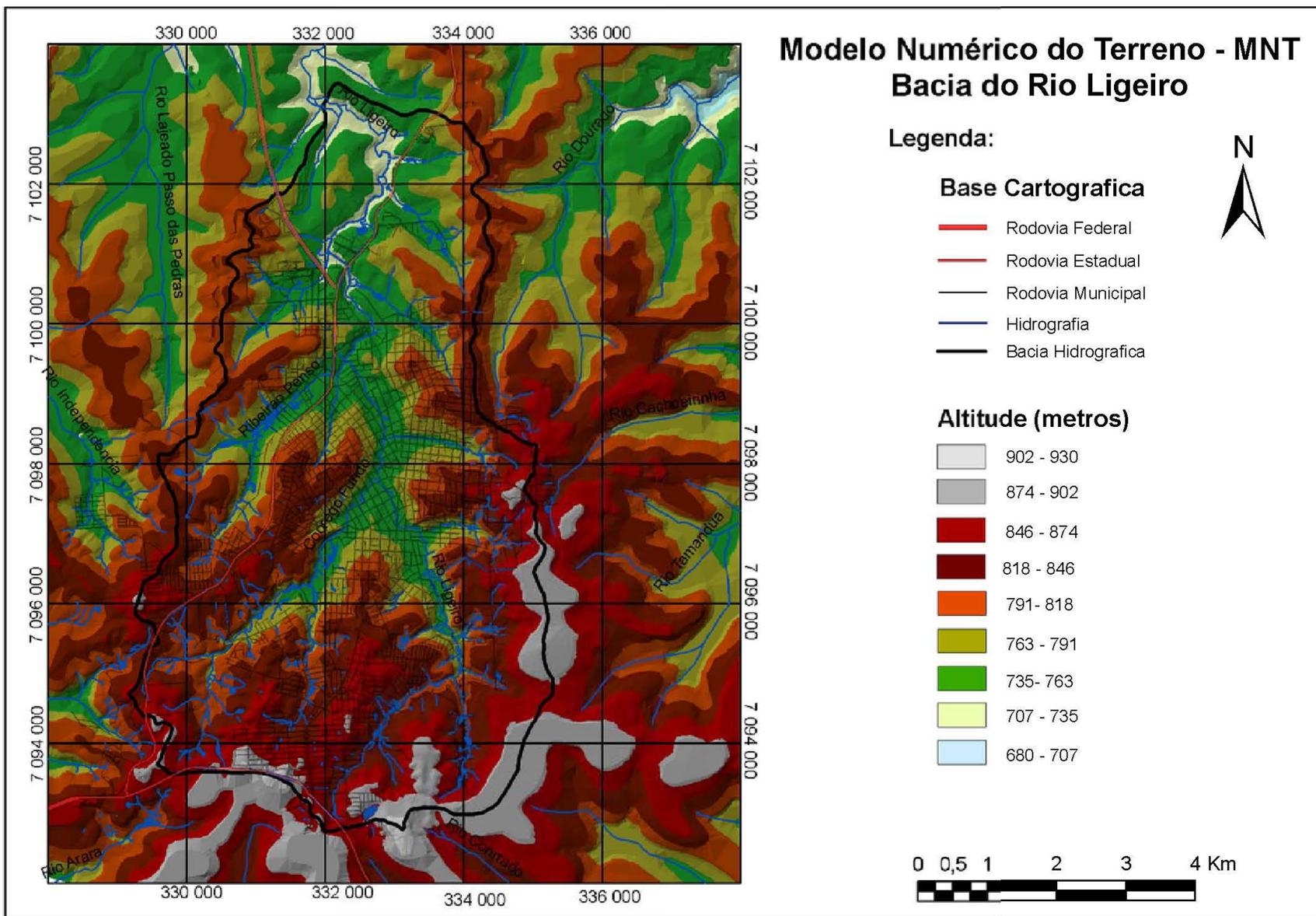
Um Modelo Numérico de Terreno - MNT ou DTM (*Digital Terrain Model*) é uma representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real. A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado.

As cartas topográficas foram digitalizadas no ArcMap, após terem sido escaneadas e georreferenciadas. A digitalização obedeceu à sistemática do *software*, sendo digitalizado cada informação em *layers* diferentes.

Na seqüência, incorporaram-se os arquivos vetoriais que continham as curvas de nível como sendo uma *feature class* no ArcMap, em uma categoria de modelo numérico do terreno.

A partir da base de dados elaborada no *software* Esri ArcMap, versão 9.2, elaborou-se o Modelo Numérico de Terreno (figura 24) contribuindo para a visualização das feições estruturais da área.

FIGURA 24 – MODELO NUMÉRICO DO TERRENO DA ÁREA ESTUDADA E ENTORNO



Por meio da ferramenta do ArcMap, *3D analys tools / tin creation / create tin*, gerou-se uma grade triangular *TIN* - (*TRIANGULAR IRREGULAR NETWORK*). Para a execução desse comando, devem-se informar linhas e pontos cotados com informações (x, y, z), bem como usar a hidrografia como linhas de quebra de relevo.

O *TIN* é um modelo que simula a superfície do terreno, ligando uma rede de entidades pontuais dotados de informações de altura, formando, assim, uma malha contínua de triângulos. A precisão depende fundamentalmente da densidade de pontos de controle.

Para digitalização, selecionou-se, na carta, uma área retangular na qual estava inserida a respectiva bacia e procedeu-se à vetorização dessa, ultrapassando os limites da bacia. Esse procedimento, além de permitir uma noção do entorno, possibilita um melhor tratamento dos dados relativos à bacia.

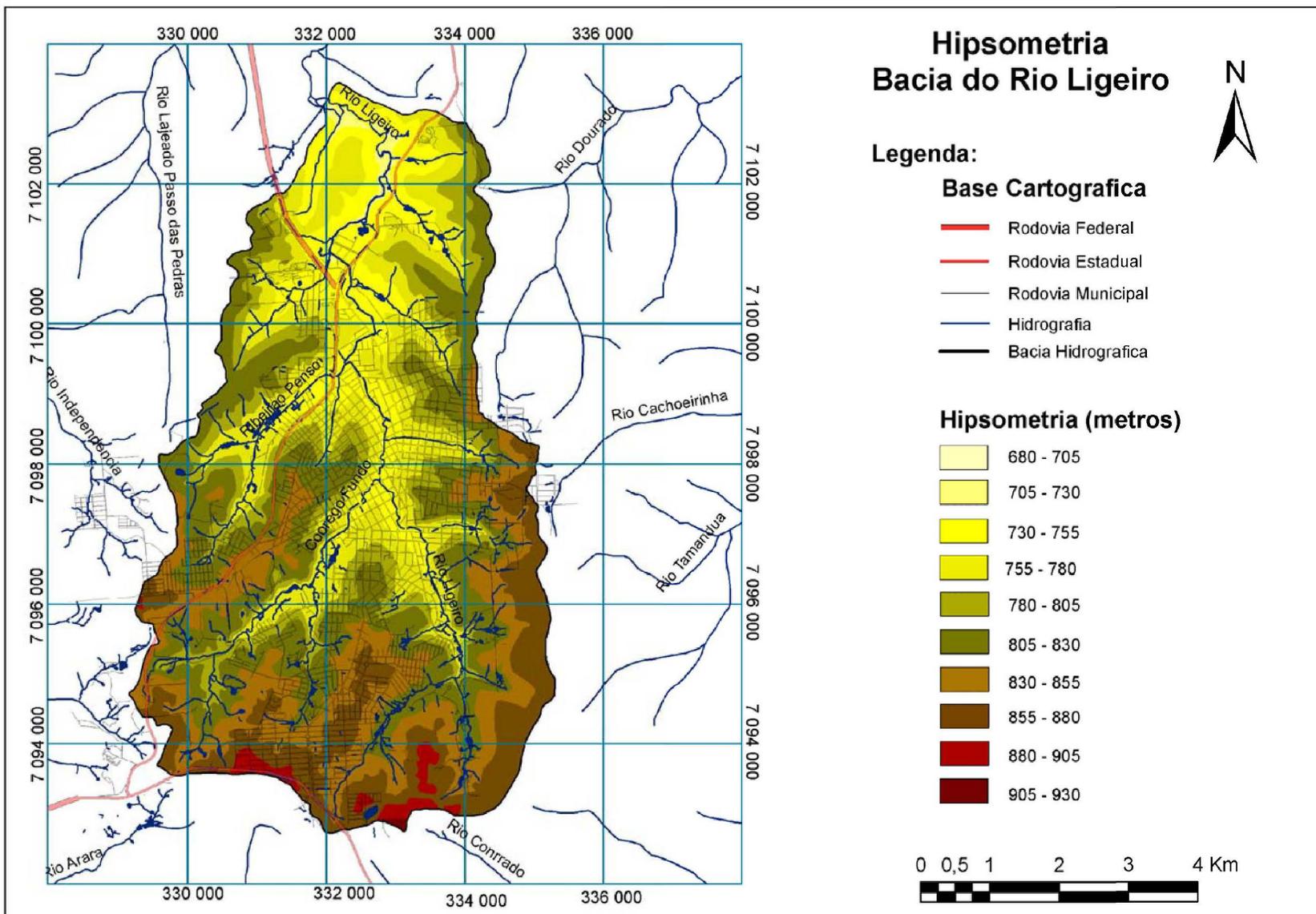
5.1.2 Mapa Hipsométrico

O Mapa Hipsométrico exposto (Figura 25) foi elaborado após gerar-se uma grade com espaçamento de 5 m, sendo feito na seqüência o fatiamento a cada 25 m, a partir da cota inicial de 680 m, até a cota final de 910 m.

Apesar de não ser necessário conhecer a altimetria para aplicar as equações que calculam o Fator de Segurança, optou-se em elaborar o Mapa Hipsométrico para servir como uma ferramenta de auxílio na análise dos diversos mapas produzidos.

Para a hipsometria da área adotou-se o fatiamento efetuado por Florenzano (1993). Este fatiamento está de acordo também com os trabalhos referentes a riscos de deslizamentos, como o de Guimarães *et al.* (1998). A partir da cota 680 foram estabelecidas as demais classes, obtendo os seguintes intervalos em metros: 680-705, 705-730, 730-755, 755-780, 780-805, 805-830, 830-855, 855-880, 880-905, 905-930.

FIGURA 25 MAPA HIPSONIÉTRICO



Fonte: Obtido automaticamente à partir do MNT

5.1.3 Mapa de Declividade

A elaboração do mapa de declividade consistiu em determinar áreas no terreno com um mesmo intervalo de inclinações. O primeiro passo foi importar para o banco de dados as curvas de nível, com intervalo de 1 em 1 m, para na seqüência gerar o Modelo Numérico do Terreno (MNT), através do *software* ArcMap.

Utilizando a função *SLOPE* do ArcMap, foi possível elaborar o Mapa de Declividade da área em graus e em porcentagem. O *SLOPE* utiliza um método de interpolação especificamente projetado para criar modelos digitais do terreno hidrologicamente corretos, baseados em dados topográficos (curvas de nível, pontos cotados e hidrografia). O mapa obtido foi reclassificado de forma a gerar dez classes de declividade, segundo intervalos utilizados em Tabalipa (2002).

O intervalo de classe de declividade, além de considerar a variação do relevo da área, procurou-se atender aos critérios necessários para outras avaliações como erosão, movimentos de massa, loteamentos, entre outros.

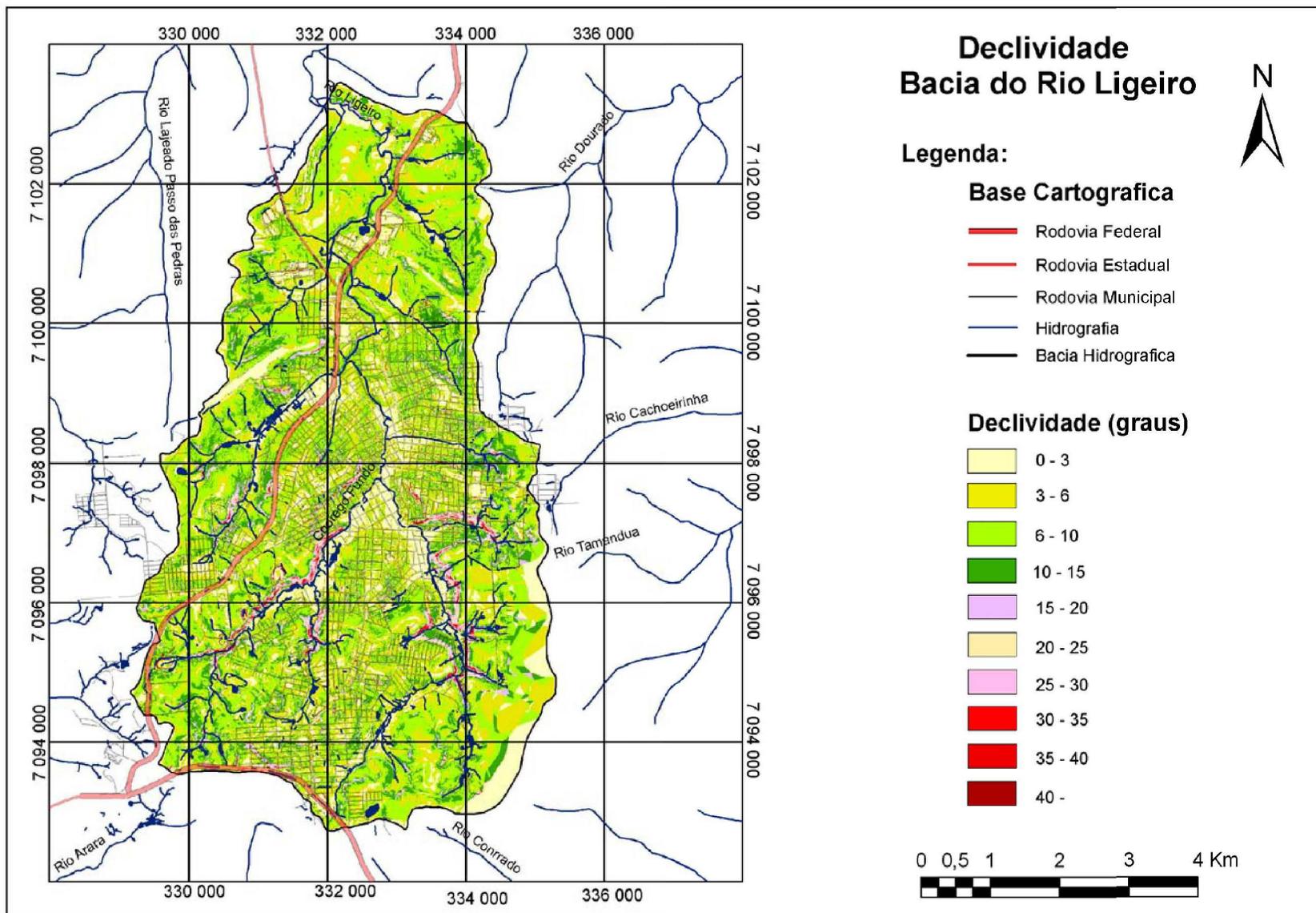
As classes adotadas foram: 1) 0 – 3°, 2) 3 – 6°, 3) 6 – 10°, 4) 10 – 15°, 5) 15 – 20°, 6) 20 – 25°, 7) 25 – 30°, 8) 30 – 35°, 9) 35 – 40°, 10) 40° - >, (quadro 09).

classes	Intervalos de declividade		Área (km ²)
	(°)	(%)	
1	0 – 3°	0 – 5,24%	8,20
2	3 – 6°	5,24 – 10,5%	10,97
3	6 – 10°	10,5 – 17,6%	14,48
4	10 – 15°	17,6 – 26,8%	6,45
5	15 – 20°	26,8 – 36,4%	1,81
6	20 – 25°	36,4 – 46,6%	0,93
7	25 – 30°	46,6 – 57,7%	0,55
8	30 – 35°	57,7 – 70%	0,31
9	35 – 40°	70 – 83,9%	0,15
10	40° - >	83,9 - >	0,16
Área total dos intervalos de declividade			44,00

QUADRO 09 – CÁLCULO DAS ÁREAS PARA OS INTERVALOS DE DECLIVIDADE E PRINCIPAIS INDICAÇÕES

A partir do MNT realizado e obedecendo aos critérios acima descritos, elaborou-se o Mapa de Declividade (figura 26).

FIGURA 26 – MAPA DE DECLIVIDADE



Fonte: Obtido automaticamente à partir do MNT.

5.1.4 Mapa de Orientação das Encostas

A direção das encostas foi gerada através do *ASPECT*, ferramenta do ArcMap que identifica a direção das vertentes baseando-se na direção da máxima declividade de cada célula com seus vizinhos. Os valores de cada célula do *grid* gerado é a direção de bússola do *aspect*. O conhecimento da orientação das encostas é importante para o fornecimento de informações sobre a exposição das mesmas às variações climatológicas, como por exemplo, vento e insolação.

Por sua vez o conhecimento da orientação das encostas é fundamental para este estudo pois as equações usadas para o cálculo do Fator de Segurança com vegetação utilizam a velocidade do vento como uma das variáveis. Como visto anteriormente no item 4.1.2.3 Ventos, no Capítulo 4, a velocidade com que o vento sopra é diferente em cada direção, ou seja, dependendo da orientação da encosta, a vegetação sofrerá esforços diferentes sob ação do vento.

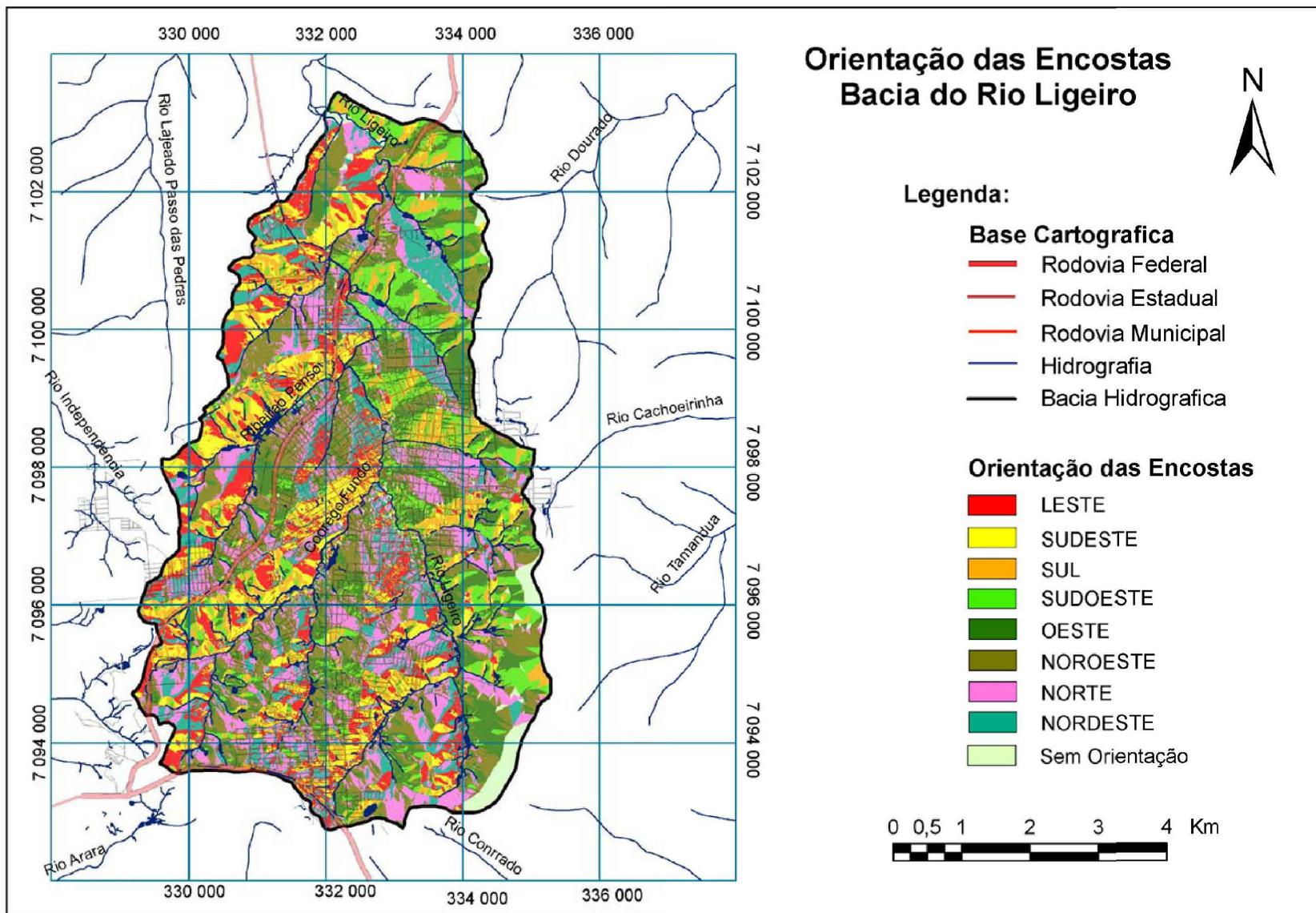
Os valores encontrados foram atribuídos nas áreas cujas tipologias de vegetação são constituídas por árvores altas (superiores a 20m), conforme quadro 10.

TIPO DE VEGETAÇÃO	σ_a	σ_{ve}	S_r	T
Floresta	3,6	70 Km/h – 0,6270 60 Km/h – 0,4428 56 Km/h – 0,3857 52 Km/h – 0,3326 48 Km/h – 0,2834 42 Km/h – 0,2170 40 Km/h – 0,1968 35 Km/h – 0,1507	Profundidade do solo < 3,00m = 5,9	5,0
Capoeira	2,0	70 Km/h – 0,6270 60 Km/h – 0,4428 56 Km/h – 0,3857 52 Km/h – 0,3326 48 Km/h – 0,2834 42 Km/h – 0,2170 40 Km/h – 0,1968 35 Km/h – 0,1507	Profundidade do solo < 1,50m = 5,9	5,0
Agricultura	-	-	Profundidade do solo < 0,75m = 5,9	-

QUADRO 10 – VALORES ATRIBUÍDOS AOS PARÂMETROS DE COBERTURA VEGETAL (σ_{ve}), (S_R) E (T) EM RELAÇÃO À CADA TIPOLOGIA VEGETAL.

Seria um erro usar uma velocidade igual em todas as direções, uma vez que como visto anteriormente, para cada direção, há uma velocidade diferente de vento correspondente. O Mapa de Orientação das Encostas é apresentado na Figura 27.

FIGURA 27 – MAPA DE ORIENTAÇÃO DAS ENCOSTAS



Fonte: Obtido automaticamente à partir do MNT

5.1.5 Mapa Geológico

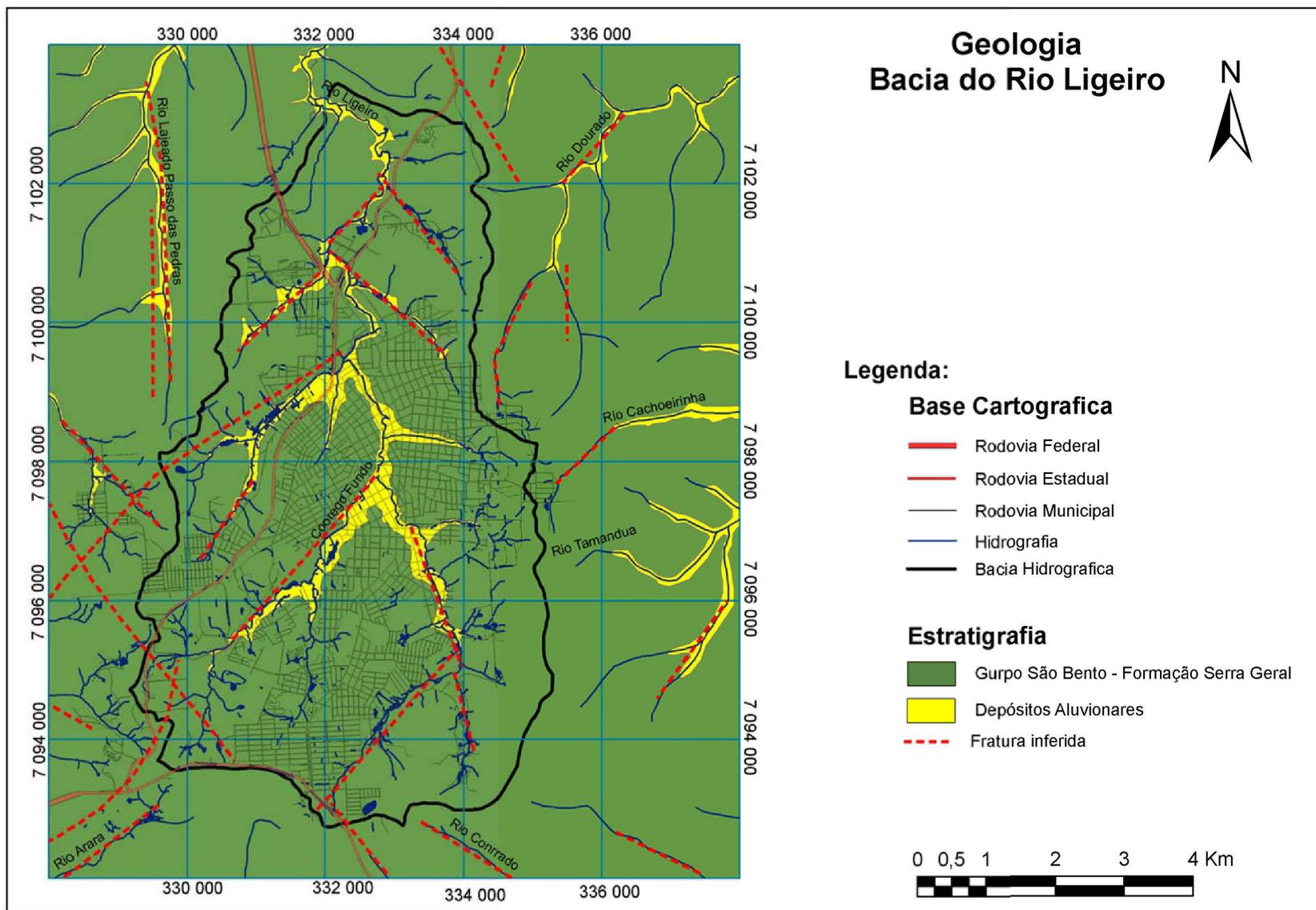
Na área em estudo, as feições estruturais existentes observáveis em fotografia aérea são feições lineares, alinhadas segundo a direção preferencial NE e NW, muitas vezes condicionando da rede de drenagem que apresenta uma configuração subparalela, especialmente pelo fraturamento com direção NW-SE. Podem-se caracterizar algumas dessas feições lineares como fraturas ou falhas.

Na área mapeada ocorre um sistema de fratura predominantemente na direção NW-SE e, secundariamente na direção NE-SW.

Estão cartografados também no mapa geológico os depósitos aluvionares que ocupam as áreas de fundo de vale. Esses depósitos ocorrem principalmente na várzea do rio Ligeiro, em área sujeita a inundação e são formados predominantemente por sedimentos recentes, inconsolidados, com proporções variáveis de matéria orgânica, de coloração castanha a cinza escura. São depósitos compostos por partículas argilosas e arenosa, desagregadas dos solos formados sobre as rochas basálticas, através do transporte pelas águas pluviais e enxurradas.

A partir de mapas geológicos confeccionados por Mineropar (2006) e Hidroservice (1981) elaborou-se um Mapa Geológico que serve de base para os demais trabalhos (figura 28).

FIGURA 28 – MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO E ENTORNO
 FONTE: MINEROPAR (2006); HIDROSERVICE (1980);



Fonte: MNEROPAR (2005); HIDROSERVICE (1980); TABALIPA (2002)

5.1.6 Mapa de Uso e Ocupação da Área

O Mapa de Uso e Ocupação do Solo (figura 29) foi de grande utilidade para a separação das áreas de cobertura vegetal de porte arbóreo (que influenciam no fator de segurança das encostas), das áreas de vegetação de porte mais ralo (de pouca relevância na aplicação da equação de fatores de segurança) e das áreas sem vegetação.

Com a classificação da imagem do satélite QUICKBIRD de dezembro de 2005, o próximo passo foi organizar as informações em forma de banco de dados e elaborar o Mapa de Uso e Ocupação do Solo da área estudada.

As classes identificadas no mapeamento de uso e ocupação do solo basearam-se seguindo o critério proposto pelo IBGE (1992) e o existente em Tabalipa (2002). As classes cobertas por estratos vegetais, foram divididas conforme o seu porte e estágio de regeneração, ficando a legenda do mapa de uso e ocupação do solo assim representado:

Agricultura: a essa classe corresponde a todas as áreas de cultivo, independentemente do tipo de cultura e se de espécies perenes ou temporárias.

Campo: classe que corresponde às áreas de pastagem sem presença arbustiva.

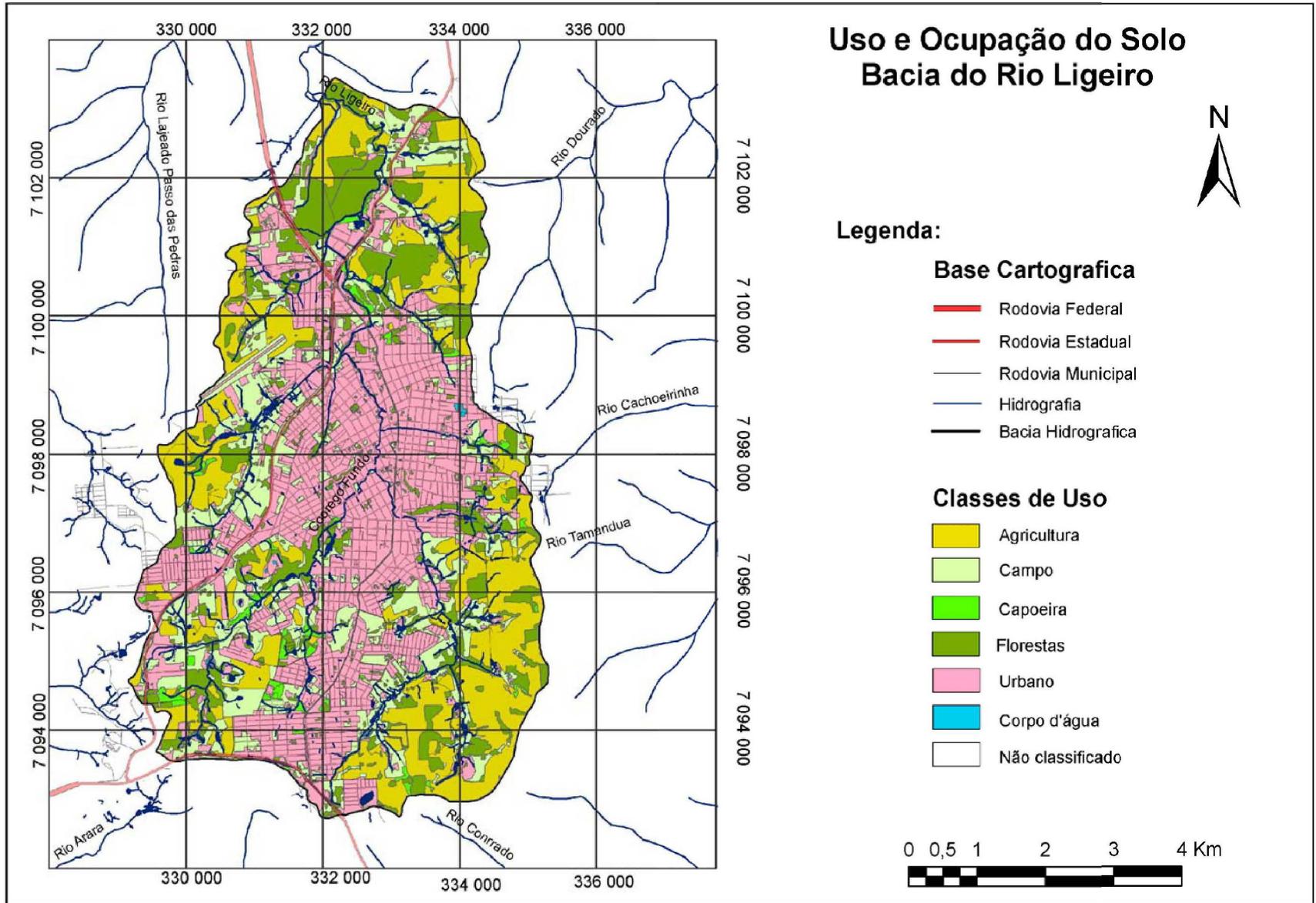
Urbana: área com ocupação urbana, lotes residenciais, comerciais, industriais e infra-estrutura pública.

Capoeira: São comunidades vegetais de porte ralo a médio, que incluem os estágios da vegetação herbácea, regenerando após sofrerem corte raso.

Florestas: Consiste em toda a vegetação da formação pioneira e floresta secundária. A formação pioneira apresenta na sua estrutura original mais do que um estrato arbóreo. A floresta secundária sofreu regeneração, após o corte raso, apresentando assim, diferentes estágios de vegetação, conforme a sua recuperação.

Corpo d'água: classe que representa os rios e lagos existentes na área de estudo.

FIGURA 29 – MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA ÁREA ESTUDADA



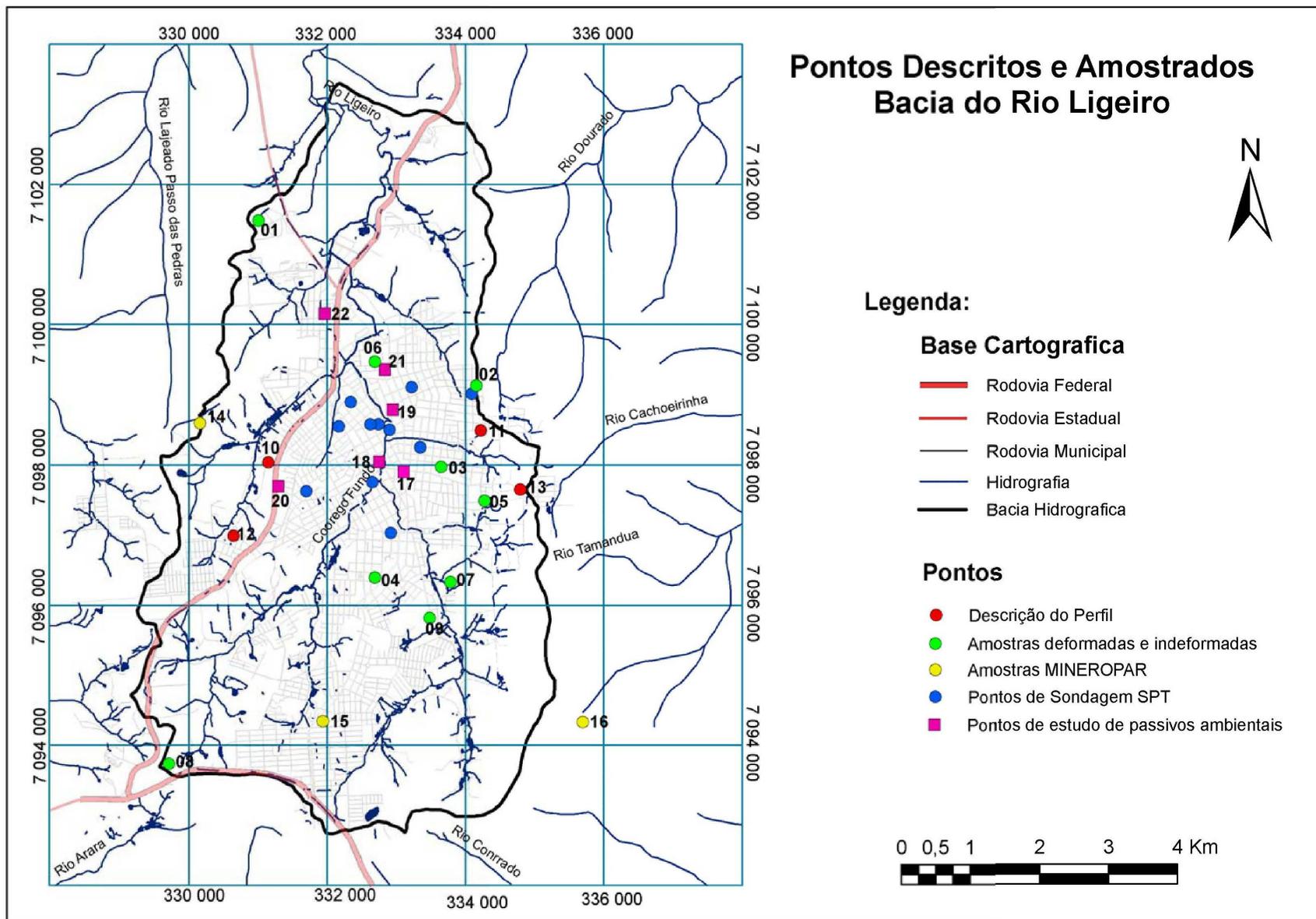
5.1.7 Pontos Descritos e Amostragem de Solo

A escolha dos pontos de amostragem de solo foi realizada de forma a abranger todos os tipos existentes na bacia, sendo auxiliado por meio de cartas topográficas, GPS e fotografias, tendo por base o Mapa Pedológico existente em Tabalipa (2002), criado a partir da classificação pedológica sugerida pela Embrapa (1999).

O parâmetro adotado para a escolha dos pontos foi a facilidade de acesso e a distribuição na bacia de forma a obter uma boa distribuição na área, conforme visualizada na figura 30. Também se utilizou de trabalhos anteriores realizados na área, tais como, sondagens geológicas a percussão – SPT (*Standard Penetration Test*), avaliação geológica e geotécnica do município realizado pela MINEROPAR e investigações de passivos ambientais nos solos dos postos de gasolina do município. Os pontos utilizados para se realizar a descrição dos solos da bacia estudada estão divididos da seguinte forma:

Nos pontos de 1 a 9, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, sendo realizada a descrição do solo *in situ* e ensaios nos laboratórios da UFPR (LAME e LabESed). Nos pontos 10 a 13 coletaram-se apenas amostras deformadas, depois analisadas do laboratório de solos da UTFPR de Pato Branco. As informações dos pontos 14 a 16 foram retiradas do trabalho: Avaliação Geológica e Geotécnica para o Planejamento Territorial e Urbano do Município de Pato Branco, MINEROPAR (2006). Finalmente, os pontos 17 a 21 foram retirados de Estudos de Passivos Ambientais em Postos de Gasolina do Município de Pato Branco, 2004. A relação de todos os pontos analisados neste estudo está na tabela 16.

FIGURA 30 – MAPA DOS PONTOS DESCRITOS E AMOSTRADOS.



5.1.8 Mapa de Solos

O Mapa de Caracterização de Solos foi elaborado, inicialmente, a partir das informações constantes no Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná, Embrapa (1984), e Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná, Embrapa (1974); o primeiro, com mapa na escala 1: 600.000 e o segundo, com mapa na escala 1: 300.000. Também fez-se uso de informações existentes em Tabalipa (2002).

Dada a grande diferença de escalas, os mapas apresentavam erros grosseiros no ajuste cartográfico e foi realizada uma correção das feições poligonais, através de interpretações sobre imagem de satélite, fotografias aéreas e de sobreposição com outras feições, como geologia, declividade, altimetria, e direção das vertentes.

Também foram realizadas várias descrições de perfis e trabalhos de campo para verificar se as classes de solos obtidas no mapa correspondiam às classes de solos encontradas em campo, bem como se procedeu a coleta de amostras de solo para análise em laboratório.

Inicialmente, o Mapa de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná, Embrapa (1974), foi escaneado e, na seqüência, georreferenciado por meio do software ArcMap, recortando apenas a área de interesse conforme figura 31.

A nomenclatura foi definida segundo critério estabelecido pela Embrapa (1999), resultando nos seguintes tipos:

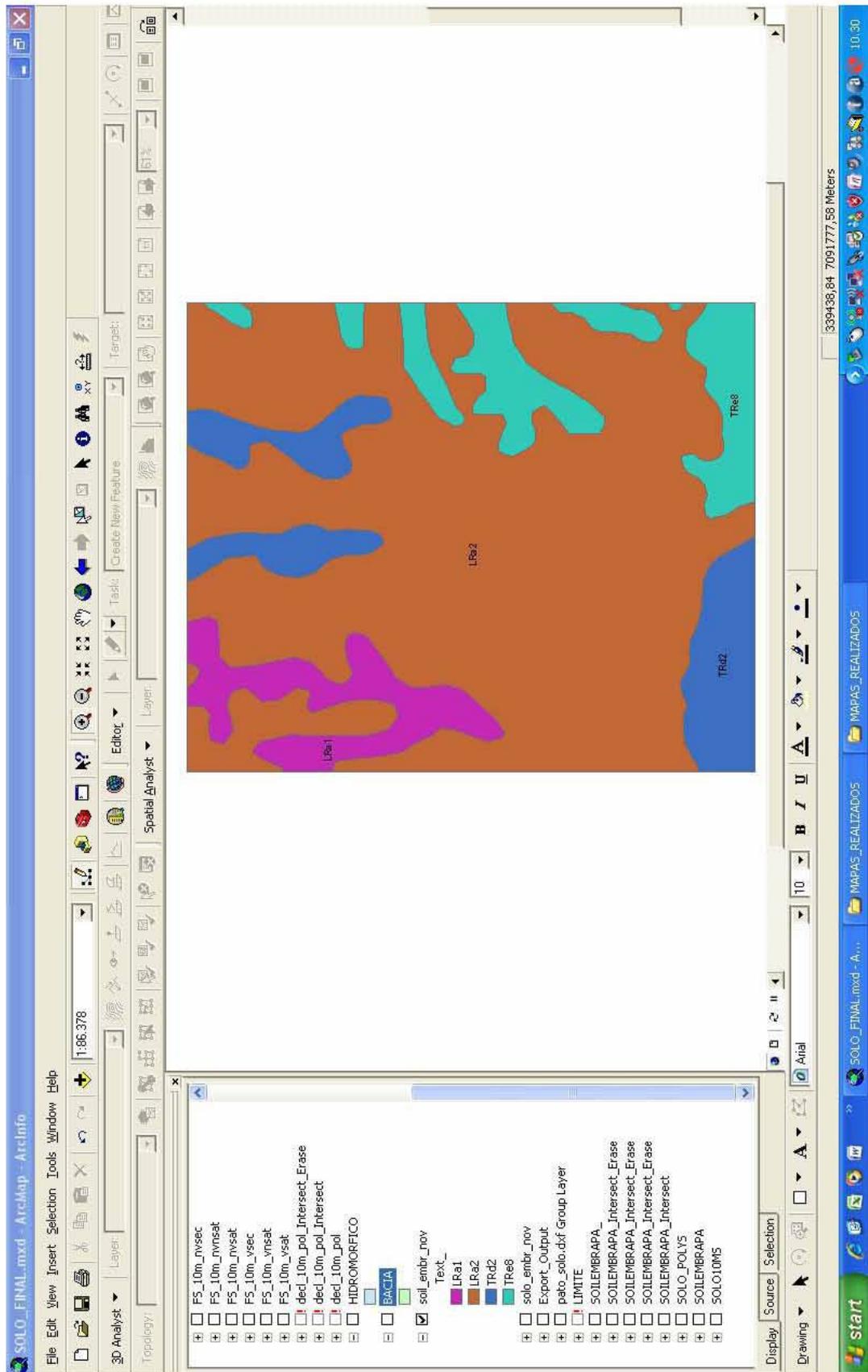


FIGURA 31 – TELA DO SOFTWARE ARCMAP COM O MAPA DE RECONHECIMENTO DOS SOLOS DO SUDOESTE, EMBRAPA (1974)

Os valores do Fator de Segurança (F_s) são bastante influenciados pela espessura dos solos. A profundidade dos perfis de cada classe de solo foi estimada baseando-se nos perfis descritos em campo e no referido no Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná, EMBRAPA (1974), cujos solos mais espessos não ultrapassaram 2m de espessura.

Porém, deve-se analisar que, neste estudo dos solos, a EMBRAPA não levou em consideração o horizonte C que é de pouca relevância para a pedologia, mas de grande importância em termos geotécnicos.

De uma forma genérica, quando a soma dos horizontes A e B atinge valores próximos a dois metros, tem-se averiguado em trabalhos de campo, que a espessura do horizonte C, também se encontra em torno de dois metros. Com isto em vista, foram recalculados os índices de segurança somando-se esses dois metros na espessura total do solo.

Já nos solos com espessura igual ou inferior a 1m, o horizonte C apresenta-se pouco evoluído e de espessura reduzida, tendo assim, nenhuma relevância para efeito de cálculo de fatores de segurança, sendo mantida a espessura descrita pela Embrapa (1974). Baseando-se nessas informações, os Fatores de Segurança foram calculados somando-se o horizonte C na espessura do solo.

Na elaboração do mapa de solos foi necessário fazer uma associação dos tipos de solo e suas inclusões, com o tipo de relevo e com a declividade do terreno, o que possibilitou a produção de um novo mapa mais detalhado e já adotando a nova Classificação de Solos da Embrapa, conforme demonstrado no quadro 11.

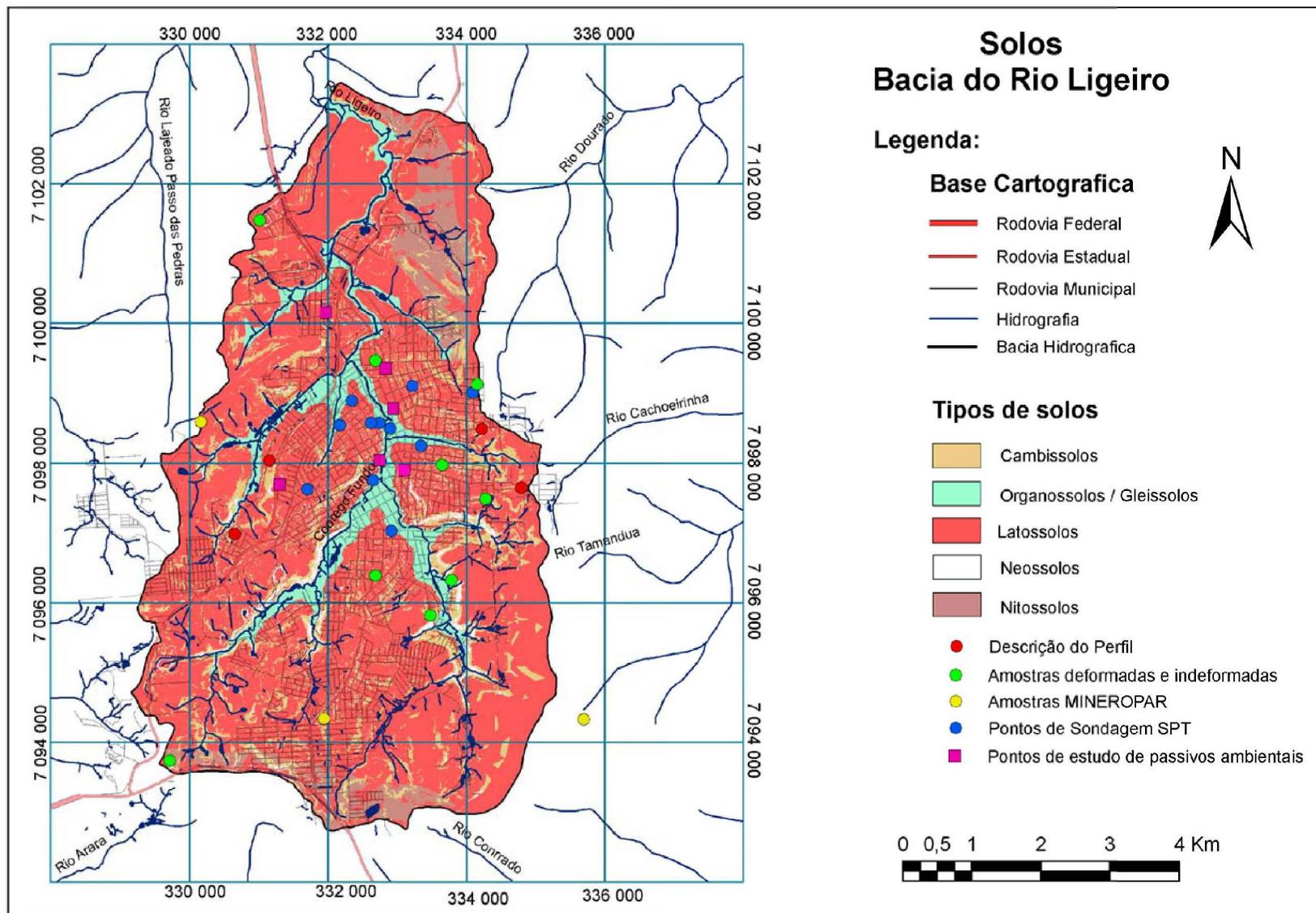
SOLOS	DECLIVIDADE	RELEVO	INCLUSÕES	Declividade inclusões	Relevo inclusões
LRa1 (LATOSSOLO Roxo Álico)	0 - 5%	Suave ondulado	LRa2	3 - 8%	Suave ondulado
			TRd2	8 - 20%	Ondulado
			Cambissolos	20 - 45%	Forte ondulado
			Solos Litólicos	> - 45%	montanhoso
LRa2 (LATOSSOLO Roxo Álico)	8 - 15%	Ondulado	LRa1	3 - 8%	Suave ondulado
			LRd3	3 - 8%	Suave ondulado
			Terra Roxa Estrut.	8 - 20%	Ondulado
			Cambissolos	20 - 45%	Forte ondulado
			Solos Litólicos	> - 45%	montanhoso
TRd2 (TERRA Roxa Estruturada)	10 - 20%	Ondulado	TRd1	8 - 20%	Ondulado
			LRd3	8 - 20%	Ondulado
			LRa1	3 - 8%	Suave ondulado
(LATOSSOLO Roxo Distrófico)	< - 10%	Suave ondulado	LRa2	8 - 20%	ondulado
			Cambissolos	20 - 45%	Forte ondulado
			Solos Litólicos	> - 45%	montanhoso
TRe8 (TERRA Roxa Estruturada)	20 - 45%	Forte ondulado	LRe1	3 - 8%	Suave ondulado
Cambissolos	20 - 45%	Forte ondulado	TRe2	8 - 20%	Ondulado
Solos Litólicos	> - 45%	Montanhoso			

QUADRO 11 – CLASSES DE SOLOS QUE OCORREM NA REGIÃO DE ESTUDO COM SUAS INCLUSÕES

FONTE: EMBRAPA (1974).

O próximo passo foi montar um banco de dados de solos, no *software* ArcMap, com as informações do quadro 11, juntamente com os dados levantados em campo e no laboratório, passando à construção de um novo mapa baseado em tais informações. O produto final desta etapa pode ser observado na figura 32, em forma de um Mapa de Solos, com as seguintes classes: Latossolos (Latossolo Roxo Álico e Distrófico), Nitossolos (Terra Roxa Estruturada), Cambissolos (Cambissolos Eutróficos, Distróficos e Álicos), Neossolos (Litólicos) e Organossolos/Gleissolos (Depósitos Aluvionares).

FIGURA 32 – MAPA DE SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO



Fonte: EMBRAPA & IAPAR - Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Paraná - 1974

Por meio da elaboração do Mapa de Solos, foi possível se conhecer quais áreas estão ocupadas por determinado solo, bem como, o tamanho da área de cada classe de solo na bacia estudada, de acordo com o quadro 12.

Classe de Solo	Área (Km ²)
Neossolos	1,14
Cambissolos	5,80
Nitossolos	2,56
Latosolos	30,36
Gleissolos	4,14
Área Total	44,00

QUADRO 12 – ÁREA CORRESPONDENTE A CADA CLASSE DE SOLO NA ÁREA ESTUDADA

5.2 DESCRIÇÃO DOS SOLOS

Em pontos pré-determinados da área de estudo os solos foram descritos *in situ*, considerando-se aspectos gerais do afloramento, localização na área, relevo, drenagem, existência ou não de erosão e situações de risco, uso atual, além da cor e da textura. As amostras de solos também foram analisadas em laboratório. Para uma melhor compreensão dos solos e ensaios realizados organizou-se a tabela abaixo. (tabela 11)

TABELA 11. DESCRIÇÃO DOS SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO FEITA *IN LOCO*.

PONTO 1	AMOSTRA		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latosolo Roxo Álico)*
	2.0269.06 (A)	coordenadas			
	x	y	799		
	331.004	7.101.504			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>					
			<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>Localização: UTFPR Relevo: Ondulado Situação: Terço médio da encosta, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: campo Cor: Vermelho escuro 2,5 YR 4/6 estrutura granular moderada e ligeiramente plástica, friável Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 1,5m</p>		

PONTO 2	AMOSTRA	2.0270.06 (B)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latossolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	833		
		334.117	7.099.131			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Indeformada e Deformada

Localização: bairro Pinheiros (Nossa Escola)
Relevo: Ondulado
Situação: Terreno com superfície aplainada em topo de morro, boa drenagem e erosão não aparente
Uso atual: vegetação preservada
Cor: Vermelho escuro 2,5 YR 4/6 estrutura granular moderada e ligeiramente plástico, friável
Textura: Argilosa
Profundidade de amostragem: 1,5m

Cont. tabela 11

PONTO 3	AMOSTRA	2.0263.06 (C)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	CAMBISSOLO (Cambissolo Eutrófico)*
	coordenadas	x	y	815		
		333.616	7.098.000			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Indeformada e Deformada

Localização: bairro La Salle
Relevo: Forte Ondulado
Situação: Terço superior da encosta, boa drenagem e erosão não aparente
Uso atual: campo
Cor: Bruno avermelhado 5 YR 4/4 fraca, média em blocos angulares pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição gradual e irregular
Textura: Argilosa
Profundidade de amostragem: 0,5m

PONTO 4	AMOSTRA	2.0266.06 (D)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latossolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	755		
		332.680	7.096.433			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Indeformada e Deformada

Localização: bairro Cristo Rei
Relevo: Pouco Ondulado
Situação: Terço superior da encosta, boa drenagem e erosão não aparente
Uso atual: terreno baldio
Cor: Vermelho escuro 2,5 YR 4/6 estrutura granular moderada e ligeiramente plástico, friável
Textura: Argilosa
Profundidade de amostragem: 1,5m

PONTO 5	AMOSTRA	2.0267.06 (F)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	CAMBISSOLO (Cambissolo Eutrófico)*
	coordenadas	x	y	841		
		334.269	7.097.543			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>Localização: bairro La Salle Relevo: Ondulado Situação: Terço superior da encosta, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: terreno baldio Cor: Bruno avermelhado 5 YR 4/4 fraca, média em blocos angulares pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição gradual e irregular Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 0,5m</p>		

Cont. tabela 11

PONTO 6	AMOSTRA	2.0264.06 (E)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latossolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	743		
		332.680	7.099.458			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>Localização: bairro Bortot Relevo: Plano Situação: Terço superior da encosta, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: terreno baldio Cor: Vermelho escuro 2,5 YR 4/6 estrutura granular moderada e ligeiramente plástico, friável Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 1,5m</p>		

PONTO 7	AMOSTRA	2.0273.06 (G)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	CAMBISSOLO (Cambissolo Eutrófico)*
	coordenadas	x	y	790		
		333.769	7.096.367			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>Localização: bairro Bonato Relevo: Forte Ondulado Situação: Terço superior da encosta, boa drenagem, rastejos e erosão aparente Uso atual: campo Cor: Bruno avermelhado 5 YR 4/4 fraca, média em blocos angulares pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição gradual e irregular Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 0,5m</p>		

PONTO 8	AMOSTRA	2.0268.06 (H)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO:	NITOSSOLO (Terra Roxa Estruturada Distrófica)*
	coordenadas	x	y	870	classificação conforme EMBRAPA (1999)	
		329.677	7.093.734			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>Localização: bairro São Cristóvão Relevo: Ondulado Situação: Solo exposto em barranco, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: campo Cor: Bruno avermelhado escuro acizentado 2,5 YR 4/6 estrutura em blocos subangulares fortemente desenvolvido Textura: Argilo Siltosa Profundidade de amostragem: 1,5m</p>		
Cont. tabela 11						
PONTO 9	AMOSTRA	2.0274.06 (I)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO:	NEOSSOLO (Litossolo Eutrófico)*
	coordenadas	x	y	790	classificação conforme EMBRAPA (1999)	
		333.464	7.095.823			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada Localização: bairro Novo Horizonte Relevo: Forte Ondulado Situação: Solo exposto em barranco, terço médio da encosta, boa drenagem e erosão aparente Uso atual: campo Cor: Vermelho escuro acizentado 2,5 YR 3/3 estrutura granular média e fracamente desenvolvida, ligeiramente duro e plástico quando úmido Textura: Argilo Siltosa Profundidade de amostragem: 0,3m</p>		
PONTO 10	AMOSTRA	PERFIL 01 (2002)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO:	NITOSSOLO (Terra Roxa Estruturada Distrófica)*
	coordenadas	x	y	778	classificação conforme EMBRAPA (1999)	
		331.113	7.098.087			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Deformada</p> <p>Localização: Bairro Bela Vista, corte de estrada Relevo: forte ondulado Situação: Solo exposto em barranco, Terço médio da encosta, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: pastagem Cor: Bruno forte 7,5 YR 4/6 moderada, média em blocos angulares, pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição difusa e plana Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 1,5m</p>		

PONTO 11	AMOSTRA	PERFIL 02 (2002)	ALTITUDE (m)		TIPO DE SOLO:	NEOSSOLO (Litossolo Eutrófico)*
	coordenadas	x	y	764	classificação conforme EMBRAPA (1999)	
		334.182	7.098.500			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
			<p>Amostra: Deformada Localização: Bairro La Salle Relevo: forte ondulado Situação: Terço médio da encosta, boa drenagem e erosão laminar Uso atual: cultura de milho Cor: Bruno avermelhado escuro 2,5 YR 3/3 argiloso, forte a média granular, pouco plástico e pouco pegajoso Textura: Argilo Arenosa Profundidade de amostragem: 0,3m</p>			

Cont. tabela 11

PONTO 12	AMOSTRA	PERFIL 03 (2002)	ALTITUDE (m)		TIPO DE SOLO:	CAMBISSOLO (Cambissolo Eutrófico)*
	coordenadas	x	y	812	classificação conforme EMBRAPA (1999)	
		330.613	7.097.020			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
			<p>Amostra: Deformada Localização: Bairro Bela Vista Relevo: forte ondulado Situação: Terço médio da encosta, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: pastagem Cor: Bruno avermelhado 5 YR 4/4 fraca, média em blocos angulares pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição gradual e irregular Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 0,5m</p>			

PONTO 13	AMOSTRA	PERFIL 04 (2002)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latosolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	874		
		334.770	7.097.651			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Deformada</p> <p>Localização: Bairro La Salle Relevo: Ondulado Situação: Terço superior da encosta, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: Cultura anual Cor: Vermelho Acinzentado Escuro 2,5 YR 3/4 forte, pequena em grânulos, friável, pegajoso e não plástico, transição difusa e plana. Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 1,5m</p>		

Cont. tabela 11

PONTO 14	AMOSTRA	MINEROPAR 459		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latosolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	803		
		330.134	7.098.609			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>Solo residual. Pista de MotoCross, onde se pretende fazer o novo cemitério municipal. Cor: Marrom Avermelhado 2,5 YR 3/4 Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 0,4m</p>		

PONTO 15	AMOSTRA	MINEROPAR 523		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	CAMBISSOLO (Cambissolo Eutrófico)*
	coordenadas	x	y	839		
		331.940	7.094.365			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>solo residual. Basalto maciço. Coleta de amostra indeformada Cor: Marrom Avermelhado 2,5 YR 4/6 Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 0,4m</p>		

PONTO 16	AMOSTRA	MINEROPAR 486		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latosolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	861		
		335.662	7.094.321			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Indeformada e Deformada
 Basalto maciço. Coleta de amostra em solo residual
 Cor: Marrom Avermelhado 2,5 YR 4/6
 Textura: Argilosa
 Profundidade de amostragem: 0,4m

Cont. tabela 11

PONTO 17	AMOSTRA	PASSIVO 01		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latosolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	761		
		333.094	7.097.913			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Deformada
 Localização: bairro Centro
 Relevo: plano
 Uso atual: urbano
 Cor: Bruno forte 7,5 YR 4/6 moderada, média em blocos angulares, pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição difusa e plana
 Textura: Argilosa
 Profundidade de amostragem: até 2m

PONTO 18	AMOSTRA	PASSIVO 02		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	ORGANOSSOLO/ GLEISSOLO (Hidromórfico)*
	coordenadas	x	y	752		
		332.724	7.098.065			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Deformada
 Localização: bairro Centro
 Relevo: plano
 Uso atual: urbano
 Cor: acinzentada, lençol freático raso e muita presença de matéria orgânica
 Textura: Argilosa
 Profundidade de amostragem: até 3m

PONTO 19	AMOSTRA	PASSIVO 03		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	ORGANOSSOLO/ GLEISSOLO (Hidromórfico)*
	coordenadas	x	y	747		
		332.920	7.098.783			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Deformada

Localização: bairro Brasília
 Relevo: plano
 Uso atual: urbano
 Cor: acinzentada, lençol freático raso e muita presença de matéria orgânica
 Textura: Argilosa
 Profundidade de amostragem: até 3m

Conclusão tabela 11

PONTO 20	AMOSTRA	PASSIVO 04		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latossolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	765		
		332.811	7.099.393			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Deformada

Localização: bairro Bortot
 Relevo: plano
 Uso atual: urbano
 Cor: Bruno forte 7,5 YR 4/6 moderada, média em blocos angulares, pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição difusa e plana
 Textura: Argilosa
 Profundidade de amostragem: até 3m

PONTO 21	AMOSTRA	PASSIVO 05		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO: classificação conforme EMBRAPA (1999)	LATOSSOLO (Latossolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	775		
		331.897	7.100.176			

DESCRIÇÃO *in situ*



Amostra: Deformada

Localização: bairro Trevo Patinho
 Relevo: plano
 Uso atual: urbano
 Cor: Bruno forte 7,5 YR 4/6 moderada, média em blocos angulares, pegajoso e ligeiramente plástico, friável, transição difusa e plana
 Textura: Argilosa
 Profundidade de amostragem: até 5m

*EMBRAPA(1974)

5.2.1 Coleta de Amostras Indeformadas de Solo

A coleta de todas as amostras foi realizada conforme a norma NBR 9604/86, segundo o manual de procedimento LAME (Laboratório de Materiais e Estruturas) 2.01.01.

a) Amostras para Ensaio de Cisalhamento Direto

O procedimento de coleta de amostras indeformadas de solo para o ensaio de cisalhamento obedeceu à norma 002/1994 do DNER (1994). Para este ensaio foram coletadas amostras de solo em nove pontos distintos da bacia estudada, representando os solos de diferente classificação pedológica: 4 pontos de Latossolo, 3 pontos de Cambissolo, um ponto de Nitossolo e um ponto de Neossolo. A divisão desta forma do número das amostras prendeu-se ao fato de que a maior parte da área é coberta por Latossolos e que durante o trabalho de campo percebeu-se que os Cambissolos se apresentavam instáveis (rastejos, erosões).

Os Solos Gleissolos (Depósitos aluvionares) não foram analisados, uma vez na área estudada, ocupam planícies, com pouca declividade, não apresentando risco de escorregamentos ou demais movimentos.

Em solos profundos, como os Latossolos e Nitossolo as coletas foram feitas a 1,5m de profundidade. Nos Cambissolos, as amostras foram retiradas na profundidade de 0,50m e nos Litossolos as amostras foram retiradas de aproximadamente 0,30m. A redução da profundidade destes últimos solos foi devido à dificuldade de escavação decorrente da dureza do solo. Em cada ponto coletaram-se amostras em cilindro de PVC de medidas: diâmetro igual a 15 cm e comprimento de 30 cm. No caso de haver necessidade de repetição do ensaio, num mesmo nível planimétrico, coletaram-se duas amostras. (ver quadro 13). Todas as amostragens dos cilindros foram feitas na vertical (figura 33). Para que o solo mantivesse seu teor de umidade natural, as amostras foram impermeabilizadas com parafina para serem encaminhadas a câmara úmida para aguardar os ensaios. Os detalhes das coletas estão na figura 34 (A e B)

Amostra	Classe de solo	Símbolo	Profundidade	Coletores de amostras
02.269.06	LATOSSOLO (Latossolo Roxo Álico)	LRa	1,50m	Cilindro de PVC:
02.270.06				
02.266.06				
02.264.06				

02.268.06	NITOSSOLO (Terra Roxa Estruturada Distrófica)	TRd		Diâmetro: 15 cm Comprimento: 30 cm
02.263.06	CAMBISSOLO Cambissolo Eutrófico	Ce	0,50m	
02.267.06				
02.273.06				
02.274.06	NEOSSOLO (Litossolo Eutrófico)	Le	0,30m	

QUADRO 13. PROFUNDIDADE DE COLETA DAS AMOSTRAS PARA CISALHAMENTO DIRETO E DIMENSÕES DOS COLETORES.



FIGURA 33 – COLETA DAS AMOSTRAS NA POSIÇÃO VERTICAL.

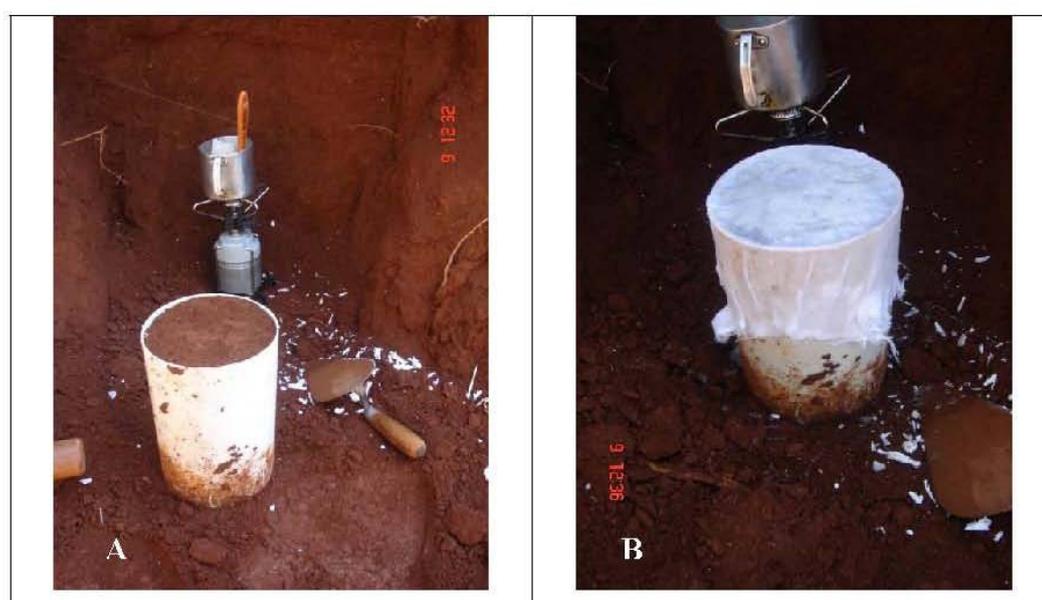


FIGURA 34 – DETALHES DA COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO, (A) MOLDAGEM E NIVELAMENTO DA AMOSTRA E (B) VEDAÇÃO DA AMOSTRA COM PARAFINA.

b) Amostra para Ensaio de Permeabilidade

As amostras para os ensaios de permeabilidade foram retiradas através de cilindros metálicos com diâmetro igual a 5cm e de 10cm de comprimento, segundo norma do DNER-002/1994. A coleta foi feita no mesmo ponto onde se retirou a amostra para o ensaio de cisalhamento. (figura 35).



FIGURA 35 – DETALHES DA AMOSTRA COLETADA PARA O ENSAIO DE PERMEABILIDADE

5.2.2 Coleta de Amostras Deformadas de Solo

Nos mesmos pontos e na mesma profundidade de onde se retiraram as amostras indeformadas, foram coletadas amostras deformadas de solo, numa quantidade aproximada de 2 kg cada.

5.2.3 Ensaios de Laboratório

As atividades de laboratório consistiram na caracterização dos solos através de ensaios de parâmetros geotécnicos para enfim, classificá-los em uma categoria de comportamento.

Os ensaios obedeceram às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), descritos no quadro 14.

ENSAIO	NORMA
Análise Granulométrica	NBR 7181/84
Teor de Umidade (h)	NBR 6457/86
Limite de Liquidez (LL)	NBR 6459/84
Limite de plasticidade (LP)	NBR 7180/84

Massa específica	DNER DPT M 93 - 63
Ensaio de Cisalhamento Direto	DRAINED DIRECT SHEAR TEST EM 1110-2-1906/70
Ensaio de Permeabilidade (K)	NBR 14545/00

QUADRO 14: ENSAIOS REALIZADOS E NORMALIZAÇÃO UTILIZADA

Os ensaios de análise granulométrica que constam da Tabela 12, foram realizados no LabESed (Laboratório de Estudos Sedimentológicos do Departamento de Geologia da UFPR). Todos demais ensaios foram realizados no LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas do LACTEC/UFPR.

5.2.3.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica é utilizada na identificação e classificação do solo, segundo os vários sistemas de classificação existentes, revelando a porcentagem dos diferentes tamanhos das partículas que compõem o solo.

Basicamente o ensaio consiste em se fazer o peneiramento do solo por meio de uma série de peneiras empilhadas em ordem crescente de abertura das malhas das mesmas. Estas aberturas representarão o diâmetro das partículas do solo, por definição. O peneiramento é efetuado para a fração do solo de granulometria mais grossa, isto é, aquela retida na peneira nº 200 (abertura de 0,074mm).

Para aqueles solos que passaram na peneira nº. 200, constituídos quase apenas de finos foram quantificados por volume, por meio do método de pipetagem que baseia-se na lei de Stokes, que tem como princípio básico a velocidade de decantação das partículas expressa na Lei de Stokes, conforme figura 36.

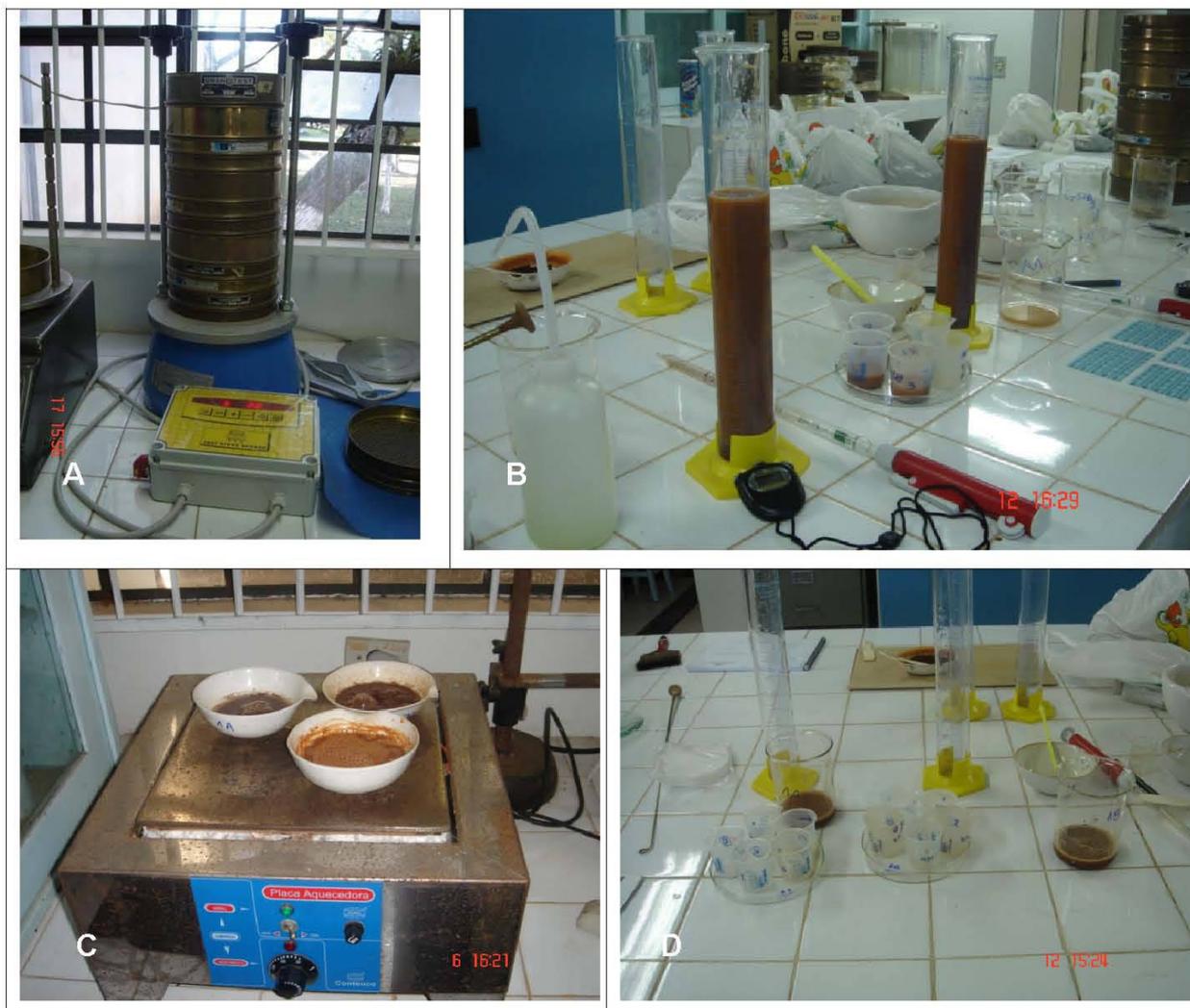


FIGURA 36 – DETALHES DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA REALIZADO: PENEIRAMENTO (A) SEDIMENTAÇÃO POR PIPETAGEM (B) SECAGEM DAS AMOSTRAS (C) E DIVISÃO DAS AMOSTRAS (D)

5.2.3.2 Teor de Umidade (W)

O teor de umidade, conforme Caputo, (1988) pode ser definido como sendo a quantidade de *água* (por peso) presente no solo, em relação ao peso do solo seco.

O procedimento adotado na realização deste o ensaio foi baseado na NBR 6457/86 da ABNT. O procedimento do ensaio consiste, primeiramente em, pesar o solo no estado natural (com a presença de água) e repetir a pesagem do solo (seco) após permanecer um determinado período em estufa. Através da razão entre o peso da água contida na massa de solo e o peso do sólido, encontra-se o teor de umidade expresso em porcentagem.

5.2.3.3 Limites de Atterberg

Os limites de consistência dos solos são também conhecidos como Limites de Atterberg.

Um solo de granulometria fina (silte, argila) pode ser encontrado em seu estado natural apresentando consistência que depende da quantidade de água presente em seus vazios.

Estes limites foram mais tarde melhor definidos por CASAGRANDE (1932) como sendo o teor de umidade do solo apresentado na mudança de estado, determinados sob as condições de ensaio.

Como consequência, o comportamento físico do solo (compressibilidade, resistência ao cisalhamento, permeabilidade) também dependerá desta quantidade de água. Atterberg definiu estados de consistência do solo denominando "limites" os pontos de transição de um estado a outro, são eles:

- a) "Limite de Liquidez" - fronteira entre os estados líquido e plástico.
- b) "Limite de Plasticidade" - fronteira entre os estado plástico e semi-sólido.

a) Limite de Liquidez (LL)

A fronteira convencional entre o estado líquido e o estado plástico (teor de umidade) foi chamada por Atterberg de Limite de Liquidez e sua obtenção foi padronizada por Casagrande.

O limite de liquidez é o teor de umidade no qual o solo apresenta resistência ao cisalhamento tão pequena que flui quando vibrado sob condições padronizadas, fechando uma ranhura, também padrão, realizada em seu meio. Quando o teor de umidade supera este limite o solo deixa de ter comportamento plástico e passa ao estado líquido.

Para a determinação do Limite de Liquidez (LL) utilizou-se o aparelho de Casagrande (figura 37) conforme a NBR 6459/84.



FIGURA 37 – DETALHE MOSTRANDO O APARELHO UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ EM LABORATÓRIO.

b) Limite de Plasticidade (LP)

O teor de umidade que determina a fronteira entre o estado plástico e o estado semi-sólido é chamado de Limite de Plasticidade.

O Limite de Plasticidade define o teor de umidade acima do qual o solo deixa de ter comportamento semi-sólido e passa ter comportamento plástico, começando a fissurar quando rolado para formar pequenos cilindros de dimensões padronizadas.

Determinou-se o Limite de Plasticidade (LP) utilizando a NBR 7180/84 (figura 38).

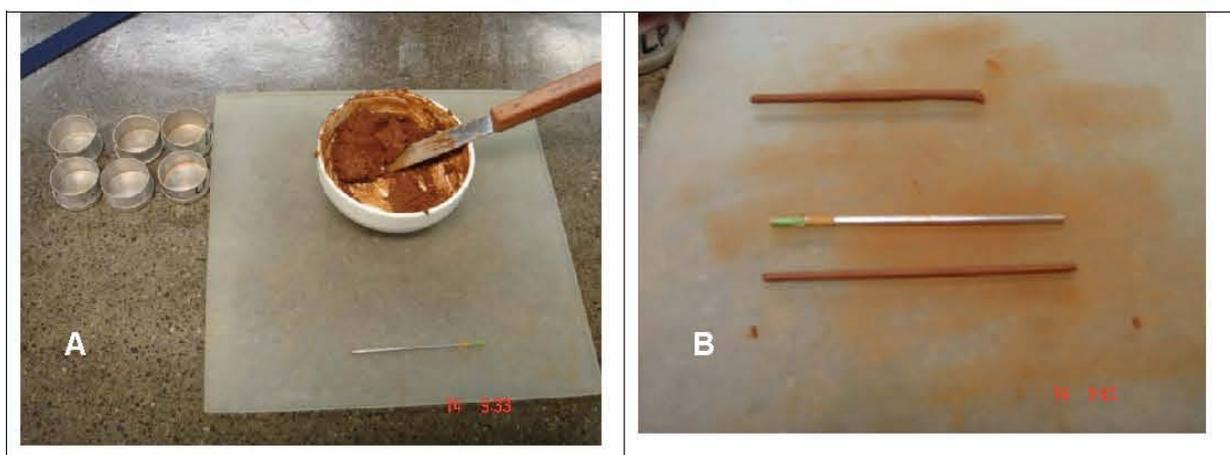


FIGURA 38 – ETAPAS DO ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE, MOSTRANDO A PREPARAÇÃO DO SOLO E A CONFEÇÃO DOS ROLOS COM MEDIDAS DE ESPESSURA E COMPRIMENTOS CONFORME CILINDRO METÁLICO PADRÃO.

c) Índice de Plasticidade (IP)

A quantidade de água necessária, a ser adicionada no solo, para levar o seu limite de plasticidade para o de liquidez é uma indicação da plasticidade do solo.

Esta plasticidade é indicada pelo "Índice de Plasticidade", definido como sendo a diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP). Este índice fornece informações acerca da amplitude da faixa da plasticidade de um solo, ou seja, quanto maior for o (IP), maior será a plasticidade do solo e maiores os problemas relacionados ao uso do solo como material de engenharia.

5.2.3.4 Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram efetuados no intuito de obter os valores de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) por método direto e respeitou-se o Drained Direct Shear Test – 1110-2-1906/70 (US DEPARTMENT OF THE ARMY, 1970).

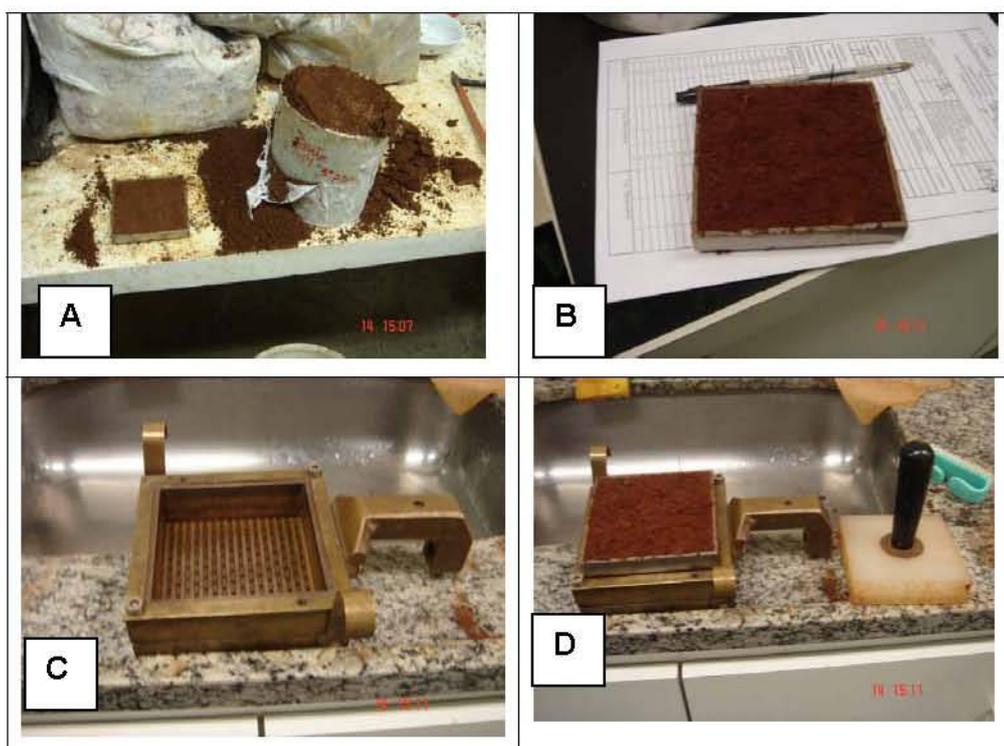
Este ensaio submete o solo ao estado de tensão, em que a tensão normal σ_n é aplicada à amostra verticalmente, e a tensão de cisalhamento τ é aplicada através de deslocamento horizontal da parte superior da caixa cisalhamento. Devido o método de ensaio, o plano de ruptura solo é pré-fixado, ocorrendo horizontalmente entre a parte superior e inferior da caixa de cisalhamento.

Os valores de c e ϕ foram determinados por meio da realização de, três ensaios de cisalhamento direto para cada solo. Cada ensaio resultou em um par de valores σ_n e τ , correspondendo cada um deles a um ponto no gráfico de coordenadas σ_n e τ . Traçando a reta de interpolação entre aqueles pontos, determina-se ϕ como o ângulo de inclinação da reta, e c como o valor de intersecção daquela com a coordenada τ .

O ensaio de cisalhamento direto foi adensado e drenado, ou seja, após o adensamento da amostra, o cisalhamento é aplicado vagarosamente de forma a não provocar pressões neutras durante o ensaio (figura 39).

O ensaio obedeceu a seguinte seqüência:

- a) Abertura das amostras indeformadas provenientes de campo onde se retirada um corpo de través de um anel de moldagem;
- b) Utilizando o anel de moldagem foi esculpida a faca uma amostra que preencheu completamente o volume do anel, sendo o conjunto anel e amostra pesados para obtenção do peso específico do material;
- c) Base da caixa de cisalhamento onde será colocado uma pedra porosa, papel filtro e depois a amostra de solo;
- d) Procedimento para a transferência do solo do anel para a base da caixa de cisalhamento;
- e) Uma vez posicionado o solo na base, coloca-se outra pedra porosa e papel filtro e a parte superior da caixa de cisalhamento;
- f) Caixa de cisalhamento composta de duas metades, travada através de dois parafusos pronta para ser levado para a máquina de cisalhamento;
- g) A amostra é adensada e drenada, sendo aplicado ao conjunto pesos aplicados de um dia para outro e drenado, o carregamento seguiu os procedimentos do LAME.
- h) Posicionamento dos dois extensômetros para medir a deformação vertical e horizontal durante o cisalhamento da amostra.



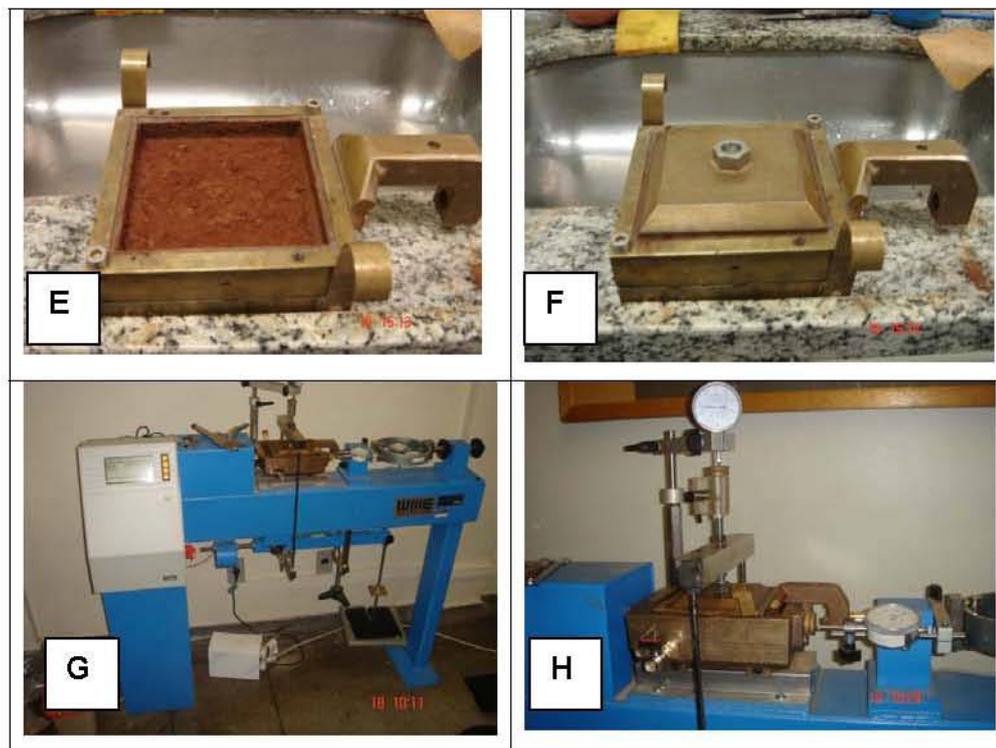


FIGURA 39 – SEQUÊNCIA DO ENSAIO DE CISALHAMENTO

5.2.3.5 Ensaio de Permeabilidade

Normalmente os vazios deixados pelas partículas sólidas do solo podem estar ocupados pela água. Para se determinar a percolação desta água no solo utiliza-se o ensaio de permeabilidade. A determinação da permeabilidade do solo foi baseada na NBR 14545/00.

O método utilizado para determinação do coeficiente de permeabilidade foi o de Carga Variável baseado na lei de Darcy, conforme seqüência mostrada na figura 40 e seguiu o procedimento LAME 2.01.04 para amostra compactada.

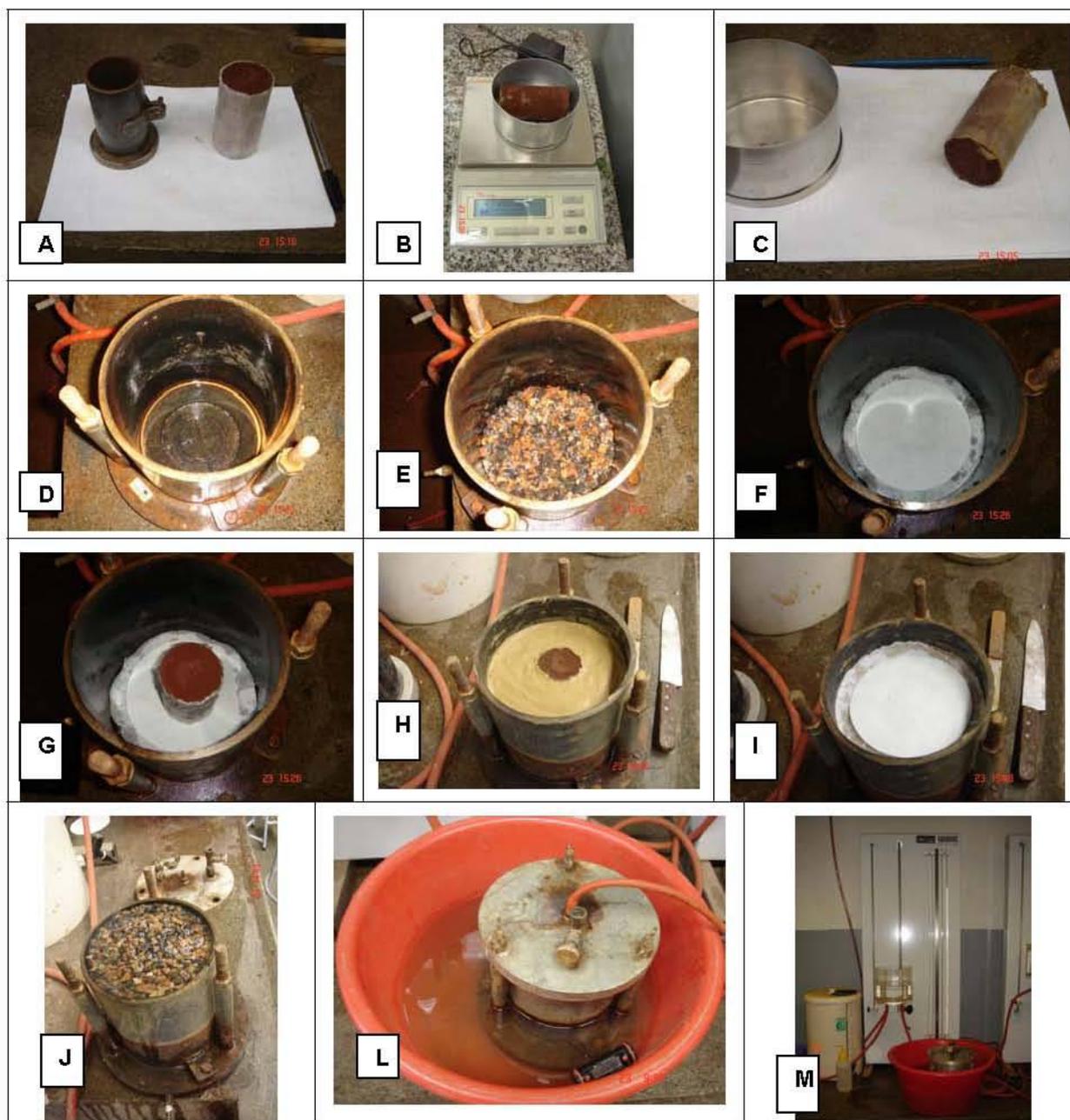


FIGURA 40 – SEQÜÊNCIA DA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE REALIZADO NO LABORATÓRIO DE SOLOS DO LAME.

A moldagem da amostra seguiu o procedimento LAME 2.01.04 para amostra compactada

- a) Preparação da amostra e revestimento com parafina;
- b) Pesagem da amostra;
- c) Anotação das medidas a amostra;
- d) Detalhe do permeâmetro utilizado no ensaio;
- e) Colocação de pedra britada no fundo do permeâmetro;

- f) Colocação de papel filtro para proteger a pedra britada e seção da amostra da lama bentonítica;
- g) Posicionamento da amostra no permeâmetro;
- h) Moldagem do permeâmetro com lama bentonítica de forma a permitir o fluxo de água somente pelo interior da amostra;
- i) Colocação de papel filtro na parte superior para proteger a amostra e a pedra britada da lama bentonítica;
- j) Colocação de pedra britada até o topo do permeâmetro;
- l) Saturação da amostra sob fluxo ascendente até a estabilização do mesmo e detalhe do termômetro medindo a temperatura da água;
- m) Detalhe do permeâmetro de carga constante, onde deverá ser feita a medição do fluxo da água na bureta.

5.3 CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS DA ÁREA ESTUDADA

5.3.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo foi determinada a partir das amostras deformadas coletadas pelo procedimento da NBR 7181: Solo – Análise granulométrica (1984). Os valores encontrados nos ensaios para cada ponto amostrado estão expressos na tabela 12.

TABELA 12 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO E SEDIMENTAÇÃO DAS AMOSTRAS COLETADAS EM CAMPO

Ponto	solo	Amostra	Prof. (cm)	Classificação de Shepard (1954)	Classificação de Flimming (2000)	% areia	% silte	% argila
1(A)	LRa	02.269.06	2,00	Argila Siltica	Lama argilosa ligeiramente arenosa	6,30	29,31	64,39
2(B)	LRa	02.270.06	2,50	Argila Siltica	Lama argilosa ligeiramente arenosa	11,57	28,71	59,72
3(C)	Ce	02.263.06	0,75	Argila Siltica	Lama muito argilosa ligeiramente arenosa	16,85	19,22	63,93
4(D)	LRa	02.266.06	2,50	Argila	Lama extremamente argilosa ligeiramente arenosa	15,36	7,29	77,35
5(F)	Ce	02.267.06	0,75	Argila Siltica	Lama muito argilosa ligeiramente arenosa	15,24	12,41	72,35
6(E)	LRa	02.264.06	2,50	Argila Siltica	Lama argilosa ligeiramente arenosa	13,00	26,54	60,46
7(G)	Ce	02.273.06	0,75	Argila	Argila ligeiramente siltosa	2,97	14,21	82,82
8(H)	TRd	02.268.06	1,50	Argila Siltica	Lama argilosa ligeiramente arenosa	8,35	41,82	49,83
9(I)	Le	02.274.06	0,40	Argila Siltica	Lama argilosa ligeiramente arenosa	21,98	35,08	42,94
10	TRd	Perfil 01	1,50	Argila Siltica		22,00	16,00	62,00
11	Le	Perfil 02	0,40	Areia Siltico-Argilosa	Lama arenosa argilosa	38,00	28,00	34,00
12	Ce	Perfil 03	0,75	Argila Siltica		19,00	10,00	71,00
13	LRa	Perfil 04	2,50	Argila Siltica		12,00	20,00	68,00
14	LRa	Mineropar 459	2,50	Argila Siltica		5,00	21,00	74,00
15	Ce	Mineropar 523	0,75	Argila		3,00	22,00	75,00
16	LRa	Mineropar 486	2,50	Argila		2,00	20,00	78,00

5.3.2 Limites de Atterberg e Teor de Umidade

Os resultados dos limites de consistência (Limite de Liquidez – LL, Limite de Plasticidade – LP, Índice de Plasticidade - IP e Teor de Umidade – W) dos solos, obtidos nos diversos ensaios realizados podem ser vistos na tabela 13.

TABELA 13 – RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO

Ponto	Amostra	Solo*	Granulometria			W	LL (%)	LP (%)	IP (%)
			Areia						
			(fina a média) 0,06mm < % < 2mm	Silte 2µm < % < 0,06mm	Argila % < 2µm				
1	02.269.06	Latossolo	6,30	29,31	64,39	34,4	47	35	12,0
2	02.270.06	Latossolo	11,57	28,71	59,72	41,6	50,5	42	8,5
3	02.263.06	Cambissolo	16,85	19,22	63,93	34,9	46,7	35	11,7
4	02.266.06	Latossolo	15,36	7,29	77,35	46,8	49,7	42	7,7
5	02.267.06	Cambissolo	15,24	12,41	72,35	39,2	66	41	25,0
6	02.264.06	Latossolo	13,00	26,54	60,46	39,3	51,2	37	14,2
7	02.273.06	Cambissolo	2,97	14,21	82,82	29,7	43,8	34	9,8
8	02.268.06	Nitossolo	8,35	41,82	49,83	42,1	71,5	51	20,5
9	02.274.06	Neossolo	21,98	35,08	42,94	41,0	53,4	44	9,4
10	Perfil 01	Nitossolo	22,00	16,00	62,00	nr.	nr.	nr.	nr.
11	Perfil 02	Neossolo	38,00	28,00	34,00	nr.	nr.	nr.	nr.
12	Perfil 03	Cambissolo	19,00	10,00	71,00	nr.	nr.	nr.	nr.
13	Perfil 04	Latossolo	12,00	20,00	68,00	nr.	nr.	nr.	nr.
14	Mineropar 459	Latossolo	5,00	21,00	74,00	45,3	59,6	41,3	18,3
15	Mineropar 523	Cambissolo	3,00	22,00	75,00	29,6	60,0	45,5	14,5
16	Mineropar 486	Latossolo	2,00	20,00	78,00	42,3	67,4	43,3	24,1

*Classificação pedológica EMBRAPA (1999):

(nr. = Ensaio não realizado)

Utilizando-se a classificação geotécnica proposta pelo IAEG (1979), baseada no (IP), os solos da área foram enquadrados em moderadamente plásticos, altamente plásticos, conforme tabela 14.

TABELA 14 – CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS SEGUNDO ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IAEG, 1979)

Índice de Plasticidade	Amostra	Denominação
7 < IP < 17	2.0269.06	Moderadamente plástico
	2.0270.06	
	2.0263.06	
	2.0266.06	
	2.0264.06	
	2.0273.06	
	2.0274.06	

	MINEROPAR 486	
	MINEROPAR 523	
17 < IP < 35	2.0267.06 2.0268.06	Altamente plástico
	MINEROPAR 459	

5.3.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Os resultados das amostras ensaiadas estão representados por gráficos de tensão cisalhante versus deslocamento, na forma de envoltória de resistência, constam em Anexo e os valores médios dos atributos geotécnicos determinados estão na tabela 15.

TABELA 15 – VALORES DE COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO DAS AMOSTRAS

Amostra	Registro LAME	Classe de Solo	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
Amostra 1 (A)	02.0269.06	Latossolo Roxo Álico	13,21	22,98
Amostra 2 (B)	02.0270.06	Latossolo Roxo Álico	7,82	20,86
Amostra 3 (C)	02.0263.06	Cambissolo Eutrófico	7,90	16,49
Amostra 4 (D)	02.0266.06	Latossolo Roxo Álico	15,23	18,37
Amostra 5 (F)	02.0267.06	Cambissolo Eutrófico	5,15	15,48
Amostra 6 (E)	02.0264.06	Latossolo Roxo Álico	3,78	21,60
Amostra 7 (G)	02.0273.06	Cambissolo Eutrófico	2,69	22,54
Amostra 8 (H)	02.0268.06	Terra Roxa Estruturada Distrófica	4,22	17,12
Amostra 9 (I)	02.0274.06	Litossolo Eutrófico	2,62	28,15

No mesmo momento que se realizava o ensaio de cisalhamento, determinaram as massas específicas dos solos (ρ_{nat}), expressas em g/cm^3 , utilizando a norma DNER DPT M 93 – 64. Os valores de índices físicos obtidos nos ensaios são apresentados na tabela 16.

TABELA 16 – ÍNDICES FÍSICOS DAS AMOSTRAS DE SOLO OBTIDOS EM ENSAIOS NO LAME

Amostra	Amostra 01 (A)	Amostra 02 (B)	Amostra 03 (C)	Amostra 04 (D)	Amostra 05 (F)	Amostra 06 (E)	Amostra 07 (G)	Amostra 08 (H)	Amostr a 09 (I)
	2.0269.0	2.0270.0	2.0263.0	2.0266.0	2.0267.0	2.0264.0	2.0273.0	2.0268.06	2.0274.0
Ensaio	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Massa específica (g/cm^3)	2,712	2,664	2,938	2,508	2,918	2,905	3,006	2,753	3,137
Massa específica seca (g/cm^3)	0,88	0,92	1,20	1,17	0,99	1,06	1,30	1,07	1,12
Massa específica natural (g/cm^3)	1,18	1,30	1,61	1,70	1,38	1,47	1,66	1,51	1,60
Índice de vazios inicial (e_0)	2,08	1,91	1,43	1,10	1,95	1,73	1,25	1,60	1,79

Multiplicando-se as massas específicas dos solos pela aceleração da gravidade ($9,8\text{m/s}^2$), encontram-se os pesos específicos (γ_{nat}), expressos em kN/m^3 .

Os valores obtidos de peso específico natural, saturado e submerso, para cada tipo de solo da área em estudo são apresentados na tabela 17.

TABELA 17 – VALORES DO PESO ESPECÍFICO SUBMERSO (γ_{SUB}), PESO ESPECÍFICO SATURADO (γ_{SAT}) E PESO ESPECÍFICO NATURAL (γ_{NAT}) PARA CADA SOLO ESTUDADO

Amostra de Solo	Peso Submerso γ_{sub} (KN/m^3)	Peso Saturado γ_{sat} (KN/m^3)	Peso Natural γ_{nat} (KN/m^3)
(A) 2.0269.06	5,56	15,56	11,80
(B) 2.0270.06	5,72	15,72	13,00
(C) 2.0263.06	7,97	17,97	16,10
(D) 2.0266.06	7,18	17,18	17,00
(F) 2.0267.06	6,50	16,50	13,80
(E) 2.0264.06	6,98	16,98	14,70
(G) 2.0273.06	8,92	18,92	16,60
(H) 2.0268.06	6,74	16,74	15,10
(I) 2.0274.06	7,66	17,66	16,00

Os pesos específicos do solo (γ_{nat} , γ_{sub} , γ_{nat}) e os parâmetros de resistência do solo encontrados nos ensaios foram organizados na tabela 18, para que possam ser utilizados na elaboração dos Mapas de Fatores de Segurança, objetivo principal deste estudo. A profundidade dos perfis de cada classe de solo da tabela foi estimada no levantamento de campo realizado e nos dados do Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 1984).

TABELA 18 – VALORES DE PESOS ESPECÍFICOS DO SOLO (γ_{NAT} , γ_{SUB} , γ_{NAT}) E OS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO ENCONTRADOS NOS ENSAIOS

Classe de Solo	Amostra	Profundidade	Coesão	Ângulo de Atrito (ϕ)	γ_{nat}	γ_{sub}	γ_{sat}
Latossolo Roxo Álico	(A)2.0269.06	200 cm	13,21	22,98	11,80	5,56	15,56
Latossolo Roxo Álico	(B)2.0270.06	250 cm	7,82	20,86	13,00	5,72	15,72
Cambissolo Eutrófico	(C)2.0263.06	75 cm	7,90	16,49	16,10	7,97	17,97
Latossolo Roxo Álico	(D)2.0266.06	250 cm	15,23	18,37	17,00	7,18	17,18
Cambissolo Eutrófico	(F)2.0267.06	75 cm	5,15	15,48	13,80	6,50	16,50
Latossolo Roxo Álico	(E)2.0264.06	250 cm	3,78	21,60	14,70	6,98	16,98
Cambissolo Eutrófico	(G)2.0273.06	75 cm	2,69	22,54	16,60	8,92	18,92
Terra Roxa Estruturada Distrófica	(H)2.0268.06	150 cm	4,22	17,12	15,10	6,74	16,74
Litossolo Eutrófico	(I)2.0274.06	40 cm	2,62	28,15	16,00	7,66	17,66

5.3.4 Ensaio de Permeabilidade

Os coeficientes de permeabilidade (K) encontrados nos ensaios (tabela 19), são um dos mais importantes parâmetros hidráulicos de um solo e expressam a maior ou menor facilidade com que as partículas de água encontram para fluir por entre os vazios do solo.

Os atributos que influenciam o parâmetro (K) são: a natureza do meio, a densidade e a viscosidade do fluido, as quais, por sua vez, têm seus valores em função da temperatura e da pressão a que este está submetido.

Interessante citar a variação encontrada entre os resultados obtidos na pesquisa (da ordem 10^{-6}) e os resultados da Mineropar (da ordem 10^{-3}). Acredita-se que esta variação seja devida a diferença de profundidade na coleta das amostras, uma vez que nesse estudo coletou-se amostras a uma profundidade de 1,5m enquanto que no trabalho da Mineropar colheu-se amostras superficiais, com profundidade até 0,5m.

TABELA 19 – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE (K) DOS SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO

Ponto	Amostra	Solo*	Permeabilidade (K) cm/s
1	02.269.06	LRa	$2,95 \times 10^{-5}$ 0,00002951 cm/s
2	02.270.06	LRa	$3,48 \times 10^{-6}$ 0,00000348 cm/s
3	02.263.06	Ce	$2,26 \times 10^{-4}$ 0,00022621 cm/s
4	02.266.06	LRa	$1,73 \times 10^{-5}$ 0,00001732 cm/s
5	02.267.06	Ce	$2,11 \times 10^{-6}$ 0,00000211 cm/s
6	02.264.06	LRa	$7,94 \times 10^{-6}$ 0,00000794 cm/s
7	02.273.06	Ce	$2,58 \times 10^{-6}$ 0,00000258 cm/s
8	02.268.06	TRd	$3,14 \times 10^{-6}$ 0,00000314 cm/s
9	02.274.06	Le	$4,37 \times 10^{-6}$ 0,00000437 cm/s
14	Mineropar 459	LRa	2×10^{-3} 0,00249 cm/s
15	Mineropar 523	Ce	1×10^{-3} 0,00171 cm/s
16	Mineropar 486	LRa	3×10^{-3} 0,00364 cm/s

5.3.5 Classificação Geotécnica

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentadas pelos diversos solos perante as solicitações de interesse da geotecnia levou ao seu natural agrupamento em conjuntos distintos. Desta tendência de agrupamento e organização dos solos, surgiram os sistemas de classificação dos solos.

O objetivo da classificação dos solos é o de poder estimar um provável comportamento geotécnico do solo, orientando os estudos e o planejamento das investigações para obtenção dos parâmetros mais importantes para cada projeto.

Existem diversas formas de classificar os solos, mas os mais conhecidos são os sistemas baseados no tipo e comportamento das partículas constituintes dos solos. Nestes sistemas, os índices empregados são, geralmente, a composição granulométrica e os índices de Atterberg.

O sistema adotado para analisar os resultados obtidos nos ensaios foi o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Neste sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras (quadro 15):

Tipo principal de solo	Dados complementares de solos
G - pedregulho	W – bem graduado
S - areia	P – mal graduado
M - silte	H – alta compressibilidade
C - argila	L – baixa compressibilidade
O – solo orgânico	Pt - turfas

QUADRO 15 – CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA (SUCS)

O resultado desta classificação encontra-se no quadro 16, abaixo.

Classe de Solo	Solos	Símbolo do grupo (SUCS)
Latossolo Roxo Álico	finos	CL, MH ou ML
Cambissolo Eutrófico		CL ou MH
Terra Roxa Estruturada Distrófica		MH
Litossolo Eutrófico		MH

QUADRO 16 – CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS SOLOS SEGUNDO CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA (SUCS)

As propriedades geotécnicas das amostras de solo, segundo SUCS, estão resumidas no quadro 17.

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS	Símbolo do Grupo (SUCS)			
	MH	ML	CH	CL
Classificação dos solos	Silte Elástico	Silte	Argila Muito Plástica	Argila Pouco Plástica
Trabalhabilidade como material de construção	Má	Regular	Má	Regular a boa
Permeabilidade quando compactado	Semipermeável a permeável		Impermeável	
Resistência compacta e saturada	Baixa a regular	regular	baixa	Regular
Compressibilidade compactada e saturada	Alta	Média	Alta	Média
Peso específico máximo (kN/m^3)	11, a 15,0	15,0 a 19,0	12,0 a 17,0	15,0 a 19,0
Valor como fundação	Má	Muito má	Regular a má	Má a boa
Características de drenagem	Regular a má		Má	

QUADRO 17 – PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DAS AMOSTRAS DE SOLOS DA ÁREA ESTUDADA RELACIONADAS À CLASSIFICAÇÃO SUCS

5.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

Uma vez determinadas todas as variáveis, atuantes no processo de estabilidade de uma encosta, aplicou-se o modelo matemático, obtendo-se diferentes valores de Fator de Segurança nas simulações realizadas. Este modelo possibilita o mapeamento dos diferentes graus de risco ao escorregamento, interpolando os dados obtidos pelas equações de Fator de Segurança com as cartas temáticas elaboradas.

Para encontrar o Fator de Segurança de um talude de extensão infinita, levaram-se em consideração as classes de solo, espessura, coesão, ângulo de atrito, índices físicos e propriedades do solo, inclinação e orientação das encostas, a presença de água no solo e de vegetação na encosta. Primeiramente, consideraram-se três possibilidades de saturação da encosta: solo Natural, ou quase

totalmente Seco ($h_2 = 0$), solo Não Saturado, para uma saturação de 50% ($h_2 = Z/2$) e solo Saturado onde (h_2) é igual a (Z), passando a verificar, nas áreas vegetadas, a influência da cobertura vegetal e a força dos ventos nas copas das árvores. Nas áreas sem vegetação, aplicaram-se as equações 05, 07 e 13, enquanto que nas áreas vegetadas, utilizaram-se as equações 23, 24 e 25.

Desconsiderando-se os parâmetros da cobertura vegetal e adotando-se a vertente Natural ou praticamente Seca, após um longo período sem chuvas, tem-se $h_1=Z$ e $h_2=0$ (equação 05).

Vertente Natural sem vegetação (talude de extensão ilimitada, sem percolação de água eq. 05 cap. 02)

$$F_s = \frac{C + Z \cdot \gamma_{nat} \cdot \cos^2 i \cdot tg \phi}{Z \cdot \gamma_{nat} \cdot seni \cdot \cos i} \quad (05)$$

O próximo passo foi considerar que a vertente não está totalmente saturada, onde o nível do lençol freático tem a mesma espessura do solo, $h_1=h_2$, ou seja, $Z/2$.

Vertente Não Saturada sem vegetação (talude de extensão ilimitada, com percolação de água paralela à vertente eq. 13 cap. 02)

$$F_s = \frac{C + (h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub}) \cdot \cos^2 i \cdot tg \phi}{(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + h_2 \cdot \gamma_a) seni \cdot \cos i} \quad (13)$$

Para simular uma situação de chuva intensa, onde o solo esteja totalmente saturado, ou seja, $h_1=0$ e $h_2=Z$, tem-se:

Vertente Saturada sem vegetação (talude de extensão ilimitada, com percolação de água paralela à vertente eq. 07 cap.02)

$$F_s = \frac{C + \gamma_{sub} \cdot Z \cdot \cos^2 i \cdot tg \phi}{\gamma_{sat} \cdot Z \cdot seni \cdot \cos i} \quad (07)$$

Utilizando-se os parâmetros para determinar o Fator de Segurança abordado na equação 05, 07 e 13, mas incluindo os parâmetros de cobertura vegetal, quais sejam: a) contribuição da raiz para a coesão do solo, e a tensão que

são submetidas às raízes como forças resistentes ao movimento; b) força do vento atuando sobre a copa das árvores, como força solicitante; c) o peso das árvores tanto como força resistente como solicitante, as equações foram reorganizadas.

Vertente Natural com vegetação (feito a partir da equação 05)

$$F_S = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{nat} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \cos \theta}{[(Z \cdot \gamma_{nat} + P_a) \text{seni} + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (23)$$

Vertente Não Saturada com vegetação (feito a partir da equação 13)

$$F_S = \frac{(C_s + S_r) + [(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \cos \theta}{[(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + h_2 \cdot \gamma_a + P_a) \text{seni} + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (24)$$

Vertente Saturada com vegetação (feito a partir da equação 07)

$$F_S = \frac{(C_s + S_r) + [(Z \cdot \gamma_{sub} + P_a) \cdot \cos^2 i + T \cdot \text{sen} \theta] \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \cos \theta}{[(Z \cdot \gamma_{sub} + Z \cdot \gamma_a + P_a) \text{seni} + F_{ve}] \cdot \cos i} \quad (25)$$

A organização das informações como um banco de dados digital permitiu a simulação de várias alternativas na bacia estudada, utilizando-se como variáveis as características do terreno. A partir do cruzamento dos mapas temáticos, tais como: declividade, solos, orientação das encostas e uso e ocupação do solo, que contém os valores de todos os parâmetros abordados e aplicando-se as equações 05, 07, 13, 23, 24, 25 no mapa gerado, obtêm-se como resultado um valor de F_S para cada polígono gerado.

Para a confecção do Mapa de Fator de Segurança das Encostas, foram estabelecidas classes de estabilidade e instabilidade das encostas. Os valores de F_S menores que 1 (um) indicam áreas de instabilidade, em que as forças solicitantes ao movimento são maiores que as resistentes, e assim o talude está em desequilíbrio. Como margem de segurança, conforme Kozciak (2005) adotou-se, neste trabalho, que as encostas encontram-se instáveis e sendo iminente a ruptura, quando o F_S possui valor menor que 1,5. Este valor também é adotado pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER, para cortes de taludes em estradas (DNER, 1996).

Os valores maiores de 1,5 indicam que as forças resistentes são maiores que as solicitantes e, com isso, o talude está em equilíbrio sendo que quanto maior o Fator de Segurança, menor a possibilidade de escorregamento nos taludes, quando submetidos a condições desfavoráveis a sua estabilidade.

Os resultados obtidos foram transformados em mapas para uma melhor visualização e reclassificados de acordo com as classes do quadro 18.

INTERVALOS DE FS	CLASSES	DIAGNÓSTICO
$0 < FS < 1$	1	Instabilidade
$1 \leq FS < 1,5$	2	
$1,5 \leq FS < 2$	3	Estabilidade crítica
$2 \leq FS < 3$	4	Boa estabilidade
$3 \leq FS < 4$	5	Alta estabilidade
$4 \leq FS < 5$	6	Excelente estabilidade
$5 \leq FS < 8$	7	
$8 \leq FS < 10$	8	
$FS \geq 10$	9	

QUADRO 18 – DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE CADA INTERVALO DE FATOR DE SEGURANÇA, CONSIDERANDO F_s DE ESTABILIDADE DETERMINADO PELO DNER ($F_s \geq 1,5$) COMO PADRÃO

Os mapas obtidos por meio das várias simulações utilizando as equações 05, 07, 13, 23, 24, 25 estão apresentados nas figuras 41, 42, 43, 44, 45 e 46.

FIGURA 41 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NATURAL SEM VEGETAÇÃO

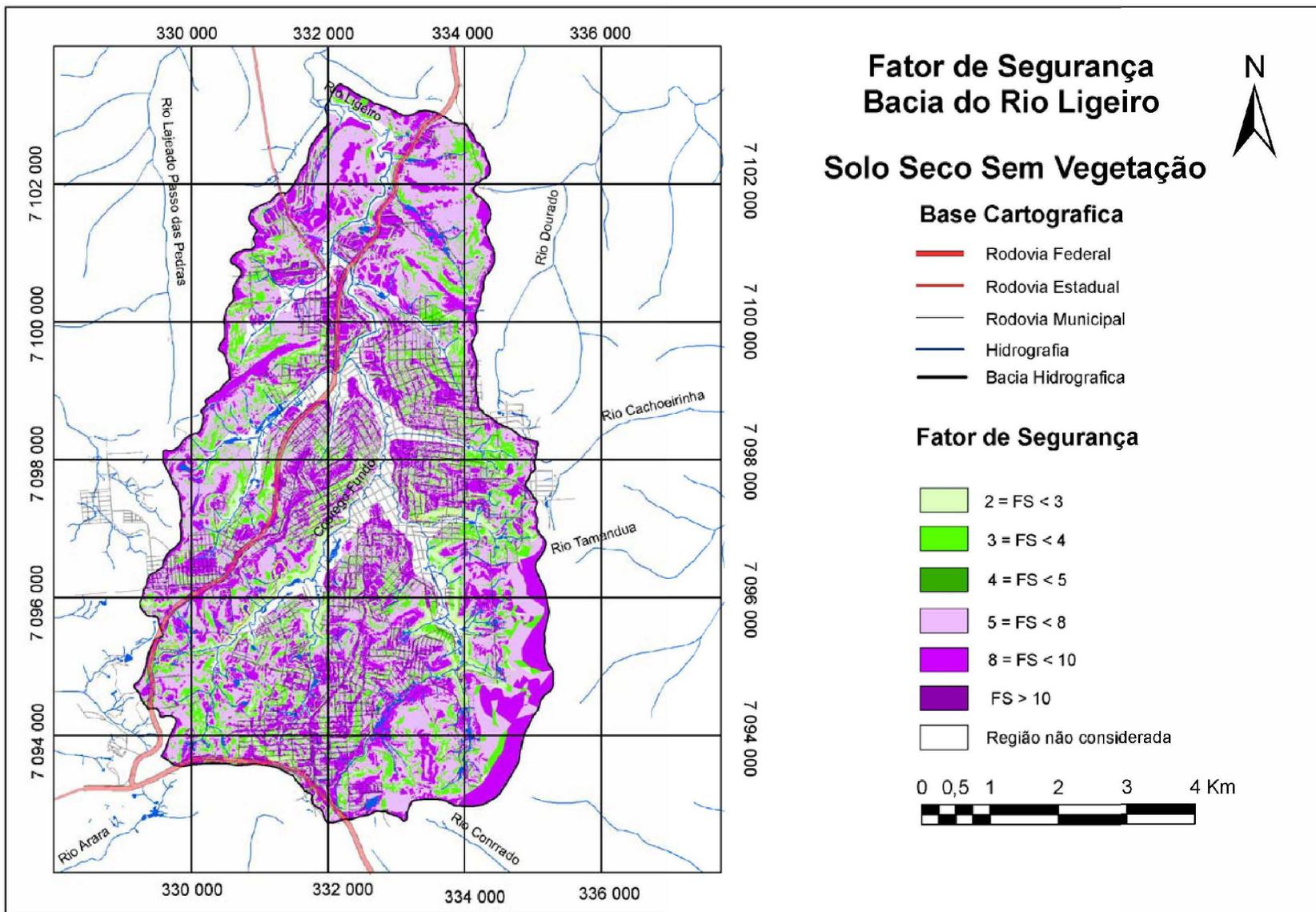


FIGURA 42 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NÃO SATURADO SEM VEGETAÇÃO

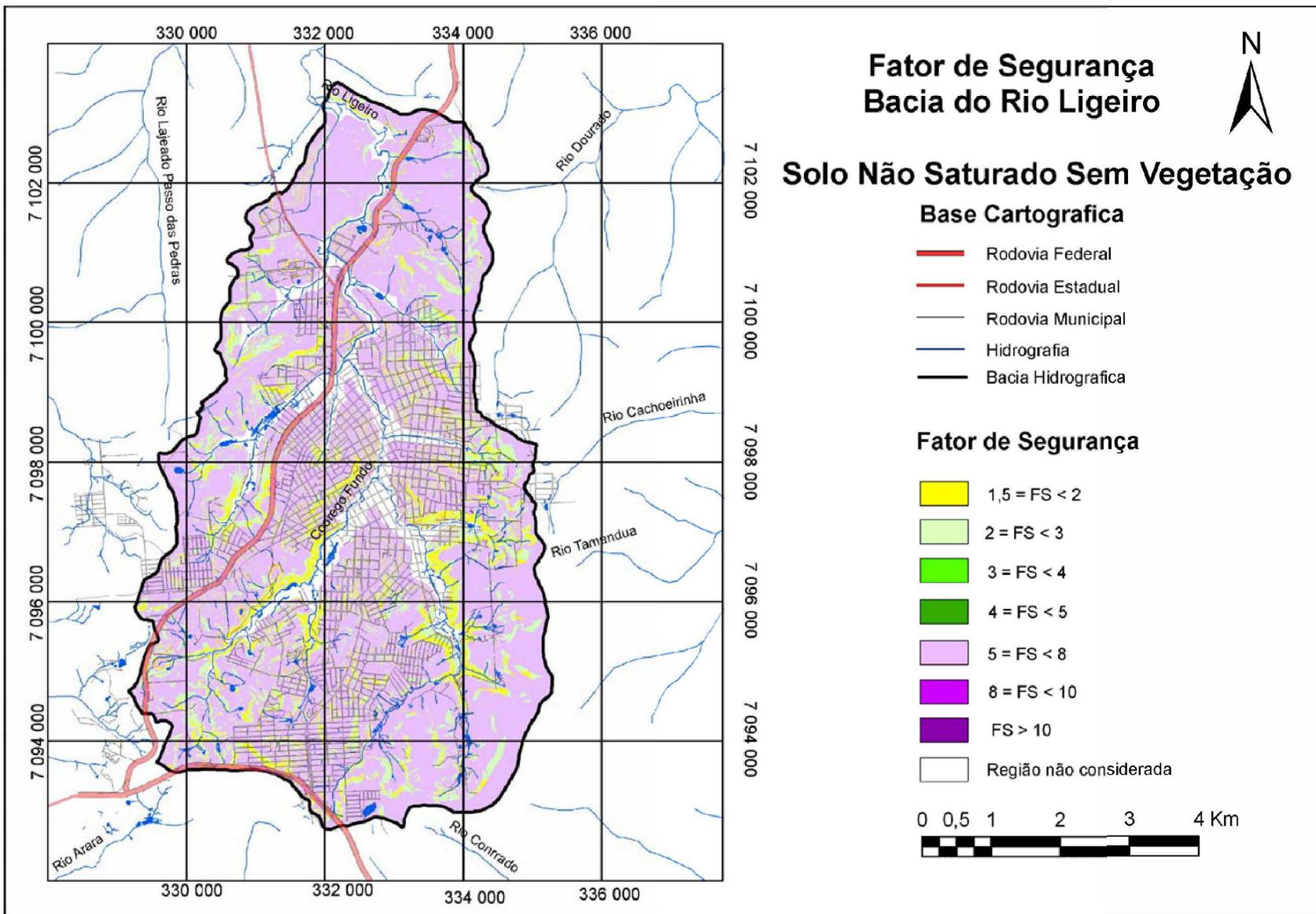


FIGURA 43 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO SATURADO SEM VEGETAÇÃO

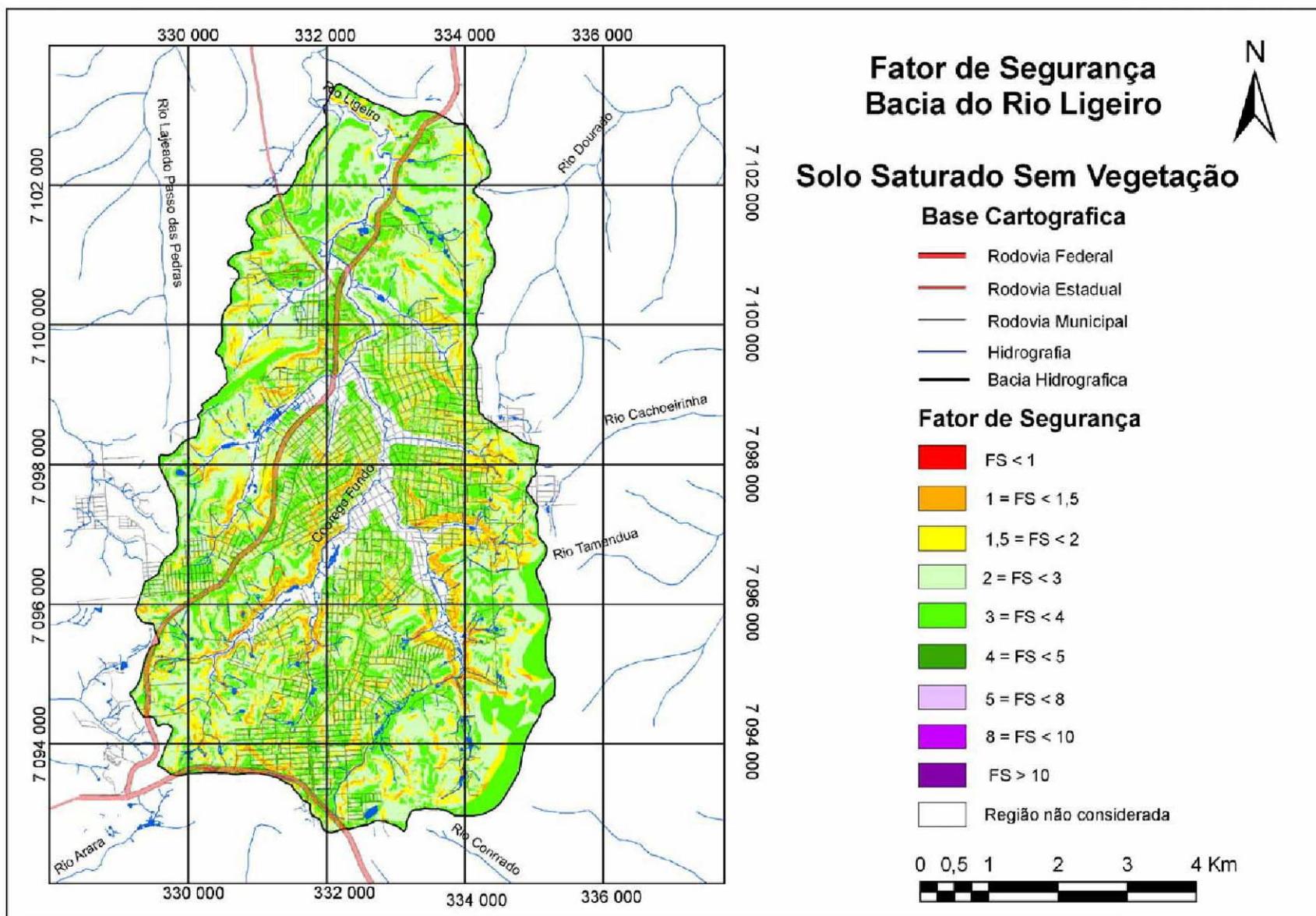


FIGURA 44 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NATURAL COM VEGETAÇÃO

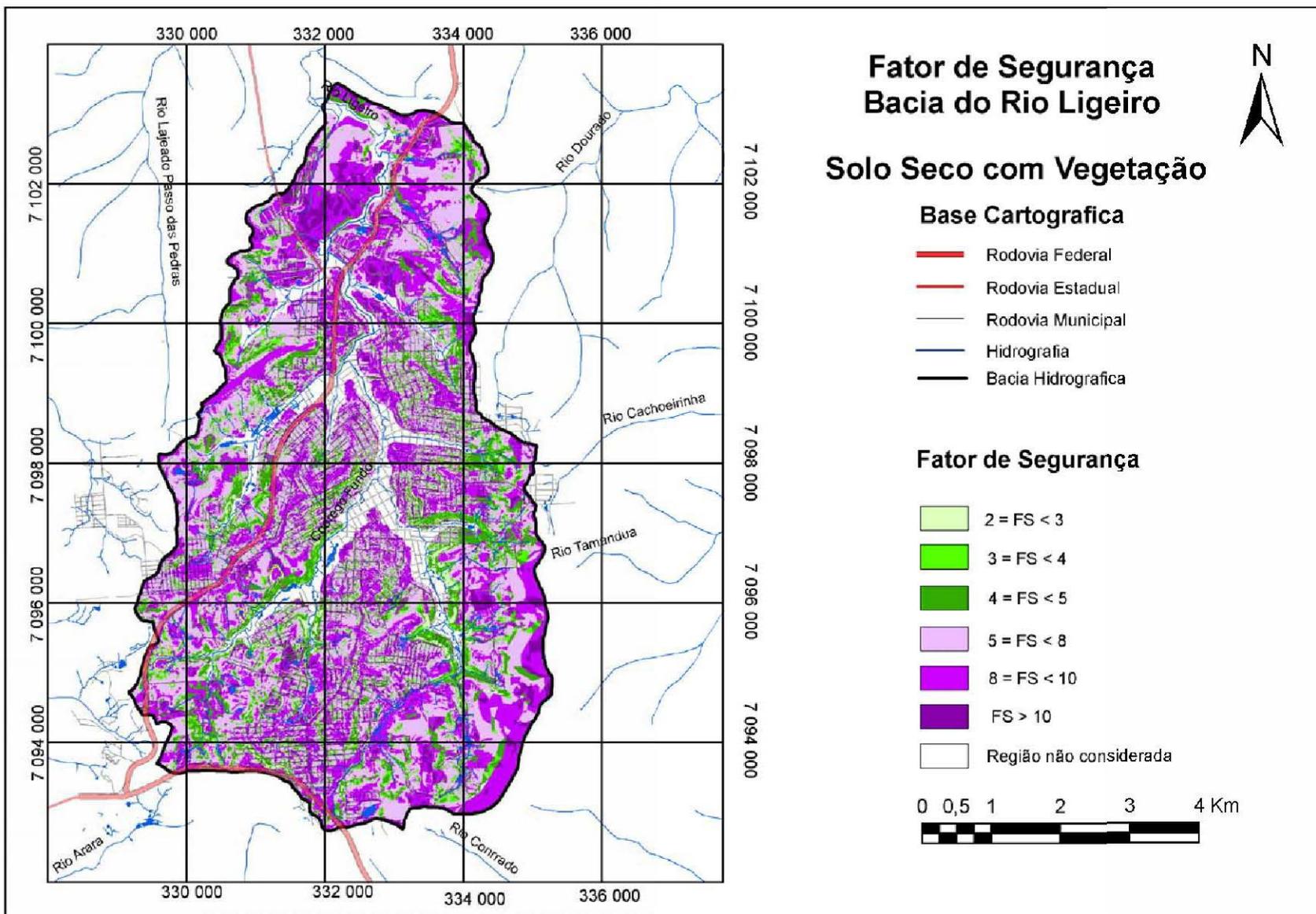


FIGURA 45 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO NÃO SATURADO COM VEGETAÇÃO

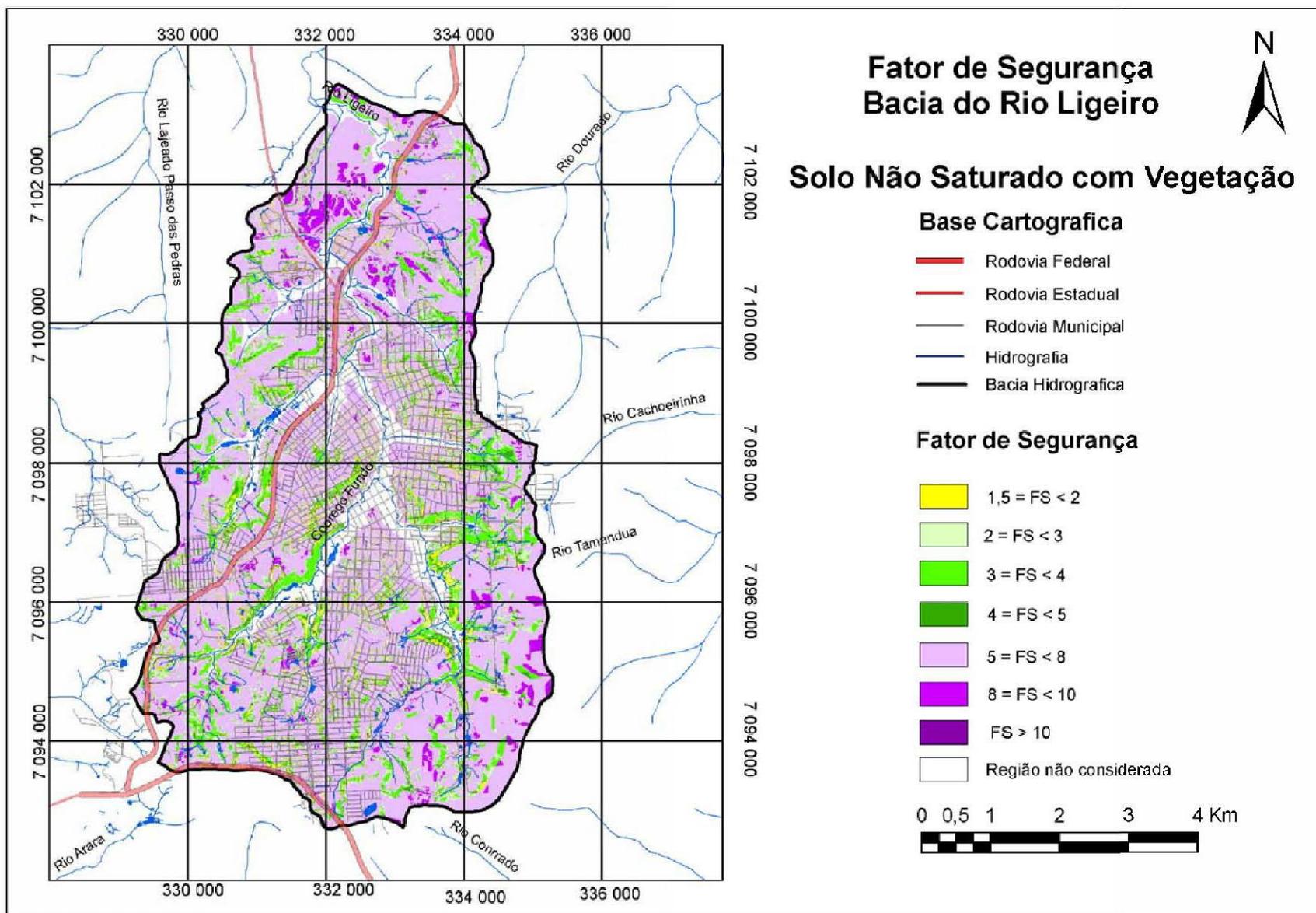
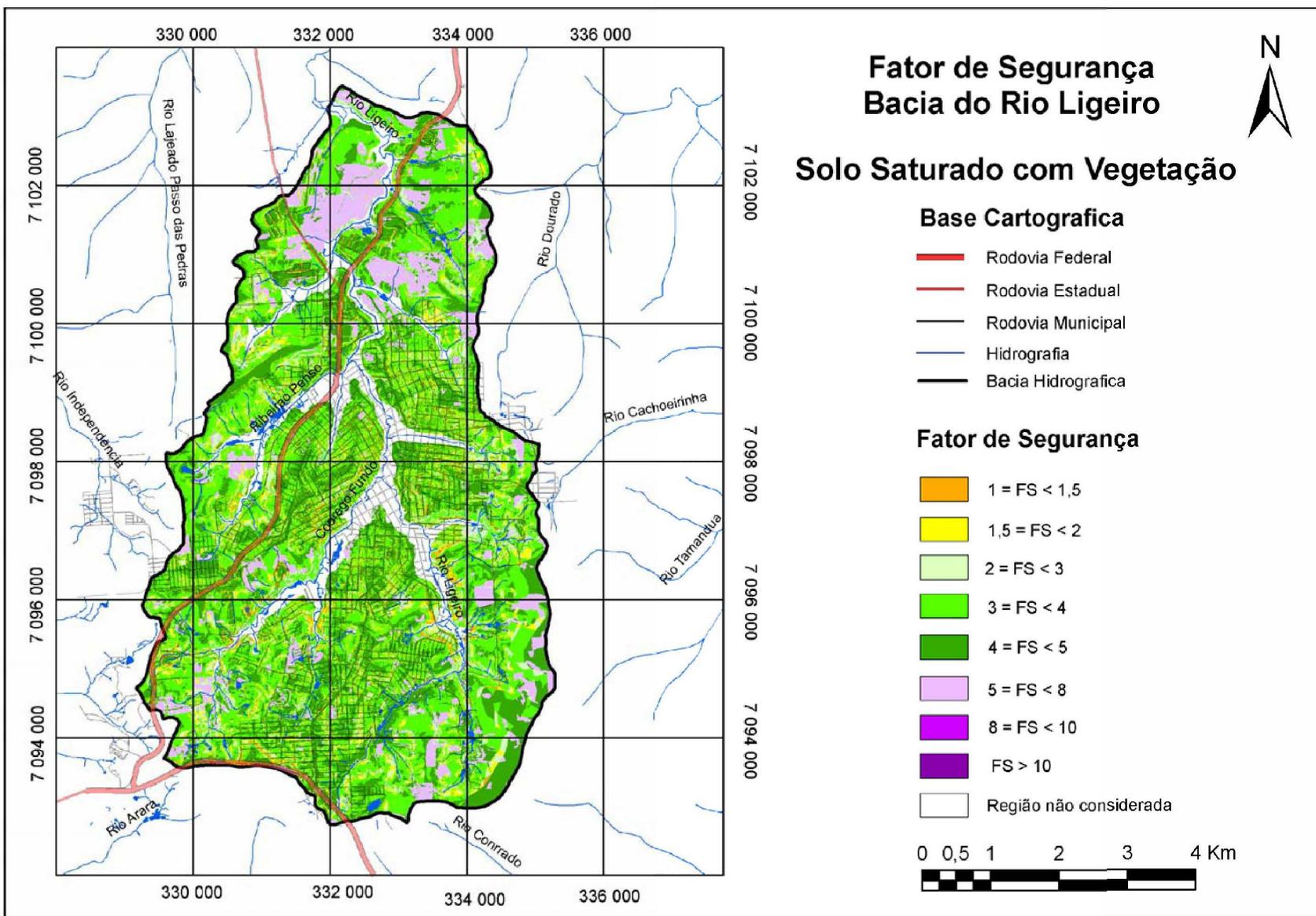


FIGURA 46 – MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA DO SOLO SATURADO COM VEGETAÇÃO



5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.5.1 Análise dos Resultados da Equação de Fatores de Segurança (F_S)

A aplicação da Equação de Fator de Segurança (F_S) para cada unidade de solo, considerando-se situações de estabilidade de talude com e sem vegetação estando o solo saturado, não saturado ou com umidade natural (solo praticamente seco), resultou nos índices de segurança ilustrados nas tabelas 20 a 31.

O objetivo da aplicação dessa equação foi a comparação dos índices de segurança para as mesmas vertentes, com diferentes estados de saturação. Também foram analisadas as áreas vegetadas, primeiramente no estado atual, ou seja, com vegetação e num segundo momento avaliando o F_S simulando a retirada da vegetação.

TABELA 20 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO NITOSSOLO. ($C_s = 4,22$ kPa; $\phi = 17,12^\circ$; $\gamma_{SAT} = 16,74$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 6,74$ kN/m³)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
5% - 10%	9,904 - 4,963	7,775 - 3,898	5,855 - 2,938
10% - 15%	4,963 - 3,324	3,898 - 2,613	2,938 - 1,973
15% - 20%	3,324 - 2,509	2,613 - 1,975	1,973 - 1,494

TABELA 21 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO CAMBISSOLO. ($C_s = 2,69$ kPa; $\phi = 22,54^\circ$; $\gamma_{SAT} = 18,92$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 8,92$ kN/m³)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
15% - 20%	4,240 - 3,199	3,365 - 2,541	2,597 - 1,964
20% - 30%	3,199 - 2,168	2,541 - 1,728	1,964 - 1,341
30% - 40%	2,168 - 1,664	1,728 - 1,331	1,341 - 1,039
40% - 60%	1,664 - 1,387	1,331 - 1,097	1,039 - 0,835

TABELA 22 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO LATOSSOLO. ($C_s = 7,82$ kPa; $\phi = 20,86^\circ$; $H_1 = 4,00$ M; $\gamma_{SAT} = 15,72$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 5,72$ kN/m³)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
< 5%	> 10,645	> 9,173	> 7,225
5% - 10%	10,645 - 7,068	9,173 - 5,129	7,225 - 3,659
10% - 15%	7,068 - 3,566	5,129 - 2,584	3,659 - 1,772
15% - 20%	3,566 - 2,687	2,584 - 1,950	1,772 - 1,340

TABELA 23 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE SEM VEGETAÇÃO, COM SOLO DO TIPO NEOSSOLO. ($C_s = 2,62$ kPa; $\phi = 28,15^\circ$; $H_1 = 0,4$ M; $\gamma_{SAT} = 17,66$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 7,66$ kN/m³)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
60% - 70%	1,719 – 1,636	1,430 – 1,366	1,169 – 1,121
70% - 75%	1,636 – 1,566	1,366 – 1,312	1,121 – 1,082
75% - 80%	1,566 – 1,508	1,312 – 1,268	1,082 – 1,050

TABELA 24 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA E SOLO NITOSSOLO. ($C_s = 4,22$ kPa; $\phi = 17,12^\circ$; $\gamma_{SAT} = 16,74$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 6,74$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 3,6$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
5% - 10%	11,937 - 7,106	10,589 – 6,270	9,323 – 5,494
10% - 15%	7,106 – 5,087	6,270 – 4,481	5,494 – 3,921
15% - 20%	5,087 – 3,985	4,481 – 3,510	3,921 – 3,071

TABELA 25 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA E SOLO CAMBISSOLO. ($C_s = 2,69$ kPa; $\phi = 22,54^\circ$; $\gamma_{SAT} = 18,92$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 8,92$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 3,6$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
15% - 20%	5,532 – 4,399	6,140 – 4,887	5,532 – 4,399
20% - 30%	4,399 – 3,925	4,887 – 3,538	4,399 – 3,184
30% - 40%	3,925 – 3,151	3,538 – 2,844	3,184 – 2,564
40% - 60%	3,151 – 2,684	2,844 – 2,430	2,564 – 2,194

TABELA 26 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA E SOLO LATOSSOLO. ($C_s = 7,82$ kPa; $\phi = 20,86^\circ$; $H_1 = 4,00$ M; $\gamma_{SAT} = 15,72$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 5,72$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 3,6$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
< 5%	> 11,882	> 10,278	> 8,688
5% - 10%	11,882 – 8,074	10,278 – 6,310	8,688 – 4,914
10% - 15%	8,074 – 4,490	6,310 – 3,547	4,914 – 2,750
15% - 20%	4,490 – 3,451	3,547 – 2,726	2,750 – 2,114

TABELA 27 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO FLORESTA E SOLO NEOSSOLO. ($C_s = 2,62$ kPa; $\phi = 28,15^\circ$; $H_1 = 0,4$ M; $\gamma_{SAT} = 17,66$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 7,66$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 3,6$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
60% - 70%	3,424 – 3,309	3,209 – 3,104	3,005 – 2,911
70% - 75%	3,309 – 3,215	3,104 – 3,021	2,911 – 2,837
75% - 80%	3,215 – 3,140	3,021 – 2,953	2,837 – 2,777

TABELA 28 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA E SOLO NITOSSOLO. ($C_s = 4,22$ kPa; $\phi = 17,12^\circ$; $\gamma_{SAT} = 16,74$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 6,74$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 2,0$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
5% - 10%	12,189 – 7,316	10,776 – 6,430	9,452 – 5,610
10% - 15%	7,316 – 5,255	6,430 – 4,611	5,610 – 4,016
15% - 20%	5,255 – 4,126	4,611 – 3,618	4,016 – 3,152

TABELA 29 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA E SOLO CAMBISSOLO. ($C_s = 2,69$ kPa; $\phi = 22,54^\circ$; $\gamma_{SAT} = 18,92$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 8,92$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 2,0$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
15% - 20%	7,148 – 5,725	6,417 – 5,131	5,750 – 4,591
20% - 30%	5,725 – 4,169	5,131 – 3,735	4,591 – 3,341
30% - 40%	4,169 – 3,359	3,735 – 3,013	3,341 – 2,700
40% - 60%	3,359 – 2,870	3,013 – 2,584	2,700 – 2,319

TABELA 30 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA E SOLO LATOSSOLO. ($C_s = 7,82$ kPa; $\phi = 20,86^\circ$; $H_1 = 4,00$ M; $\gamma_{SAT} = 15,72$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 5,72$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 2,0$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
< 5%	> 11,984	> 10,348	> 8,727
5% - 10%	11,984 – 8,185	10,348 – 6,363	8,727 – 4,930
10% - 15%	8,185 – 4,543	6,363 – 3,572	4,930 – 2,755
15% - 20%	4,543 – 3,494	3,572 – 2,747	2,755 – 2,119

TABELA 31 – FATOR DE SEGURANÇA DETERMINADO PARA VERTENTE COM VEGETAÇÃO DO TIPO CAPOEIRA E SOLO NEOSSOLO. ($C_s = 2,62$ kPa; $\phi = 28,15^\circ$; $H_1 = 0,4$ M; $\gamma_{SAT} = 17,66$ kN/m³; $\gamma_{SUB} = 7,66$ kN/m³; $\theta = 45^\circ$; $P_A = 2,0$ kPa; $SR = 5,9$ kPa; $T = 5,0$ kN/m; $VE = 70$ Km/h)

Inclinação do terreno (%)	Fator de Segurança para vertente natural $h_1 = Z$	Fator de Segurança para vertente não saturada $h_1 = h_2$	Fator de Segurança para vertente saturada $h_2 = Z$
60% - 70%	3,852 – 3,729	3,588 – 3,478	3,341 – 3,243
70% - 75%	3,729 – 3,630	3,478 – 3,390	3,243 – 3,166
75% - 80%	3,630 – 3,550	3,390 – 3,320	3,166 – 3,105

Na área estudada, as áreas instáveis aumentam à medida que é simulada a saturação do solo conforme visualizado nos mapas das figuras 41 a 46.

A área ocupada pelos depósitos aluvionares por encontrar-se em relevo plano, não foi considerada para a realização dos cálculos de F_s .

Os Fatores de Segurança determinados, levando-se em consideração a presença de vegetação sobre os solos e a variação do nível do lençol freático, resultaram nos mapas das figuras 44 a 46.

O mapa da figura 44 representa a situação de solo natural ou seco com vegetação, a figura 45 representa a situação de solo não saturado com vegetação e a figura 46, solo saturado com vegetação.

Nesses casos, as forças derivadas da presença de vegetação aumentam a resistência ao escorregamento do solo. Observa-se que a presença de vegetação, aliada à coesão do solo, contribui significativamente para a estabilidade das vertentes, não havendo região instável onde existe vegetação.

A coesão e as forças decorrentes da presença de vegetação são os grandes aliados à estabilidade de uma vertente.

Considerando-se solo seco com vegetação (equação 23) aproximadamente 0,17% da área da bacia apresenta-se em condições instáveis. Passando para uma situação de solo não saturado com vegetação (equação 24) esse valor de instabilidade passa para 0,27% da área da bacia. Com a saturação total do solo (equação 25), observa-se que mais de 3,29% da área da bacia apresenta-se instável com valores de F_s menores que 1,5.

A tabela 32 e o gráfico 08 apresentam os resultados obtidos nos mapas para os três níveis de saturação do solo com vegetação.

Durante o mapeamento dos índices de segurança das encostas, pode-se observar que a classe de zonas estabilizadas por cobertura vegetal, aparece predominantemente nas regiões de solos Neossolos e de Cambissolos com altas declividades, que possuem elevada susceptibilidade a processos erosivos, tão logo seja retirada a cobertura vegetal.

As áreas instáveis aparecem predominantemente sobre as áreas dos solos Neossolos e Cambissolos. Já a classe de zonas estáveis aparece com maior frequência nas áreas de solos Latossolos e Nitossolos, por estarem localizados em áreas de baixa declividade, independentemente ou não, da existência de cobertura vegetal de porte arbóreo.

TABELA 32 – FATOR DE SEGURANÇA DAS ÁREAS COM VEGETAÇÃO APLICANDO AS EQUAÇÕES 23, 24 E 25

Classe	Solo Natural (Seco) Área (Km ²) (Equação 23)	%	Solo Não Saturado Área (Km ²) (Equação 24)	%	Solo Saturado Área (Km ²) (Equação 25)	%
FS < 1	-	-	-	-	0,08	0,19
FS 1 - 1,5	0,08	0,17	0,12	0,27	1,37	3,10
FS 1,5 - 2	0,05	0,12	1,22	2,78	2,93	6,66
FS 2 - 3	1,52	3,45	2,83	6,43	3,18	7,23
FS 3 - 4	3,01	6,83	3,83	8,70	16,59	37,71
FS 4 - 5	4,62	10,48	0,92	2,09	11,40	25,91
FS 5 - 8	15,02	34,15	29,51	67,07	4,47	10,15
FS 8 - 10	14,08	32,02	1,59	3,61	-	-
FS > 10	1,64	3,73	-	-	-	-
Não Considerada	3,98	9,05	3,98	9,05	3,98	9,05
Total	44,00	100,00	44,00	100,00	44,00	100,00

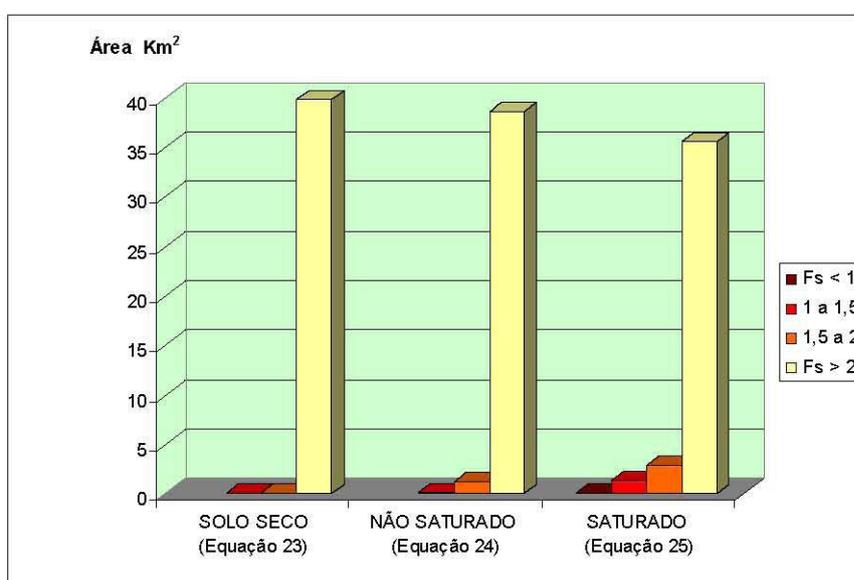


GRÁFICO 08 - REPRESENTAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA COM APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES 23, 24 E 25

Os Mapas de Fator de Segurança gerados para a situação que desconsidera a presença de cobertura vegetal estão representados na Figura 41 a Figura 43, nas quais a primeira simula a condição de solo Natural (Seco - equação 05), a segunda solo Não Saturado (equação 13) e a última figura, solo Saturado (equação 07).

Caso fosse feita a extração da vegetação existente na bacia, as áreas instáveis ($F_s < 1,5$) aumentariam respectivamente de 0,17% para, 0,25% com solo natural (equação 05), de 0,27 para 0,43% com solo não saturado (equação 13) e de

3,29% para 6,27% para solo saturado (equação 07), conforme Tabela 33 e Gráfico 09.

Nos cálculos do F_s apenas 0,19% da área da bacia apresentou $F_s < 1,0$ quando se considerou a vegetação, passando para 0,29% da mesma área quando se desconsidera a vegetação.

Nas condições de solo saturado ficou evidenciada a fragilidade a riscos de escorregamentos que a presença de água causa, pois as áreas instáveis aumentam consideravelmente quando o nível freático atinge a superfície do terreno.

Avaliando-se os resultados de Fator de Segurança para a situação que desconsidera a presença de cobertura vegetal, concluiu-se que, para declividades acima de 20%, há risco de escorregamentos, e abaixo desta inclinação há maior estabilidade. No caso de haver cobertura vegetal, o risco ocorre a partir de declividades superiores a 30%.

TABELA 33 – FATOR DE SEGURANÇA DAS ÁREAS SEM VEGETAÇÃO APLICANDO AS EQUAÇÕES 05, 07 E 13

Classe	Solo Natural (Seco) Área (Km ²) (Equação 05)	%	Solo Não Saturado Área (Km ²) (Equação 13)	%	Solo Saturado Área (Km ²) (Equação 07)	%
FS < 1	-	-	-	-	0,13	0,29
FS 1 - 1,5	0,11	0,25	0,19	0,43	2,63	5,98
FS 1,5 - 2	0,08	0,18	2,45	5,57	6,64	15,08
FS 2 - 3	3,32	7,55	6,26	14,23	-	-
FS 3 - 4	5,88	13,36	-	-	18,08	41,10
FS 4 - 5	-	-	-	-	12,54	28,50
FS 5 - 8	18,08	41,09	31,12	70,73	-	-
FS 8 - 10	12,55	28,52	-	-	-	-
FS > 10	-	-	-	-	-	-
Não Considerada	3,98	9,05	3,98	9,05	3,98	9,05
Total	44,00	100,00	44,00	100,00	44,00	100,00

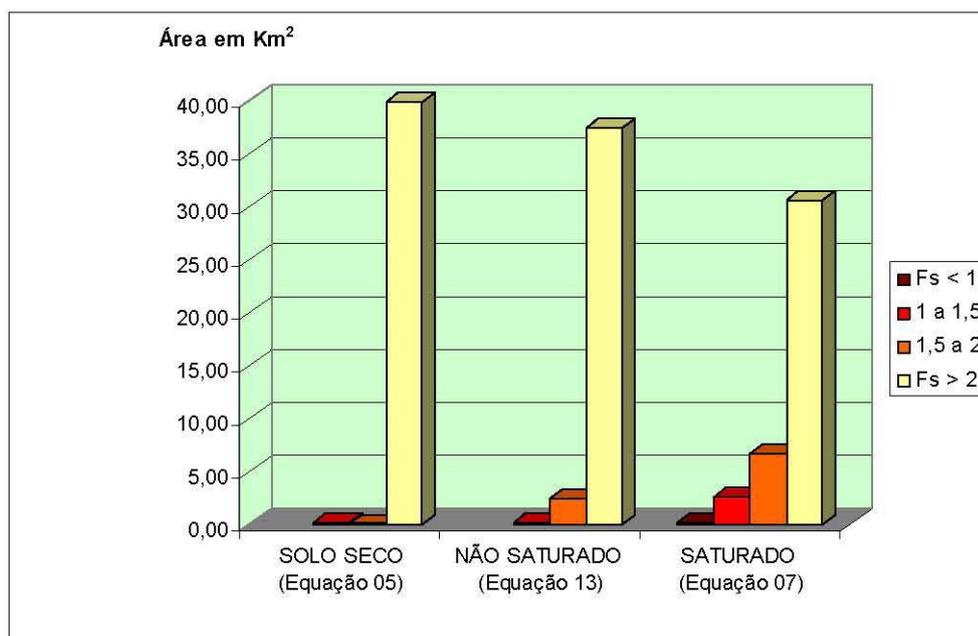


GRÁFICO 09 – REPRESENTAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA COM APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES 05, 07 E 13

Observa-se nitidamente na tabela acima que, para a pior situação, quando não se consideram os parâmetros da cobertura vegetal em solos saturados, mais de 6,27% da área apresenta valores de F_s menor que 1,5, sendo que desses, 0,29% corresponde a áreas com valores de F_s menor que 1, ou seja, áreas altamente instáveis.

5.5.2 Correlação entre o Fator de Segurança e os Parâmetros Geoambientais

5.5.2.1 Correlação entre Declividade e Fator de Segurança

Em relação à inclinação, as áreas com maiores Fatores de Segurança correspondem às declividades mais baixas, onde não existe risco de escorregamentos. Essas áreas correspondem a regiões que, nos mapas, possuem declividade inferior a 20%, ou seja, as áreas com declividade menor que 20% de inclinação apresentam F_s maior que 1,5 e estão em condições estáveis segundo a norma do DNER para estradas brasileiras.

Pode-se afirmar então que as áreas instáveis da bacia coincidem com declividades acima de 20%.

5.5.2.2 Correlação entre Orientação das Encostas e Fator de Segurança

Outro elemento que influencia no resultado das equações é a orientação das encostas, uma vez que os fenômenos climáticos agem de maneira diferenciada nas encostas, dependendo de sua orientação. Além de existir incidência de sol e chuvas diferentes sobre as encostas, sabe-se que a velocidade do vento sopra de forma desigual nas diversas direções, fazendo com que exista uma disparidade de forças atuando nas encostas devido a sua orientação, conforme visto no capítulo 04.

Nas equações 23, 24 e 25 que incluem os parâmetros da vegetação utilizaram-se diferentes velocidades de vento, dependendo da orientação da encosta, conforme o estudo realizado nos ventos da região. No levantamento realizado os maiores picos de vento encontrados foram de 70 km/h na direção NOROESTE; 60 km/h na direção SUL; 56 km/h na direção NORTE; 52 km/h na direção SUDOESTE; 48 km/h na direção OESTE; 42 km/h na direção LESTE; 40 km na direção SUDESTE e 35 km/h na direção NORDESTE.

Esses valores foram substituídos nas equações e aplicados nas encostas de acordo com a orientação de cada uma.

Apesar de que nas áreas com vegetação não foram obtidos Fatores de Segurança menores que 1,5 (encosta instável), percebeu-se um decréscimo da segurança à medida que se aumentava a velocidade do vento. Observou-se que em vertentes com as mesmas características de inclinação, uso e solos, mas com diferentes orientações, ocorreram grandes alterações no F_S devido às diferentes velocidades do vento.

Para demonstrar este fato selecionaram-se áreas cobertas por floresta, com solo do tipo Nitossolo e declividade de 10%. O fator de segurança modificou-se a medida que variava a orientação da encosta pela diferença de velocidade do vento em cada direção, conforme tabela 34.

A redução do F_S nesse caso pode chegar até a 14,13%, ou seja, teoricamente encostas com as mesmas características e mesma cobertura vegetal, podem ter seu Fator de Segurança reduzido em 14,13% dependendo da sua orientação. Este dado mostra a importância de se conhecer detalhadamente os efeitos climáticos sobre a encosta, pois, ao adotar valores únicos de vento para todas as direções, corre-se o risco de superestimar o FS de algumas encostas e de subestimar de outras.

TABELA 34 – FATOR DE SEGURANÇA DAS ÁREAS COBERTAS POR FLORESTAS, SOLO DO TIPO NITOSSOLO E DECLIVIDADE DE 10%, VARIANDO CONFORME A ORIENTAÇÃO DA ENCOSTA

Orientação da encosta	Velocidade do Vento (Km/h)	F_{ve}	F_s
NORDESTE	35,00	0,15	8,275
SUDESTE	40,00	0,20	8,138
LESTE	42,00	0,22	8,080
OESTE	48,00	0,28	7,893
SUDOESTE	52,00	0,33	7,761
NORTE	56,00	0,39	7,623
SUL	60,00	0,44	7,480
NOROESTE	70,00	0,60	7,106

5.5.2.3 Correlação entre Pedologia e Fator de Segurança

Os solos da bacia estão divididos nos tipos: 2,59% de Neossolos, 5,82% de nitossolos, 13,18% de cambissolos, 69% de latossolos e 9,41% de gleissolos, conforme tabela 35.

TABELA 35 – ÁREA CORRESPONDENTE A CADA CLASSE DE SOLO

Tipo de Solo	Total (Km ²)	Total da área da bacia (%)
CAMBISSOLO	5,80	13,18
NEOSSOLOS	1,14	2,59
NITOSSOLOS	2,56	5,82
LATOSSOLO	30,36	69,00
GLEISSOLOS	4,14	9,41

Na bacia estudada, os solos apresentam os valores de instabilidade descritos na tabela 36, que mostra os valores de instabilidade variando de acordo com a saturação do solo.

TABELA 36 – VALOR DAS ÁREAS INSTÁVEIS EM RELAÇÃO AO TIPO DE SOLO, DEPENDENDO DA SATURAÇÃO DO SOLO

Tipo de Solo	Total da área da bacia (Km ²)	Quantidade de área instável em relação ao tipo de solo quando Saturado (%)	Quantidade de área instável em relação ao tipo de solo quando Não Saturado (%)	Quantidade de área instável em relação ao tipo de solo quando Natural ou Seco (%)
CAMBISSOLO	5,80	33,57	1,22	0,06
NEOSSOLOS	1,14	38,62	8,00	1,44
NITOSSOLOS	2,56	0,99	0,05	0,01
LATOSSOLO	30,36	1,36	0,09	0,02

Os latossolos apresentaram grande estabilidade devido, principalmente, à pequena declividade que possuem. À medida que se aumenta a declividade e saturação do solo, surgiram áreas instáveis cobertas com esse tipo de solo.

Do total de áreas de latossolo ($30,36\text{Km}^2$ da bacia), apenas uma pequena porção (1,36%) apresentou F_s menor que 1,5 para solos Saturados sem vegetação, reduzindo para 0,09% para não saturados e 0,02% para solo com umidade natural ou seco. Os latossolos não apresentaram Fator de Segurança menor que 1,0

Os nitossolos representam apenas $2,56\text{Km}^2$ da bacia, e desse total, 0,99% se torna instável quando o solo estiver saturado, reduzindo para 0,05% para solo não saturado e 0,01% para solos naturais ou secos.

Os neossolos representam a menor quantidade de um tipo de solo da bacia ($1,14\text{Km}^2$ da área estudada), mas apresentaram as maiores quantidades de áreas instáveis de um solo. Aproximadamente 38,62% dos neossolos se tornam instáveis quando saturados, passando para 8,00% quando não saturados e 1,44 em estado Natural ou Seco.

Apesar de os neossolos apresentarem maiores porcentagens de instabilidade, e declividade mais acentuada, esses solos possuem valores de F_s maiores do que os cambissolos, ou seja, são solos mais estáveis que os cambissolos. Este fato se deve principalmente a pouca espessura dos neossolos que reduz a capacidade de retenção de água, diminuindo a pressão neutra.

Nas áreas de ocorrência de cambissolos, totalizando $5,80\text{Km}^2$, observa-se que, quando o solo estiver Saturado, 33,57% se tornará instável, diminuindo para 1,22% para solos Não Saturados e 0,06% para solos naturais ou secos.

As áreas correspondentes a cambissolos e neossolos correspondem a 84% das áreas instáveis da bacia.

Examinando a vertente com umidade natural (seco) e sem vegetação apenas os solos da classe cambissolo, com declividade entre 55 a 60% apresentaram Fator de Segurança abaixo de 1,5 ($1,0 < F_s < 1,5$).

Considerando a vertente como não saturada, apresentaram $F_s < 1,5$ os solos cambissolos com declividade entre 40 e 60% e neossolos com qualquer declividade.

Finalmente tendo em conta o solo saturado, apresentaram $F_s < 1,5$ os solos cambissolos com declividade entre 30 e 60%, neossolos com qualquer declividade e nitossolos e latossolo com declividade superior a 20%.

A área ocupada pelos depósitos aluvionares apresentaram-se totalmente estáveis, por encontrar-se em relevo plano, não sendo realizado cálculos de F_s na região coberta por essa classe de solo.

5.5.2.4 Correlação entre Uso e Cobertura do Solo e Fator de Segurança

O uso do solo da bacia está dividido respectivamente em 1,73% de capoeira, 16,50% de florestas, 20,66% de campo, 22,52% de agricultura e 38,20% de uso urbano, conforme tabela 37.

TABELA 37 – CLASSES DE USO DO SOLO DA BACIA DO RIO LIGEIRO

Uso do solo na Bacia	Área (Km ²)	(%)
Florestas	7,26	16,50
Capoeira	0,76	1,73
Urbano	16,81	38,20
Agricultura	9,91	22,52
Corpo d'água	0,17	0,39
Campo	9,09	20,66
Total da Bacia	44,00	100

Excluindo dos cálculos do Fator de Segurança as áreas ocupadas pelos depósitos aluvionares, por apresentarem-se totalmente estáveis e os corpos d'água, (totalizando 4,14 Km²) as classes de uso do solo da bacia foram reorganizados e ficaram divididos conforme a tabela 38, respectivamente, em 1,66% de capoeira, 16,43% de florestas, 20,17% de campo, 24,46% de agricultura e 37,28% de uso urbano.

TABELA 38 – USO DO SOLO DA BACIA SEM CONSIDERAR ÁREAS DE DEPÓSITOS ALUVIONARES E CORPO D'ÁGUA

Uso do solo na Bacia	Área total da bacia		Área da bacia sem os depósitos aluvionares e corpo d'água	
	Área (Km ²)	(%)	Total (Km ²)	Total (%)
Florestas	7,26	16,5	6,55	16,43
Capoeira	0,76	1,73	0,66	1,66
Urbano	16,81	38,2	14,86	37,28
Agricultura	9,91	22,52	9,75	24,46
Campo	9,09	20,66	8,04	20,17
Corpo d'água	0,17	0,39		
Total da Bacia	44,00	100	39,86	100

Após determinar a área da bacia retirando as áreas de depósitos aluvionares e corpo d'água, foi calculada a área que apresentou $F_s < 1,5$ dividida em cada classe de uso do solo e em cada nível de saturação do solo adotado, resultando nos valores da tabela 39.

TABELA 39 – QUANTIDADE EM PORCENTAGEM DE CADA USO DO SOLO QUE APRESENTAM $F_s < 1,5$ EM CADA NÍVEL DE SATURAÇÃO DO SOLO SEM VEGETAÇÃO

Uso do Solo	Área total da Bacia		Quantidade em porcentagem de cada uso do solo que apresentam $F_s < 1,5$ em cada nível de saturação do solo		
	Total (Km ²)	Total (%)	Saturado (%)	Não saturado (%)	Seco (%)
Capoeira	0,66	1,66	18,33	1,44	0,24
Agricultura	9,75	24,46	1,78	0,07	0,00
Campo	8,04	20,17	9,64	0,51	0,07
Floresta	6,55	16,43	11,41	0,88	0,01
Urbano	14,86	37,28	6,82	0,53	0,08

Fazendo-se a correlação entre o uso do solo e os Fatores de Segurança, verificou-se que as áreas vegetadas (florestas e capoeiras) não apresentam áreas instáveis, independentemente da quantidade de saturação de água no solo. Mas quando se simulou a retirada dessa vegetação para calcular os F_s percebeu-se o surgimento de áreas com risco de escorregamento, com $F_s < 1,5$.

As áreas ocupadas por capoeiras à medida em que se aumentava a saturação de água no solo, aumentou também a instabilidade do solo. No caso de solo saturado, 18,33% das capoeiras se tornaram instáveis, para solo não saturado esse valor se reduziu para 1,44% e para solo natural ou seco o valor ficou em 0,24% do total das capoeiras.

Nas regiões de florestas, a retirada da vegetação tornou instável 11,41% da área quando o solo estava saturado, 0,88% para solo não saturado e 0,01% para solo com umidade natural.

Este resultado só reforça o fato de que a vegetação possui um importante papel na estabilidade dos taludes.

Através do estudo realizado verificou-se que os parâmetros da cobertura vegetal auxiliam na estabilidade da encosta, uma vez que as áreas vegetadas, ou seja, áreas cobertas por florestas ou capoeira não apresentaram Fator de Segurança menor que 1,5 estando as vertentes em equilíbrio ($F_s \geq 1,5$).

Independentemente da classe de solo, declividade do terreno ou velocidade do vento, em todos os casos o Fator de Segurança nas áreas com vegetação de porte arbóreo foi superior a 2,0, indicando uma boa estabilidade.

Do total ocupado pela agricultura, apenas 1,78% se apresentou instável quando o solo está saturado e 0,07% no caso de não saturado, enquanto que o solo com umidade natural não apresentou risco de escorregamento.

As áreas de campo se apresentaram com 9,64% do total instável quando o solo está saturado, 0,51% para solo não saturado e apenas 0,07% para solos com umidade natural ou quase seco.

As áreas urbanas apresentaram 6,82% de instabilidade para solos saturados, 0,53% para não saturado e 0,08% para solos com umidade natural ou seco.

Os dados acima demonstram a grande relação da estabilidade das encostas com períodos de grande pluviosidade ou saturação do solo. É possível notar que áreas antes estáveis, com umidade natural ou praticamente seca, tornaram-se instáveis com a presença da água.

A tabela 40 mostra uma divisão do uso do solo nas classes de solo existentes e uma relação com as quantidades de áreas com risco de escorregamento nos níveis de saturação do solo adotados.

Exemplificando o quadro abaixo (em amarelo), percebe-se que 19,34% da classe campo é coberta por solos da classe Cambissolo e que 37,17% desse solo pode apresentar risco ao escorregamento quando saturado, reduzindo para 1,10% para não saturado e 0,05% quando o solo estiver seco.

TABELA 40 – RELAÇÃO ENTRE AS CLASSES DE SOLO, SEU USO E VALORES DE INSTABILIDADE

Uso do Solo	ÁREA TOTAL (%)	SATURADO (%)	NSATURADO (%)	SECO (%)
CAPOERIA		0,66 Km²		
CAMBISSOLO	31,17	45,78	1,96	0,14
NEOSSOLOS	7,86	43,04	10,16	2,22
TERRA ROXA	3,77	1,72	0,00	0,00
LATOSSOLO	57,20	2,48	0,16	0,05
AGRICULTURA		9,75 Km²		
CAMBISSOLO	8,25	16,46	0,04	0,00
NEOSSOLOS	0,38	24,87	7,25	1,29
TERRA ROXA	9,66	0,51	0,00	0,00
LATOSSOLO	81,71	0,34	0,02	0,00
CAMPO		8,04 Km²		
CAMBISSOLO	19,34	37,17	1,10	0,05
NEOSSOLOS	3,55	36,78	6,06	1,25
TERRA ROXA	7,22	1,23	0,11	0,02
LATOSSOLO	69,90	1,52	0,10	0,02

FLORESTA		6,55 Km²		
CAMBISSOLO	18,34	43,68	1,78	0,06
NEOSSOLOS	5,84	45,83	8,65	1,14
TERRA ROXA	9,53	0,83	0,02	0,00
LATOSSOLO	66,30	0,99	0,07	0,01
URBANO		14,86 Km²		
CAMBISSOLO	13,71	30,46	1,37	0,07
NEOSSOLOS	2,60	33,62	8,58	1,78
TERRA ROXA	2,63	1,98	0,15	0,03
LATOSSOLO	81,06	2,06	0,13	0,02

5.5.3 Análise das Áreas Susceptíveis a Escorregamentos

Os remanescentes vegetais existentes na área da bacia encontram-se nas encostas de grande declividade da bacia (figura 47), e conforme se observou foram preservados principalmente pela dificuldade da ocupação urbana dessas áreas.

Atualmente devido ao crescimento urbano e ao inchaço populacional dos últimos anos no município, percebeu-se que essas mesmas áreas estão sofrendo invasões e ocupações apesar da dificuldade de acesso, principalmente por uma população de baixa renda que procura essas áreas devido a proximidade do centro urbano. Essa ocupação, em muitos casos, vem ocorrendo de forma desordenada e com implantação de edificações instáveis, além disso, traz como consequência a retirada da vegetação existente, aumentando a instabilidade da encosta.

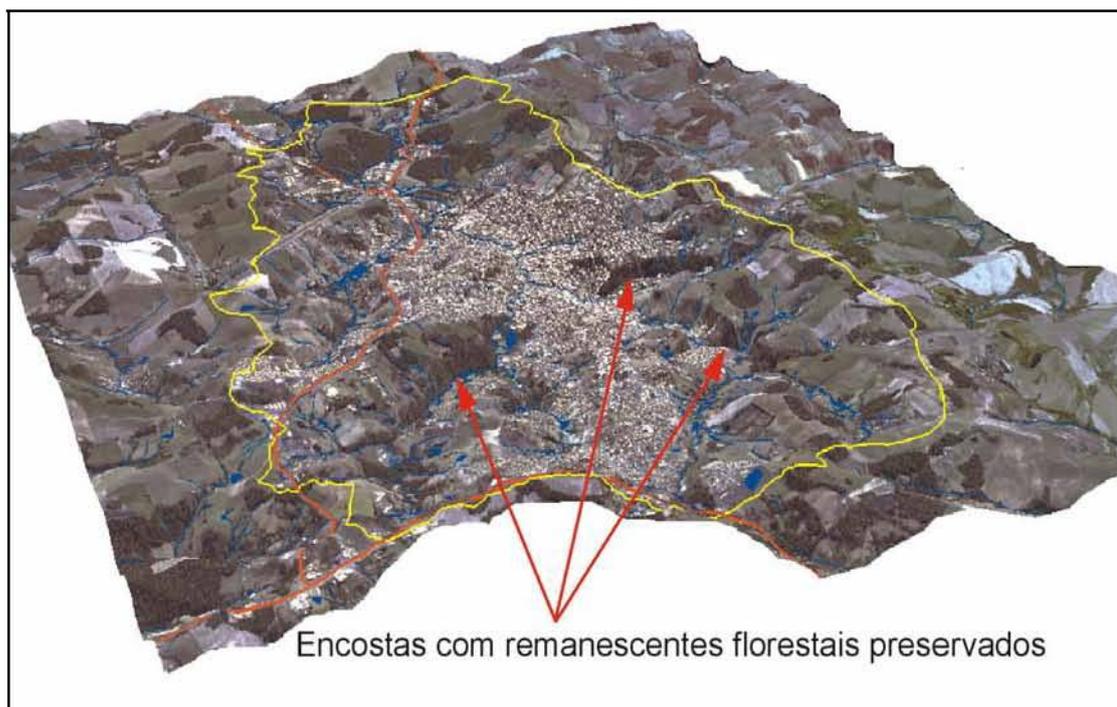


FIGURA 47 – DELIMITAÇÃO DO ALTO E MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO LIGEIRO EM 3D, MOSTRANDO VEGETAÇÃO PRESERVADA EM ENCOSTAS DE GRANDE DECLIVIDADE

Avaliando os resultados do Fator de Segurança determinados para solos sem cobertura vegetal, observa-se que a instabilidade ocorre em terrenos secos a partir de declividades de 55%, enquanto, para solos não saturados, a declividade passa para 40% e considerando o solo saturado, o risco de escorregamento passa a ser maior a partir de declividades iguais a 20%.

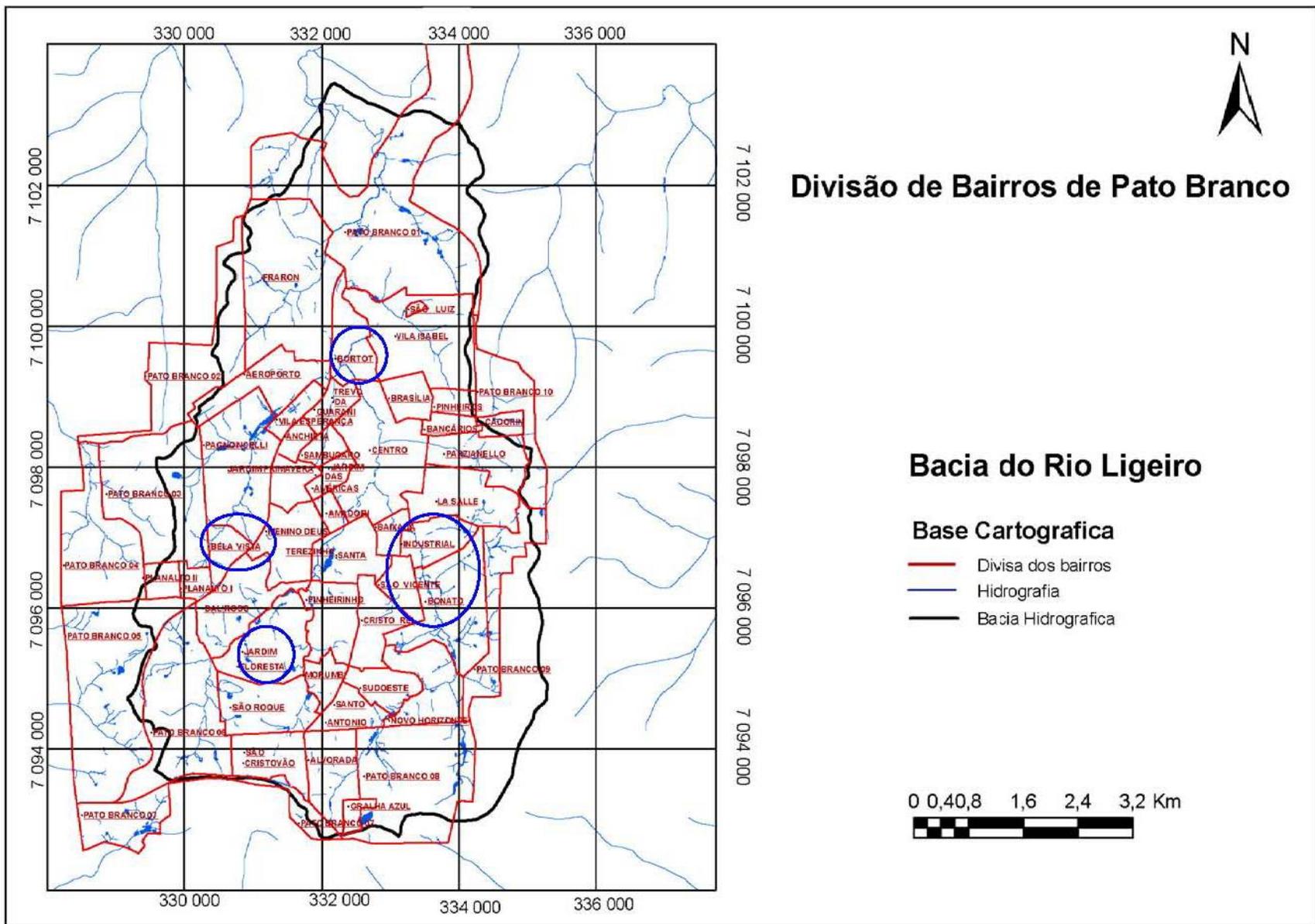
Pode-se concluir que áreas hoje estáveis, mesmo estando com o solo saturado, quando desprovidas da vegetação se tornarão instáveis e em condições eminente de escorregamento. Este fato mostra a importância da vegetação no aumento da estabilidade de vertentes por efeito do peso das árvores e na agregação do solo pelas raízes das árvores.

As áreas detalhadas a seguir apresentam instabilidade alta, podendo ser consideradas como as mais críticas da bacia, devendo ser objeto de estudos específicos e até ter sua ocupação restringida.

Essas áreas também apresentam as maiores declividades da bacia estando a instabilidade associada à declividade acentuada e à ocupação desordenada das encostas conforme verificou-se no levantamento de campo.

Para uma melhor localização dos pontos que serão descritos na seqüência, a figura 48, apresenta a divisão de bairros do Município de Pato Branco e mostra onde estão marcados os bairros que serão discutidos a seguir.

FIGURA 48 – DIVISÃO DE BAIRROS DO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO



A figura 49 mostra um comparativo do Fator de Segurança da mesma área (Bairro Bonato e Industrial) com e sem vegetação. Na primeira parte, as áreas ocupadas por Florestas e Capoeiras estão estabilizadas apresentando F_S superior a 3,0. Na segunda parte, quando se desconsiderou a cobertura vegetal, as áreas que estavam ocupadas por Florestas e Capoeiras se tornaram em grande parte instáveis, apresentando $FS < 1,5$. Também é possível observar em relação à declividade do terreno, que as áreas mais instáveis são as que apresentam maior declividade. No Mapa de Solos é possível notar que a maior instabilidade está localizada nos solos das classes cambissolo e neossolos.

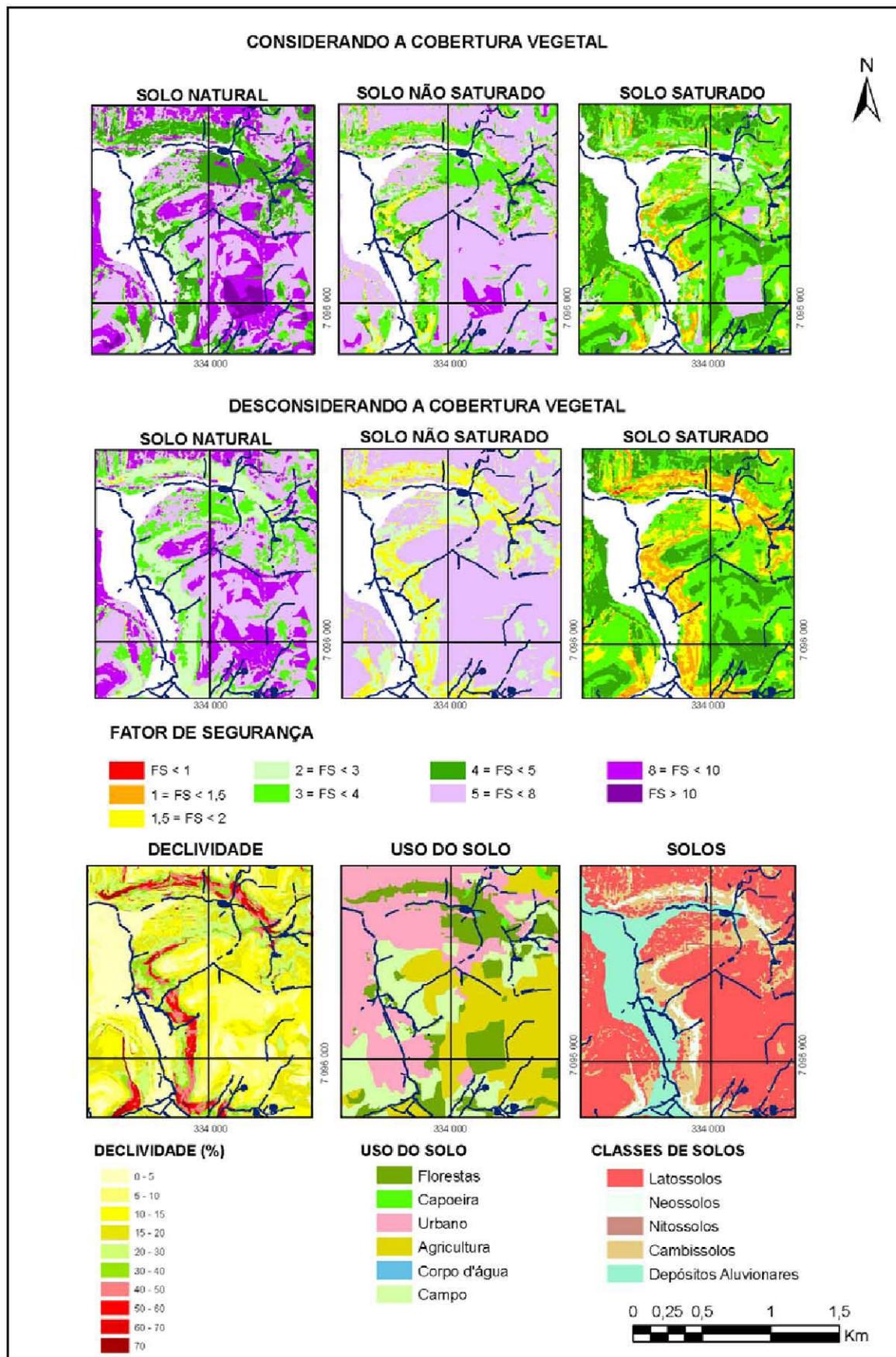


FIGURA 49 – DETALHE DA ÁREA EM ESTUDO, MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO FATOR DE SEGURANÇA

A figura 50 mostra três pontos da encosta do Bairro Bonato que segundo o cálculo do Fator de Segurança são consideradas áreas instáveis simulando a retirada da vegetação e saturação do solo ($1 < F_s < 1,5$).

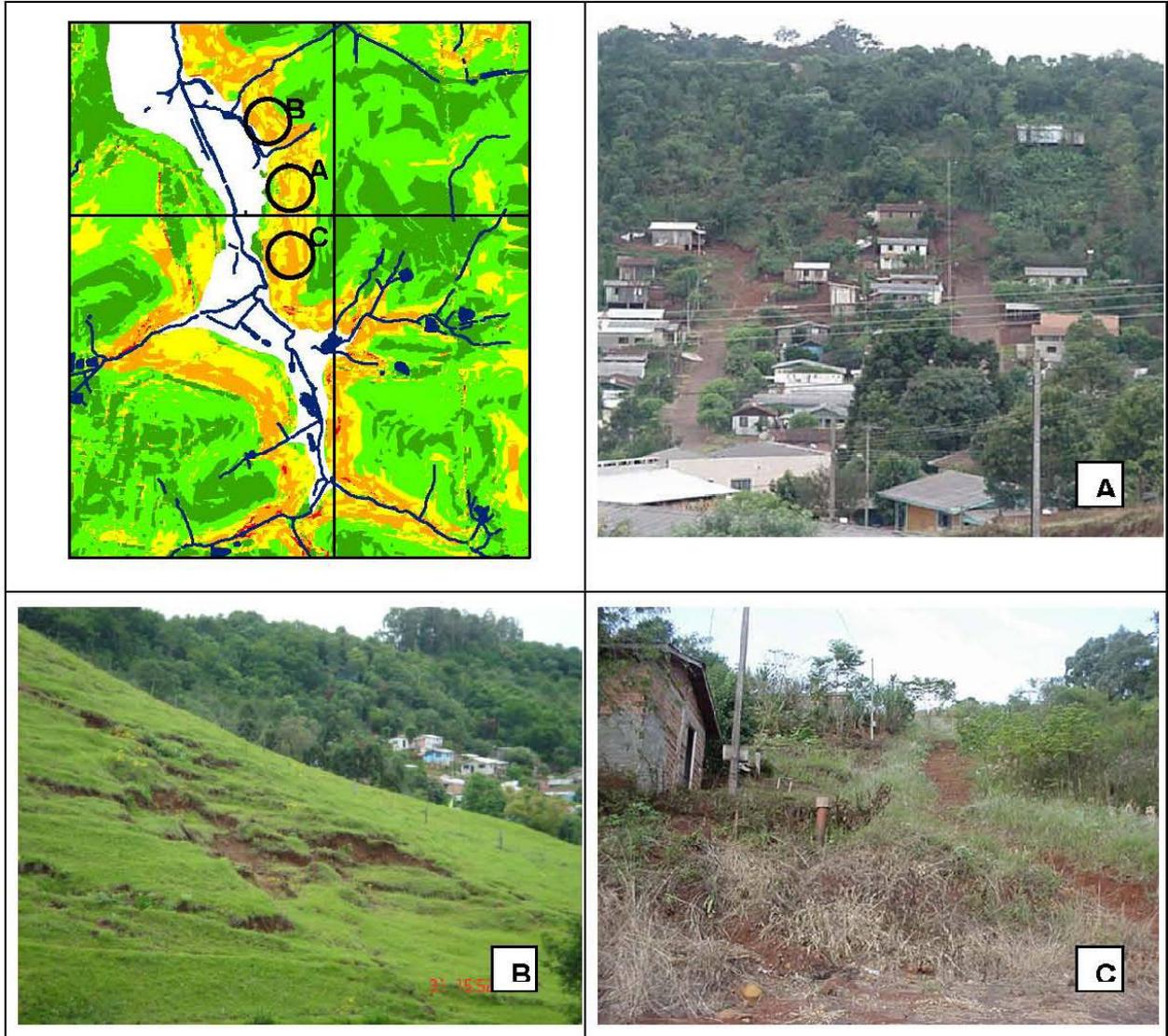


FIGURA 50 – DETALHE DO BAIRRO BONATO

As encostas de grande declividade, como é o caso no Bairro Bonato (Foto A), estão sendo ocupadas por invasões, sem planejamento e de forma desordenada ou através de aprovação incorreta de loteamentos. Com isso, as vertentes estão sendo modificadas, a vegetação está sendo retirada, o que tem contribuído para a ocorrência de escorregamentos.

Na Foto B, pode-se observar em primeiro plano uma área de campo e pastagem, apresentando processo de instabilidade, sendo possível ver rastejos e erosões e, ao fundo, na parte vegetada da encosta, ocupação desordenada de moradias com retirada da vegetação.

Na Foto C, pode-se notar que as encostas do Bairro Bonato, mesmo apresentando declividade superior a 60%, estão sendo ocupadas, a vegetação está sendo retirada para dar lugar às moradias, tornando áreas de risco.

Importante mencionar que, conforme o Mapa de Fator de Segurança da Figura 43, as áreas das Fotos A, B e C estão localizadas em regiões com susceptibilidade alta de escorregamento quando o solo estiver saturado e se a vegetação for retirada.

A Figura 51 mostra detalhes do Bairro Industrial nos diversos mapas elaborados.

O Bairro Industrial está localizado entre uma encosta e um fundo de vale, possuindo grande quantidade de habitações, com lotes de pequena metragem e medidas irregulares, que dificulta o escoamento das águas da chuva. A ocupação nesse bairro ocorre desde as áreas mais baixas com pouca declividade, sujeitas a inundações até áreas altas, com declividades acentuadas, com risco de escorregamentos.

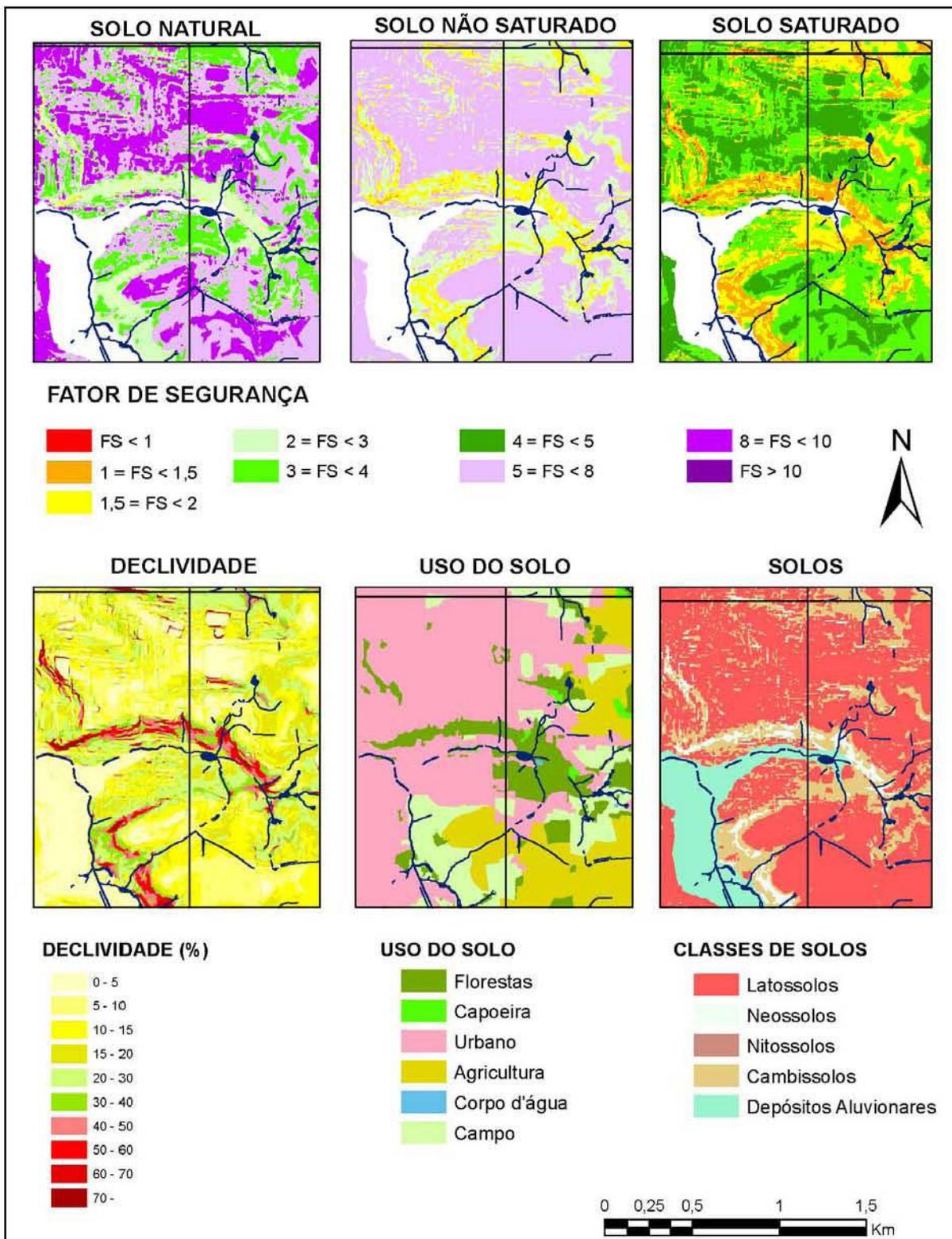


FIGURA 51 – DETALHES DO BAIRRO INDUSTRIAL (F_S SEM VEGETAÇÃO)

A figura 52 indica três pontos da encosta do Bairro Industrial para mostrar os problemas encontrados nessas áreas que, nos cálculos realizados, apresentaram $F_S < 1,5$.

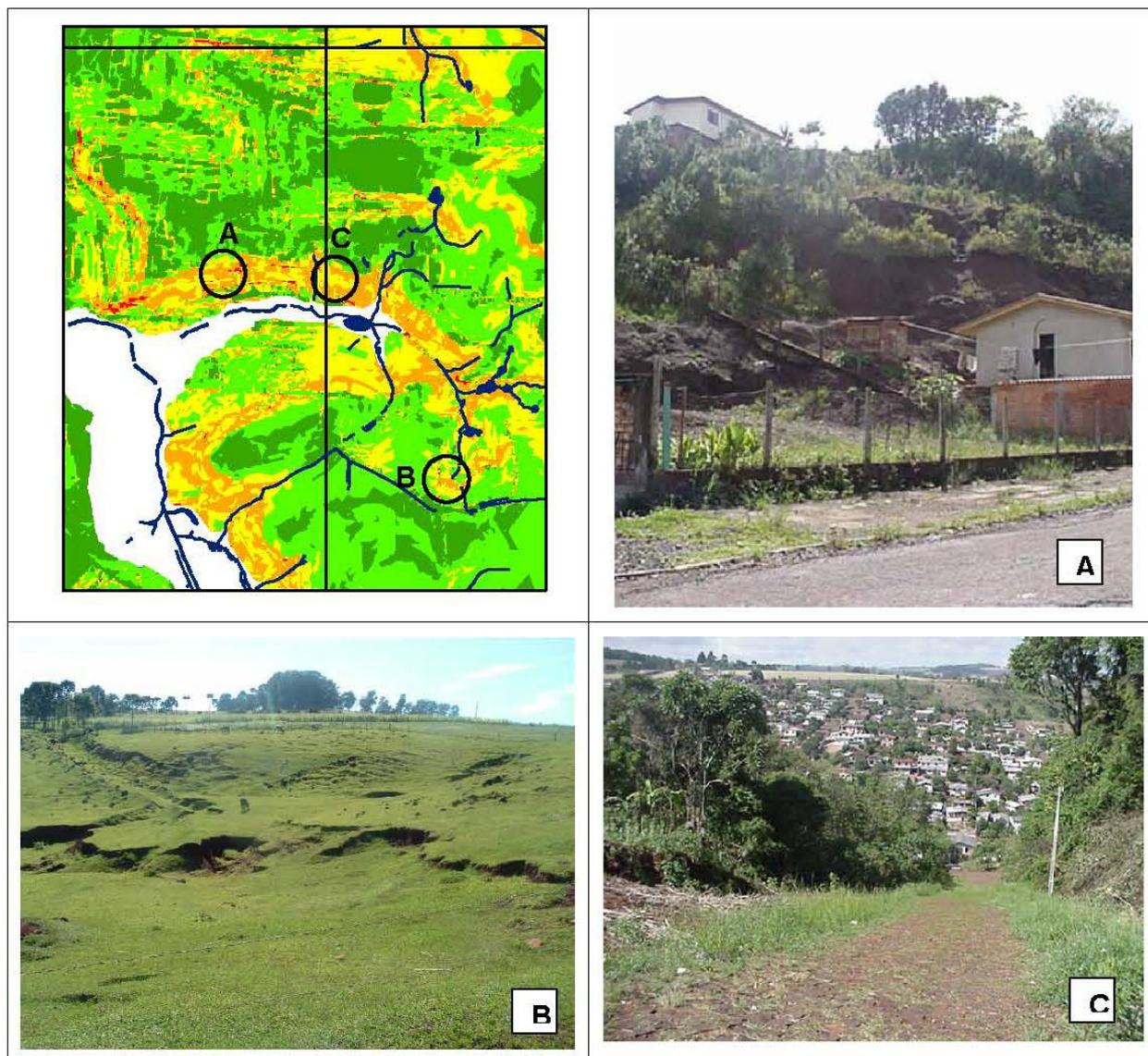


FIGURA 52 – DETALHE DO BAIRRO INDUSTRIAL

Como é possível observar na Foto A, as encostas do Bairro Industrial vêm sendo ocupadas desordenadamente, por meio da retirada da vegetação e execução de cortes sem critérios. A foto B mostra áreas ocupadas por campo, com declividade superior a 20% e solos do tipo cambissolos, que apresentam várias marcas de instabilidade, tais como rastejos e erosões. Ainda em relação a obras executadas sem consideração ao meio físico, notam-se diversas ruas, pela cidade, com traçado criando rampas perpendicularmente às curvas de nível (Foto C) as quais servem como canais de concentração das águas de chuva podendo resultar em erosões e inundações à jusante.

A figura 53 mostra detalhe do Bairro Bela Vista.

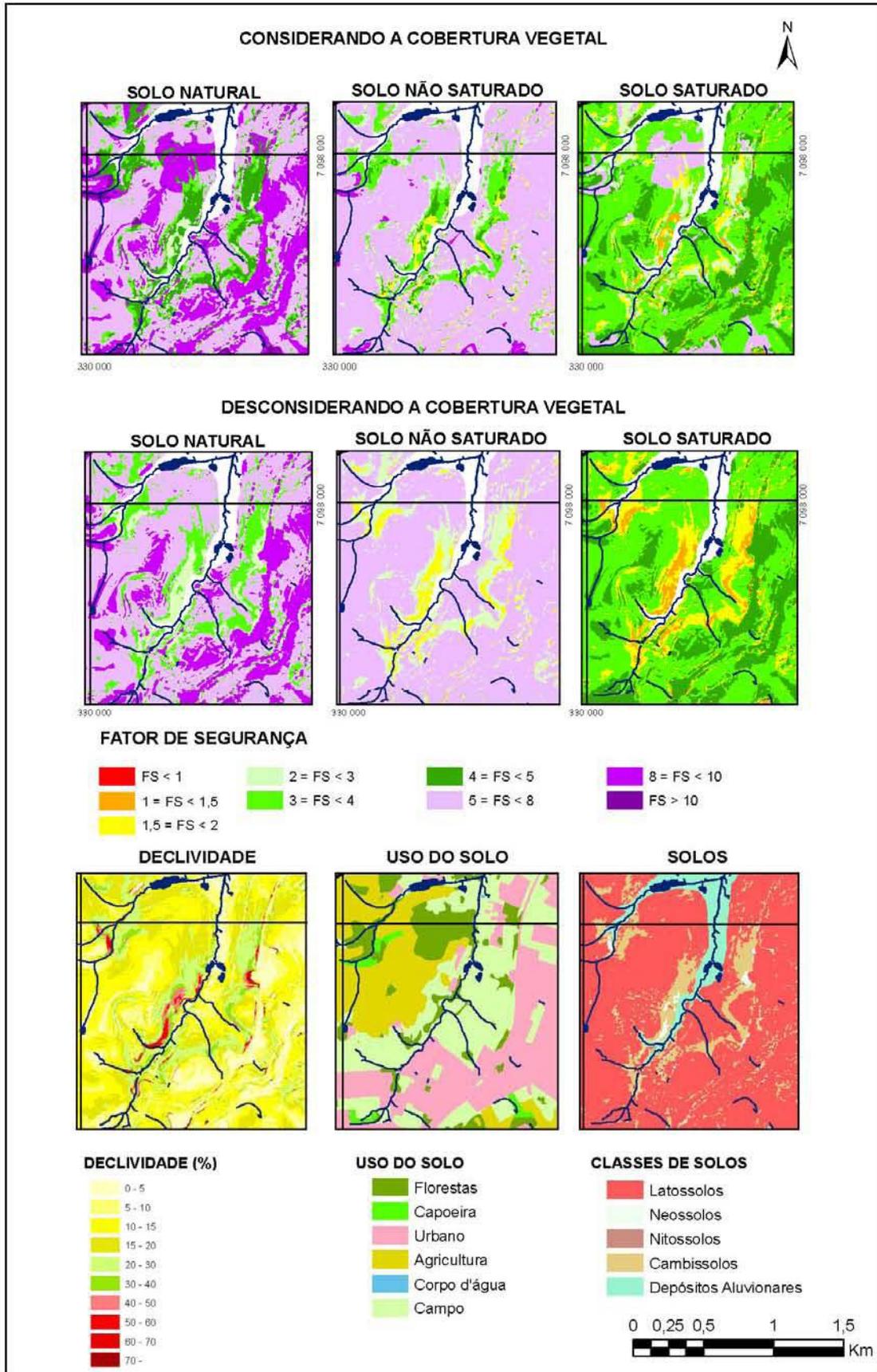


FIGURA 53 – DETALHE DOS MAPAS DO BAIRRO BELA VISTA

O bairro Bela Vista está localizado em área com declividade média superior a 30% e constituída por solo da classe cambissolo. Nessa área, foram realizados diversos cortes para implantar moradias populares e construção de conjuntos habitacionais conforme mostram as fotos da figura 54. Com a retirada da vegetação e raspagem da camada superior do solo, os Cambissolos ficaram expostos e, por suas características de pouca capacidade de infiltração, estão forçando as águas pluviais a escoarem superficialmente, provocando o surgimento de sulcos de erosão e até provocar a desestabilização de casas e infraestrutura urbana (ruas e sistema de drenagem), fato já detectado anteriormente nessa área.

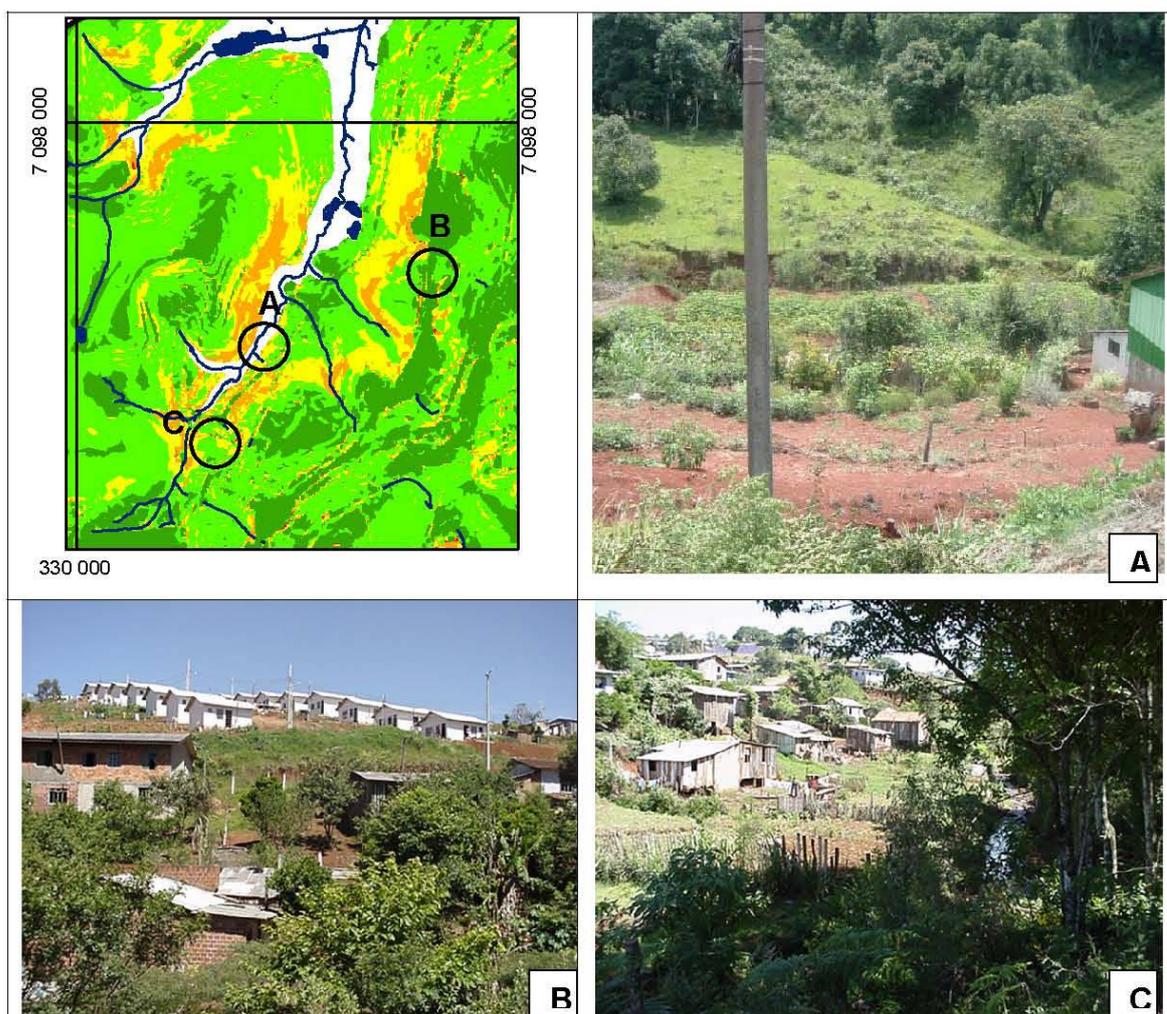


FIGURA 54 – OCUPAÇÃO NO BAIRRO BELA VISTA

As encostas do Bairro Jardim Floresta são um exemplo da relevância da vegetação na proteção de encostas, pois nessa área as partes cobertas por vegetação apresentaram $F_s > 1,5$ garantindo, assim, a estabilidade da encosta. Mas é nítido no comparativo dos mapas de F_s da figura 55, que a retirada das árvores transformaria essa região muito instável.

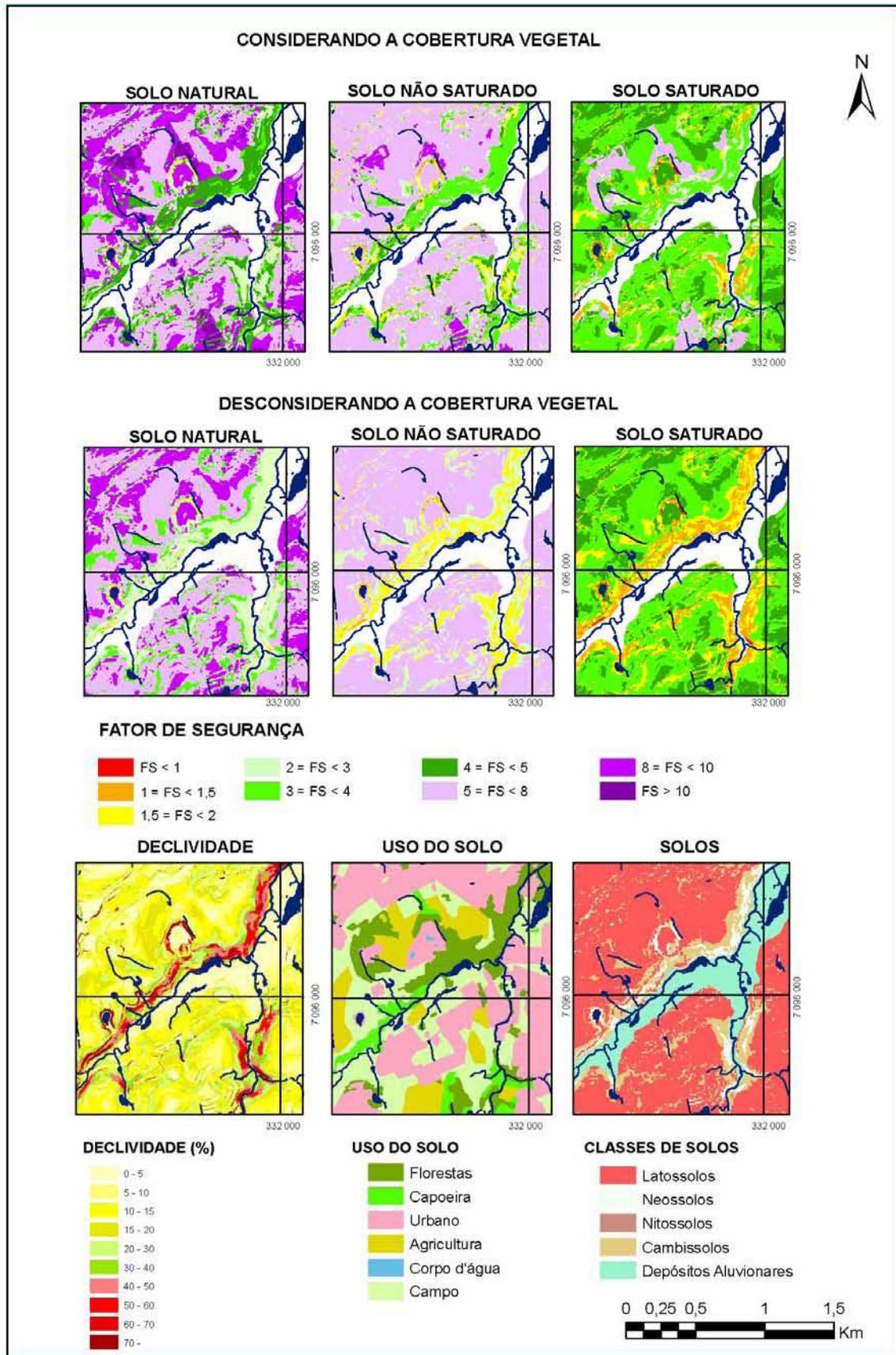


FIGURA 55 – DETALHE DO BAIRRO JARDIM FLORESTA, NOS DIVERSOS MAPAS ELABORADOS

Na figura 56, é possível observar a vegetação muito preservada na encosta do Bairro Jardim Floresta, não existindo atualmente nenhuma forma de ocupação na vertente que ainda conta com a presença de vegetação nativa da região.

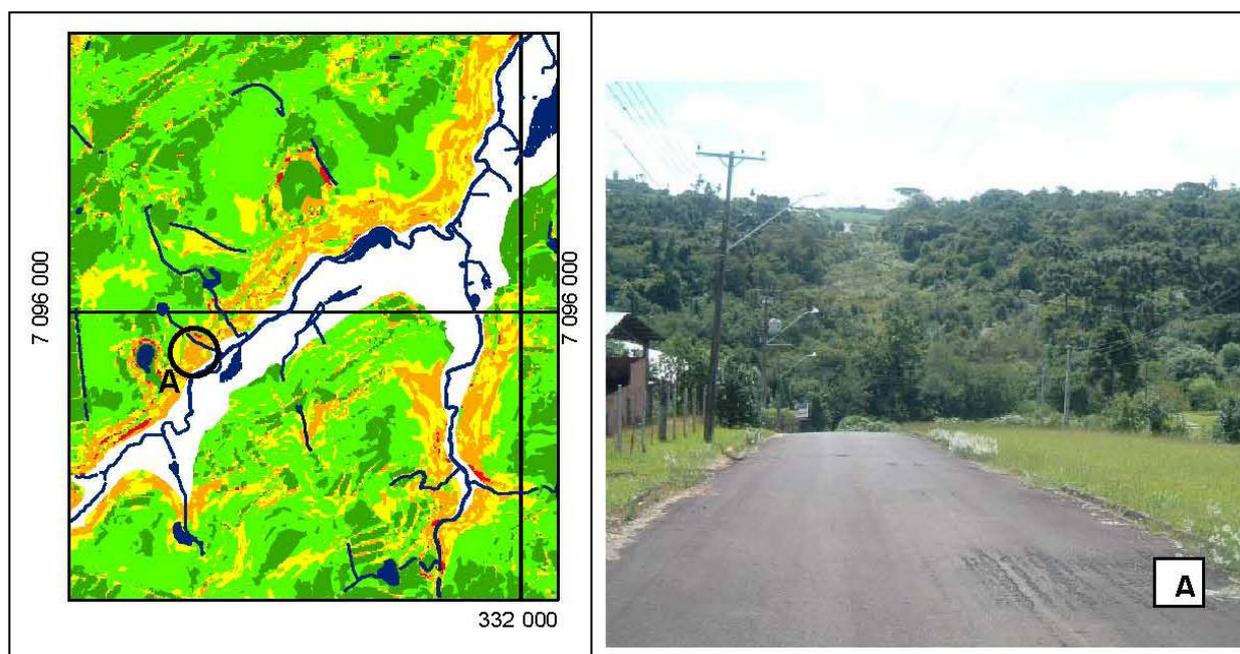


FIGURA 56 – BAIRRO JARDIM FLORESTA

No Bairro Bortot (figura 57), as construções em área de risco, próximas ao leito do rio Ligeiro sempre sofreram nos períodos de grande pluviosidade, seja por ocorrência de pequenos escorregamentos em 2000 (Foto C) ou pelo surgimento de erosões causadas pela chuva em 2002 (Foto B).

Atualmente, (Foto A) não se verificaram grandes problemas na área, apenas pequenas incisões no solo causadas pela retirada da cobertura vegetal, pontos com surgimento de erosões lineares e lançamento de esgoto diretamente no rio sem o devido tratamento.

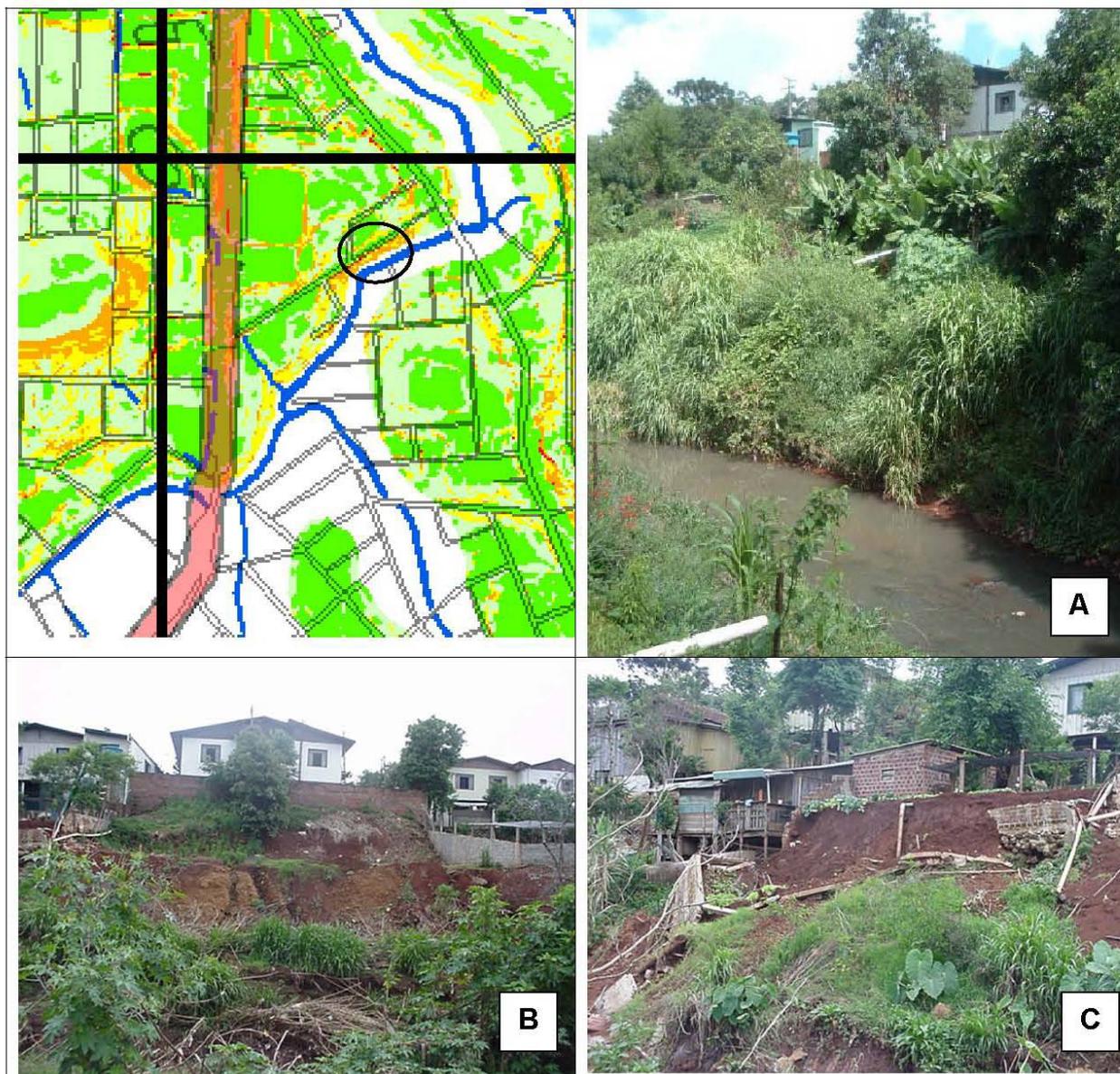


FIGURA 57 – DETALHE DE CONSTRUÇÕES PRÓXIMAS AO RIO LIGEIRO, NO BAIRRO BORTOT EM TRÊS ÉPOCAS DIFERENTES, 2006 (A); 2002 (B); 2000 (C)

A falta de fiscalização das questões ambientais, por parte da Prefeitura Municipal, pode ser percebida ao longo da cidade, pois é fácil encontrar áreas de preservação, como encostas, sendo ocupadas por construções, e fundos de vale transformados em loteamentos.

Também tem ocorrido a degradação de áreas, provocada por empresas de terraplenagem que executam cortes e aterros com geometria inadequada deixando o solo exposto e sem proteção, tornando áreas que, inicialmente eram estáveis, em taludes altamente instáveis conforme é mostrado na figura 58, áreas apresentando vários sulcos de erosão.

A figura 58 - A, exibe o detalhe de uma ravina localizada no bairro Menino Deus, causada pela falta de proteção do solo. Essas erosões já tinham sido verificadas no ano de 2001 por Tabalipa (2002), mas ainda hoje nada foi feito para conter esse problema.

A figura 58 - B, C e D mostram áreas consideradas como de expansão do município, próximas ao Bairro Dall Ross, apresentando o surgimento erosões e diversas ravinas provocadas pelas águas pluviais ao escoarem em solos expostos.



FIGURA 58 – ÁREAS DE CORTE E ATERRO APRESENTANDO VÁRIAS EROSÕES EM SULCOS.

Várias áreas que apresentam grande declividade estão sendo ocupadas na cidade, seja por invasões ou através de loteamentos aprovados pelo governo municipal. Com isso, as encostas vêm sendo modificadas, o que tem contribuído para a ocorrência de escorregamentos.

Essas ocupações contrariam, além dos critérios geológicos e ambientais, as determinações da Lei Federal 6.766/79, que trata do parcelamento do solo urbano e considera que, em terrenos com declividade > 30%, somente será admitido o seu parcelamento, ou uso, se atendidas às exigências específicas das autoridades competentes e com as determinações da Lei Federal 4.771/65 que institui o Código Florestal, modificada pela Lei Federal 7.511/86, que considera de preservação permanente as vegetações naturais em encostas com declividade superior a 45°.

É comum ver loteamentos sendo aprovados pela Prefeitura Municipal, em áreas sujeitas a essas restrições legais sem o cumprimento das exigências específicas.

A exemplo de outras cidades brasileiras, na cidade de Pato Branco, está surgindo os primeiros condomínios e/ou loteamento horizontal fechados. A localização dessas áreas coincide com áreas verdes e rica em corpos d'água e nascentes, com aproveitamento das áreas rurais no entorno da área urbana.

A existência de rios e vegetação no loteamento é utilizada como marketing de qualidade de vida, e refúgio da vida moderna estressante.

A figura 59 A, B e C mostra condomínio horizontal fechado em construção no bairro Parzianello, sendo possível observar a execução de cortes e aterros que avançam sobre algumas nascentes da bacia do rio Ligeiro. Percebe-se também o surgimento de processos erosivos sobre esses aterros que estão assoreando a nascente localizada a poucos metros da construção.

Dessa forma alguns trechos de rio e restos de matas são incorporados para criar um ambiente “saudável” aos futuros moradores enquanto que o restante dessas áreas de mananciais é aterrada para compor a geometria das obras do condomínio (figura 59 – B). Embora a legislação brasileira seja clara quanto à ocupação de áreas com presença de nascentes, em muitos casos, ela não é respeitada causando um grande ônus ao meio ambiente e população futura.

A figura 59 D, mostra um exemplo muito comum de como são executadas as construções na cidade, que devido a declividade do terreno são necessários a realização de cortes e aterros. Na maioria dos casos executam-se os cortes, deixando o solo exposto sem realizar a devida contenção resultando quase sempre em desabamentos das construções vizinhas ou ao menos formação de trincas e rachaduras nas casas.

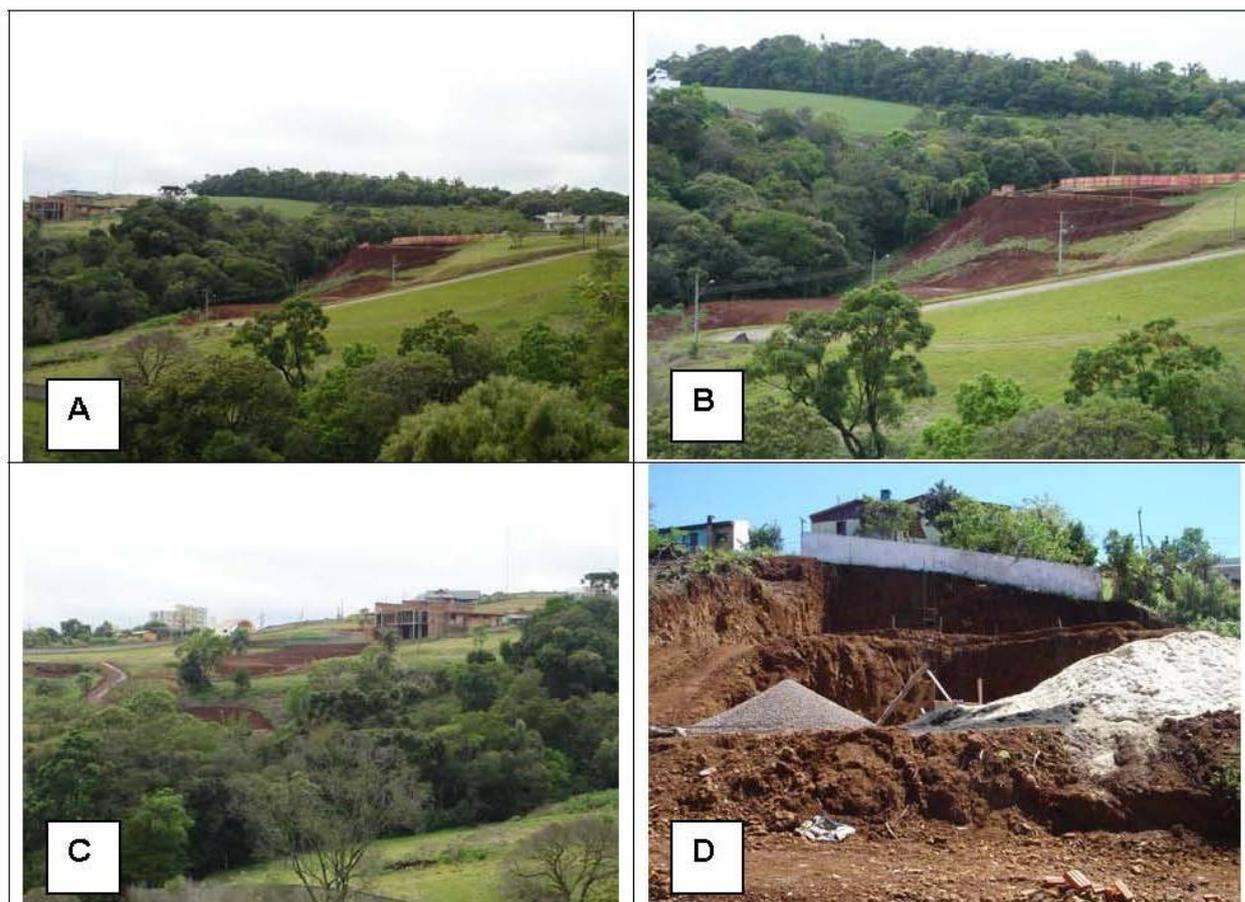


FIGURA 59 – OCUPAÇÃO DE ÁREAS SEM A DEVIDA ATENÇÃO A EXIGÊNCIAS LEGAIS, TÉCNICAS OU AMBIENTAIS.

A idéia desse estudo não é impedir totalmente a ocupação das encostas, mas sim que o uso seja realizado de forma tecnicamente adequada e segura, respeitando as condicionantes naturais.

Neste trabalho buscou-se aplicar um método voltado para o levantamento de áreas que apresentam risco, mapeando os diferentes Fatores de Segurança das encostas aos escorregamentos, permitindo assim a quantificação da possibilidade de ocorrer esse tipo de acidente nas vertentes da área de estudo.

CONCLUSÕES

O capítulo descreve as conclusões da pesquisa e dos resultados obtidos. Ainda relaciona as referências bibliográficas utilizadas e nos anexos, os resultados dos laudos dos ensaios de cisalhamento direto.

Nesta pesquisa, estudou-se a Estabilidade de Taludes, através do método determinístico, empregando o equilíbrio limite.

O trabalho foi proposto com o objetivo de determinarem-se as condições de estabilidade das encostas pertencentes a bacia do rio Ligeiro no município de Pato Branco – Pr. Essas condições são dadas por um Fator de Segurança que representa a razão entre as forças favoráveis e as forças resistentes ao movimento de um talude.

O cálculo da estabilidade de vertentes pelo método determinístico possibilitou quantificar os Fatores de Segurança em valores absolutos, através da avaliação de fatores de segurança. Consideraram-se informações detalhadas das encostas fundamentadas em princípios da mecânica dos solos, pedologia, geologia, relevo e por meio do modelo matemático adotado, pode-se, igualmente, avaliar parâmetros da cobertura vegetal e da interferência da água na estabilidade dos taludes.

De acordo com os resultados alcançados no presente estudo, verifica-se que a área estudada apresenta regiões com instabilidade, susceptíveis a escorregamentos, como consequência dos fatores ambientais (pluviosidade e ventos), do meio físico (tipo de solos, declividade e orientação das encostas) e do uso e ocupação das encostas.

As técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações

Geográficas apresentaram-se eficientes na interpolação dos mapas temáticos e na confecção dos mapas de Fatores de Segurança das encostas a partir dos dados obtidos pela aplicação das equações.

O SIG utilizado apresentou-se como uma extraordinária ferramenta para a análise de estabilidade de encostas, em virtude de facilitar a elaboração de mapas de escorregamentos, e na combinação de dados espaciais. O emprego de técnicas de geoprocessamento possibilitou trabalhar ao mesmo tempo com um grande número de informações de uma forma precisa, permitindo uma rápida visualização espacial das áreas críticas.

A determinação dos parâmetros físicos e mecânicos do solo em laboratório conduziram a uma melhor caracterização geotécnica dos solos e a uma determinação precisa da resistência dos mesmos a escorregamentos.

Dessa forma, a qualidade dos resultados está fortemente relacionada com a precisão da determinação dos parâmetros físicos dos solos, na representatividade das amostras e o grau de detalhamento dos mapas temáticos.

Os fatores envolvidos na análise de estabilidade encontrados foram aplicados em seis modelos matemáticos para a determinação dos índices de segurança da área estudada, em função da presença ou não de água na vertente e da existência ou não de vegetação.

Os mapas encontrados permitem uma visualização das áreas de risco em relação à instabilização das encostas.

Considerou-se a vertente com cobertura vegetal e sem a presença de água (seca), e, assim ficaram anulados os efeitos da pressão de percolação e da pressão neutra. Nesta situação, constata-se que menos de 0,17% da área da bacia apresenta-se em condições instáveis. Passando para uma situação de solo não saturado esse valor de instabilidade se eleva para 0,27% da área da bacia. A partir do momento em que os solos da área apresentam-se totalmente saturados, mais de 3,29% da área da bacia tornou-se instável.

Quando é simulada a situação de solo sem cobertura vegetal as áreas instáveis aumentaram respectivamente de 0,17% para 0,25% com solo natural, de 0,27 para 0,43% com solo não saturado e de 3,29% para 6,27% para solo saturado.

A água é o principal agente determinante dos episódios de escorregamento em que a instabilidade das encostas aumenta com a saturação do solo. Os períodos de chuvas intensas e prolongadas potencializam os efeitos da pressão neutra e da

força de percolação à sua situação máxima, levando a uma drástica diminuição da resistência do solo aos escorregamentos.

Verificou-se também que a vegetação, aliada à coesão do solo, contribui para a estabilização das encostas da região, uma vez que, o efeito da vegetação na encosta fez aumentar o Fator de Segurança da área estudada, não havendo região instável onde existe vegetação.

Muitas áreas estão estáveis graças à ação da vegetação que aumentaram o valor de F_S acima de 2,0, indicando uma boa estabilidade. A vegetação, dessa forma, está protegendo essas áreas, garantindo a sua estabilidade e a sua remoção, faz com que essas áreas passem a ser instáveis em condições de risco de escorregamento.

Ainda em relação à vegetação, nas zonas estabilizadas por cobertura vegetal, predominam os solos Neossolos e Cambissolos com altas declividades, de elevada susceptibilidade a processos erosivos e escorregamentos, tão logo seja retirada a cobertura vegetal.

Observou-se ainda que a vegetação (floresta e capoeira) representa 18,09% do total da bacia. Se fosse retirada, 11,41% das regiões de florestas se tornaria instáveis com solo saturado, 0,88% para solo não saturado e 0,01% para solo com umidade natural. Nas áreas ocupadas por capoeiras que representam 18,33% de áreas instáveis para solo saturado, 1,44% para solo não saturado e 0,24% para solo natural ou seco.

A avaliação dos índices de segurança da área permite concluir que a vegetação apresenta um papel importante na estabilidade das vertentes por efeito do peso das árvores e agregação do solo pelas raízes. Este fato mostra a importância da vegetação no aumento da estabilidade de vertentes e a necessidade de sua preservação.

A partir da relação dos índices de segurança obtidos pela aplicação da equação de fatores de segurança e das características geoambientais da área, pode-se deduzir que as áreas estáveis aparecem com maior frequência nas áreas de solos latossolos e nitossolos, por estarem localizados em áreas de baixa declividade, onde o perigo de ocorrência de deslizamento é praticamente nulo.

Constatou-se, por meio desse estudo, que as áreas mais susceptíveis a escorregamentos estão associadas a encostas com solos do tipo cambissolo e neossolo encontrados em áreas com declividade superior a 20%.

Percebeu-se que, para piorar a situação, quando não se consideram os parâmetros da cobertura vegetal em solos saturados, mais de 6,27% da área apresenta valores de $F_s < 1,5$, sendo que desses, 0,29% corresponde a áreas com valores de F_s menor que 1, ou seja, áreas altamente instáveis.

Em relação à inclinação, as áreas com maiores Fatores de Segurança correspondem à declividade menor que 20%, nos quais não existe risco de escorregamentos.

Pode-se afirmar, então, que as áreas instáveis da bacia coincidem com declividades acima de 20%, potencializadas pela atuação da força de gravidade sobre a vertente.

Nas áreas de solo latossolo apenas 1,36% apresentou $F_s < 1,5$ quando saturados e sem vegetação, reduzindo para 0,09% para Não Saturados e 0,02% para solo com umidade Natural ou Seco.

Nos solos nitossolos 0,99% é instável quando o solo estiver Saturado, reduzindo para 0,05% para solo Não Saturado e 0,01% para solos Naturais ou Secos.

Nos solos neossolos 38,62% apresentaram-se instáveis quando Saturados, passando para 8,00% quando Não Saturados e 1,44% em estado Natural ou Seco.

Nas áreas de ocorrência de cambissolos, 33,57% se tornará instável quando o solo estiver Saturado, diminuindo para 1,22% para solos Não Saturados e 0,06% para solos Naturais ou Secos.

Observou-se ainda que, considerando a vertente com umidade natural (seco) e sem vegetação, apenas os solos da classe cambissolo, com declividade entre 55 a 60%, apresentaram Fator de Segurança $< 1,5$. No caso de vertente não saturada, apresentaram instabilidade os solos cambissolos com declividade entre 40 e 60% e neossolos com qualquer declividade.

Finalmente, quando se considerou o solo saturado, apresentaram $F_s < 1,5$ os solos cambissolos com declividade entre 30 e 60%, neossolos com qualquer declividade e nitossolos e latossolo com declividade superior a 20%.

Portanto, constatou-se que o solo que apresenta a pior situação em termos de segurança a escorregamentos é o cambissolo em encostas sem vegetação e o solo que apresenta a melhor situação em termos de segurança a escorregamentos é o latossolo em encostas sem vegetação.

As áreas de ocorrência de cambissolos e neossolos correspondem a 84% das áreas instáveis da bacia quando o solo se encontra totalmente saturado. Isto se deve ao fato de estarem associados à vertente com declividades elevadas.

Foi possível, através deste trabalho de pesquisa, estabelecer a velocidade e a direção dos ventos da bacia estudada, elementos importantes para determinação dos efeitos da força do vento nas copas das árvores.

Observou-se também que as encostas voltadas para a direção NW e S possuem ventos com as maiores velocidades, apresentando menor F_S em relação às demais. A redução do F_S de encostas com as mesmas características, mas orientação diferente pode ultrapassar a 14%.

Através do mapeamento realizado, observa-se que, sem considerar a cobertura vegetal, a instabilidade ocorre em terrenos secos a partir de declividades de 55%, enquanto para solos não saturados a declividade passa para 40% e considerando o solo saturado, o risco de escorregamento passa a ser maior a partir de declividades iguais a 20%.

Ainda, por meio do estudo, as áreas urbanas apresentaram 6,82% de instabilidade para solos saturados, 0,53% para não saturado e 0,08% para solos com umidade natural ou seco, as áreas de campo se apresentaram com 9,64% do total instável quando o solo está saturado, 0,51% para solo não saturado e apenas 0,07% para solos com umidade natural ou quase seco. No uso agrícola, apenas 1,78% se apresentou instável para solo saturado e 0,07% para não saturado, não apresentando risco de escorregamento para solo com umidade natural.

Ficou evidente, neste trabalho, que o comportamento geotécnico dos solos, analisados pelos mapas de fator de segurança gerados, atesta que a região é em grande parte estável, quando o solo não está totalmente saturado e desde que seja preservada a vegetação remanescente.

Assim evidenciou-se que, os mapas de índices de segurança tomam-se ferramentas indispensáveis para o planejamento territorial e amenização das conseqüências geradas pelos escorregamentos. Esses mapas são de fundamental importância para os planejadores, pois permitem elaborar medidas de prevenção e mitigação dos riscos, direcionando as ações públicas nas políticas de uso e ocupação de terras.

Espera-se que, por meio do mapa de uso do solo se faça o controle e a preservação do pouco que resta da cobertura vegetal, através de atualizações

periódicas desse mapa, pois é ele que informa as mudanças ocorridas na área em determinada época.

A ação antrópica, na abertura de loteamentos, rua e desmatamento, atesta a influência direta desta quanto à instabilidade de algumas regiões.

Enfim, pode-se concluir que a metodologia utilizada mostrou-se satisfatória, com resultados coerentes com a realidade. O conhecimento das limitações e potencialidades dos terrenos possibilitará, ao governo municipal de Pato Branco e outros municípios similares, tomarem decisões em relação ao uso e ocupação do solo, a partir do conhecimento das principais características do meio físico estudado.

Espera-se que o trabalho desenvolvido seja uma contribuição valiosa para com a sociedade no sentido do desenvolvimento planejado da cidade. Sirva ele como base ao fornecer informações e orientação para o uso e ocupação seguros do solo no município e em sua expansão. Que forneça subsídios às questões ambientais tornando a vida de seus moradores mais segura e dando à vida uma melhor qualidade.

REFERÊNCIAS

AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP.** 360 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP. São Carlos – SP, 2005.

ALMEIDA FILHO, G. S. et al. **Prevenção e controle da erosão urbana no Estado de São Paulo.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, 16-21 set. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6184:** execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos; procedimento. Rio de Janeiro, 1979.

_____. **NBR 6502:** Rochas e solos; terminologia. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 7520:** Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos; procedimentos. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 8036:** Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios; procedimento. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. ABNT/CB-02 CONSTRUÇÃO CIVIL, Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. ABNT/CB-02 CONSTRUÇÃO CIVIL, Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. ABNT/CB-02 CONSTRUÇÃO CIVIL, Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 12.069:** Solo: ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 14545: Solo** – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. ABNT/CB-02 CONSTRUÇÃO CIVIL, Rio de Janeiro, 2000.

AMARAL, C.; BARROS, W. G.; D'ORSI, R. a AMARAL, F. **SIG alternativo aplicado ao gerenciamento de áreas de risco geológico no Rio de Janeiro**. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7, Poços de Caldas. Anais. São Paulo: ABGE. v. 2, 1993. p. 55-62.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 172 p.

AUGUSTO FILHO, O. et al, apud OGURA, A. T. Análise de Riscos Geológicos em Planos Preventivos de Defesa Civil. In: BITAR, O. Y. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. São Paulo: ABGE / IPT, 1995.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. **Estabilidade de taludes**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. Geologia de Engenharia. São Paulo: Oficina de Textos, 1998. p. 243-270

BARATA, F. E. **Propriedades mecânicas dos solos: Uma introdução ao projeto de fundações**. Rio de Janeiro: Livro Técnico e Científico, 1994.

BARROS, W.T.; AMARAL, C.P.; D'ORSI, R.N. **Landslide susceptibility map of Rio de Janeiro**. Rotterdam: In Bell (ed) Landslides, 1992. p. 869-871

BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; NARDY, A.J.R.; PAPTRECHAS, C.; PICCIRILLO, E.M., ROISENBERG, A.; STOLFA, D. **Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships**. J. Petrology, 27, 1983. p 915-944.

BISHOP, A. W.; STEVENS, M. E. **Landslide on logged areas in southeast Alaska**. United States Department of Agriculture, Forest Service, Northern Forest Experiment Station, Juneau, AK, Research Paper NOR-1. 1964.

BLOOM, A. L. **Superfície da Terra**. Trad. de S. Petri e R. Ellert. São Paulo: Edgard Blücher / Edusp. 1988. 184 f.

BONUCCELLI, T.J. **Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosionais com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG) – escala 1:10000**. 497 f. Tese (Doutorado) – São Carlos – EESC, USP. 3v. 1999.

BORCHARDT, N. **Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade das vertentes do alto e médio curso da bacia do Rio Sagrado, PR**. 122 f. Dissertação. (Mestrado em Geologia) Departamento de Pós-Graduação em Geologia, UFPR, Curitiba, 2005.

BRABB, E. E. The world landslide problem. **Episodes - Journal of International Geoscience**, v. 14, n. 1, 1991. p.52-61.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solo e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científico, 6 ed. v.2, 1988.

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; DETTI, R.; GUZZETTI, F.; PASQUI, V. & REICHENBACH, P. **GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard**. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 20, nº 5, 1991. p. 427-445.

CARVALHO, E. T. de.; PRANDINI, F. L. **Áreas Urbanas**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998.

CARVALHO, P.A.S. (Coord.) **Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas**. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1991. Publicação IPT n. 1843.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991. 136 f.

CHOWDHURY, R.N. **Slope analysis**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 423 f.

CHRISTOFOLETTI, A. Condicionantes geomorfológicos e hidrológicos aos programas de desenvolvimento, in **Análise Ambiental: Uma Visão Interdisciplinar** (TAUK, S. M. – org.) São Paulo: Editora UNESP, 1991. p. 82-84.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2. ed., 1980, 188 f.

COSTA, E. A. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005, 159p.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa Hidrogeológico da América do Sul – Escala: 1:5.000.000**: texto explicativo/UNESCO, Departamento Nacional de Produção Mineral. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Brasília: CPRM, 1996.

CRUDEN, D. M.; KRAUTER, E.; LEFEBURE, G.; TER-SHEPANIAN, G. I.; ZHANG, Z. Y. **Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board. National Research Council** – Special Report. 247p. Cap. 3, Washington, 1994. p.36-75.

CUNHA, M. A. *et al.* **Manual de ocupação de Encostas**. São Paulo: IPT, 1991, 216f.

DAÍ, F. C.; LEE, C. F.; NGAI, Y. Y. Landslide risk assessment and management and overview. **Engineering Geology**, v. 64, n. 1, 2002, p. 65-87.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER). **Manual de Pavimentação**. MT – Ministério de Transportes; Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. 327p., 1996, p. 48-62.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) **Massa específica aparente seca**. DPT M 93-64 AASHO T 100 ASTM D 854.
DSG – Diretoria de Serviço Geográfico – **Folha topográfica MI – 2862/2, Pato Branco** – escala – 1:50.000, 1981.

DSG – Diretoria de Serviço Geográfico – **Folha topográfica MI – 2862/4, Mariópolis** – escala – 1:50.000, 1980.

DUN, I. S.; ANDERSON, L. R.; KIEFFER, F. W. **Fundamentals of geotechnical analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1980, 414 f.

EL-RAMLY, H. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, 2001. 391p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Curitiba: EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 1984. 196p. 2t. (Boletim de Pesquisa, 27)

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Estado do Paraná**. Curitiba: EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 1974. 79 p. (Boletim Técnico n. 40)

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Mapa de Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná**. Londrina: EMBRAPA : IAPAR, 1984 b. Escala 1:600.000.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999. 412 f.

FELL, R. Landslide risk assessment and acceptable risk. **Canadian Geotechnical Journal**. Canada, v. 31, 1994, p.261-272.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.;
FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico - geomorfológico. In Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. (org) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996, p. 123-194.

FERNÁNDEZ, C. I.; CASTILLO, T. F.; HAMDOUNI, R.; MONTERO, J. C. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 24, n. 6, 1999, p. 537-544.

FIORI, A. P.; BORCHARDT, N. Influência da vegetação na estabilidade de taludes naturais. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n 45, 1997, p. 43-58.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.

FIORI, A. P. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n 43, 1995.

FLORENZANO, T. G.; CSORDAS, S. M. **Mapa geomorfológico da região do vale do Paraíba e litoral norte do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1993, 14p. (INPE-5531-PRP/179).

FRANCISS, F.O.; ROCHA, H.C. **Obras Subterrâneas Civis**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Oficina de Textos. 1998. p. 439-456.

FREIRE, E. S. de M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Revista Construção**, Rio de Janeiro, 1965. p 10-18.

GRAY, G.L.; LEISER, A.J. Role of vegetation in stability and protection of slopes. In: **Biotechnical slope protection and erosion control**. New York: Van Nortrand Reinhol Company, 1982. p. 37-65.

GUEDES, M.C.S. **Considerações sobre análise probabilística da estabilidade de taludes**. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 1997, 202p.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Ed.) **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995, Cap. 4, p. 149-209.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. 648 f.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 196 f.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamento em meio tropical úmido**. São Paulo: IPT, 1976. 48 f.

GUIMARÃES, R. F.; VIEIRA, B. C.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. **Avaliação de parâmetros morfológicos das cicatrizes dos escorregamentos da bacia do rio Quitite (RJ)**. *Revista Geosul (UFSC)*, v. 14, n. 27, 1998, p. 316-320.

GUIMARÃES, R. B.; SPADA, J. L. G. **Creep and the prediction for slides in soil**. In: **II Panamerican Symposium of Landslides & Cobrae**, Rio de Janeiro, 1997.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. landslide hazard evaluation: a review of current techniques and this application in a multi-scale study, central, Italy. **Geomorphology**, 31: 1999, p. 181-216.

HIDROSERVICE Engenharia de Projetos Ltda. **Relatório Geológico do Bloco SG.22-N (ACS-78) – Região de Pato Branco – Xanxerê**. Relatório Final, Paulipetro, 1981.

HSI, G. & NATH, J.H. Wind drag within a simulated forest. **Journal of Applied Meteorology**, **9**, 1970. p 592–602,

HUTCHINSON, J. N. apud AUGUSTO FILHO, O. Escorregamentos em Encostas Naturais e Ocupadas: Análise e Controle. In: BITAR, O. Y. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. São Paulo: ABGE / IPT, 1995.

HUTCHINSON, J. N. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. **5th International Symposium on Landslides**. A. A. Balkema, Lousanne: 1988, p. 3-35.

IBDF – INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL; FUNDAÇÃO DE PESQUISAS FLORESTAIS DO PARANÁ. **Inventário Florestal do Pinheiro no Sul do Brasil**. Curitiba, 1978.

INFANTI Jr, N.; FORNASARI FILHO, N. **Processo de Dinâmica Superficial**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de uso da terra**. Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 7. Rio de Janeiro, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual de classificação da vegetação brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 1. Rio de Janeiro, 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário e a Contagem da População: 2007**. Rio de Janeiro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico: 2000**. Rio de Janeiro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico: 1991**. Rio de Janeiro.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Leituras regionais: **Mesorregião Geográfica Sudoeste Paranaense**. Curitiba: IparDES, 2004.

ITCF – Instituto de Terras, Cartografia e Florestas do Paraná – **Levantamento aerofotogramétrico do Paraná**: Foto aérea de Pato Branco, 1980 – escala 1:50.000.

KOZCIAK, S. **Análise da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná**. Tese (Doutorado em Geologia) Departamento de Pós-Graduação em Geologia, UFPR, Curitiba, 2005.

LEINZ, V. **Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil**. Fac. Filos. Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, Bol. CIII, Geologia, nº 5, 1949, p.1-61.

LEMOS, R. C. de.; SANTOS, R. D. dos. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. Campinas: SBCS e SNLCS, 2. ed., 1984.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 178p.

LONDE, P.; VIGIER, G.; VORMERINGER, R. **Stability of rock slopes, a three dimensional study**. New York: Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, v.95, 1965. p.235-261.

LOPES, J. A.U. **The evolution and stability of tropical and subtropical hillslopes and their importance in the Engineering Geology practice**. In: International Congress of the IAEG, 5, Buenos Aires. Proceedings Rotterdam: A.A. Balkema. 1986. V.6, p.2029-2038.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Livraria J. Olympio, 2. ed., 1981.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**, Curitiba:CODIPAR, 1968.

MAPA HIDROGEOLÓGICO DA AMÉRICA DO SUL: Escala : 1:5.000.000 : texto explicativo / UNESCO, Departamento Nacional de Produção Mineral. [e] Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Brasília: CPRM, 1996.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2003.

MINERAIS DO PARANÁ (MINEROPAR). **Avaliação Geológica e Geotécnica para o Planejamento Territorial e Urbano do Município de Pato Branco**. – Relatório final. 2 v. Curitiba: MINEROPAR, 2006.

MINERAIS DO PARANÁ (MINEROPAR) / UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR). **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná – Escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.00** Curitiba: MINEROPAR/UFPR, 2006. 63 p.; il.

Miranda, M. F. **Avaliação da estabilidade de contenções através de métodos probabilísticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, 2005, 106p.

MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos escorregamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, 2001, p. 51-71.

MOREIRA, C.V.R.; PIRES NETO, A.G. **Clima e Relevo**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Oficina de Textos. 1998. p. 69-86.

MORGENSTERN, N. R. **The role of analysis in the evaluation of slope stability landslides**. In: **International Symposium of Landslides, 1995**. Resumos. Balkema – Rotterdam, 1995. p. 1615-1629.

MOSTYN, G. R.; SMALL, J. C. **Methods of stability analysis**. In: **WALKER, R. & FELL, R.** ed. **Soil slope instability and stabilization**, Cap. 3, 1987. p. 71-113.

MOTA, S. **Urbanização e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

NAKAZAWA, V. A.; CERRI, L. E. S. **Os escorregamentos ocorridos em Petrópolis, RJ, em fevereiro de 1988: ações emergenciais**. In: Simpósio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano, 1, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE. 1990. p. 325-333.

NOGUEIRA, F. J.; UEHARA, K. **Águas de Superfície**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Oficina de Textos. 1998. p. 101-110.

NUNES, A. J. da C. **Landslides in soils of decomposed rock due to intense rainstorms**. In: *Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, 7ª., México, anais v.2 5ª sessão, 1969. p 547-554.

NUNES, A. J. C.; FERNANDES, C. E. M.; ILIESCO, M.; CID, M. R. V. K.; ALVES, R. I. V.; SILVA, L. J. R. D. B. **Contribuição ao conhecimento do risco geológico da cidade de Petrópolis, RJ**. In: *Simpósio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano*, 1, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE. 1990. p.102-114.

OGURA, A. T. *Análise de Riscos Geológicos em Planos Preventivos de Defesa Civil*. In: BITAR, O. Y. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. São Paulo: ABGE / IPT, 1995.

OLIVATTI, O. **Projeto rio Segredo**. Relatório Final RT 123/82. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) – Superintendência de Goiânia, 1982

OLIVEIRA, L. M. de. org. **Guia de Prevenção de Acidentes Geológicos Urbanos**. Curitiba: MINEROPAR, 1998.

O'LOUGHLIN, C. L. **Effectiveness of induced Forest vegetation for protecting against landslides and erosion in New Zealand steep lands**. Paper presented to Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability. Honolulu, Hawaii, 1984.

PICHLER, E. Aspectos geológicos dos escorregamentos de Santos. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, 6, setembro, 1957, p. 69-77.

PICCIRILO, E. M.; MELFI, A. J. **Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin (Brazil), Petrogenetic and Geophysical Aspects**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1988. 600p.

PINTO, C de S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas – 2ª edição –** São Paulo: Oficina de textos, 2002.

PRANDINI, L. F.; 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, 38 p. (Relatório n. 1074), 1976.

PRANDINI, L. F. et al. Cartografia Geotécnica nos Planos Diretores Regionais e Municipais. In: BITAR, O. Y. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente.** São Paulo: ABGE / IPT, 1995.

RODRIGUES, B. B. **Proposta de sistemática para tomada de decisão relativa a movimentos de massa gravitacionais: Aplicação em Ouro Preto (MG).** Tese (Doutorado) – Escola Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, SP, 2002.

RODRIGUES, B.B. **Inventário e análise de susceptibilidade aos escorregamentos de massa gravitacionais e erosão na região de Águas de Lindóia – SP – Escala 1:10.000.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, 1998.

RODRIGUES, J.E. **Estudo de fenômenos erosivos acelerados - Boçorocas.** 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de vias de transportes e Topografia, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, 1982.

RODRIGUES, R.; LOPES, J. A. U. **Rodovias.** In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. Geologia de Engenharia. São Paulo: Oficina de Textos. 1998. p. 419-430.

SALOMÃO, F. X.; IWASA, O. Y. Erosão e a Ocupação Rural e Urbana. In: BITAR, O. Y. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente.** São Paulo: ABGE / IPT, 1995.

SALOMAO, F. X. de T.; ANTUNES, F. dos S. **Solos e Pedologia.** In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. Geologia de Engenharia. São Paulo: Oficina de Textos. 1998. p. 87-99.

SEAB – SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ. **Atlas Geográfico do Paraná,** Curitiba, 1987.

SELBY, M. J. Hillslope materials and process. Oxford: Oxford University Press, 1982, 264 f.

SELBY, M. J. **Earth's changing surface.** Oxford: Clarendon Press, 1985.

SERAPHIM, L. A. **Mecânica dos Solos.** Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil – Departamento de Engenharia de Transportes. Campinas: Unicamp, 1995. 95p.

SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; O'LOUGHLIN, C. L. **Hillslope Stability and Land use**. Washington DC: American Geophysical Union. 1985, 140p.

SIMEPAR – Instituto Tecnológico Simepar. **Dados meteorológicos do Município de Pato Branco/Pr – período de 1979 – 2005**. Curitiba, 2005.

SOIL TAXONOMY. **A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey**. Washington, DC: USA, 1975. 754p.

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

STRAHLER, A. N. **Hypsometric analysis of an erosional topography**. Geol. Soc. Am. Bull., v.38, 1952. p.1117-1142.

TABALIPA, N.L. **Proposta para o desenvolvimento urbano do município de Pato Branco, Paraná, baseada em critérios geológicos e geomorfológicos**. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) Departamento de Pós-Graduação em Geologia, UFPR, Curitiba, 2002.

TABALIPA, N.L. Caracterização e classificação dos resíduos sólidos urbanos do Município de Pato Branco, PR. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, nº 4. São Paulo: NISAM/ICTR, 2005.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 8ª ed., 1948. p. 406-479.

TATIZANA, C.; OGURA, A.T.; CERRI, L.E.S.; ROCHA, M.C.M. **Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão**. In. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. Anais...São Paulo: ABGE. v.2, p.225-236.

THOMAS, M. F. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates**. 2 ed. London: MacMillan. 1979, 332 p.

TOMAZONI, J. C. **Morfodinâmica e transporte fluvial no Sudoeste do Estado do Paraná por método de levantamento de microbacias hidrográficas através de geoprocessamento**. Tese (Doutorado em Geologia) Departamento de Pós-Graduação em Geologia, UFPR, Curitiba, 2003.

TRICART, J. **The landforms of the humid tropics, forests and savannas**. London: Longman. 1972. 306 f.

TUTTLE, S. D. **Landforms and landscapes**. Iowa: Ed Brown, 1970. 136 f.

US DEPARTMENT OF THE ARMY. Army Corps of Engineers. **Engineer Manual em 1110-2-1906**. Washington, DC, Laboratory Soils Testing, 1970.

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

VARGAS, M. Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos na Serra do Mar. **Boletim Solos e Rochas** (ABMS e ABGE), São Paulo, v. 22 n 1, 1999.

WALDRON, L.J. **The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil**. J. Soil Sci. Soc. Am. N. 41, 1977. p. 843-849.

WALDRON, L.J.; DAKESSIAN, S. **Soil reinforcement by roots: calculation of increased shear resistance from root properties**. Soil Science, 132, 1981. p. 427-435,

WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; TERLIEN, M. T. J.; SOETERS, R. **Prediction of the occurrence of slope instability phenomena trough GIS-based hazard zonation**. Geologische Rundschau, v. 86, n. 2, 1997, p. 404-414.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Escorregamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. **Boletim Solos e Rochas** (ABMS e ABGE), São Paulo, v. 12, n. único, 1989, p. 27-36.

WOLLE, C.M. **Análise de escorregamento translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. São Paulo, 800 p. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1988.

WOLLE, C.M.; PEDROSA, J.A.B. **Horizontes de transição condicionam mecanismos de estabilização de encostas na Serra do Mar**, In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Anais. V.2, Itapema, 1981, p. 121-135.

WOLLE, C. M.; GUIDICINI, G.; ARAÚJO, J. S.; PEDROSA, J. A. B. A. **Caracterização de um mecanismo de escorregamentos nas encostas da Serra do Mar**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1977, 23 p. (Relatório n. 1.079)

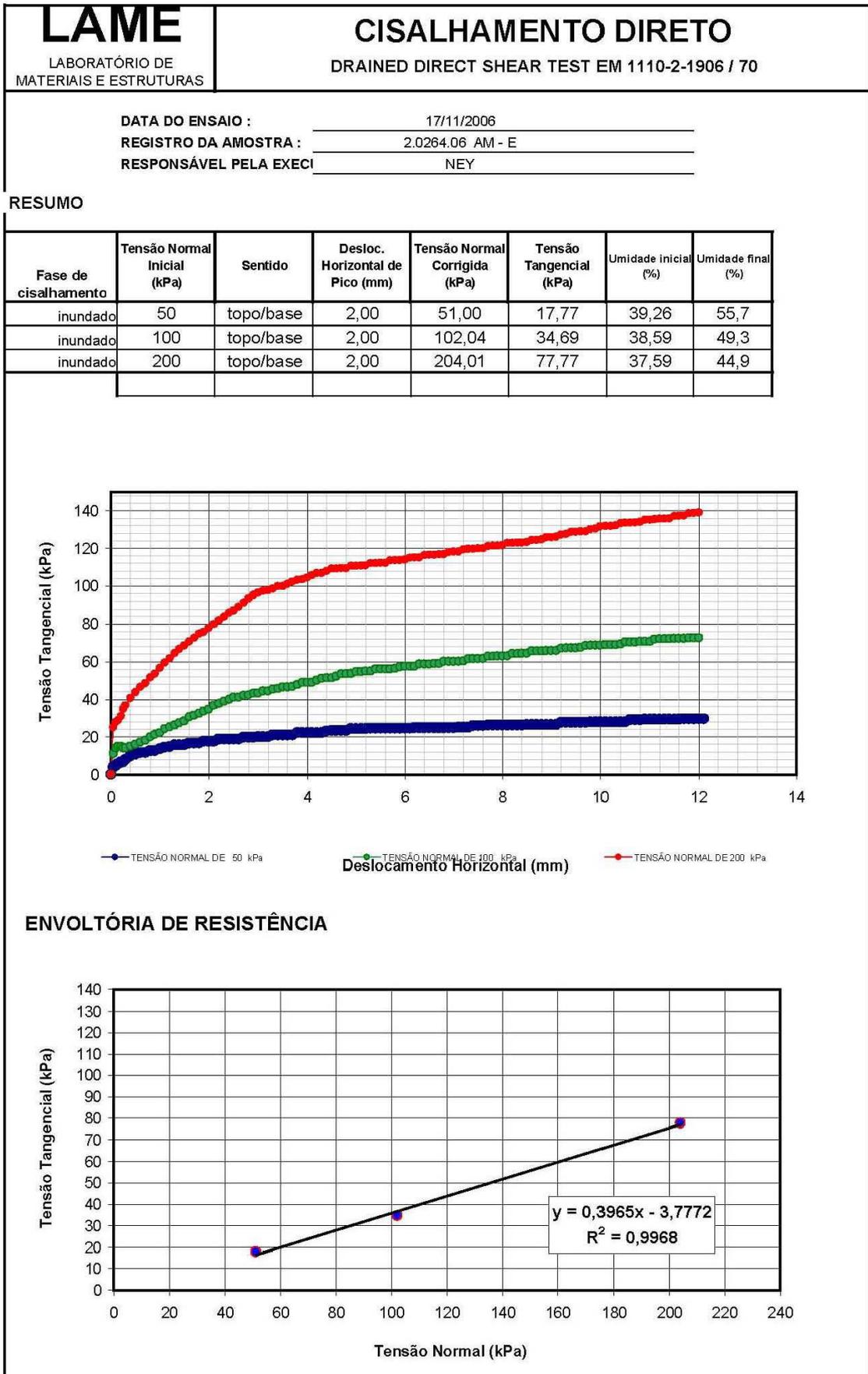
WOLLE, C.M. (Coord.) **Slope stability**. In: International Conference on Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1, Brasília: ABMS. 1985.

WU, T.H.; McKINNELL, W.P.III.; SWANTON, D.N. **Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska**. Canadian Geotechnical J., 16, 1979. p. 19-33.

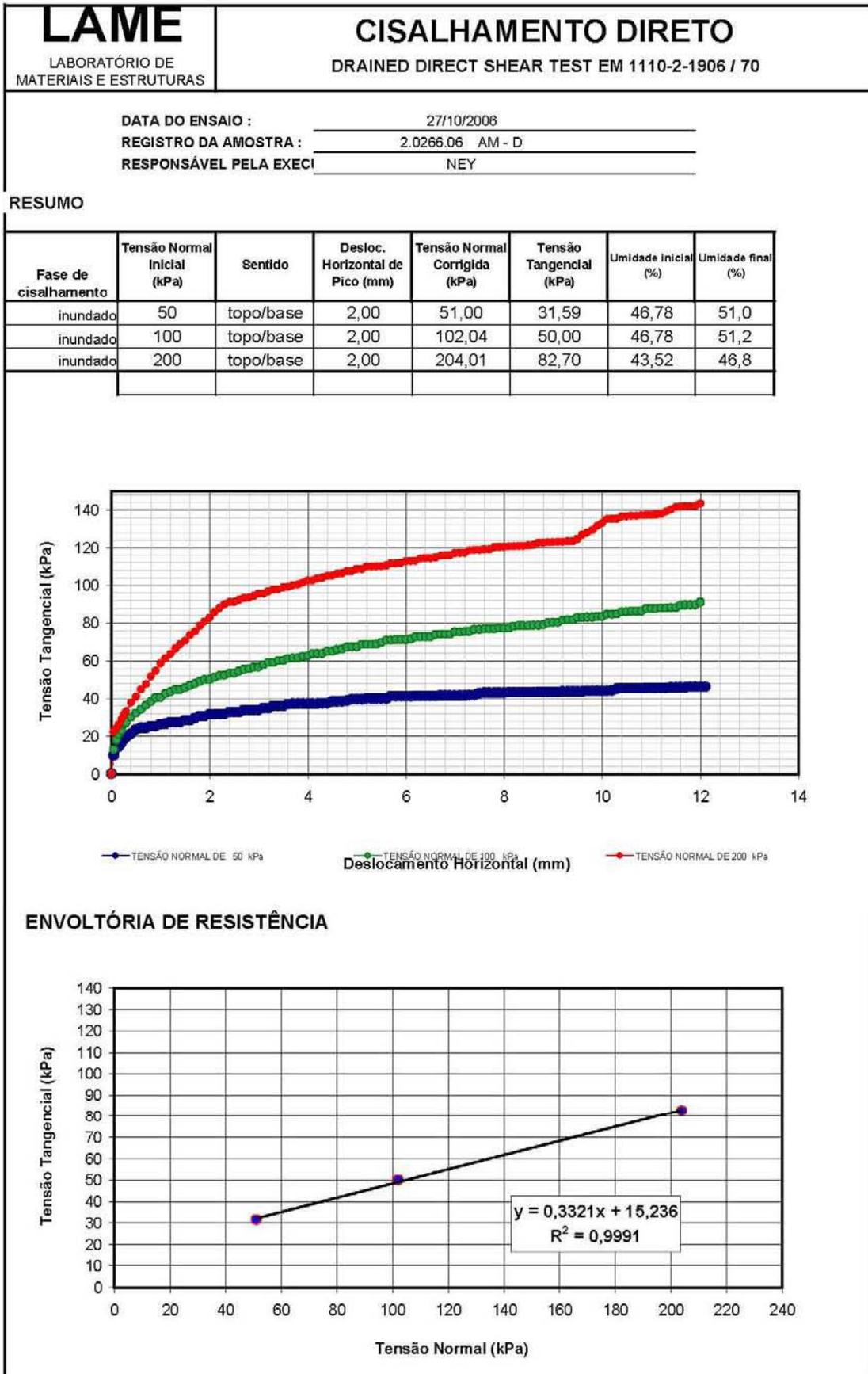
ZUQUETE, L.V. Proposta metodológica para análise de eventos perigosos. **Revista Geociências**. São Paulo, 1988.

ANEXOS

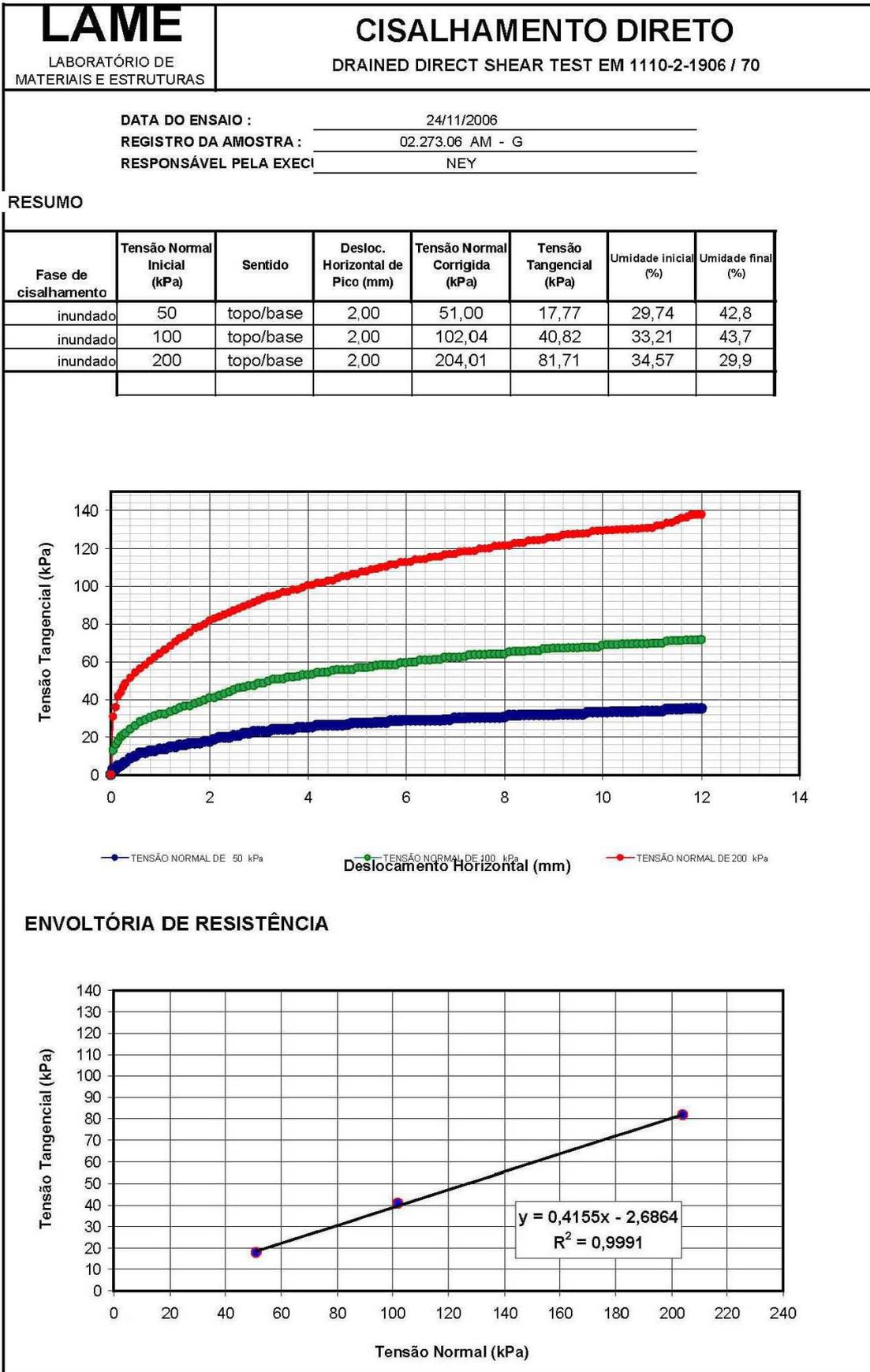
Resultado do ensaio da amostra 2.0264.06 (E)	235
Resultado do ensaio da amostra 2.0266.06 (D)	236
Resultado do ensaio da amostra 2.0273.06 (G)	237
Resultado do ensaio da amostra 2.0263.06 (C)	238
Resultado do ensaio da amostra 2.0136.06 (F)	239
Resultado do ensaio da amostra 2.0268.06 (H)	240
Resultado do ensaio da amostra 2.0269.06 (A)	241
Resultado do ensaio da amostra 2.0269.06 (A)	242
Resultado do ensaio da amostra 2.0270.06 (B)	243



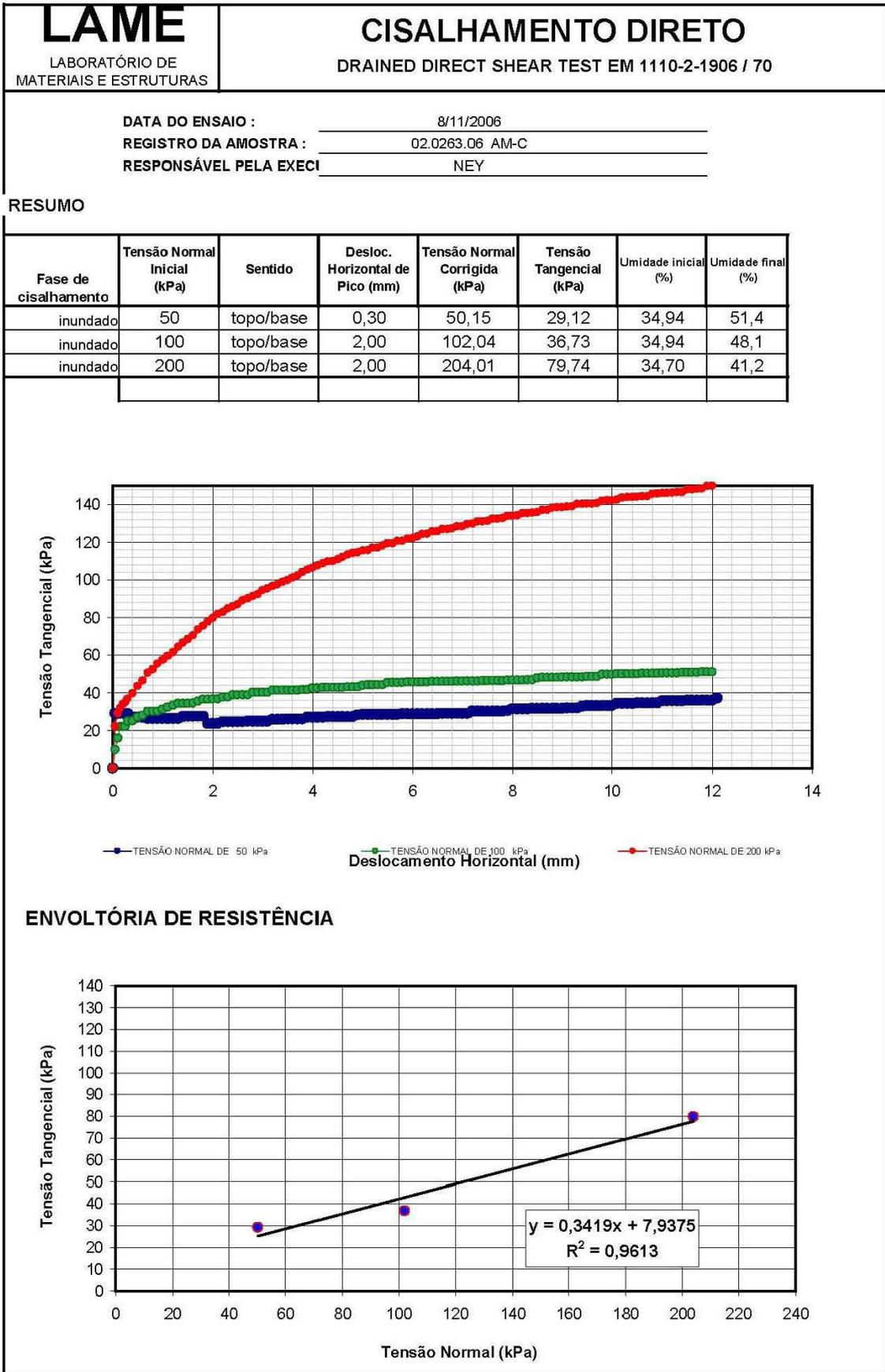
Resultado do ensaio da amostra 2.0264.06 (E)



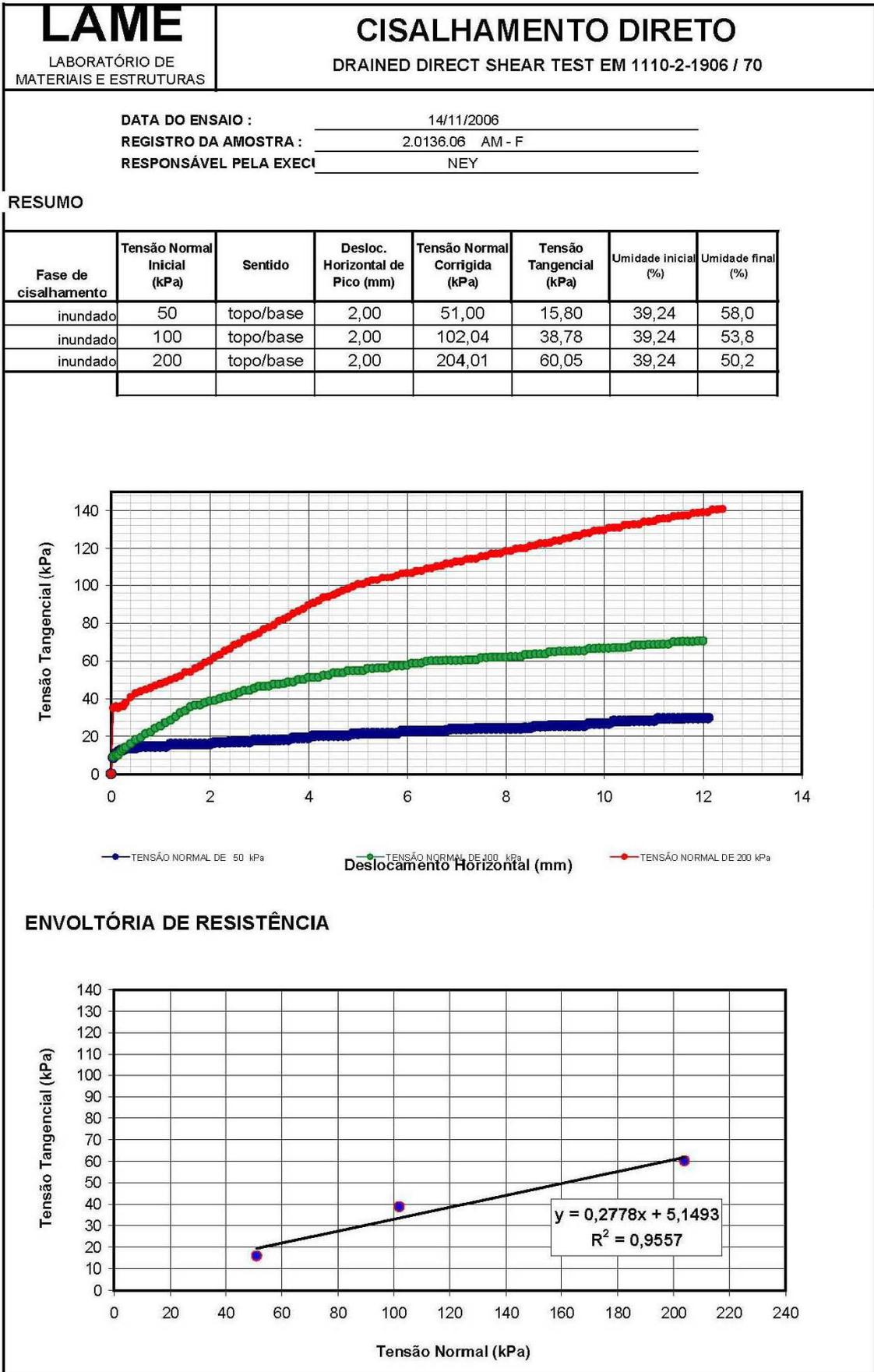
Resultado do ensaio da amostra 2.0266.06 (D)



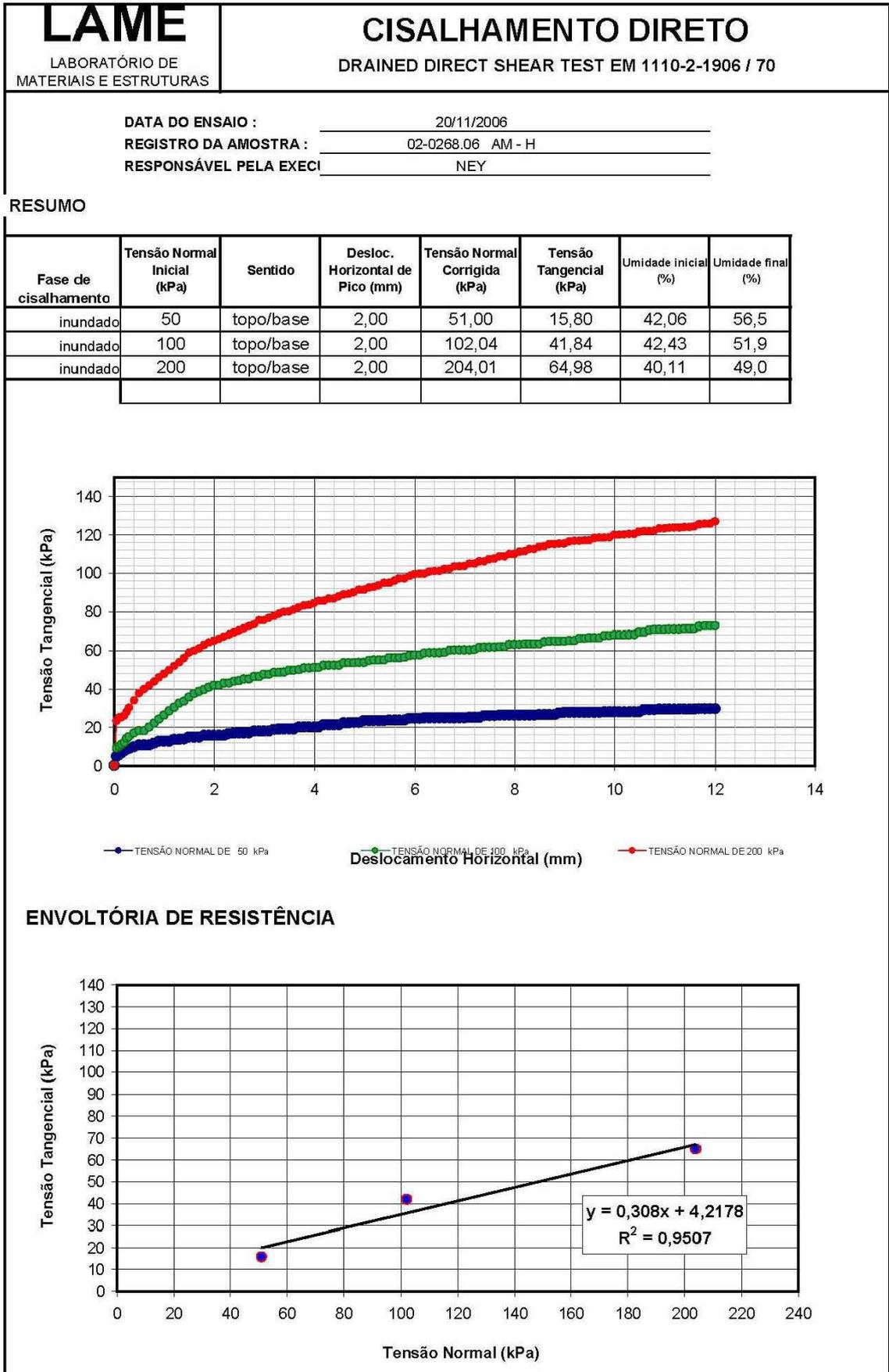
Resultado do ensaio da amostra 2.0273.06 (G)



Resultado do ensaio da amostra 2.0263.06 (C)



Resultado do ensaio da amostra 2.0136.06 (F)



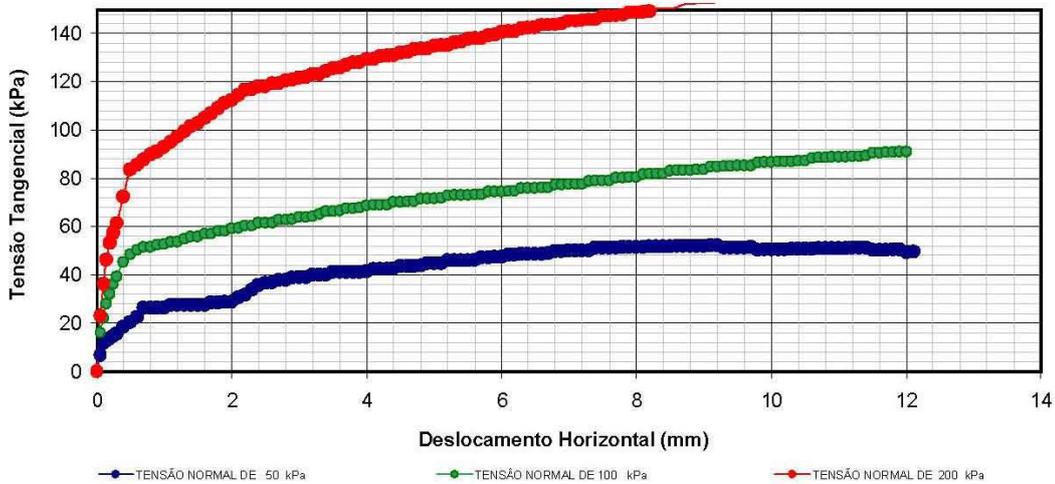
Resultado do ensaio da amostra 2.0268.06 (H)

<h1 style="margin: 0;">LAME</h1> <p style="margin: 0; font-size: small;">LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS</p>	<h2 style="margin: 0;">CISALHAMENTO DIRETO</h2> <p style="margin: 0; font-size: small;">DRAINED DIRECT SHEAR TEST EM 1110-2-1906 / 70</p>
--	---

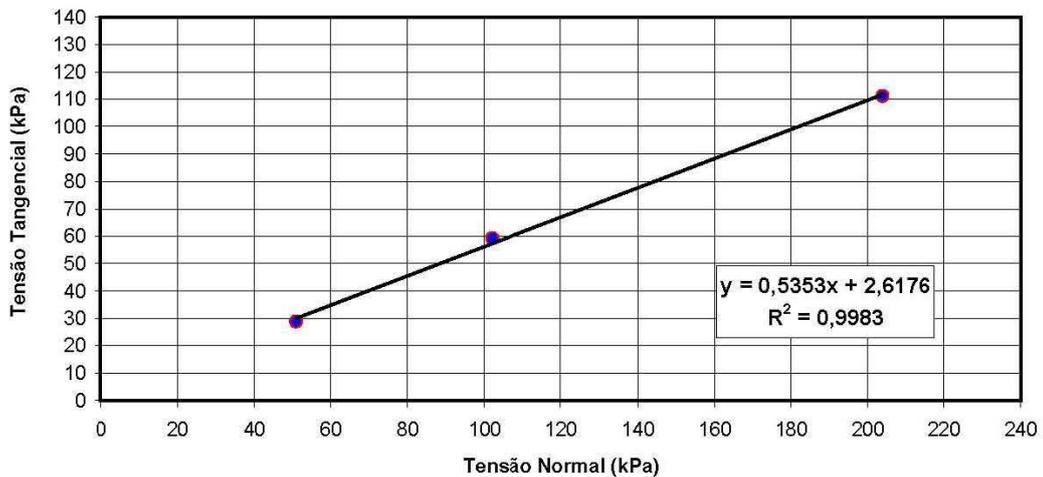
DATA DO ENSAIO :	23/11/2006
REGISTRO DA AMOSTRA :	02.274.06 AM - I
RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO:	NEY

RESUMO

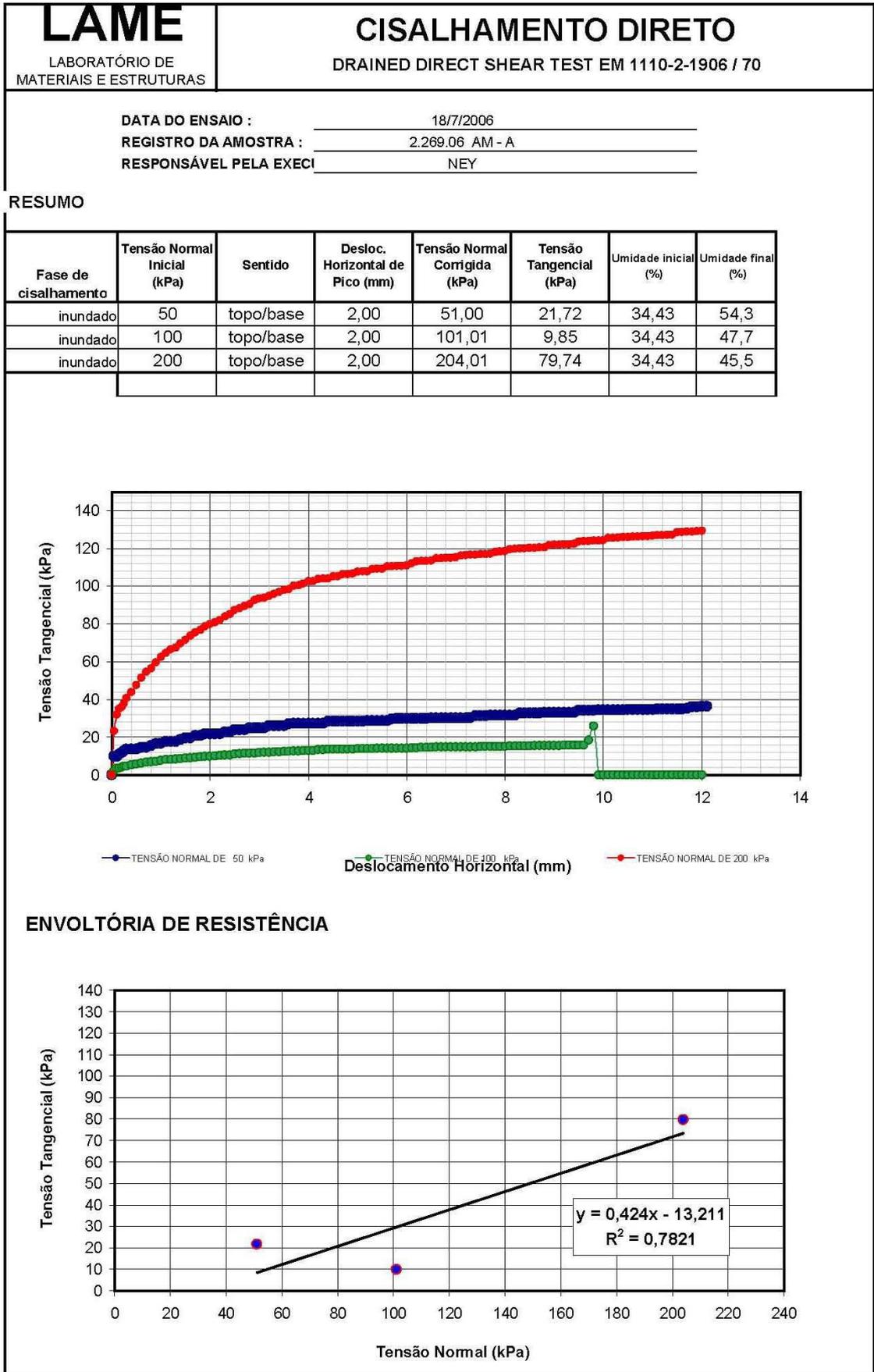
Fase de cisalhamento	Tensão Normal Inicial (kPa)	Sentido	Desloc. Horizontal de Pico (mm)	Tensão Normal Corrigida (kPa)	Tensão Tangencial (kPa)	Umidade inicial (%)	Umidade final (%)
inundado	50	topo/base	2,00	51,00	28,63	41,05	33,1
inundado	100	topo/base	2,00	102,04	59,18	44,34	60,3
inundado	200	topo/base	1,90	203,87	111,11	44,50	59,2



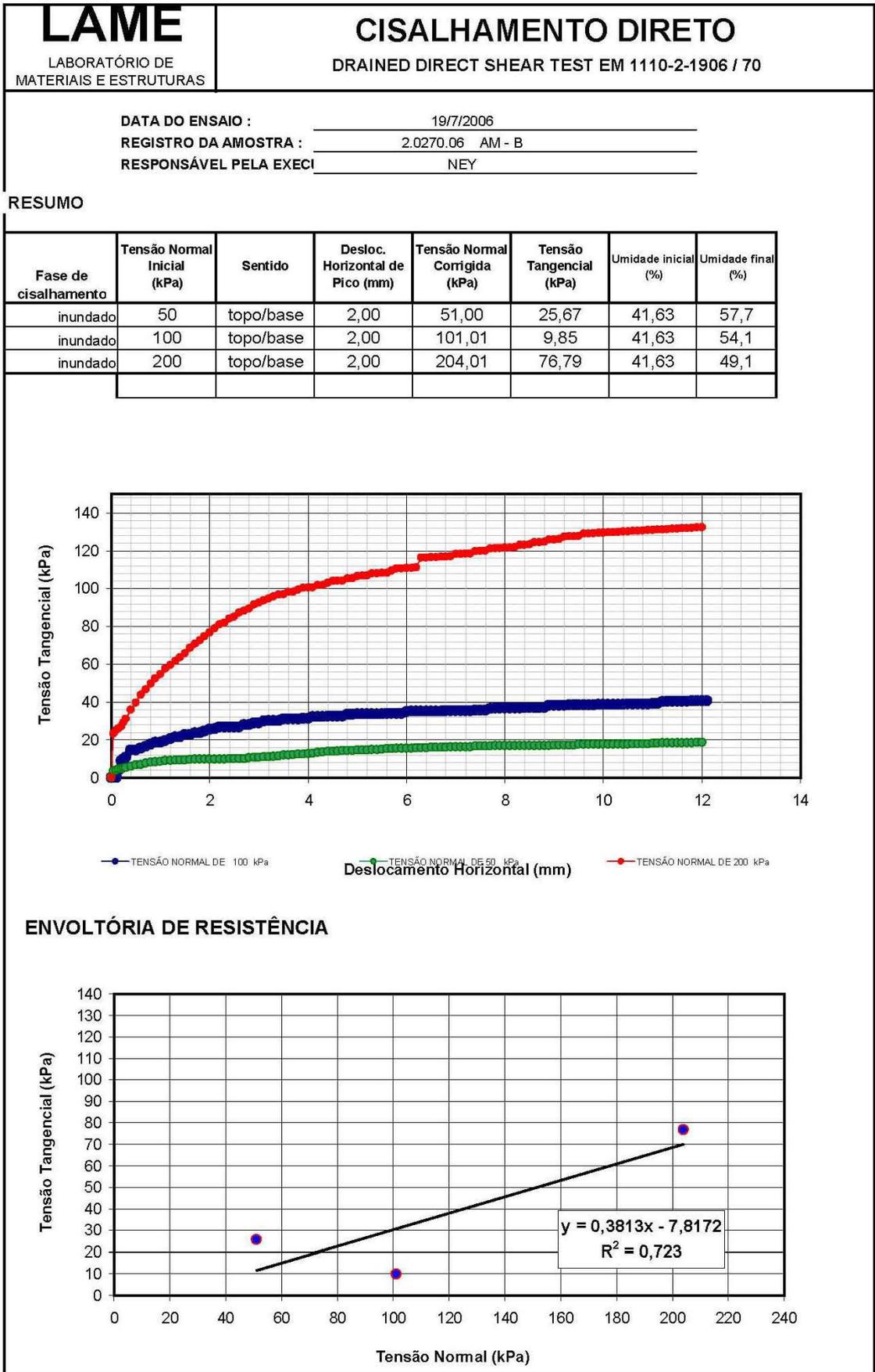
ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA



Resultado do ensaio da amostra 2.0269.06 (A)



Resultado do ensaio da amostra 2.0269.06 (A)



Resultado do ensaio da amostra 2.0270.06 (B)