



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO BIM

MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTO DE MASSA DA
MICROBACIA DO RIBEIRÃO DAS PEDRAS/SC DETERMINADO
COM ÊNFASE NA VARIAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

Florianópolis
2015

RODRIGO BIM

MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTO DE MASSA DA
MICROBACIA DO RIBEIRÃO DAS PEDRAS/SC DETERMINADO
COM ÊNFASE NA VARIAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Área de concentração:
Infra-Estrutura e Geotecnia

Orientador: Prof. Orlando Martini
de Oliveira, Dr.

Co-orientador: Prof. Rafael
Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

BIM, RODRIGO

MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTO DE MASSA DA
MICROBACIA DO RIBEIRÃO DAS PEDRAS/SC DETERMINADO COM
ÊNFASE NA VARIAÇÃO PLUVIOMÉTRICA / RODRIGO BIM ;
orientador, Orlando de Oliveira ; coorientador, Rafael
Higashi. - Florianópolis, SC, 2015.

222 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Escorregamento de Encostas. 3.
Mapeamento Geotécnico. 4. Pluviometria. 5. SIG. I. de
Oliveira, Orlando. II. Higashi, Rafael. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. IV. Título.

MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTO DE MASSA DA
MICROBACIA DO RIBEIRÃO DAS PEDRAS/SC DETERMINADO
COM ÊNFASE NA VARIAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, 12 de Março de 2015.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.
Coordenador do PPGEC-UFSC

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.
ECV-UFSC (Orientador)

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
ECV-UFSC (Coorientador)

Comissão Examinadora:

Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. – ECV-UFSCM

Prof(a). Regina Davison Dias, Dra.

Prof. Antônio Edésio Jungles, Dr. – ECV-UFSC

Ao Cauã, ao Kaique e à Mays a quem pertence
o tempo dedicado a esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família pelo apoio e incentivo ao ingressar em mais uma etapa de estudos, com destaque aos cafés e as longas conversas até a sua conclusão.

Ao meu Orientador Orlando Martini pela paciência, parceria e conhecimentos transmitidos.

Ao Higashi por ter me direcionado, aberto às portas e semeado o interesse pela pesquisa desde a graduação até os dias atuais.

A todos os colegas de laboratório e campo, Murilo, Rodrigo, Fabio e em especial Felipe, que deu o incentivo final para a conclusão deste trabalho.

Mari e Priscila, pela renovação da oportunidade, confiança e simpatia a mim transmitidos.

À EPAGRI pela disponibilização dos equipamentos e tempo despendidos.

Ao CNPq pelo auxílio concedido.

A todos aqueles que participaram direta ou indiretamente no resultado deste trabalho.

RESUMO

O desenvolvimento do estudo propõe o mapeamento de áreas susceptíveis ao escorregamento de encostas, especificando de forma sequencial os métodos, processos e instrumentos, agregando as variáveis físicas e mecânicas do solo com a variação pluviométrica local. A proposta baseia-se no mapeamento geotécnico, coleta de amostras para caracterização, uso de equipamentos de campo, geotecnologias, análise e monitoramento de eventos pluviométricos e manipulação de dados em ambiente SIG. Como resultado final, será gerado o mapa de suscetibilidade a partir de solução analítica do modelo de estabilidade incorporado ao modelo hidrológico para a predição de escorregamentos. Tais medidas são propícias ao uso em Planos Municipais de Redução de Riscos – PMRR e contribuem para a inserção de novas tecnologias voltadas a gestão de riscos frente a obrigatoriedade de Estados e Municípios a identificarem e mapearem suas áreas de risco, identificando ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades, assim como o monitoramento meteorológico, hidrológico e geológico de suas áreas.

Palavras-chave: Escorregamento de Encostas, Mapeamento Geotécnico, Pluviometria, SIG.

ABSTRACT

The development of the study proposes the mapping of areas susceptible to slope slip, specifying sequentially the methods, processes and tools, combining the physical and mechanical characteristics of the soil with the local rainfall variation. The proposal is based on engineering geological mapping, sampling for characterization, use of field equipment, geo, analysis and monitoring of rainfall events and manipulating data in a GIS environment. The end result will be generated the susceptibility map from analytical solution of the stability model incorporated into the hydrologic model to predict landslides. Such measures are conducive to use in Municipal Plans Risk Reduction - PMRR and contribute to integration of new technologies focused risk management forward the requirement for states and municipalities to identify and map their areas of risk, identifying threats, vulnerabilities and susceptibilities as well as the meteorological, hydrological and geological monitoring of their areas.

Keywords: Slip of Slopes, Geotechnical Mapping, Pluviometry, GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desastres mais recorrentes no Brasil (1991-2010).....	34
Figura 2. Desastres mais recorrentes em Santa Catarina (1991-2010)..	35
Figura 3. Desastres naturais causados por movimento de massa em Santa Catarina (1991-2010).	35
Figura 4. Frequência de escorregamento por município em Santa Catarina (1980-2003).	37
Figura 5. Ocorrência anual de Movimento de Massa no Brasil (1991-2010).	38
Figura 6. Comparativo de ocorrências entre décadas.	38
Figura 7. Mortes por tipo de desastre.	38
Figura 8. Evolução de desastres e ocupação urbana gradativa.	40
Figura 9. Classificação de Movimentos de Massa segundo Varnes (1978).	42
Figura 10. Carta de periculosidade da Cidade do Rio de Janeiro (GUIDICINI E IWASA, 1976). Fonte: Guidicini e Iwasa apud D' Orsi (2011).	46
Figura 11. Envoltória dos escorregamentos induzidos segundo Tatizana et al. (1987). Fonte: Tatizana et al apud D' Orsi (2011).	47
Figura 12. Demonstração da construção de linhas de tendência para as correlações. Fonte: D' Orsi (2011).	47
Figura 13. Superposição de mapas para determinação das unidades geotécnicas, metodologia Davison Dias (1995).	55
Figura 14. Simbologia empregada na determinação das unidades geotécnicas.	56
Figura 15. Mapa de localização da microbacia do Ribeirão das Pedras.64	
Figura 16. Mapa de uso do solo da microbacia do Ribeirão das Pedras.	67
Figura 17. Mapa da Hidrografia do município de Florianópolis. Fonte: ATLAS, 2006.	68
Figura 18. Mapa representando a hidrografia da microbacia do Ribeirão das Pedras.	69
Figura 19. Média Pluviométrica Mensal do Município de Florianópolis – Período 2001 à 2013. Fonte: Autor.	70
Figura 20. Mapa das unidades geológicas da microbacia do Ribeirão das Pedras.	72

Figura 21. Toposequência – Perfil típico do município de Florianópolis. Fonte: Adaptado de Santos (1997).....	73
Figura 22. Mapas das unidades pedológicas da microbacia do Ribeirão das Pedras.	75
Figura 23. Mapa Geotécnico produzido pelos estudos de Santos (1997). Fonte: Adaptado Santos (1997).....	78
Figura 24. Dique presente na área de estudos. Fonte: Oliveira et al (2012).....	79
Figura 25. Localização dos afloramentos de dique de diabásio na microbacia do Ribeirão das Pedras.	80
Figura 26. Seção geológica perpendicular a SC 401 no local do escorregamento de 2008 em Cacupé.....	81
Figura 27. Alinhamento entre o diques do Maciço do Morro da Cruz (ponto A) e o dique da SC 401 (ponto B)	83
Figura 28. Etapas de desenvolvimento do estudo.	86
Figura 29. Movimentos de Massa entre Décadas no Município de Florianópolis/SC.	92
Figura 30. Proporção de escorregamentos relacionados a tipologia do movimento no Município de Florianópolis/SC entre o período de 1970 à 2014.....	92
Figura 31. Proporção de escorregamentos relacionados a intensidade máxima de chuvas em 24 horas no Município de Florianópolis/SC entre o período de 1970 à 2014.....	93
Figura 32. Mapa de localização da Estação Pluviométrica de Santo Antônio de Lisboa instalada na microbacia de estudo.	94
Figura 33. Localização das estações pluviométricas da EPAGRI a partir dos dados de monitoramento on line. Fonte: Adaptado Epagri (2014).	95
Figura 34. Classes de relevo e declividade da microbacia do Ribeirão das Pedras.	98
Figura 35. Mapa geotécnico preliminar da microbacia do Ribeirão das Pedras.....	99
Figura 36. Exemplo de adoção das siglas para formação da nova unidade geotécnica. Fonte: Rosolem (2014).....	100
Figura 37. Demonstração de sondagens a trado e boletins de sondagens da área de estudo.....	101
Figura 38. Distribuição dos pontos de investigação e coleta de amostras.	102
Figura 39. Moldagem de esferas submetidas à imersão para determinação da transição entre solos residuais e sedimentares da microbacia de estudo.....	103

Figura 40. Ajustes finais do Mapa Geotécnico: Polígonos e curvas de nível.....	104
Figura 41. Ajustes finais do Mapa Geotécnico: Investigações de campo.	105
Figura 42. Modelo de limiar pluviométrico gerado a partir do acumulado de 3 dias de chuva – Adaptado do modelo de Tatizana et al. (1987)..	107
Figura 43. Modelo de limiar pluviométrico a partir das faixas de probabilidade A,B,C e D – Adaptado do modelo de Guidicini e Iwasa (1976).	108
Figura 44. Equações geradas a partir das faixas de probabilidade A, B e C.	109
Figura 45. Comparativo de chuvas acumulados entre décadas com o evento extremo de 2008.	112
Figura 46. Pontos de coleta de amostras indeformadas.....	115
Figura 47. Imagem do local de coleta de amostras – ponto 2.	117
Figura 48. Pontos de coleta de amostragens de estudos anteriores.	118
Figura 49. Imagem da execução do ensaio do DPL.	119
Figura 50. Elementos de composição do DPL. Fonte: Adaptado de Nilsson (2009).	120
Figura 51. Perfil penetrométrico do talude T1.	121
Figura 52. Identificação dos pontos de utilização do DPL.....	122
Figura 53. Imagem da infraestrutura necessária para instalação da estação pluviométrica.	123
Figura 54. Imagem do processo de calibração do pluviômetro.	124
Figura 55. Imagem da montagem final do pluviômetro.	124
Figura 56. Pluviometria acumulada de chuvas mensais do ano de 2013 – Estação de Santo Antônio de Lisboa.	125
Figura 57. Pluviometria acumulada de chuvas mensais do ano de 2014 – Estação de Santo Antônio de Lisboa.	125
Figura 58. Comparativo entre estações pluviométricas no ano de 2013.	126
Figura 59. Comparativo entre estações pluviométricas no ano de 2014.	126
Figura 60. Imagens dos ensaios de caracterização e índices físicos....	128
Figura 61. Preparação e execução do ensaio de cisalhamento direto. .	129
Figura 62. Preparação da amostra e realização do ensaio de permeabilidade de carga variável.	131
Figura 63. Elementos usados pelo modelo hidrológico. Adaptado de Montgomery e Dietrich (1994), Apud Michel (2011).	132

Figura 64. Interpolação dos parâmetros de coesão do solo na microbacia do Ribeirão das Pedras.....	134
Figura 65. Comparação da variação do FS(T) entre episódios de chuva .	140
Figura 66. Comparação da variação do FS(G) entre episódios de chuva.	142
Figura 67. Demonstração gráfica de um talude infinito. Fonte: Adaptado Marinho (2010).	143
Figura 68. Modelo de estabilidade de um talude qualquer.	144
Figura 69. Decomposição de forças no talude infinito. Fonte: Rosolem (2014).....	145
Figura 70. Mapa de estabilidade em função das variáveis q/T	152
Figura 71. Espacialização de parâmetros T na microbacia do Ribeirão das Pedras.	154
Figura 72. Mapa de estabilidade em função da taxa de recarga q.....	155
Figura 73. Simulação da aplicação do mapa de susceptibilidade final no evento do dia 23 de novembro de 2008 – Análise pelo modelo de Tatizana et al. (1987).	158
Figura 74. Simulação da aplicação do mapa de susceptibilidade final no evento do dia 23 de novembro de 2008 – Análise pelo modelo de Guidicini e Iwasa (1976).....	159
Figura 75. Gráfico da variação granulométrica dos pontos amostrados - % passante.....	163
Figura 76. Carta de plasticidade de Casagrande.	165
Figura 77. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T1 .	166
Figura 78. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T2.	167
Figura 79. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T3.	167
Figura 80. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T4.	167
Figura 81. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T5.	168
Figura 82. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T6.	168
Figura 83. Comparativo dos resultados de cisalhamento.	168
Figura 84. Interpolação dos parâmetros de ângulo de atrito do solo na microbacia do Ribeirão das Pedras.	170
Figura 85. Interpolação dos parâmetros de peso específico do solo na microbacia do Ribeirão das Pedras.	171

Figura 86. Seção Penetrométrica- Toposequências e boletins dos pontos 1 ao 4.....	173
Figura 87. Seção Penetrométrica- Toposequências e boletins dos pontos 5 ao 8.....	174
Figura 88. Boletins penetrométricos dos pontos 0 e 9.....	175
Figura 89. Mapa Geotécnico Final do Ribeirão das Pedras.	177
Figura 90. Gráfico de dispersão para acumulados de 1 e 3 dias.....	179
Figura 91. Gráfico de dispersão para acumulados de 7 e 15 dias.....	180
Figura 92. Gráfico de dispersão para acumulados de 30 e 60 dias.....	181
Figura 93. Gráfico de dispersão para acumulados de 90 e 120 dias....	182
Figura 94. Gráfico de dispersão para acumulados de 180 dias.	183
Figura 95. Cenário 1 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987). ..	185
Figura 96. Cenário 1 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).	186
Figura 97. Cenário 2 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987). ..	187
Figura 98. Cenário 2 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).	188
Figura 99. Cenário 3 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987). ..	189
Figura 100. Cenário 3 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).	190
Figura 101. Cenário 4 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987). ..	191
Figura 102. Cenário 4 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).	192
Figura 103. Cenário 5 – Modelo Adaptado de Tatizana et al (1987). .	193
Figura 104. Cenário 5 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).	194
Figura 105. Cenário 6 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987). ..	195
Figura 106. Cenário 6 – Modelo Adaptado de Guidicini Iwasa (1976).	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação entre tipos de análise e escalas de mapeamento. Adaptado Soeters e Van Westen (1996) apud Ahrendt (2005).	50
Tabela 2. Critérios para a determinação dos graus de risco (ADAPTADO MINISTÉRIO DAS CIDADES/IPT, 2007).	51
Tabela 3. Metodologias de Mapeamento Geotécnico (Adaptado Kopenzinski, 2000; Higashi, 2006; Zuquette, 1987).	54
Tabela 4. Resumo dos métodos mais utilizados para análise da estabilidade de taludes (ADAPTADO DE HUNT, 1986 APUD AHRENDT, 2005).	59
Tabela 5. Registros de movimento de massa no município de Florianópolis/SC.	88
Tabela 6. Classes de estabilidade proposto por Dietrich e Montgomery (1998) adaptáveis ao estudo.	136
Tabela 7. Equações da curva crítica empregados a partir dos modelos de Tatizana et al. (1987) e Guidicini e Iwasa (1976).	137
Tabela 8. Variação do Fator de Segurança pelo método de Tatizana et al. (1987) entre os períodos de 21 a 23 de novembro de 2008.	139
Tabela 9. Variação do Fator de Segurança pelo método de Tatizana et al. (1987) entre os períodos de 20 a 22 de setembro de 2013.	139
Tabela 10. Variação do Fator de Segurança pelo método de Guidicini e Iwasa (1976) entre os períodos de 21 a 23 de novembro de 2008.	140
Tabela 11. Variação do Fator de Segurança pelo método de Guidicini e Iwasa (1976) entre os períodos de 20 a 22 de setembro de 2013.	141
Tabela 12. Classes de estabilidade proposto por Dietrich e Montgomery (1998).	149
Tabela 13. Mapas temáticos utilizados no modelo SHALSTAB.	150
Tabela 14. Valores de Transmissibilidade do solo a partir dos resultados de permeabilidade.	153
Tabela 15. Resumo dos locais amostrados.	162
Tabela 16. Resultado da Granulometria nos pontos amostrados.	162
Tabela 17. Resultado dos Índices Físicos nos pontos amostrados.	164
Tabela 18. Resultado dos Índices Físicos nos pontos amostrados.	164
Tabela 19. Classificação do solo segundo sistema S.U.C.S e H.R.B nos pontos amostrados.	165
Tabela 20. Parâmetros de resistência nos pontos amostrados.	166
Tabela 21. Parâmetros de resistência de outros autores consultados.	169
Tabela 22. Resumo dos locais ensaiados com uso do DPL.	172

Tabela 23. Cenários de comparação dos Fatores de Segurança para predição de escorregamentos pelos métodos adaptados de Tatizana et al. (1987) e Guidicini e Iwasa (1976) gerados a partir do Shalstab para os eventos de novembro de 2008 e setembro de 2013..... 184

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1. OBJETIVO GERAL.....	29
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1. RECORRÊNCIA DOS DESASTRES NATURAIS POR MOVIMENTOS DE MASSA.....	33
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS REGISTROS DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	37
2.2.1. Principais Tipos de Ruptura em Taludes.....	41
2.2.2. Agentes Instabilizantes.....	43
2.3. CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS E ESCORREGAMENTOS.....	45
2.4. MAPEAMENTO DE ENCOSTAS	48
2.4.1. Classificação do Risco	50
2.5. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO.....	52
2.5.1. Metodologia da UFRGS - Davison Dias (1995)	55
2.6. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) ..	57
2.7. METODOLOGIAS PARA MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE E AMEAÇA	58
2.8. PMRR.....	61
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	63
3.1. GEOMORFOLOGIA, VEGETAÇÃO E HIDROLOGIA....	65
3.2. FORMAÇÃO GEOLÓGICA	70
3.3. FORMAÇÃO PEDOLÓGICA	73
4. MÉTODO.....	85
4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS	87
4.1.1. Informações Geotécnicas	87

4.1.2.	Histórico de escorregamentos	87
4.1.3.	Regime Pluviométrico	93
4.1.4.	Tratamento dos Dados	96
4.2.	COMPILAÇÃO DOS DADOS.....	96
4.2.1.	Mapa Geotécnico	96
4.2.2.	Correlações Entre Chuvas e Escorregamentos.....	105
4.3.	TRABALHOS DE CAMPO	113
4.3.1.	Confirmação de Dados do Mapa Geotécnico Preliminar 113	
4.3.2.	Coleta de Amostras	114
4.3.3.	Definição de Perfil Estratigráfico - Toposequências..	119
4.3.4.	Instalação de Pluviômetro Automático	123
4.4.	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	127
4.4.1.	Caracterização Física do Solo	127
4.4.2.	Cisalhamento.....	128
4.4.3.	Permeabilidade.....	130
4.5.	CONSOLIDAÇÃO DOS DADOS EM AMBIENTE SIG.	131
4.5.1.	Fases para Formação da Etapa de Consolidação dos Dados	132
4.5.2.	Desenvolvimento das Equações de Curva Crítica de Chuva na Formação de Fatores de Segurança.....	137
4.5.3.	Variação do Fator de Segurança FS(T).....	139
4.5.4.	Variação do Fator de Segurança FS(G)	140
4.6.	APLICAÇÃO DE UM MODELO DE ESTABILIDADE .	143
4.6.1.	Shalstab.....	146
4.6.2.	Sequência de Utilização do Modelo Shalstab na Microbacia do Ribeirão das Pedras.....	150
4.7.	MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE À ESCORREGAMENTO DO RIBEIRÃO DAS PEDRAS.....	156
5.	RESULTADOS	161

5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS PONTOS DE COLETA.....	161
5.2. RESULTADO DOS PERFIS DE RECONHECIMENTO DO SOLO POR DPL – TOPOSEQUÊNCIAS.....	172
5.3. RESULTADO DO MAPA GEOTÉCNICO FINAL.....	176
5.4. RESULTADO DAS CORRELAÇÕES ENTRE CHUVA E ESCORREGAMENTOS.....	178
5.5. RESULTADO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE.....	184
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	199
ANEXO A	203
REFERÊNCIAS	211

1. INTRODUÇÃO

A remodelação do meio natural pelos processos de antropização traz consigo inevitáveis consequências ao meio físico, principalmente relacionadas ao uso e ocupação do solo. Esta ação em determinada área, ou apenas sua proximidade, pode ser suficiente para instabilizar ou por em risco entidades materiais, ambientais e humanas ali contidas.

A experiência brasileira revela, ao longo dos anos, a deficiência no atendimento e prevenção de fenômenos naturais como inundações e escorregamentos. A falta de informação, capacitação e a má gestão de recursos financeiros levam o interesse municipal, estadual e federal a negligenciar ações mitigadoras, refletindo no aumento gradual dos desastres naturais, muitas vezes cíclicos e de elevado custo para recuperação.

Em muitos casos, o retrato destes fenômenos são as perdas de inúmeras vidas, sem que haja um investimento significativo para a sua prevenção ou monitoramento.

Em escala mundial, estima-se que a cada R\$ 1 investido em prevenção equivale, em média, entre R\$ 25 e 30 de obras de reconstrução após o evento (Kobiyama et al., 2006).

O município de Florianópolis vivencia problemas com estabilidade em taludes, principalmente por sua porção insular de relevo acidentado, sujeita à intensa infiltração de água e a deslizamentos do manto de decomposição das rochas, exigindo maior conhecimento prévio dos elementos naturais e sua inter-relação com a gradativa expansão urbana.

Neste sentido pretende-se, como área teste, mapear as áreas de susceptibilidade a escorregamento de solos da microbacia de drenagem do Ribeirão das Pedras, assim denominado neste trabalho com o mesmo nome de sua maior elevação, cuja face oeste está voltada para a principal rodovia de ligação do centro ao norte da ilha, à SC 401.

O local de estudo fica situado entre as comunidades de Cacupé e Santo Antônio de Lisboa, que registrou em 2008 um dos maiores movimentos de massa ocorridos em Florianópolis, interditando completamente a rodovia, soterrando um caminhão e vitimando seu motorista.

Levantamentos realizados por Raimundo (1998), em relação à distribuição das ocorrências por tipo de registro em Florianópolis, revelaram que de 1960 a 1996 foram registrados 236 casos relacionados

a problemas geotécnicos em encostas, sendo 88% destes apenas nos últimos seis anos de registros.

Ainda em seus estudos, Raimundo aponta dois episódios na série histórica de escorregamentos ocorridos na SC 401, ambas na margem oposta e a menos de 500 m do último escorregamento ocorrido em novembro de 2008, sendo a primeira em 1983 e a segunda em 1996, atingindo também as duas pistas.

Segundo informações do relatório TCU (2010) a SC-401 é uma das rodovias estaduais de maior volume de tráfego, passando diariamente mais de 30 mil veículos durante a temporada de veraneio. Esta ligação é muito importante para a região, pois configura-se como principal acesso ao norte da ilha.

Além da relevância viária, a área da microbacia vem apresentando nesta última década um aumento no ritmo de ocupação, cuja origem é bastante antiga, apresentando sítios que se subdividiram em terrenos estreitos e de grande profundidade, sucessivamente transformados em condomínios horizontais (ORTH, 1994).

Hoje, nesta localidade, percebe-se, principalmente próximos a face escorregada em 2008 a apresentação de núcleos de ocupação isolada, que de certa forma sofrem a influência da especulação imobiliária e da ocupação máxima das áreas mais planas.

Nota-se ainda a proximidade da ocupação em relação a Unidade de Conservação Ambiental Desterro – UCAD, porção mais elevada da área, sendo um fragmento de Mata Atlântica de 491,5 hectares em avançado estado de preservação (SIMBIOSIS, 2013).

Através do mapa cadastral na escala 1:2000, fornecido pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis – IPUF, juntamente com mapas pedológicos, geológicos e topográficos da área de estudo, busca-se elaborar o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento da microbacia do Ribeirão das Pedras.

O uso de parâmetros geotécnicos do solo, ensaios laboratoriais e de campo, aplicação de geotecnologias, monitoramento pluviométrico e aplicação de modelo de estabilidade vinculado à variação pluviométrica, que integram a matriz metodológica do trabalho, visam complementar as etapas definidas pelo Plano Municipal de redução de Riscos – PMRR, contidas na publicação *Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais* (CARVALHO e GALVÃO, 2006), e na publicação *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios* (MINISTÉRIO DAS CIDADES/IPT, 2007). Tais informações são promovidas pelo Ministério das Cidades e servem como referência a fim de identificação

e hierarquização das áreas de risco, utilizando-se de linguagem comum e unificada na orientação às prefeituras na gestão do risco associados a morros e encostas urbanas.

A presente dissertação possui 6 capítulos que irão contextualizar os conceitos básicos e os procedimentos metodológicos aplicados ao mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos da microbacia do Ribeirão das Pedras, suscintamente distribuídos abaixo:

- Capítulo 1: Introdução aos fatos e os objetivos gerais e específicos;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica contendo a abordagem a partir da recorrência, características, correlações, mapeamentos e metodologias para modelagem e susceptibilidade de escorregamentos;
- Capítulo 3: Caracterização da área de estudo com suas formações geológicas, pedológicas, geomorfológicas, vegetacionais e hidráulicas;
- Capítulo 4: Formação da metodologia a partir da reunião de dados, ensaios, mapa geotécnico, correlações, monitoramento pluviométrico e aplicação de modelo de estabilidade;
- Capítulo 5: Resultados gerados no desenvolvimento da metodologia;
- Capítulo 6: Conclusões e recomendações com base nos produtos dos mapas e seus processos;

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é fazer o mapa de susceptibilidade a escorregamento de encostas da microbacia do Ribeirão das Pedras, baseado em uma análise qualitativa e quantitativa, partindo de uma solução analítica do modelo de estabilidade incorporado ao modelo hidrológico para a predição de escorregamentos, estabelecendo seus níveis críticos dependentes da variação pluviométrica.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Formação de mapa geotécnico;
- Realização de correlações entre chuvas e escorregamentos;
- Ensaios de campo e laboratório: Caracterização física (massa específica aparente, limites de liquidez e plasticidade, análise

granulométrica, permeabilidade e teor de umidade natural) e determinação de parâmetros Mecânicos (resistência ao cisalhamento, tensão deformação);

- Instalação e monitoramento de pluviômetro automático;
- Elaboração de mapa de susceptibilidade a escorregamento em ambiente SIG em função da previsibilidade de chuvas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente percebe-se a deficiência na identificação, monitoramento e previsibilidade de escorregamentos em taludes ou encostas. O desafio está em manter ativas as ações pré e pós-evento, mantendo recursos humanos, materiais e financeiros para mitigação de riscos.

Genericamente o termo escorregamento e/ou deslizamento entre geólogos, engenheiros e outros profissionais afins, são utilizados para descrever processos de movimento de descida do solo, de rochas e material orgânico sob efeito da gravidade (HIGHLAND et al., 2008).

Esses processos, também conhecidos por movimentos de massa, ocorrem nos taludes ou encostas naturais ou artificiais definidas por superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos, originados por processos geológicos, geomorfológicos e antrópicos (OLIVEIRA et al., 1998).

Sob ação da gravidade, cada encosta possui a interação de um conjunto de forças favoráveis e resistentes ao movimento, gerando tensões cisalhantes em uma massa homogênea ou heterogênea de solo, rocha ou mistos, dado ao longo de uma superfície potencial de ruptura.

A instabilidade é deflagrada quando as tensões cisalhantes se igualam as tensões de resistência ao cisalhamento. Esta condição ocorre pelo aumento das tensões ou pela redução da resistência.

As causas são atribuídas por Terzaghi (1950) sendo um dos precursores no estudo desta fenomenologia (RAIMUNDO, 1998), estão ligados a fatores internos, resultando da diminuição da resistência ao cisalhamento, ofertadas por intemperismo, falhas e infiltração da água, e externos, resultando do aumento das tensões de cisalhamento originárias da alteração da geometria do maciço, carregamentos, choques e vibrações.

Desde então as causas são muito bem conhecidas e estudadas, porém identificar seu principal mecanismo de ocorrência, quando e onde acontecem são desafios que levam a variadas linhas de estudo no meio científico, tornando a análise de cada caso fundamental para dirimir fatores intrínsecos locais e climáticos.

A atualização dos dados, mapeamentos, populações e constante avaliação dos resultados são ações disseminadas em congressos e eventos que envolvem gestão de riscos em encostas, porém pouco aplicado nos dias atuais.

A vulnerabilidade instalada e a abordagem cultural do problema carecem de medidas preventivas, tornando o sistema cíclico e de baixo efeito frente às perdas humanas e materiais relacionados a desastres naturais deste tipo, acumulando prejuízos sociais e econômicos em muitos países.

A cultura de prevenção é uma realidade mundial que precisa ser mais bem explorada no Brasil, que por sua vez, vem demonstrando esta preocupação após recentes catástrofes, como a ocorrida na região serrana do Estado do Rio de Janeiro em 2011, onde morreram mais de 900 pessoas após constantes chuvas e deslizamentos generalizados. De certa forma, catástrofes desta magnitude, fomentaram a formação de cidades mais resilientes¹.

No Brasil, o reflexo mais recente para mitigar desastres, como a ocorrida no Rio de Janeiro, está na elaboração da Lei 12.608/12, validada a partir do dia 11 de abril de 2012, obrigando Estados e Municípios a identificarem e mapearem suas áreas de risco, realizar estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades, bem como a obrigatoriedade do monitoramento meteorológico, hidrológico e geológico de suas áreas (BRASIL, 2012).

Em relação ao grande número de vítimas, o Ministério das Cidades vem apoiando os municípios mais atingidos por deslizamentos, mesmo que estes não liderem o ranking dos desastres mais recorrentes na atualidade do Brasil. Segundo Carvalho & Galvão (2006), este fato justifica a concepção e implantação de políticas públicas municipais específicas para a gestão de risco de deslizamentos em encostas.

Desde 2004, ações de Prevenção e erradicação dos riscos promovem, dentro dos programas urbanos do Ministério das Cidades, a realização de Planos Municipais de Redução de Risco – PMRR, com objetivo de diagnosticar o risco através dos mapeamentos para a proposição de medidas estruturais para sua redução, considerando

¹ Resilientes: O significado literal é dado como propriedade de um corpo de recuperar a sua forma original após sofrer choque ou deformação (PRIBERAM, 2013). Este termo foi incorporado atualmente pelo Escritório das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres (UNISDR) para tratar sobre a redução dos riscos de desastres nas cidades ocasionados por eventos climáticos, dentre eles os deslizamentos de encostas.

estimativas de custos, critérios de priorização e compatibilização a outros programas nas três esferas de governo: federal, estadual e municipal (CARVALHO e GALVÃO, 2006).

Devido ao ainda crescente número de vítimas, em 2012 foi lançado pelo governo brasileiro o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais, no qual prevê o mapeamento das áreas de risco e a estruturação de um sistema de monitoramento, alerta e resposta a desastres naturais.

Dentre os eixos temáticos, o plano prevê o mapeamento de áreas de alto risco de deslizamento, enxurradas e inundações em 821 municípios prioritários até 2014, identificando ainda a vulnerabilidade das habitações e da infraestrutura dentro dos setores de risco, bem como a proposição de soluções para os problemas encontrados. Além disso, o Governo Federal propõe apoio a elaboração de cartas geotécnicas de aptidão urbana para subsidiar diretrizes urbanísticas (PLANALTO, 2013).

2.1. RECORRÊNCIA DOS DESASTRES NATURAIS POR MOVIMENTOS DE MASSA

Conforme pesquisa divulgada pelo Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED, 2012), os desastres classificados por movimentos de massa representam menos de 3% da totalidade dos registros oficiais de desastres naturais no Brasil no período de 1991 à 2010. Conforme Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, as tipologias mais recorrentes são as relacionadas a estiagem e seca, representando 53% da totalidade de registros, seguidos de inundação brusca e inundação gradual com 21% e 12% respectivamente, vendaval e/ou ciclones com 7%, granizo com 4% e 3% classificados como outros. Dentro da parcela outros, destaca-se os tornados, geadas, incêndios florestais, erosões e movimentos de massa.

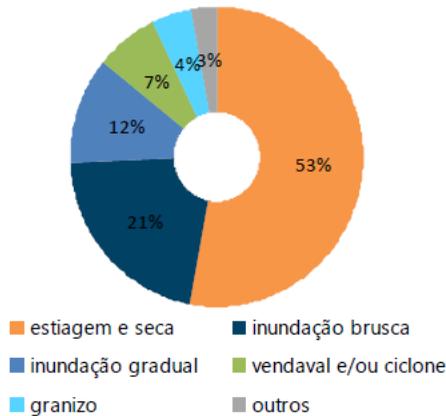


Figura 1. Desastres mais recorrentes no Brasil (1991-2010).

Fonte: CEPED, 2012.

Em relação ao Estado de Santa Catarina, o CEPED divulga a mesma tendência estatística para os desastres mais recorrentes no Brasil, com ênfase a inundações gradual e brusca (gráfico da Figura 2), que somadas ultrapassam os eventos de estiagem e seca, conferindo forte tendência a eventos pluviométricos no Estado, que alteram seu regime hídrico e deflagram problemas de drenagem urbana.

Esta alta tendência pluviométrica do Estado de Santa Catarina é confirmada nos estudos de Grim (2009), Silva Dias MAF (2009), Monteiro (2001), Herrmann et al. (2004) e Herrmann (2007), sendo associados a localização geográfica, formação do relevo, e continentalidade, ficando sujeita a atuação de variados sistemas tropicais e extratropicais, como frentes frias originadas do círculo polar antártico, vórtices ciclônicos, convecção tropical, circulação marinha e a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul).

Os registros de movimentos de massa levantados no Estado de Santa Catarina correspondem a menos de 2% do total dos registros, contidos na parcela outros, conforme gráfico da Figura 2.

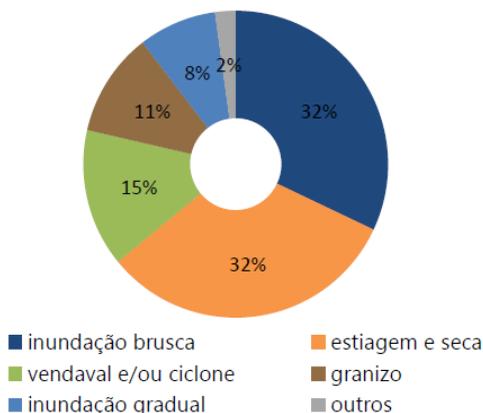


Figura 2. Desastres mais recorrentes em Santa Catarina (1991-2010).

Fonte: CEPED, 2011.

Para o município de Florianópolis, sede do presente estudo, apenas 2 escorregamentos oficiais foram registrados dentre as 24 ocorrências no Estado de Santa Catarina durante o período de 1991 à 2010, conforme Figura 3 abaixo.

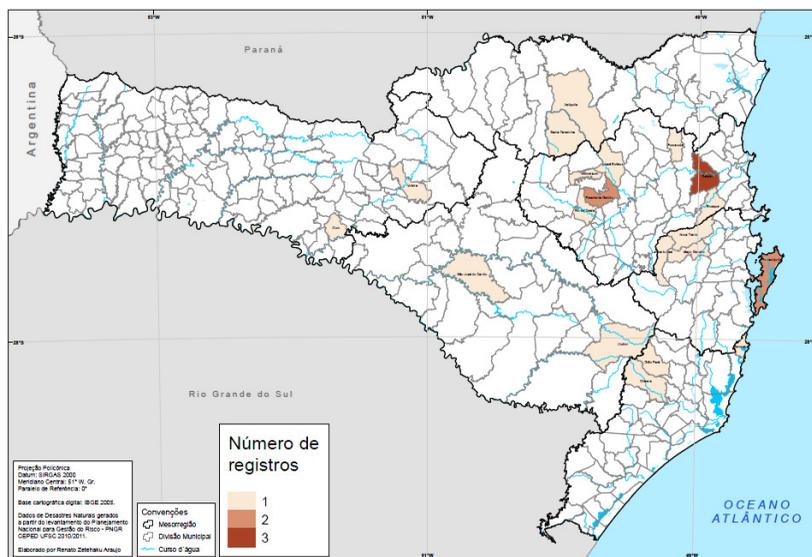


Figura 3. Desastres naturais causados por movimento de massa em Santa Catarina (1991-2010).

Fonte: CEPED, 2011.

Apesar dos esforços inovadores prestados pela Secretaria Nacional de Defesa Civil, em cooperação com a Universidade Federal de Santa Catarina para criação do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, os dados apresentados nem sempre contabilizam todas as ocorrências. A metodologia assume dados oficiais de desastres produzidos principalmente pelos órgãos municipais e estaduais, ainda carentes em estrutura física e pessoal técnico especializado, que geram, em muitos casos, uma classificação equivocada ou a associação de múltiplos eventos² em apenas um.

Contabilizam-se nas estatísticas os registros oficiais contidos em Relatórios de Danos, AVADAN, NOPRED, Decretos, Portarias e documentos em arquivos e banco de dados do Ministério da Integração Nacional e Secretaria Nacional de Defesa Civil para o levantamento da recorrência de desastres.

Os registros apontam os maiores eventos, geralmente por decretação de estado de emergência ou calamidade pública, no qual são utilizados formulários, que ao longo do tempo sofrem modificações, nem sempre registrando com exatidão o evento catastrófico. Desta maneira, os movimentos de massa são frequentemente associados a enxurradas e enchentes, ficando em segundo plano ou não identificados, conforme constatado por Herrmann et al. (2004), ao confrontar dados on-line do jornal A Notícia e os registros da Defesa Civil pelos relatórios de Avaliação de Danos - AVADANs.

Neste caso, o Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina, Figura 4, produzido por Herrmann (2007), apresenta um número maior de eventos, totalizando 140 registros de escorregamentos distribuídos no Estado de Santa Catarina entre 1980 a 2003. Dentre estes, 9 no município de Florianópolis, que juntamente com Blumenau, formam os municípios com maior número de recorrências.

²Associação de múltiplos eventos: Constata-se que eventos extremos podem atuar de forma direta ou indireta, sendo o último responsável pela deflagração de outros processos, como enchentes e movimentos de massa. (Dias e Herrmann, 2002)

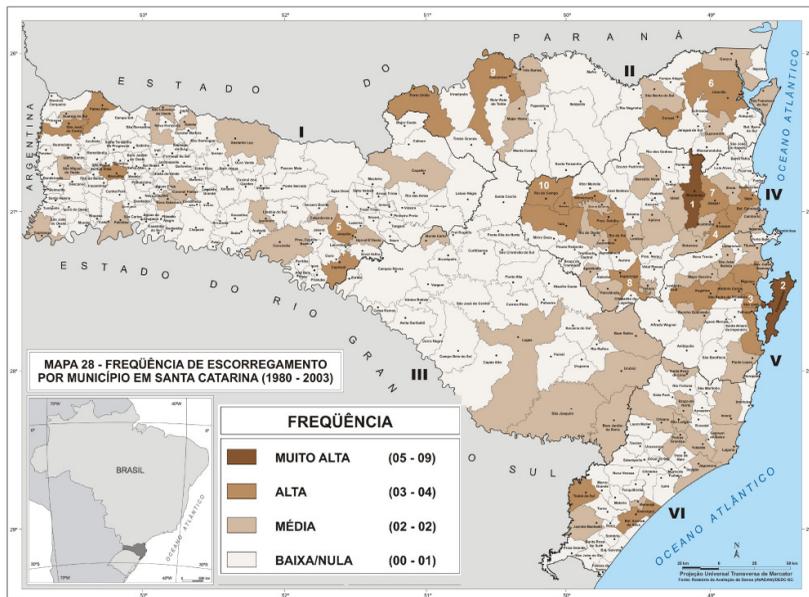


Figura 4. Freqüência de escorregamento por município em Santa Catarina (1980-2003).

Fonte: Adaptado HERRMANN, 2007.

Baseado nesta premissa, outras fontes bibliográficas serão consultadas para melhor compor a recorrência de movimentos de massa na região de estudo objetivando a formação de um banco de dados.

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS REGISTROS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são mais cíclicos na região Sudeste do Brasil, correspondendo 82% das ocorrências, seguido da região sul com 12%. As ocorrências estão concentradas nos meses de verão e início da primavera, apresentando ainda uma tendência de crescimento anual no número de eventos, conforme gráfico da Figura 5 (CEPED, 2012).

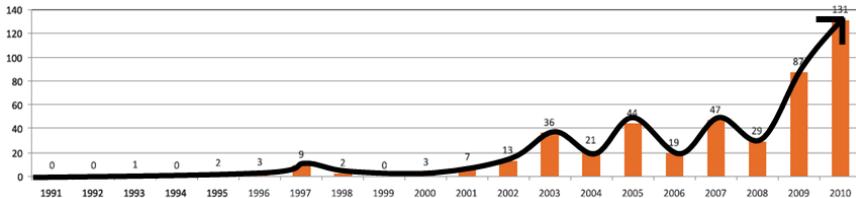


Figura 5. Ocorrência anual de Movimento de Massa no Brasil (1991-2010).

Fonte: Adaptado CEPED, 2012.

Um comparativo entre as duas últimas décadas reforçam esta tendência de crescimento, pois dentre os demais desastres (gráfico da Figura 6, os movimentos de massa obtiveram o maior aumento de sua recorrência, saltando de 4% para 96%.

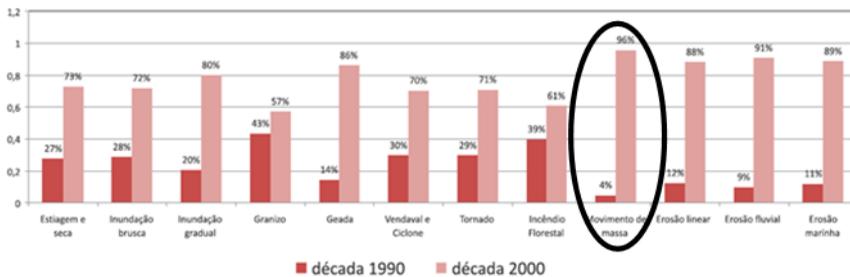


Figura 6. Comparativo de ocorrências entre décadas.

Fonte: Adaptado CEPED, 2012.

Confirmando a atenção dada ao Ministério das Cidades a eventos relacionados a escorregamentos, os dados do gráfico da Figura 7 não deixam dúvidas de sua importância frente a outros desastres, cujo número de mortes supera os demais.

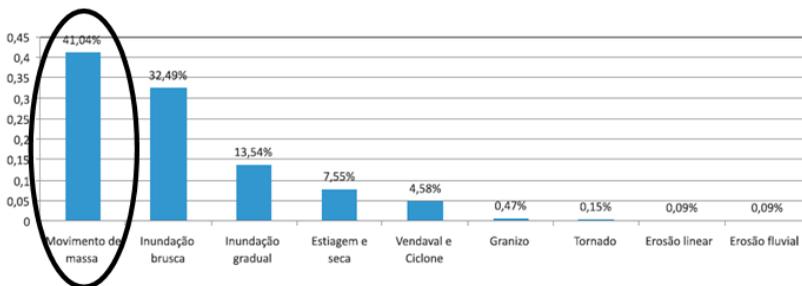


Figura 7. Mortes por tipo de desastre.

Fonte: Adaptado CEPED, 2012.

Em escala de tempo geológica (milhares de anos), é certo que algum deslizamento vai ocorrer em todas as encostas, cujo desequilíbrio provocado pela ocupação urbana tem acelerado este processo para escala humana de tempo (CARVALHO e GALVÃO, 2006).

O crescimento no número de registros de ocorrências de movimentos de massa em tempo não geológico pode estar relacionado a alguns fatores globais, como:

- Inexistência ou desatualização de registros (CEPED, 2012);
- Ocupação urbana gradativa, primeiramente em áreas de planície, e na sua falta as encostas, aumentando a vulnerabilidade do sistema (KOBAYAMA et al, 2012);
- Mudanças climáticas, podendo alterar o regime de chuvas e deflagrar eventos extremos³ (SILVA DIAS MAF, 2009);

³ Eventos extremos: Associados ao fenômeno ENOS (El Niño e La Niña), Silva Dias MAF (2009) retrata os eventos extremos em séries históricas de chuvas dos últimos 50 anos para Santa Catarina, indicando aumento de extremos de chuvas e não de chuvas regularmente no espaço tempo, que tomados em conjunto, são característicos de aumento de extremos climáticos associados ao aquecimento global.

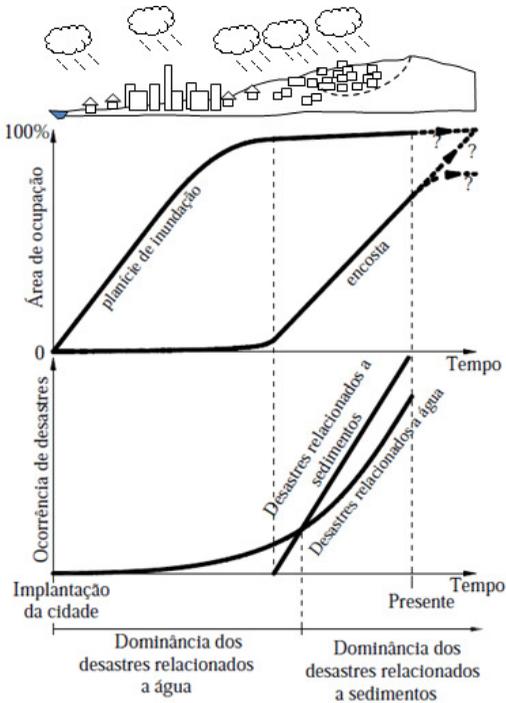


Figura 8. Evolução de desastres e ocupação urbana gradativa.

Fonte: Adaptado Kobiyama et al, 2010.

Segundo Augusto Filho e Virgili, (1998), a deflagração das instabilizações de taludes depende de uma cadeia de eventos, tendo origem da formação da própria rocha a movimentos tectônicos, intemperismos, erosão, ação antrópica, etc. Assim, relaciona como principais condicionantes dos escorregamentos e processos correlatos na dinâmica ambiental brasileira as seguintes características:

- Climáticas: Destaque ao regime pluviométrico;
- Distribuição do substrato das encostas/taludes: Solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas(xistosidades, fraturas,etc);
- Geomorfológicas: Inclinação, amplitude e forma (retilíneo, convexo, côncavo);
- Águas de superfície e subsuperfície;
- Uso e ocupação do solo: Cobertura vegetal, intervenção antrópica (cortes, aterros, concentração água pluvial), etc;

2.2.1. Principais Tipos de Ruptura em Taludes

De forma geral, as rupturas em taludes são classificadas de acordo com a tipologia do movimento, seguindo alguns critérios básicos que envolvem velocidade de deslocamento, tipo de material e geometria da massa mobilizada. Dentre as principais classificações propostas, pode-se citar Guidicini e Nieble (1976), Varnes (1978) e Augusto Filho (1994). A proposta de Varnes (1978) é uma das mais completas e difundidas, classificando em 6 tipos de movimentos principais: Quedas, tombamentos, escorregamentos, expansões laterais, corridas/escoamentos e movimentos combinados/complexos. Esta proposta é aceita pela IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment), no qual detalha seus processos e mecanismos, associando a fenômenos naturais e antrópicos.

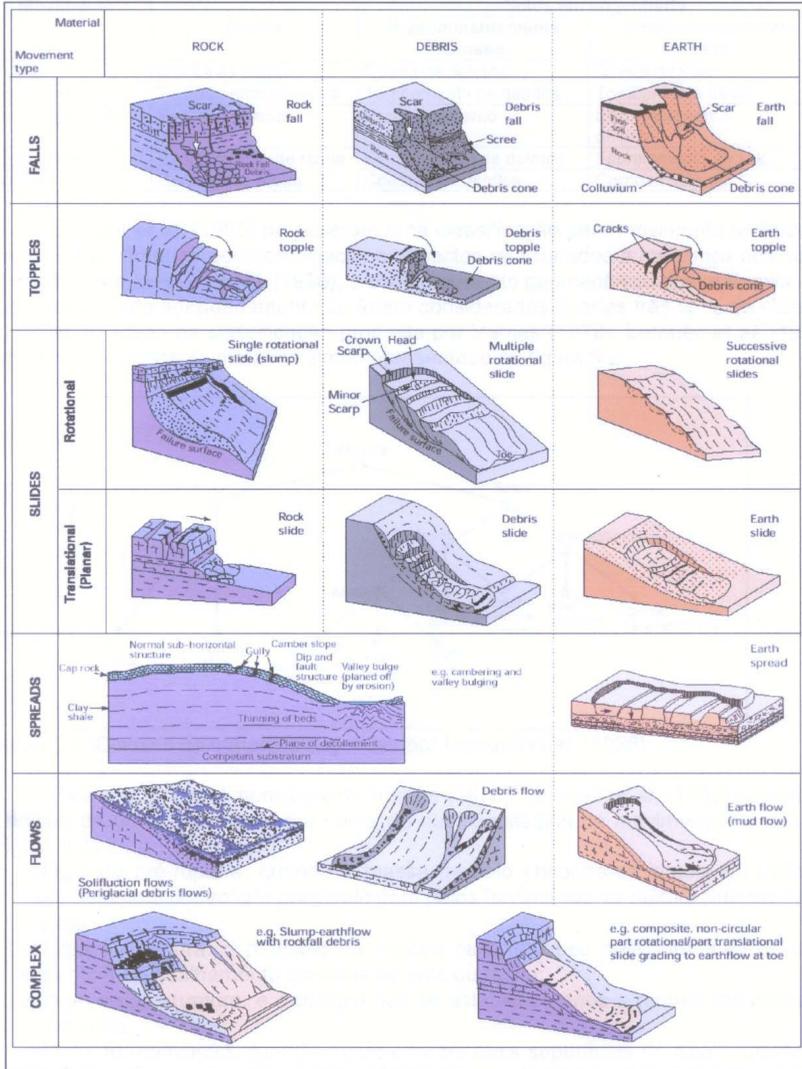


Figura 9. Classificação de Movimentos de Massa segundo Varnes (1978).

Fonte: Varnes apud Oliveira (2005).

A classificação dos movimentos de massa é de suma importância para o entendimento de suas condicionantes, dada a possibilidade de associar a um conjunto de características específicas

que permitem formular modelos, orientar na proposição de medidas preventivas e corretivas (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

Os principais tipos de ruptura ocorridos no Brasil, e que por sua vez causam os maiores número de mortos, estão relacionados a escorregamentos rotacionais⁴, escorregamentos translacionais⁵ e corridas⁶, indo de encontro com os estudos realizados por Wolle (1989) na Serra do Mar, cuja cadeia montanhosa estende-se por aproximadamente 1.500 quilômetros ao longo do litoral leste/sul entre os Estados do Rio de Janeiro e Santa Catarina.

2.2.2. Agentes Instabilizantes

Raimundo (1998), em sua revisão bibliográfica, relaciona importantes contribuições para os principais agentes instabilizantes nos estudos do comportamento de encostas em solos tropicais, principalmente os relacionados ao Estado do Rio de Janeiro, envolvendo movimentos em colúvio⁷, tálus⁸ e solo residual⁹, destacando-se a perda de sucção, flutuação do lençol freático, relâmpagos e cobertura vegetal (LACERDA, 1997, GUIDICINI e NIEBLE 1983, COLLISON et al 1995, PEDROSA, 1994 APUD RAIMUNDO, 1998).

Em relação à sucção, Oliveira (2004) demonstra em seus estudos importantes variações volumétricas e de resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado devido à

⁴ Escorregamentos Rotacionais: Possui superfícies de deslizamento curvas, ocorrendo em camadas espessas de solo residual ou depósitos coluvionares e de tálus.

⁵ Escorregamentos Translacionais: Comuns na Serra Geral e Serra do Mar, ocorrendo em vertentes com alta declividade e solo pouco espesso.

⁶ Corridas: Movimentos de grandes proporções que se deslocam por escoamento quando ocorre liquefação de solos escorregados com massa fluída ou gerada a partir de remobilização de detritos acumulados acrescidos de material escorregado das vertentes a montante.

⁷ Colúvio: Material transportado de um lugar para outro, principalmente por efeito da gravidade.

⁸ Tálus: Material incoerente e heterogêneo que se acumula nas encostas.

⁹ Solo Residual: Formado no local, diretamente da degradação da rocha subjacente ao perfil do solo.

influência dos ciclos de umedecimento e secagem do solo. Por estar condicionada ao grau de saturação do solo, ou seja, dependente do regime pluviométrico, a sucção pode ser reduzida a zero quando há precipitação intensa de chuvas, sendo determinada a partir da curva que expressa a relação entre a sucção e o teor de umidade. Os principais fatores que influenciam na relação sucção x teor de umidade são a mineralogia, composição granulométrica, estrutura e temperatura.

Baseado nas condições tropicais e subtropicais no qual o território brasileiro está inserido, somadas as condições do relevo e tipo do substrato rochoso, há grandes variações de cobertura de solo, camadas com diferentes resistências e permeabilidades, que acabam por dificultar a identificação dos mecanismos de instabilização. Augusto filho e Virgili (1998) citam os principais parâmetros que influenciam direta e indiretamente nas suscetibilidades de movimentos de massa, sendo eles: peso específico, porosidade, índice de vazios, mineralogia, granulometria, plasticidade, atividade, permeabilidade, compressibilidade e histórico de tensões. Além disso, relaciona que o comportamento de ruptura pode estar associado ainda a estruturas reliquias herdadas da rocha mãe.

Partindo deste princípio, uma análise com uso de parâmetros do solo na forma quantitativa pode-se alcançar melhores resultados do que análises qualitativas para determinação de áreas susceptíveis ao escorregamento, minimizando a subjetividade no qual é realizada a maioria dos mapeamentos subsidiados pelos Planos Municipais de Redução de Riscos – PMRRs, apenas pautada em aspectos geomorfológicos como declividade, proximidade das moradias a taludes, nível de intervenção no setor e evidências de instabilidade para determinação do grau de probabilidade de ocorrência de eventos destrutivos. Além disso, os PMRRs limitam-se a observância de áreas antropizadas e seu entorno, com o objetivo final de estabelecer o risco, baseado na vulnerabilidade instalada e sua susceptibilidade ao fenômeno de movimentos de massa, sendo que os escorregamentos ocorrem também em áreas naturais sem ocupação.

Outro fator agregado aos estudos de vertentes e que merece atenção para uma análise mais ampla de sua susceptibilidade a movimentos de massa está no cruzamento entre as ocorrências dos escorregamentos e a pluviosidade, pois a chuva atua como principal agente não-antrópico na deflagração de escorregamentos no Brasil. Neste sentido, Guidicini e Iwasa (1976) e Tatizana et al. (1987) desenvolveram aplicações de correlações satisfatórias ao identificar intensidades críticas de chuvas. A principal aplicação das correlações é

antecipar às deflagrações dos escorregamentos através de acompanhamentos dos índices pluviométricos de uma determinada região (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

2.3. CORRELAÇÃO ENTRE CHUVAS E ESCORREGAMENTOS

A importância no correto armazenamento das ocorrências relacionadas a escorregamentos, pode ajudar a responder uma das principais questões sobre qual quantidade de chuva é suficiente para deflagrar escorregamentos em determinada área.

Para esta finalidade, aplicações de correlações entre chuva e escorregamento começaram a aparecer na literatura brasileira ainda na década de 50, através dos estudos de Pichler (1957) nos morros de Santos, posteriormente ganhando destaque os estudos de Guidicini e Iwasa (1976), por sua abrangência quase nacional, no qual propôs 4 níveis de risco (A,B,C e D).

As correlações propostas por Guidicini e Iwasa (1976) são baseadas na determinação do coeficiente final (C_f) relativos a probabilidade de escorregamentos através da análise de chuvas antecedentes, representado pela soma do volume de chuva até a data do evento (coeficiente de ciclo - C_c) e a magnitude da chuva no dia do evento (coeficiente de episódio - C_e). A fórmula algébrica é dada pela expressão $C_f = C_c + C_e$, cujo valor final é plotado no gráfico da Figura 10, estabelecendo as faixas de probabilidade (níveis de risco) como citado anteriormente.

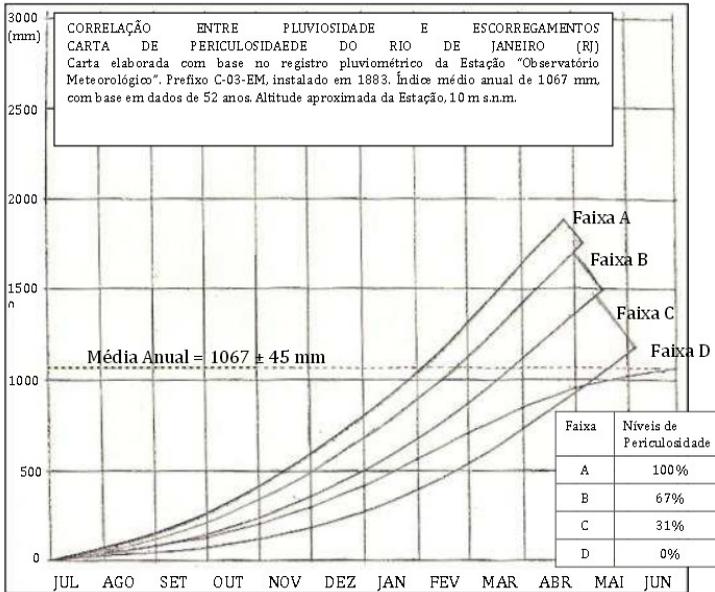


Figura 10. Carta de periculosidade da Cidade do Rio de Janeiro (GUIDICINI E IWASA, 1976). Fonte: Guidicini e Iwasa apud D' Orsi (2011).

Tatizana et al. (1987) (Figura 11), aplicou, em caráter inovador, correlações através de modelos matemáticos (envoltórias) na Serra do Mar no estado de São Paulo, baseando-se na catalogação dos eventos de deslizamentos e dos dados de chuvas, estabelecendo limiares pluviométricos empíricos através da Pluviometria acumulada em 96 horas x intensidade pluviométrica em 1 hora, determinando parâmetros "K" específicos para cada modelo de ruptura. A expressão matemática representada por Tatizana et al. (1987) é: $I(AC) = K \times (AC4d)^{-0,933}$, onde $I(AC)$ é a intensidade pluviométrica da última hora antes da ocorrência do escorregamento, $(AC4d)$ corresponde a pluviometria acumulada nos quatro dias (96 horas) antes da ocorrência e K o parâmetro associado ao modelo e ruptura. Os valores de K foram estabelecidos para quatro modelos de ruptura: escorregamentos induzidos, escorregamentos esparsos, escorregamentos generalizados e corridas de lama (APUD D'ORSI, 2011). Assim quanto melhor e maior a série histórica, melhor os resultados.

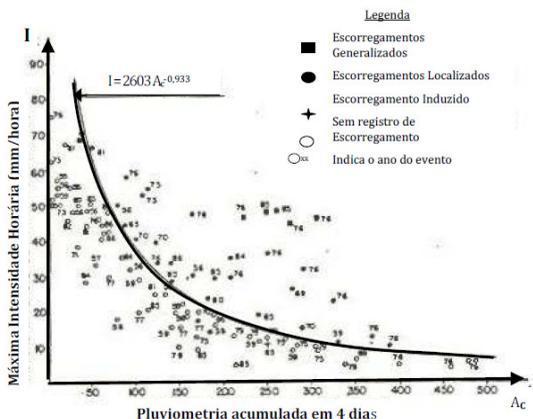


Figura 11. Envoltória dos escorregamentos induzidos segundo Tatizana et al. (1987). Fonte: Tatizana et al apud D' Orsi (2011).

Semelhante aos estudos de Tatizana et al. (1987), D'Orsi (2011) estabelece limiares em sua proposta através da construção de linhas de tendência para divisão de Eventos Importantes e Muito Importantes, que de forma detalhada, facilita o entendimento para construção da envoltória e posterior extração da equação da curva, conforme Figura 12.

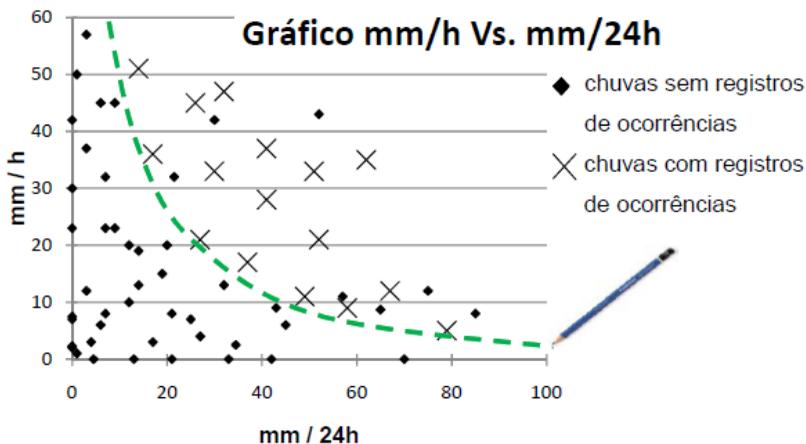


Figura 12. Demonstração da construção de linhas de tendência para as correlações. Fonte: D' Orsi (2011).

Este tipo de análise realizado por Tatizana et al. (1987) é um dos mais difundidos, sendo proposto por Carvalho e Galvão (2006) para

a elaboração de Plano de Contingência ou Preventivo de Defesa Civil (PPDC), bem como citados nas publicações do Ministério das Cidades/IPT (2007) e Tominaga et al. (2009), na orientação de agentes envolvidos na análise, gerenciamento e intervenções de áreas de risco.

Similar a Carvalho e Galvão (2006), propõe-se a utilização das correlações entre chuvas e escorregamentos no presente estudo, contudo, não se limitando apenas em Planos de Contingência, mas sim na própria etapa de elaboração do mapa de susceptibilidade, cuja fase inicial comumente prevê levantamentos de dados, agregando-se a instalação de pluviômetros para acompanhamento dos índices de chuvas e sua inter-relação com o número de escorregamentos.

2.4. MAPEAMENTO DE ENCOSTAS

Uma das ferramentas que podem ser adotadas para a mitigação de eventos provenientes de escorregamento em taludes é o mapeamento de encostas, delimitando e identificando possíveis áreas que possuem maior suscetibilidade na ocorrência do fenômeno, podendo contribuir para a adoção de políticas públicas para o uso e ocupação do solo, ou no emprego de um plano de gerenciamento de risco, evitando perdas de vidas humanas, materiais ou ambientais.

Para a realização do mapeamento são utilizados mapas e cartas, que são documentos cartográficos que reúnem informações sobre aspectos do meio ambiente. Segundo Zuquette e Nakazawa (1998), as cartas atribuem um nível de interpretação das informações contidas nos mapas, sendo que no Brasil os termos são ajustados ao nível de investigação, precisão espacial e conteúdo, com base no comportamento do meio e representação das informações.

Conforme Ministério das Cidades/IPT (1997), dentre os tipos de mapeamentos existentes, três são destacados: mapa de inventário, carta de suscetibilidade e mapa de risco. Em conjunto, resultarão na identificação do risco em uma determinada área.

No Brasil, os mapeamentos voltados a previsibilidade de movimentos de massa são, em sua grande maioria, realizados por meio de avaliações qualitativas, baseadas na identificação dos riscos por opinião técnica da equipe responsável pelo mapeamento com o apoio de informações dos moradores da área mapeada. (CARVALHO e GALVÃO, 2006). Neste sentido, Fernandes et al. (2001) classifica este tipo de metodologia como sendo empírica, ou seja, a estimativa de distribuição espacial e temporal do potencial de instabilidade de

vertentes, bem como a combinação de notas e pesos, é baseado na experiência profissional. Este tipo de análise qualitativa também é conhecido como metodologia heurística, obtendo como principal parâmetro a combinação de movimentos de massa com a geomorfologia (AHRENDT, 2005).

Os estudos de perigo ou de previsão de áreas instáveis também podem ser executados por meio de métodos denominados quantitativos, baseados em métodos determinísticos e probabilísticos. (FERNANDES et al., 2001).

A análise determinística do risco voltada ao mapeamento de encostas requer uma maior quantidade de dados, testes de laboratório e ensaios de campo, contornando a subjetividade das abordagens qualitativas. Contudo, seu alto custo é tratado como um limitador (TOMINAGA et al., 2009). Os resultados são normalmente expressos na forma de fatores de segurança através da análise do equilíbrio limite, no qual são obtidos valores numéricos. Tais valores estão sujeitos a incertezas devido à medição de parâmetros de ensaios de laboratório ou *in situ*, condições de umidade e água subsuperficial, bem como a representatividade da amostra no caso de solos heterogêneos. Neste caso, a análise probabilística pode amenizar diferenças, sendo que ao invés de considerar um local como homogêneo, sua variabilidade pode ser modelada (AHRENDT, 2005).

Os métodos probabilísticos ou com base estatística, preveem a probabilidade de ocorrer à ruptura em um talude baseando-se na quantificação de incertezas e a variabilidade associada à previsão de ruptura.

Soeters e Van Westen (1996) apud Ahrendt (2005) relacionam na Tabela 1 os tipos e escalas mais indicadas ao mapeamento, acrescentando a análise de inventário como mais uma tipologia aos demais métodos citados anteriormente, baseando-se na distribuição, atividade e densidade de escorregamentos.

Tabela 1. Relação entre tipos de análise e escalas de mapeamento. Adaptado Soeters e Van Westen (1996) apud Ahrendt (2005).

Tipo de Análise	Técnica	Características	Escala Recomendada		
			Regional (1:100.000)	Media (1:25.000)	Grande (1:10.000)
Inventário	Análise de distribuição de escorregamentos	Análise de distribuição e classificação dos escorregamentos	sim ^b	sim	sim
	Análise de atividade de escorregamentos	Análise temporal das mudanças nas características do meio Cálculo da densidade de escorregamentos em unidades de terreno ou a partir de isoetas	não	sim	sim
	Análise de densidade de escorregamentos		sim ^b	não	não
Análise Heurística	Análise geomorfológica	Utilização de opinião especialista de campo	sim	sim ^c	sim ^c
	Combinação qualitativa de mapas	Utilização de opinião especialista para atribuição de pesos aos parâmetros analisados	sim ^d	sim ^c	não
Análise estatística	Análise Bivariada	Calcula a importância da contribuição de fatores combinados	não	sim	não
	Análise Multivariada	Calcula a equação de previsão a partir de uma matriz de dados	não	sim	não
Análise determinística	Análise de fatores de segurança	Aplicação de modelos hidrológicos e de estabilidade de encostas	não	não	sim ^e

^b somente com dados confiáveis de distribuição de escorregamentos pois um mapeamento seria muito dispendioso.

^c somente com forte suporte de outras técnicas quantitativas para obtenção de níveis de objetividade aceitáveis

^d somente se existe uma base de dados confiáveis de distribuição espacial dos fatores controladores dos escorregamentos.

^e somente em condições de terreno homogêneas, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

2.4.1. Classificação do Risco

O IPT (1980) define risco na existência de perigo, possibilitando perda ou dano de caráter social ou econômico, dirigidas a ocupações urbanas, industriais ou viárias, caso sejam presenciadas os movimentos de massa ou processos correlatos.

Segundo Carvalho e Galvão (2006), o conceito de risco pode ser baseado na expressão $R = P \times C$, onde R = risco, P = Probabilidade e C = Consequências. A identificação do risco, neste caso, é executada através de trabalhos de campo, durante os quais é avaliada tanto a probabilidade (ou possibilidade) de ocorrência de processos destrutivos, quanto às consequências sociais e/ou econômicas resultantes.

Para se estabelecer o grau de probabilidade de ocorrência do processo ou risco, o Ministério das Cidades baseado em trabalhos realizados na Prefeitura de São Paulo, pelo IPT e Unesp, classificaram o

risco em 4 níveis, de acordo com os seguintes critérios descritos na Tabela 2. Baseado nesta metodologia, Ogura et al. (2009) apresentou de forma simplificada a análise de risco com o agrupamento e avaliação de forma qualitativa (heurística) a partir de observações diretas em campo. Nesse sentido, foram avaliados fatores ligados a probabilidade ou possibilidade de ocorrência de escorregamentos, vulnerabilidade dos assentamentos urbanos e tipologia do processo esperado e seu potencial de dano. A probabilidade foi estimada a partir da identificação e análise de feições e características do terreno e ocupação. A vulnerabilidade foi analisada segundo a qualidade construtiva e a maior ou menor capacidade dessas casas e seus moradores sofrerem danos. Para o potencial de dano, estimou-se o número de moradias que poderiam ser atingidas.

Tabela 2. Critérios para a determinação dos graus de risco (ADAPTADO MINISTÉRIO DAS CIDADES/IPT, 2007).

Grau de Probabilidade	Descrição
R1 Baixo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. 2. Não se observa(m) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. 3. Mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
R2 Médio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos. 2. Observa-se a presença de algum(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento. 3. Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.

Continua

Continuação

R3 Alto	<p>1. Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. Observa-se a presença de significativo(s) sinal/ feição/ evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo.</p> <p>3. Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>
R4 Muito Alto	<p>1. Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos.</p> <p>2. Os sinais/feições/evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de deslizamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação à margem de córregos, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. É a condição mais crítica, sendo impossível monitorar a evolução do processo, dado seu elevado estágio de desenvolvimento.</p> <p>3. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.</p>

A determinação do risco não será alvo do presente estudo, apenas a análise de susceptibilidade ao escorregamento de encostas, uma vez que não irá agregar a parcela de perda ou dano dirigido a ocupações urbanas, industriais ou viárias, já que se trata de uma variável antrópica do tempo presente (já instalada), não permitindo a extrapolação a áreas não habitadas.

2.5. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Quando a expansão urbana despreza as condições do meio físico, os riscos de ocorrência de eventos trágicos ficam mais evidentes, ficando as populações sujeitas à ocorrência de inundações, processos erosivos, escorregamentos de terra, perdas do solo e equipamentos urbanos (VALENTE, 1996).

Sobre o meio físico, citam-se as informações de Fernandes (2013):

A caracterização do meio físico de uma área de estudo constitui-se, para vários autores (DALE & McLAUGHLIN, 1988; ASSAD et al., 1993; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1993; NORMAN et al., 1994), numa importante informação para o planejamento racional de uso e conservação do solo e da água.

Tendo em vista a necessidade de se estabelecer um planejamento territorial, assim como viabilizar projetos de engenharia, as cartas e mapas geotécnicos têm sido amplamente utilizados para caracterizar e espacializar informações contidas em determinada área.

Alguns conceitos são atribuídos ao mapeamento geotécnico, dos quais destaca-se a definição de Zuquette (1993), cuja finalidade é o levantamento, avaliação e análise de atributos que compõe o meio físico, representando em um meio cartográfico os componentes geológicos-geotécnicos significantes para uso e ocupação do solo e subsolo, projetos, construções e manutenções na engenharia civil, de minas e por problemas ambientais.

Varnes (1974), requer operações básicas de adição, seleção, generalização e transformações das informações relativas a litologia e estrutura dos solos e rochas, hidrogeologia, geomorfologia e processos geológicos para a realização do mapeamento geotécnico.

O mapa geotécnico também pode considerar aspectos da cobertura vegetal e dinâmica superficial, como erosões e escorregamentos, onde Santos (1997) o classifica como um instrumento de gestão territorial, uma vez que estabelece o zoneamento do solo em unidades territoriais homogêneas, segundo os critérios do meio físico.

Na Tabela 3 foram relacionadas às principais metodologias internacionais e nacionais, destacando-se o método desenvolvido por Davison Dias que será utilizado no presente estudo e detalhado a seguir.

Tabela 3. Metodologias de Mapeamento Geotécnico (Adaptado Kopenzinski, 2000; Higashi, 2006; Zuquette, 1987).

METODOLOGIA	FINALIDADE	UTILIZAÇÃO
Internacional		
IAEG	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Francesa	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
PUCE (Austrália)	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Britânica	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Russa	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Hinojosa e Leon	Específica	Planejamento e projeto de estradas
ZERMOS	Específica	Movimento de massa (planejamento)
Espanhola	Específica Regional	Planejamento regional e territorial
USA (Kiefer)	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Canadá	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Nacional		
Metodologia IPT	Prever e orientar ocupação	Planejamento urbano, erosões e escorregamentos
Metodologia UNESP/Rio Claro	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Metodologia EESC/USP - Zuquette (1987)	Específica	Zoneamento geotécnico e específico
Metodologia da UFRGS - Davison Dias (1995)	Específica Regional	Zoneamento geotécnico e específico
Higashi (2006)	Específica Regional	Zoneamento geotécnico e Planejamento Urbano

2.5.1. Metodologia da UFRGS - Davison Dias (1995)

A partir da necessidade de se caracterizar grandes áreas do meio físico, onde não há possibilidade de realização de um volume considerável de ensaios, Davison Dias (1995) estabeleceu proposta metodológica ao estimar a partir de dados geológicos, pedológicos e topográficos, as unidades geotécnicas de uma determinada área.

A metodologia está baseada na superposição de mapas pedológicos e geológicos, realizando trabalhos de campo para análise morfológica, coleta de amostras, descrição dos perfis típicos e comportamento geomecânico e hidráulico no qual o solo é solicitado.

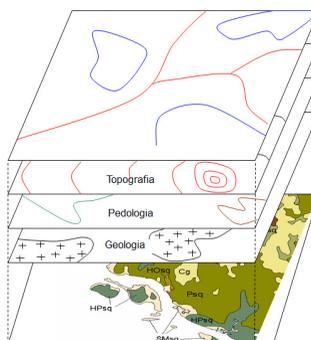


Figura 13. Superposição de mapas para determinação das unidades geotécnicas, metodologia Davison Dias (1995).

Fonte: Higashi (2011).

Para cada unidade geotécnica, Davison Dias (1995) definiu que a geologia permitirá a obtenção de características do horizonte de alteração da rocha (horizonte saprólítico), conseqüentemente mais profundo, enquanto a pedologia permitirá inferir características dos horizontes mais superficiais.

A topografia auxiliará na definição dos limites de cada unidade, cuja tendência para uma classificação inicial pode ser baseado na aplicação de faixas de declividade, onde de 0 a 3% pode representar solos hidromórficos, 3 à 8% depósitos de encostas, 8 à 20% Podzólicos, 20 à 45% Cambissolos, 45 à 70% solos Litólicos e acima de 70% escarpas.

Para a denominação, utiliza-se a simbologia ABCxyz, onde as letras maiúsculas “ABC” correspondem à classificação pedológica do horizonte superficial, e as minúsculas “xyz” identificam a geologia. São

desconsiderados na classificação pedológica as características álico, eutrófico ou distrófico. No caso de haver mais de uma litologia, utiliza-se a rocha dominante.

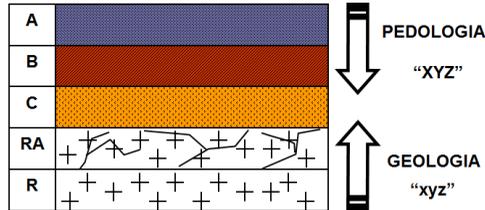


Figura 14. Simbologia empregada na determinação das unidades geotécnicas.

Fonte: Higashi (2011).

Em resumo, a metodologia Davison Dias (1995) está descrita na seguinte sequência:

- a) Inicialmente divide-se a região em grandes unidades de acordo com a geologia;
- b) Usando-se do resultado do levantamento pedológico, estimam-se os principais perfis de solos na região;
- c) Separam-se os solos hidromórficos dos não hidromórficos (sem presença de lençol freático nos horizontes A e B).
- d) Separam-se os locais onde o relevo é fortemente ondulado, ondulado e suavemente ondulado. Variações do relevo (declividade) e a geologia são indicadores das unidades geotécnicas;
- e) Indicação da presença de falhas e fissuras, além de outros aspectos importantes da estrutura definidos nos mapas geológicos. Estimam-se as características do horizonte C a partir da geologia;
- f) Aplicação das estimativas das unidades geotécnicas com as siglas ABCxyz através de intenso trabalho de campo, baseado na Classificação Pedológica Brasileira, mas em menor grau de detalhe (simplificada), adaptada a engenharia de solos, verificando-se a cor do solo, espessura, presença de minerais primários, textura, estrutura e drenagem. Solos hidromórficos são separados inicialmente por topografia, e depois analisados os graus de desenvolvimento dos horizontes.

Com base na metodologia Davison Dias (1995), citam-se os trabalhos de Santos (1997) e Higashi (2006), que manipularam mapas para a formação de unidades geotécnicas utilizando-se de Sistema de Informações Geográficas – SIG satisfatoriamente.

Devido a diversas fontes de dados utilizados (topográficos, geológicos, pedológicos, entre outros), essencialmente espaciais, a utilização de um Sistema de Informações Geográficas – SIG se torna uma ferramenta imprescindível para a preparação de mapas geotécnicos, no qual será tratado a seguir.

2.6. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é todo sistema que utiliza informações contidas em um plano geográfico georeferenciado, cujo tratamento dessas informações permite uma nova visão sobre determinado assunto. O seu uso possibilita a criação de novos mapas e temas variados, estabelecendo uma correlação entre representação espacial e informações disponíveis, gerados a partir de um banco de dados criados em uma base computacional.

Esse sistema pode ser utilizado segundo Burrough (1986), no estudo de determinados fenômenos ou em medidas relativas às decisões de planejamento, considerando o fato de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real.

Entre os trabalhos pesquisados em relação ao uso do SIG, pode-se citar o realizado por Higashi (2006), o qual apresenta uma metodologia de expansão de centros urbanos aplicável a cidades costeiras onde os aspectos geoambientais são abordados, interpretando mapas geológicos e pedológicos originários do Plano Nacional do Gerenciamento Costeiro, feições de relevo, e em ensaios laboratoriais e de campo para a formulação de unidades geoambientais. O trabalho apresentou a integração dos dados gerados em um Sistema de Informações Geográficas, possibilitando ainda uma rápida tomada de decisões, acelerado pelo processo de análise computacional.

Ramalho (1994), utilizou o SIG em sua metodologia para elaboração do mapeamento geotécnico na cidade de Viçosa/MG, baseado no uso de cartas de topografia pedologia, entre outros. O resultado foi o mapeamento de áreas de risco através caracterização geotécnica e declividades obtidas pelo Modelo Digital do Terreno (MDT).

2.7. METODOLOGIAS PARA MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE E AMEAÇA

Com o avanço das geotecnologias (SIG, GPS, sensoriamento remoto, etc.), é possível realizar mapeamentos quantitativos de áreas suscetíveis a escorregamentos, diminuindo a subjetividade (MARCELINO, 2003).

A utilização de SIG na criação de um banco de dados que permita a formação de mapas específicos a partir da correlação e sistematização dos dados favorece um maior número de métodos que buscam identificar áreas suscetíveis a movimentos de massa na paisagem (VAN WESTEN, 1993).

Devido à natureza complexa dos movimentos de massa, a predição exata do local do movimento por suposições analíticas vem tornando-se cada vez mais populares. Modelos matemáticos teóricos adequados as condições do terreno estão sendo utilizados com frequência, destacando-se os modelos hidrológicos e de estabilidade.

Os modelos de estabilidade empregam em suas análises o princípio de equilíbrio limite, onde a estabilidade do maciço é estabelecida por uma porção eventual dele, que se desprende e desliza sobre um determinado plano de ruptura, cujo consenso estabelece que a resistência mobilizada deverá ser apenas uma fração da resistência total, implicando na adoção de um fator de segurança (RAIMUNDO, 1998).

$$FS = \frac{\textit{Forças resistentes}}{\textit{Forças atuantes}} \quad (01)$$

FS é o fator no qual os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo são reduzidos, trazendo o talude para o estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície potencial de ruptura (MORGENSTERN, 1995 APUD AHRENDT, 2005).

Raimundo (1998) destaca os métodos de Fellenius, Bishop, Spencer, Janbu e Morgenstern e Price, para o cálculo do fator de segurança, dos quais realizam a divisão da massa de solo em um número determinado de fatias, onde em cada fatia são distribuídas as tensões atuantes e as forças resistentes para alcance do equilíbrio estático. O processo é iterativo e para cada superfície de ruptura assumida tem-se um fator de segurança.

A Tabela 4 resume os principais métodos de cálculo do FS segundo premissas de seu uso, tipo de superfície de ruptura, método e referências.

Tabela 4. Resumo dos métodos mais utilizados para análise da estabilidade de taludes (ADAPTADO DE HUNT, 1986 APUD AHRENDT, 2005).

<i>Superfície de ruptura</i>	<i>Método</i>	<i>Premissas</i>	<i>Referência</i>
Planar e transcorrente	Talude infinito	Inclinação constante e comprimento ilimitado	Taylor (1948)
	Culmann	Superfície de ruptura planar interceptando o topo e a base	Culmann (1866)
Planar	Cunha ou cunhas	Bloco deslizante ou bloco com forças laterais	Hoek e Bray (1977) Morgenstern (1968)
	Fellenius	Forças laterais dos dois lados são iguais	Fellenius (1936)
Circular	Círculo de atrito	Resultante atuando em arco de ruptura tangencial a um círculo concêntrico de raio $R \sin\phi$	Taylor (1948)
	Bishop	Considera todas as forças atuando nas laterais das fatias	Bishop (1955)
	Bishop modificado	Sistema de forças simplificado	Bishop (1955)
	Spencer	Forças interfatias paralelas	Spencer (1967 e 1981)
Irregular	Morgenstern & Price	Baseado no sistema de forças de Bishop completo	Morgenstern e Price (1965)
	Jambu	Considera as forças interfatias	Jambu (1954 e 1971)

Em seus estudos, Ahrendt (2005) destaca o modelo de talude infinito como solução analítica para previsão de escorregamentos, baseado em uma série de simplificações que tornam o modelo bastante maleável a aplicação em diferentes situações, apresentando boa compatibilidade com programas computacionais, principalmente SIGs.

A simplicidade é justificada pelo sistema de forças que as considera agindo sempre na direção normal a superfície do solo. O fato de o talude ser longo e uniforme contribui para que as fatias sejam iguais e as forças laterais consideradas iguais a magnitude de direção contrária, anulando-as. A superfície de percolação é considerada paralela a superfície do talude.

Exemplo do uso de um modelo de talude infinito foi empregado por Dias (2006) para identificação de áreas suscetíveis a deslizamento.

Através do uso de um SIG e baseado na equação 2, o mesmo aplicou em sua área de estudo por meio da ferramenta de álgebra matricial raster calculator. Esta ferramenta permite realizar operações

matemáticas para toda a área de estudo através de parâmetros relacionados com a morfologia do terreno ($\text{sen}\beta$, $\text{cos}\beta$ e $\text{tan}\beta$) obtidos de um Modelo Numérico do Terreno - MNT. Para cada célula do mapa de declividade o valor do ângulo de declividade foi armazenado. Os valores de ângulo de atrito, coesão e peso específico do solo são retirados de levantamentos de dados geotécnicos disponíveis, geralmente disponibilizados por ensaios de cisalhamento direto.

Como resultado a equação 2 obtém-se uma matriz onde cada célula armazena um valor de FS.

$$FS = \frac{c - \psi \gamma_w \cdot \tan \emptyset}{\gamma_{\text{sat}} \cdot h \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{cos} \beta} + \frac{\tan \emptyset}{\tan \beta} \quad (02)$$

Onde,

γ_{sat} : Peso específico do solo saturado;

γ_w : Peso específico do solo não saturado;

ψ : Razão entre a poro pressão e peso específico da água;

h : Profundidade da superfície de ruptura;

β : ângulo de declividade;

\emptyset : ângulo de atrito;

c : coesão do solo;

Atualmente, o modelo de estabilidade foi incorporado ao modelo hidrológico para a predição de escorregamentos. Esta metodologia baseia-se na modelagem matemática através da combinação de dois fatores distintos: talude infinito e o balanço entre concentração e transmissão de água no solo, cujo desenvolvimento foi realizado por Dietrich e Montgomery (1998), denominando-se SHALSTAB. A metodologia utiliza o Modelo Digital do Terreno (MDT) em formato raster para coleta dos valores de elevação, pelo qual, posteriormente são calculadas as áreas de contribuição e declividade, contendo em cada pixel um valor morfométrico distinto (MICHEL et al., 2011).

A equação que combina os dois módulos no SHALSTAB é

$$\frac{q}{T} = \frac{a}{b} \text{sen} \beta = \left[\frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\text{tg} \beta}{\text{tg} \emptyset} \right) + \frac{c}{\gamma_w \cdot z \cdot g \cdot \text{cos}^2 \beta \cdot \text{tg} \emptyset} \right] \quad (03)$$

onde:

q: Chuva crítica necessária para a ruptura;

T: Transmissibilidade do solo;

a/b: Área de contribuição da água;

β : Declividade do local;

γ_w : Massa específica da água;

g: Aceleração da gravidade;

z: Espessura do solo;

γ : Massa específica do solo;

\emptyset : Ângulo de atrito do solo, e;

c: Coesão do solo;

Com base na metodologia desenvolvida por Dietrich e Montgomery (1998), e de encontro com os objetivos do presente estudo, será utilizado o SHALSTAB para a análise da estabilidade.

2.8. PMRR

As novas políticas públicas de incentivo a mitigação dos desastres naturais, promovida pelo Ministério das Cidades a partir de 2003, instituída na ação de apoio à prevenção e erradicação de riscos em assentamentos precários, no âmbito do Programa de Urbanização e Integração de Assentamentos Precários, está realizando o fomento e sistematização do mapeamento de áreas de risco a escorregamento e alagamentos em vários municípios brasileiros.

Os recursos são atribuídos ao Programa de Aceleração do Crescimento - PAC, e são destinados a municípios prioritários, aqueles que apresentam histórico de acidentes graves de deslizamentos de encostas com ocorrência de mortes, atendendo áreas particularmente vulneráveis a ocorrência deste tipo de fenômeno, aplicando-se etapas definidas pelo Plano Municipal de redução de Riscos – PMRR, contidas na publicação Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais, elaboradas por Carvalho e Galvão (2006).

O PMRR desenvolvido pelo Ministério das Cidades demonstra de forma sequencial os processos, instrumentos e recursos técnicos para a elaboração do mapa de risco a escorregamento, subdividindo-se basicamente em oito fases obrigatórias:

- a) Elaboração de metodologia detalhada;
- b) Atualização do mapeamento de risco em escala de detalhe;

- c) Proposição das intervenções estruturais para redução do risco;
- d) Estimativa dos custos das intervenções propostas;
- e) Definição de critérios para hierarquização das obras;
- f) Identificação de programas e fontes de recursos para investimentos;
- g) Sugestões e medidas não estruturais para ação da defesa civil;
- h) Realização de audiência pública;

A não existência de padronização de metodologias para a realização dos mapeamentos desenvolvidos pelos PMRRs permite uma variada adoção de critérios com maior e menor grau de confiabilidade. Pautados geralmente por processos subjetivos, empresas públicas e privadas participantes dos contratos agem de forma a permitir uma rápida implementação das ações de prevenção e mitigação do risco, atendendo um cronograma e custos limitados, muitas vezes validados por equipes técnicas de prefeituras sem o conhecimento específico. Boa parte desses produtos acaba por ficar sem uso após as audiências públicas, sem divulgação e/ou deixando de integrar os planos de contingência de defesa civil, bem como em planos diretores.

O Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais, criado recentemente pelo governo, é mais um incentivo para gestão do risco em encostas, prevendo em um primeiro momento a setorização do risco em 821 municípios prioritários até 2014, com a participação conjunta do IPT e Serviço Geológico Brasileiro. Um segundo estágio também está previsto com a realização de mapas de suscetibilidade em 286 municípios, também até o ano de 2014.

Isso tudo leva a crer a existência de grande demanda para o objeto de estudo, que corrobora com a necessidade de medidas precisas de avaliação da susceptibilidade, realizando operações físicas, classificações de componentes e apresentação de limites geotécnicos, possibilitando ser relacionados, correlacionados, interpretados e representados de forma sistemática e contínua por mapeamentos e monitoramentos.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A microbacia do Ribeirão das Pedras está situada integralmente na ilha de Santa Catarina, pertencente ao município de Florianópolis, nos paralelos $27^{\circ}32'/27^{\circ}30'$ de latitude Sul e entre os meridianos $48^{\circ}31'/48^{\circ}30'$ de Longitude Oeste de Greenwich, conforme Figura 15.

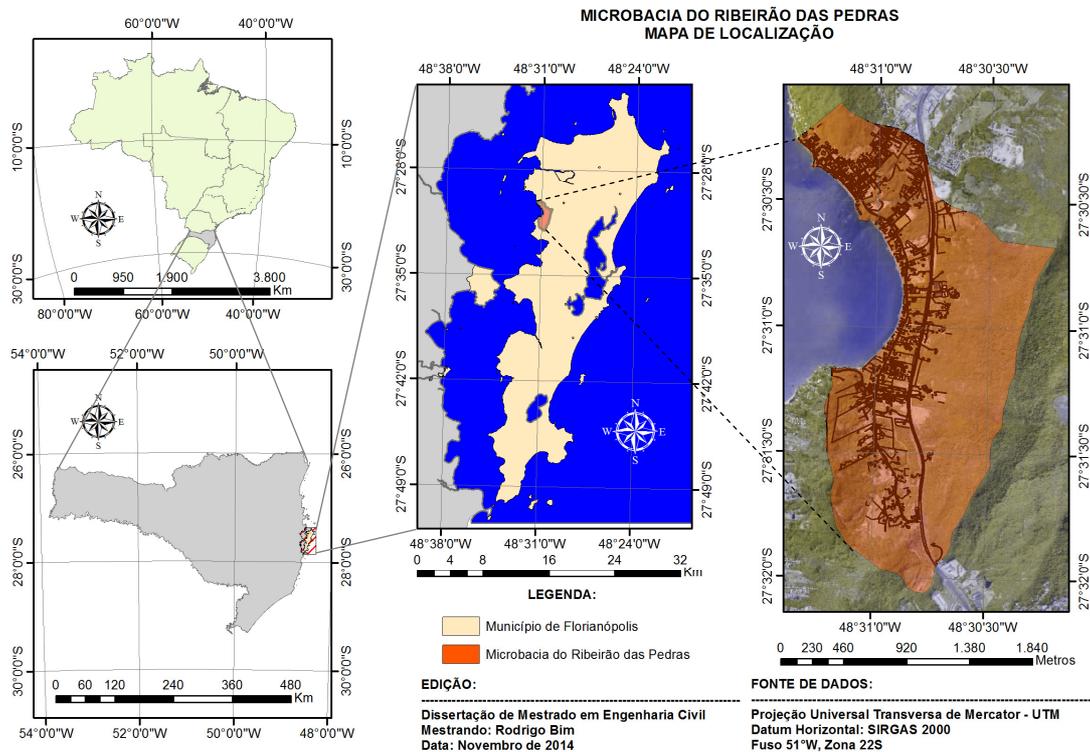


Figura 15. Mapa de localização da microbacia do Ribeirão das Pedras.

A microbacia é cortada longitudinalmente (norte a sul) pela rodovia SC 401. Possui extensão de aproximadamente 9,84 km (quilômetros), apresentando uma área de 3,26 km² (quilômetros quadrados). Localiza-se entre os bairros de Cacupé e Santo Antônio de Lisboa, sendo que as maiores altitudes chegam a 342 metros em relação ao nível do mar.

O histórico de ocupação da área de estudo ocorreu por volta do ano de 1955 para exploração agropecuária, cujas terras estendiam-se desde os mangues da baía norte em Saco Grande até o travessão dos Ratores. As áreas loteadas tinham aproveitamento inicial por extrativismo primário da mata, passando por formação de pastagens formando uma vegetação herbácea caracterizada por pequenas manchas a partir da meia encosta. (LADWIG, 1998)

Na porção mais elevada da microbacia do Ribeirão das Pedras encontra-se a Unidade de Conservação Ambiental Desterro – UCAD, que representa uma expressiva porção do ecossistema da Mata Atlântica de encosta com 491,5 hectares pertencentes a Universidade Federal de Santa Catarina.

3.1. GEOMORFOLOGIA, VEGETAÇÃO E HIDROLOGIA

A microbacia do Ribeirão das Pedras está inserida na unidade geomorfológica denominada de Serras do Leste Catarinense, localizada entre o Oceano Atlântico e os patamares da Serra Geral, que segundo Silva Dias MAF (2009), é uma região submetida a um conjunto de fatores, tais como condições climáticas, aspectos geológicos e geomorfológicos e uso da terra que configura um alto grau de risco de desastres naturais e de escorregamento de encostas.

Na atualidade, a cobertura vegetal é classificada como secundária (antrópica), derivada da formação ombrófila, cujo critério vegetacional atribui a área 5 estágios sucessionais: Herbácio, capoeirinha, capoeira, capoeirão e floresta secundária. (LADWIG, 1998)

O mapa de uso do solo na microbacia de estudos, Figura 16, adaptado dos estudos promovidos pelo IPUF (1997), distribui os estágios vegetacionais como sendo:

- *Ap+VsI*: Área de vegetação rasteira com predomínio de gramínea + vegetação secundária no primeiro estágio de crescimento (capoeiras e capoeirinhas);
- *Pmh*: Influência marinha herbácea;

- $Vs1+Re+Ap$: Capoeiras e capoeirinhas + reflorestamento de eucalipto + área de vegetação rasteira com predomínio de gramínea ;
- $Vs2$: Vegetação secundária nos estágios mais desenvolvidos (capoeirões e florestas secundárias);
- $Vs2+Vs1$: Vegetação secundária nos estágios mais desenvolvidos (capoeirões e florestas secundárias) + vegetação secundária no primeiro estágio de crescimento (capoeiras e capoeirinhas);

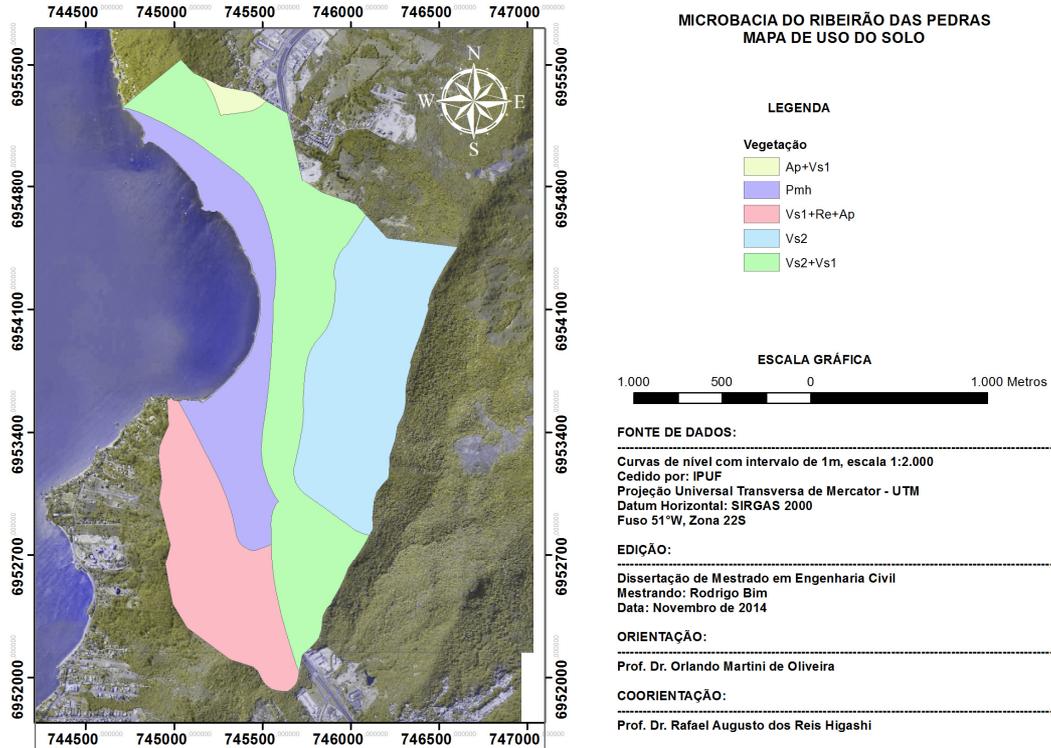


Figura 16. Mapa de uso do solo da microbacia do Ribeirão das Pedras.

Em relação a hidrologia, a área de estudos é pertencente a bacia 8 - Santo Antônio de Lisboa, formada por vertentes com pequenos córregos e cursos d'água recarregados por eventos pluviométricos que, em conjunto com outras 27 bacias existentes no município de Florianópolis, desagüam preferencialmente nas baías norte e sul.

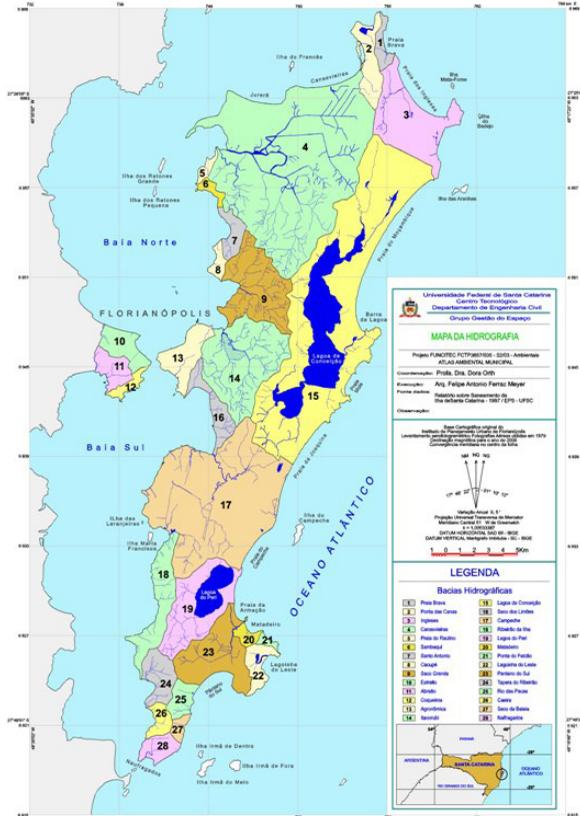


Figura 17. Mapa da Hidrografia do município de Florianópolis. Fonte: ATLAS, 2006.

Na microbacia do Ribeirão das Pedras não há grande capacidade de vazão nos cursos d'água, pois grande parte dos canais são efêmeros (possui água enquanto estiver chovendo) e intermitentes (possui água durante um certo período do ano). (LADWIG, 1998)

A Figura 18 destaca a hidrografia presente na microbacia do Ribeirão das Pedras:

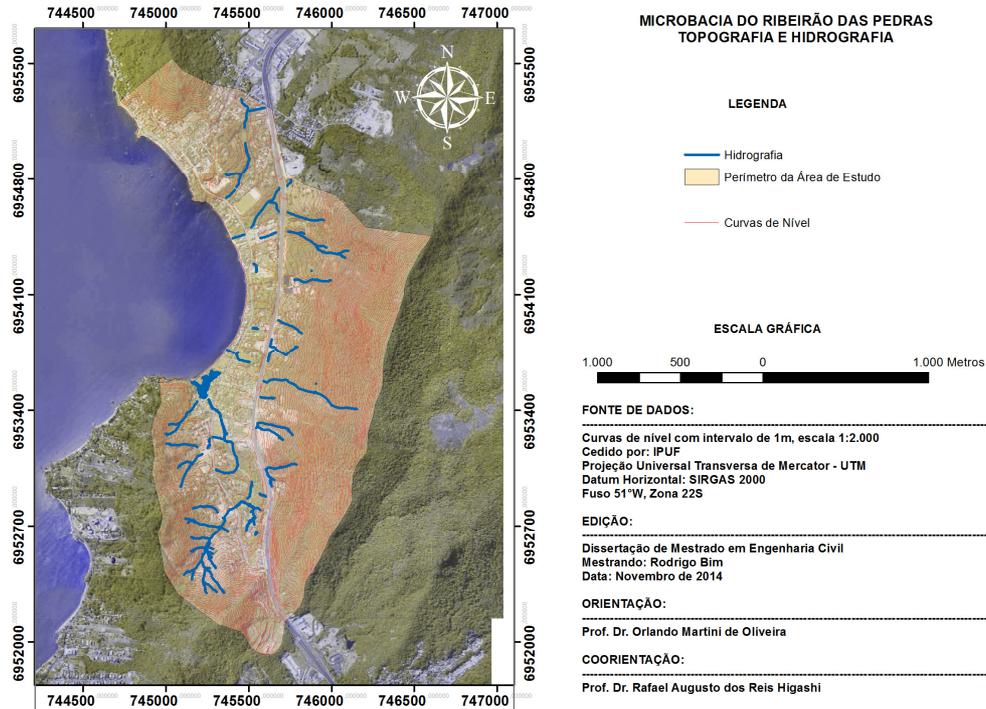


Figura 18. Mapa representando a hidrografia da microbacia do Ribeirão das Pedras.

Conforme classificação de Köppen, o clima da microbacia é definido como Cfa, situada em zona intermediária subtropical, pertencente ao grupo mesotérmico úmido. Este tipo de clima caracteriza-se pela sua homogeneidade, com chuvas bem distribuídas durante todo o ano. A oscilação térmica é amena durante o ano devido à proximidade ao mar e a formação de brisas terrestres, com média anual de 20,4°C. A faixa média do mês mais quente e do mais frio é respectivamente 24,5°C e 16,4°C. A temperatura mais baixa registrada foi de -2°C e a máxima foi de 38°C. (OLIVEIRA, 2014)

Conforme Andrade (1996), o índice de precipitação anual de Florianópolis é desigual entre norte e sul da ilha, apresentando 14,29% de diferença, sendo a região norte com maior índice. A umidade relativa anual é de 85%, com média de 140 dias de chuva por ano.

De acordo com dados fornecidos pela EPAGRI, a estação pluviométrica de São José, utilizada no presente estudo, registrou precipitação média anual é de 1942,46 mm, correspondente ao período histórico de 2001 a 2013. A Figura 19 apresenta a distribuição da média mensal.

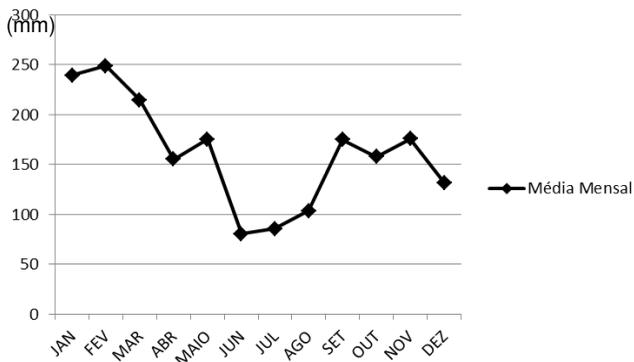


Figura 19. Média Pluviométrica Mensal do Município de Florianópolis – Período 2001 à 2013. Fonte: Autor.

3.2. FORMAÇÃO GEOLÓGICA

A geologia da Ilha de Santa Catarina é basicamente constituída por granitos, que formam as vertentes principais, pertencentes à Suíte Intrusiva Pedras Grandes, cuja formação é do período Proterozóico Superior (500 Ma), com diques de diabásio encaixados no granito, pertencentes à Formação Serra Geral de idade Juro-Cretácea (190 Ma), e pelos depósitos de origem marinha, eólica lacustres e fluviais, formados no Período Quaternário. (OLIVEIRA et al., 2012)

A microbacia do Ribeirão das Pedras possui duas unidades geológicas relativamente bem definidas, sendo a primeira relacionada à litologia formada pela Suíte Intrusiva Pedras Grandes – Granito Florianópolis (PS e pg b) e a segunda por Sedimentos Subatuais Marinhos (QPm). (OLIVEIRA et al., 2012).

Os estudos divulgados pelo IPUF (1997) confirmam a presença das duas unidades citadas no parágrafo anterior, sendo que para a Suíte Intrusiva Pedras Grandes -Granito Florianópolis (PS e pg b) a característica é de granodioritos, nas cores róseas a cinza claro, com granulação bastante variável de fina a grosseira, textura equigranular a portifírica.

Os Sedimentos Subatuais Marinhos (QPm), são caracterizados como litorâneos e eólicos retrabalhados, cuja coloração varia de castanho avermelhada e castanha com presença de óxido de ferro, ocorrendo em terraços com altitude média (15m) e espessura (40m), sendo as melhores exposições na faixa leste da ilha.

A Figura 20 representa a distribuição das litologias na microbacia do Ribeirão das Pedras baseados nos estudos do IPUF (1997).

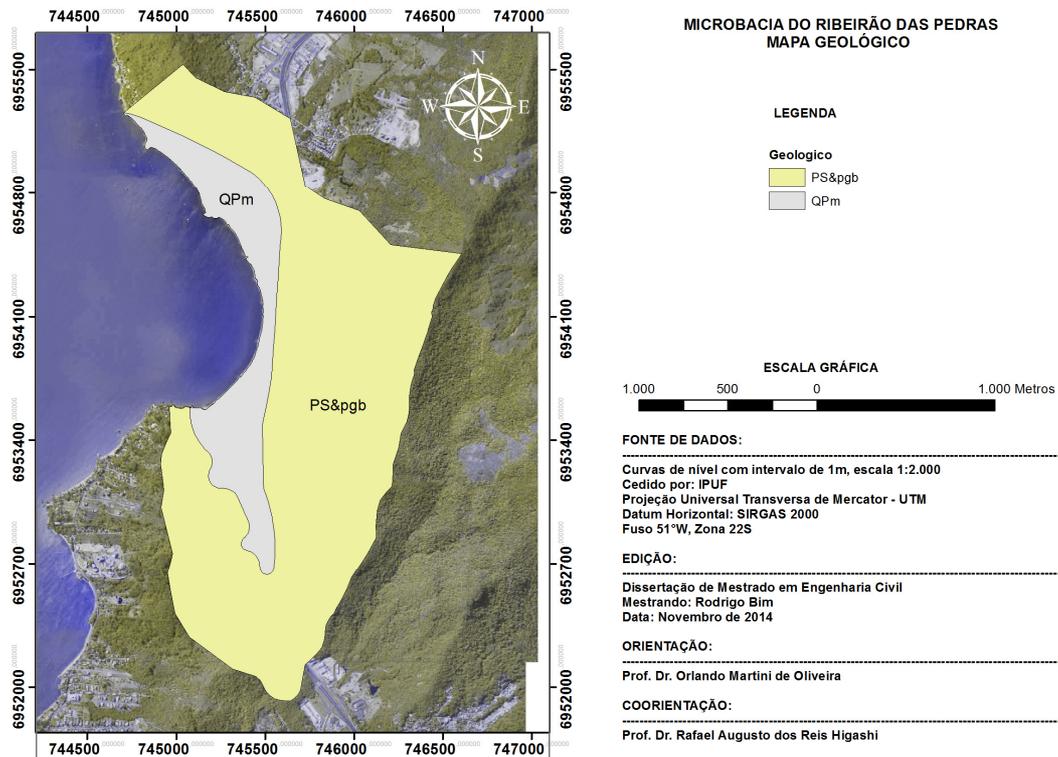
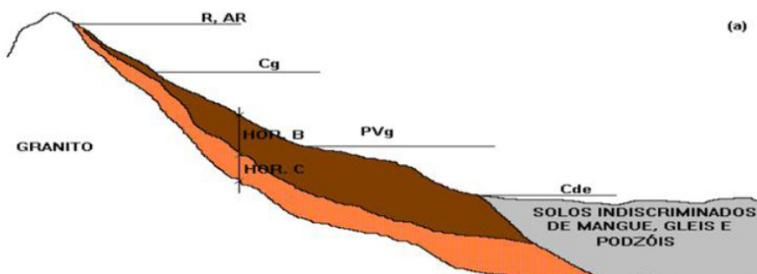


Figura 20. Mapa das unidades geológicas da microbacia do Ribeirão das Pedras.

Ladwig (1998) complementa que os granitos encontrados na região de estudo vão do grosseiro, ricos em minerais máficos (escuros) à róseas isotrópas, equigranulares, pobres em minerais máficos. Quanto a mineralogia, constituem-se de feldspato róseo microclíneo, plagioclásio, quartzo e biotita que frequentemente alterada para clorita, sendo comuns microvenulações e microfaturas preenchidas por minerais de alteração. Em relação aos diques, confirma-se a ocorrência encaixada nos falhamentos com direção preferencial NE, cuja mineralogia é constituída por plagioclásio e piroxênio, apresentando espessura variável, desde centímetros a vários metros.

3.3. FORMAÇÃO PEDOLÓGICA

Sabe-se que os processos de formação do solo dependem de alguns fatores como clima, relevo, material de origem, organismos e tempo de atuação (DAVISON DIAS, 1995). Esses processos levam a formação de perfis (ou horizontes), que por resultado podem caracterizar uma determinada região por suas toposequências em um mesmo substrato de rocha. O cruzamento das informações pedológicas com a geologia facilita o entendimento e a antecipação do comportamento do talude frente a seu substrato, com maior ou menor desenvolvimento caracterizado por seus horizontes de formação. Apresenta-se na Figura 21 o perfil típico do município de Florianópolis.



Cg: Cambissolo substrato Granito; PVg: Podzólico Vermelho-Amarelo substrato Granito; Cde: Cambissolo substrato depósito de encosta; R.AR: Litólito, Afloramento de Rocha;

Figura 21. Toposequência – Perfil típico do município de Florianópolis. Fonte: Adaptado de Santos (1997).

Segundo IPUF (1997), a microbacia do Ribeirão das Pedras possui duas unidades pedológicas bem distintas, Figura 22, classificadas como Podzólico Vermelho-Amarelo Álico (PVa 18) e Areia Quartzosa

Marinha Álica (Amaf), também identificados nos estudos de Santos (1997), Guaresi (2004) e Raimundo (1998).

A primeira caracteriza-se por possuir argilas do grupo das caolinitas no horizonte superficial, mas podendo apresentar minerais expansivos em horizontes mais profundos, em geral não hidromórficos, possuindo perfil do horizonte A ao R, passando pelo B, B/C, C e RA. O horizonte B geralmente apresenta coloração vermelho-amarelada e espessura na ordem de 1 a 3m, sendo o C com cores rosadas e amareladas e espessuras chegando a 25m, com presença de minerais primários, textura grosseira e presença de matacões.

A segunda caracteriza-se por solos hidromórficos, de ocorrência geralmente associada ao relevo plano, com coloração acinzentada homogênea e bem drenada. (SANTOS, 1997).

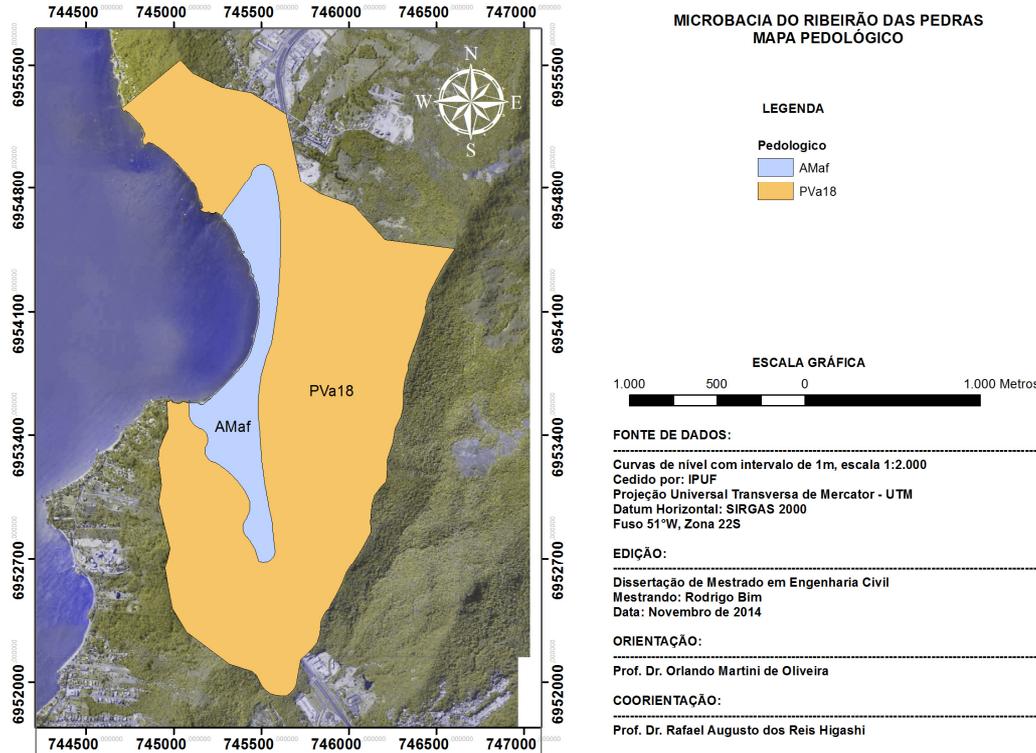


Figura 22. Mapas das unidades pedológicas da microbacia do Ribeirão das Pedras.

IPUF (1997) descreve o geossistema do leste catarinense possuindo declividade acentuada das vertentes, grau de intemperismo e intensidade dos processos morfogenéticos do solo contendo nichos erosivos que não raro evoluem para formas erosivas dos tipos sulcos e ravinas, além da ocorrência ocasional e localizada de movimentos de massa do tipo solifluxão e deslizamentos. É comum a ocorrência de solos litólicos, além dos Podzólicos Vermelho-Amarelos, Vermelho-Amarelo-Latossólico e Cambissolos, conferindo sobre o local de estudo as seguintes características específicas:

a) Podzólico Vermelho-Amarelo álico (PVa 18):

- Argila de atividade baixa (Tb), ou seja, solo que apresenta capacidade de troca de cátion após correção para carbono inferior a 24meq/100g de argila;
- Textura média (menos 35% de argila e mais 15% areia) e média/argilosa (teores de argila entre 35 e 60%);
- Cascalhento (15 a 50% cascalho);
- Relevo forte ondulado e montanhoso;
- Saturação com alumínio igual a 50% ou superior;

b) Areia quartzosa marinha álica (Amaf):

- Relevo plano;
- Solos hidromórficos, profundos, arenosos, excessivamente drenados;
- Derivados de sedimentos não consolidados de origem marinha;
- Coloração cinza clara e bruno amarelado;

Higashi et al. (2010), descreve a ocorrência do Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito presente em ambientes costeiros do estado de Santa Catarina como sendo de camadas de horizonte C chegando a 30m de profundidade, composto de materiais mais arenosos, nível de água profundo e horizonte B pouco espesso, geralmente não ultrapassando 1m de espessura.

Nos estudos de Santos (1997), além das duas unidades citadas pelo IPUF (1997), é identificada na área de estudo a unidade Cde – Cambissolo Depósito de Encosta, com ocorrência em relevo suave ondulado (8 a 20% de declividade), região de transição entre morro e planície, não hidromórfico, com horizonte A seguido de B incipiente,

com textura variável podendo ocorrer matacões na massa de solo. A Areia Marinha é representada pela sigla AQsq e o Podzólico pela sigla PVg, conforme Figura 23.

Ladwig (1998) complementa que os cambissolos representam a categoria de solos com horizonte sub-superficial em início de desenvolvimento ou em evolução, cujos processos de intemperismo não são muito acentuados, mas suficientes para gerar horizonte B incipiente. A menor intemperização leva a pressupor que os materiais constituintes do material de origem não tenham sido totalmente alterados.

Relacionados a pedologia da área de estudo, Ladwig (1998) cita a presença de Cambissolo Substrato Granito - Cg, Cambissolo Substrato Diabásio e Cambissolo Substrato Depósito de Encosta - Cde, assim como o solo Litólico Substrato Granito e Litólico Substrato Diabásio, com características não hidromórficas, pouco evoluídos e rasos sobre rocha ou, sobre horizonte C pouco espesso, cuja característica marcante é a ausência do horizonte B.

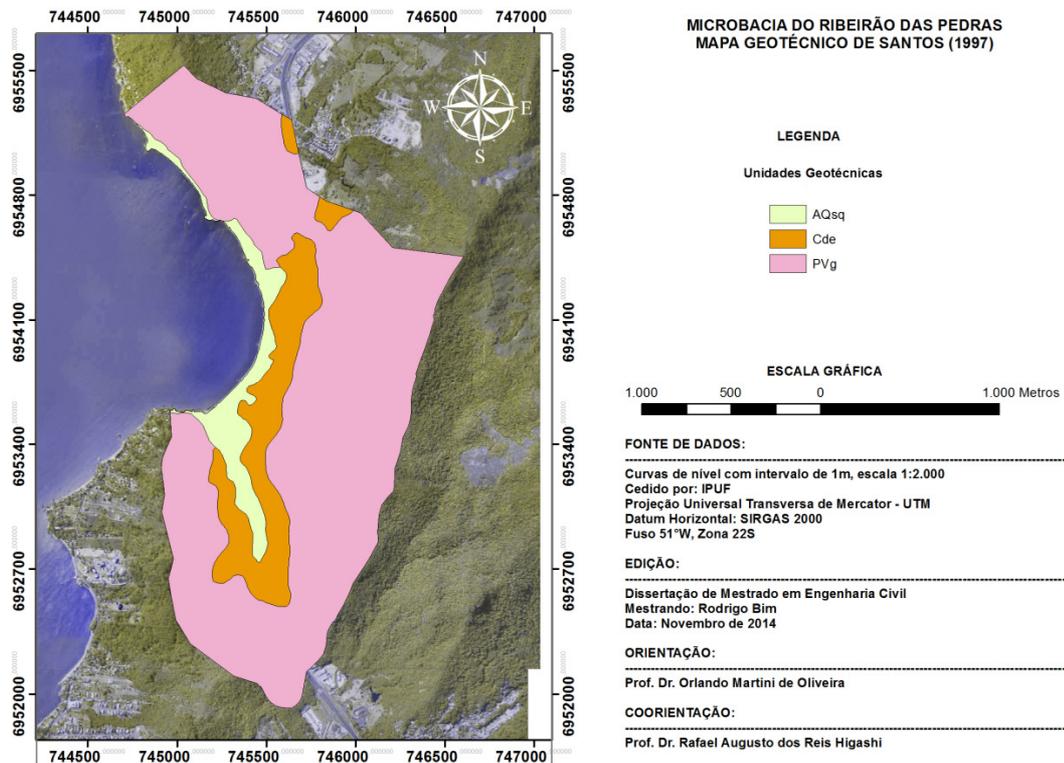


Figura 23. Mapa Geotécnico produzido pelos estudos de Santos (1997). Fonte: Adaptado Santos (1997).

Santos (1997) ainda cita a unidade PVd – Podzólico Vermelho Escuro proveniente dos diques de diabásio com características semelhantes aos podzólicos de granito, com seqüências de horizontes A, B, C, R e RA, porém a textura é bem mais fina e traz conseqüências no comportamento mecânico dos mesmos. Trata-se de uma rocha mais escura, com maior teor de máficos e, conseqüentemente, muito mais intemperizável do que os granitos. Quando encaixados horizontalmente nos granitos, acaba provocando descalçamento de grandes blocos, trazendo conseqüências graves a ocupação urbana.

Devido ao volume relativamente pequeno do PVd, Santos (1997) o associou com a unidade PVg na área de estudo, apresentando apenas a indicação do fraturamento.

Com os avanços dos estudos sobre o escorregamento ocorrido em 2008 na microbacia do Ribeirão das Pedras, Oliveira et al. (2012) confirmou a extensão do dique, inicialmente citado no trabalho de Raimundo (1998) na época de implantação da rodovia, e que na verdade se estende a montante da área de estudo atravessando a rodovia em direção ao morro do Ribeirão das Pedras, conforme Figura 24 e 25.

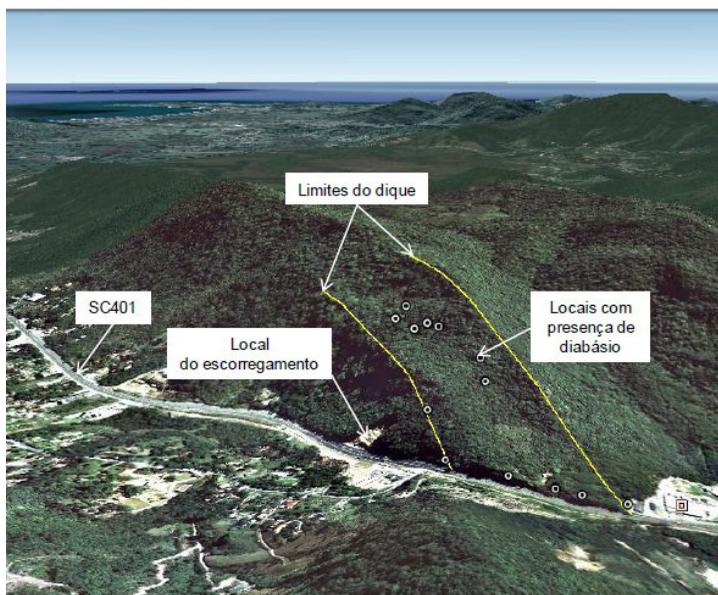


Figura 24. Dique presente na área de estudos. Fonte: Oliveira et al (2012)

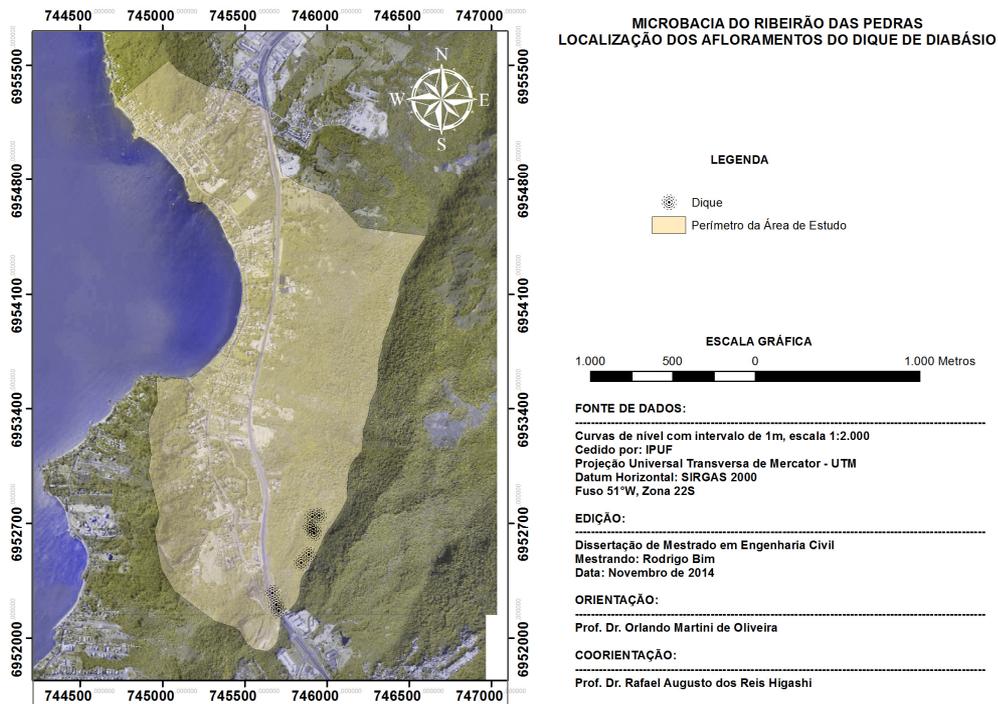


Figura 25. Localização dos afloramentos de dique de diabásio na microbacia do Ribeirão das Pedras.

Nos estudos de Santos (1997), foi possível identificar e mapear alguns diques de diabásio e riolito presentes em Florianópolis, assim como a descrição de seu comportamento, merecendo estudos criteriosos em decorrência de alterações e descontinuidades mais significativas, formando solos mais espessos, com possibilidade de desprendimento de matacões, blocos, etc. A presença deste tipo de litologia no município de Florianópolis é considerada de elevado risco, normalmente associado à ocorrência dos escorregamentos.

Em relação aos diques e sua relação com escorregamentos, Oliveira et al. (2012) proferiu importante conclusão sobre o escorregamento ocorrido em 2008 na SC 401 em Florianópolis, destacando a presença do dique como principal deflagrador do escorregamento ocorrido em 2008, no qual favoreceu o direcionamento do fluxo de água, infiltração e conseqüentemente a redução das tensões efetivas no interior das descontinuidades do maciço de granito que, por sua vez, está associado à redução de resistência ao cisalhamento e a deflagração da instabilidade que somados ao corte da rodovia e a alta pluviosidade, promoveu um dos maiores movimentos de massa registrados no município, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 26.

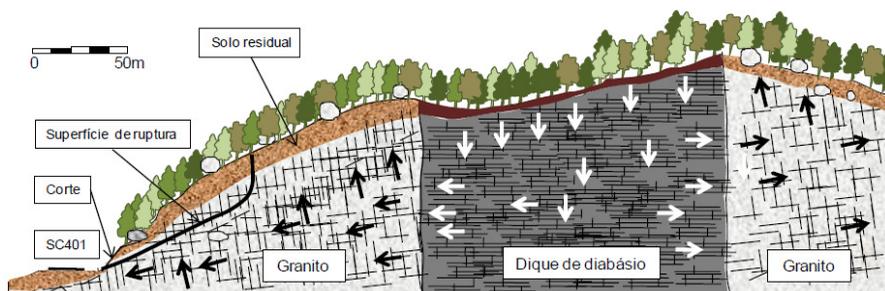


Figura 26. Seção geológica perpendicular a SC 401 no local do escorregamento de 2008 em Cacupé.

Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Vale lembrar que o maior número de registros de escorregamentos no município de Florianópolis está localizado no Maciço do Morro da Cruz, porção insular com relevo acidentado de forma alongada, sentido norte-sul, representando 90,2% do total das ocorrências apuradas no município de Florianópolis no período de 1970

à 2014, no qual além de grande concentração populacional, está em uma área considerada restritiva do ponto de vista geotécnico, com presença de diques encaixados nos granitóides, com direção principal NE-SW e espessuras de até 300 m, favorecendo situações de instabilidade, conforme apontado nos estudos de Rego Neto (1988), Raimundo (1998) e Saito (2004).

Os diques de diabásio são formados pelo resfriamento do magma básico que, tanto no Maciço do Morro da Cruz como em Cacupé, se encaixam nas descontinuidades do granito, formando paredes verticais a subverticais. O resfriamento deste magma próximo da superfície faz com que o mesmo apresente um fraturamento pouco espaçado e preferencialmente horizontal, ou seja, perpendicular a sua maior dimensão. Os minerais ferromagnesianos do diabásio e o seu fraturamento pouco espaçado faz com que o mesmo, em relação ao maciço de granito, se intemperize mais rapidamente formando assim um vale alinhado e encaixado no maciço de granito, conforme demonstrado na Figura 26.

Assim como o Maciço do Morro da Cruz, o dique que cruza a SC 401 em Cacupé é bem espesso, na ordem de 170 metros, facilmente identificado, principalmente se observado a Figura 27, cujo alinhamento entre o dique do Maciço do Morro da Cruz (ponto A) e o que cruza a SC 401 (ponto B) são coincidentes, culminando no alto do Morro do Ribeirão das Pedras.

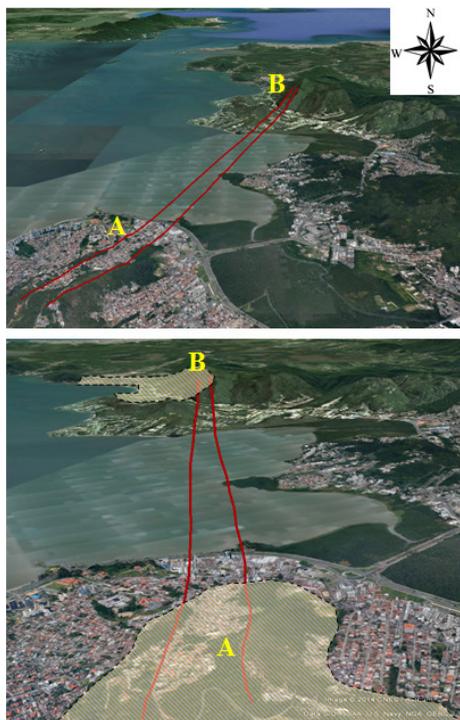


Figura 27. Alinhamento entre o diques do Maciço do Morro da Cruz (ponto A) e o dique da SC 401 (ponto B) .

Além dos diques, alguns autores consultados (HIGASHI et al., 2010, RAIMUNDO, 1998, SANTOS, 1997) apontam condições geotécnicas restritivas ao uso e ocupação dos solos Podzólicos, atribuindo-lhes perda da estrutura com a inundação, elevado grau de erodibilidade, ou ainda planos e falhas remanescentes da rocha. O horizonte C predominantemente espesso e residual acaba por apresentar minerais primários e planos de fraqueza herdadas da rocha mãe, considerado por Davison Dias (1995) como sendo um horizonte complexo, pois o grau de desenvolvimento é heterogêneo.

Tendo como base este indicativo, leva-se a crer que o horizonte C é responsável por governar as instabilidades na microbacia do Ribeirão das Pedras, no qual serão tratados como foco principal do estudo para produção dos parâmetros necessários para o cálculo da estabilidade.

4. MÉTODO

A metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo foi dividida em 5 etapas, associando o conhecimento das estimativas de unidades geotécnicas, metodologia Davison Dias (1995), correlações entre chuvas e escorregamentos, ensaios de laboratório e campo, monitoramento pluviométrico e aplicação de modelo de estabilidade incorporado ao modelo hidrológico para a predição de escorregamentos. Como resultado final será elaborado o mapa de susceptibilidade em função da previsibilidade de chuvas.

A Figura 28 demonstra a distribuição e sequência das atividades de cada etapa que serão mais bem detalhadas neste capítulo.

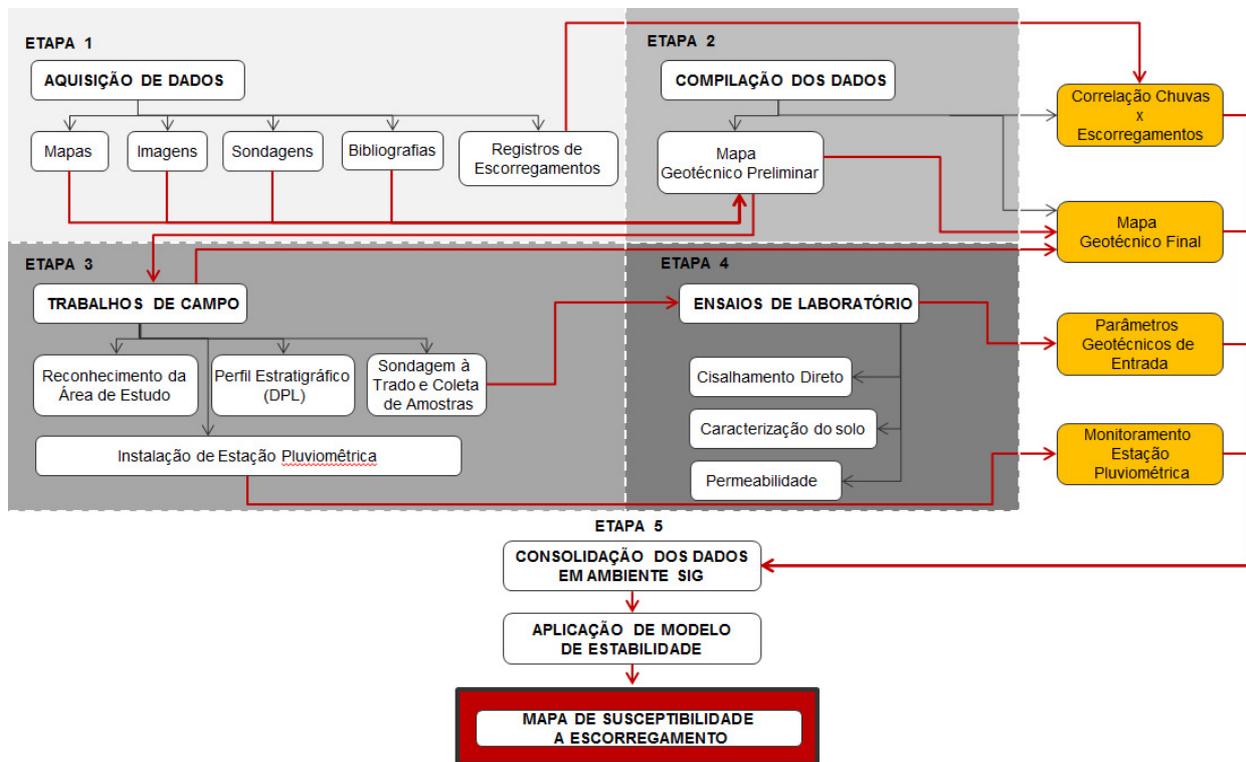


Figura 28. Etapas de desenvolvimento do estudo.

4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS

Buscando-se um entendimento do que, como, onde, e quando podem ocorrer futuros movimentos de massa, um levantamento de dados torna-se essencial.

Para a aplicação da primeira etapa desta metodologia, reuniram-se inicialmente as informações básicas para a formação do mapa geotécnico da área de estudo, regime pluviométrico, bem como o registro histórico das ocorrências dos escorregamentos. Abaixo segue a sequência discriminada em cada tópico.

4.1.1. Informações Geotécnicas

A base de dados para os parâmetros geotécnicos contemplam um conjunto de informações de ordem geológica, pedológica, sondagem, levantamento cadastral, imagens de satélite e restituição topográfica, preferencialmente em formato vetorial, composto por pontos, linhas e polígonos, assim como na forma matricial, constituído por células uniformes (pixels).

As informações de Pedologia e Geologia utilizados fazem parte dos Estudos Ambientais da Grande Florianópolis, realizada no ano de 1997 pela parceria entre o Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis – IPUF e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, assim como nos estudos de Santos (1997), com informações na escala de 1: 100.000.

Os levantamentos cadastrais, imagens de satélite e restituição topográfica foram reunidos do Projeto de Modernização da Gestão Territorial e Geoprocessamento Corporativo, através da restituição digital planialtimétrica em escala 1:2.000 realizada em novembro de 2009, conforme folhas DS-08 (SG-22-Z-D-V-2-NE-B-IV-6) e DS-04 (SG-22-Z-D-V-2-NE-B-IV-3), baseados na cobertura aerofotogramétrica escala 1:8.000 (março/2007), apoio horizontal e vertical (maio/2007 a julho/2008) e aerotriangulação (agosto/2008).

4.1.2. Histórico de escorregamentos

Em complementação aos dados do CEPED (2011) e Herrmann (2007), foram consultadas outras fontes de dados, permitindo um melhor embasamento da série histórica dos registros de movimentos de massa no município de Florianópolis. Os dados disponíveis são datados a partir da década de 70, divulgados por Cristo (2002), Raimundo (1998), Saito

(2004), Oliveira et al. (2012), Defesa Civil (2014), S2ID (2014), além de notícias vinculadas a partir de jornais locais. As informações, agora agrupadas, formam um único banco de dados válidos para o município de Florianópolis.

Os registros foram atualizados até junho de 2014. Informações pluviométricas, localização e identificação de cada autor estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Registros de movimento de massa no município de Florianópolis/SC.

Autor	Local	Data	Precipitação	Tipo de Ocorrência		
			No dia do evento (Fonte: Epagri)	Bloco de Rocha	Solo	Bloco de Rocha e Solo
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	03/03/1971	47,2	1		
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	22/07/1973	241,9	2		
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	15/05/1976	109,4	2		
Saito (2004)	MCF*	28/05/1981	133,8		1	
Saito (2004)	MCF*	25/03/1982	109,1		1	
Raimundo (1998)	MCF*	06/01/1983	134,9		1	
Saito (2004)	MCF*	07/01/1983	78,6		1	
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	14/07/1983	8,5		1	
Saito (2004)/ Cristo (2002)/ Raimundo (1998)	MCF*	17/12/1983	144	2	1	
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	06/08/1984	84,5	1	2	1
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	17/06/1985	14,2	1		
Raimundo (1998)	MCF*	09/01/1986	24,5		1	
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	22/01/1986	26,8	1		
Saito (2004)	MCF*	24/01/1986	...	1		

Continua

Continuação

Autor	Local	Data	Precipitação	Tipo de Ocorrência		
			No dia do evento (Fonte: Epagri)	Bloco de Rocha	Solo	Bloco de Rocha e Solo
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	21/09/1986	101			1
Raimundo (1998)	MCF*	09/10/1986	205,6	1		1
Saito (2004)	MCF*	10/10/1986	160,7		1	
Saito (2004)	MCF*	09/11/1986	0		1	
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	13/01/1987	68,9		1	1
Raimundo (1998)	Costeira	15/02/1987				
Raimundo (1998)	Costeira	16/02/1987	143			1
Raimundo (1998)	MCF*	17/06/1987	0	1		
Saito (2004)	MCF*	06/01/1989	94,4		1	
Cristo (2002)	Não Informado	02/02/1989	20,6		1	
Cristo (2002)	Não Informado	04/09/1989	0		1	
Raimundo (1998)	Coqueiros	11/09/1989	91,2	1		
Saito (2004)	MCF*	12/09/1989	89		1	
Cristo (2002)	Não Informado	01/01/1990	21,6		1	
Saito (2004)	MCF*	02/01/1990	27,3		1	
Saito (2004)	MCF*	10/01/1990	20,5		1	
Saito (2004)/ Cristo (2002)	MCF*	11/02/1990	155,1		1	
Saito (2004)/ Raimundo (1998)	MCF*	14/11/1991				
Raimundo (1998)	MCF*	15/11/1991	404,8	3	27	6
Saito (2004)/ Cristo (2002)	MCF*	05/01/1993	8,1		1	
Saito (2004)/ Cristo (2002)	MCF*	05/05/1993	60,3		1	

Continua

Continuação

Autor	Local	Data	Precipitação	Tipo de Ocorrência		
			No dia do evento (Fonte: Epagri)	Bloco de Rocha	Solo	Bloco de Rocha e Solo
Saito (2004)	MCF*	02/07/1993	93,5		1	
Saito (2004)/ Cristo (2002)/ Raimundo (1998)	MCF*	22/02/1994	227,4		2	
Raimundo (1998)	MCF*	05/02/1995	52		2	
Raimundo (1998)	Vários*	24/12/1995	490,4	33	121	9
Saito (2004)/ Cristo (2002)	MCF*	28/12/1995	411,9		1	
Cristo (2002)	Não Informado	29/12/1995	115,2		1	
Raimundo (1998)	Cacupé	06/02/1996	2		1	
Raimundo (1998)	Cacupé	06/03/1996	0,5		1	
Cristo (2002)	Não Informado	26/01/1998	5,6		1	
Cristo (2002)	Não Informado	27/04/1998	6,7		1	
Saito (2004)	MCF*	03/02/2001				
Saito (2004)	MCF*	04/02/2001	378,7		1	
Saito (2004)	MCF*	29/03/2004	93,6			1
Saito (2004)	MCF*	10/04/2004	30		1	
Autor	Não Informado	01/02/2008	229		1	
Autor	Não Informado	22/11/2008	97,4		1	
Oliveira et al. (2012)	Cacupé	23/11/2008	160,1		1	

Continua

Continuação

Autor	Local	Data	Precipitação	Tipo de Ocorrência		
			No dia do evento (Fonte: Epagri)	Bloco de Rocha	Solo	Bloco de Rocha e Solo
Defesa Civil (2014)	MCF*	00/00/2009 **	...*	30	160	
Autor	MCF*	19/05/2010	253		3	
Defesa Civil (2014)	MCF*	00/00/2010 **	...*	14	78	
Autor	Saco Grande	22/01/2011	1,6		1	
Autor	MCF*	10/02/2011	37,5		1	
Autor	MCF*	01/08/2011	27,9		1	
Autor	Lagoa	25/08/2011	17,5		1	
Autor	MCF*	13/12/2011	11,8	1		
Defesa Civil (2014)	MCF*	00/00/2011 **	...*	2	48	
Defesa Civil (2014)	MCF*	00/00/2012 **	...*		14	
Autor	MCF*	09/03/2013	73,8		1	
Autor	Inglese	21/03/2014	18,4	1		
Autor	MCF*	29/06/2014	27,6		1	
SUBTOTAL				98	495	21
TOTAL				614		

MCF*: Maciço Central de Florianópolis, compreendendo as localidades do Morro do Horácio, Morro do Chapecó, Morro do Céu, Morro da Penitenciária, Morro da Pedra Grande, Mont Serrat (Caixa d'Água), Serrinha, Pedra do Paraíso, Caieira do Saco dos Limões, Morro da Mariquinha (Caixa d'Água), Carvoeira, Morro do Mocotó, Morro da Queimada, Penhasco (Prainha), José Mendes, Morro da Chica e Tico-Tico. Além dos morros, têm-se também os Bairros de delimitação, como Agrônômica, Trindade, Saco dos Limões, Pantanal e Carvoeira.

...* : Dados insuficientes.

** : Apresentou apenas o ano das ocorrências.

Vários*: Rocha: 32 MCF, 3 Costeira, 1 Saco Grande, 1 Não informado. Solo: 1 Cacupé, 2 Córrego, 13 Costeira, 2 Estreito, 5 Lagoa, 1 Morro da Caixa, 1 Ratores, 1 Sapé, 1 Saco Grande, 3 Saco Grande II e 3 Não informado. Rocha e Solo: 7 MCF, 1 Saco Grande e 1 Saco Grande II.

Alcançou-se assim a marca de 614 escorregamentos, compreendido entre o período de 1970 a 2014, conforme Figura 29. Apresenta-se ainda a proporção de escorregamentos relacionados a tipologia do movimento, Figura 30, e a intensidade máxima de chuva, Figura 31.

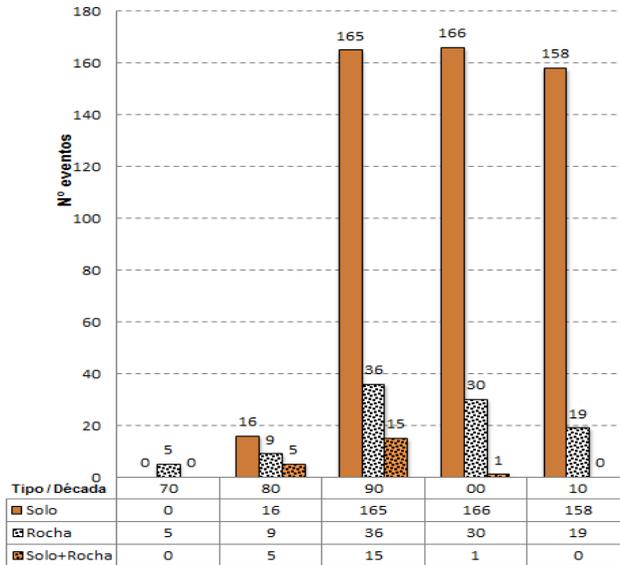


Figura 29. Movimentos de Massa entre Décadas no Município de Florianópolis/SC.

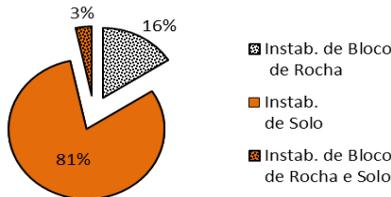


Figura 30. Proporção de escorregamentos relacionados a tipologia do movimento no Município de Florianópolis/SC entre o período de 1970 à 2014.

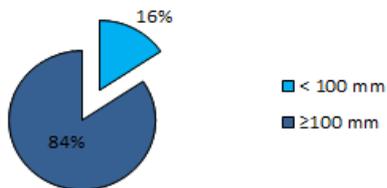


Figura 31. Proporção de escoamentos relacionados a intensidade máxima de chuvas em 24 horas no Município de Florianópolis/SC entre o período de 1970 à 2014.

Tendo em vista a grande discrepância no levantamento do número de registros de movimento de massa no município de Florianópolis em comparação aos registros oficiais, corrobora-se com a opinião de Marcelino et al. (2006), no qual prevê que o número de desastres provocados por instabilidades atmosféricas seja bem maior do que os registrados atualmente, elevando o número de escoamentos até então contabilizados na forma oficial.

4.1.3. Regime Pluviométrico

Em relação ao regime pluviométrico, os dados utilizados correspondem a estações pluviométricas de São José, na latitude 27°35', longitude 48°34' e altitude 1,84m, e Santo Antônio de Lisboa, na latitude 27°25', longitude 49°04' e altitude 58 m disponibilizados pela Empresa de Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI.

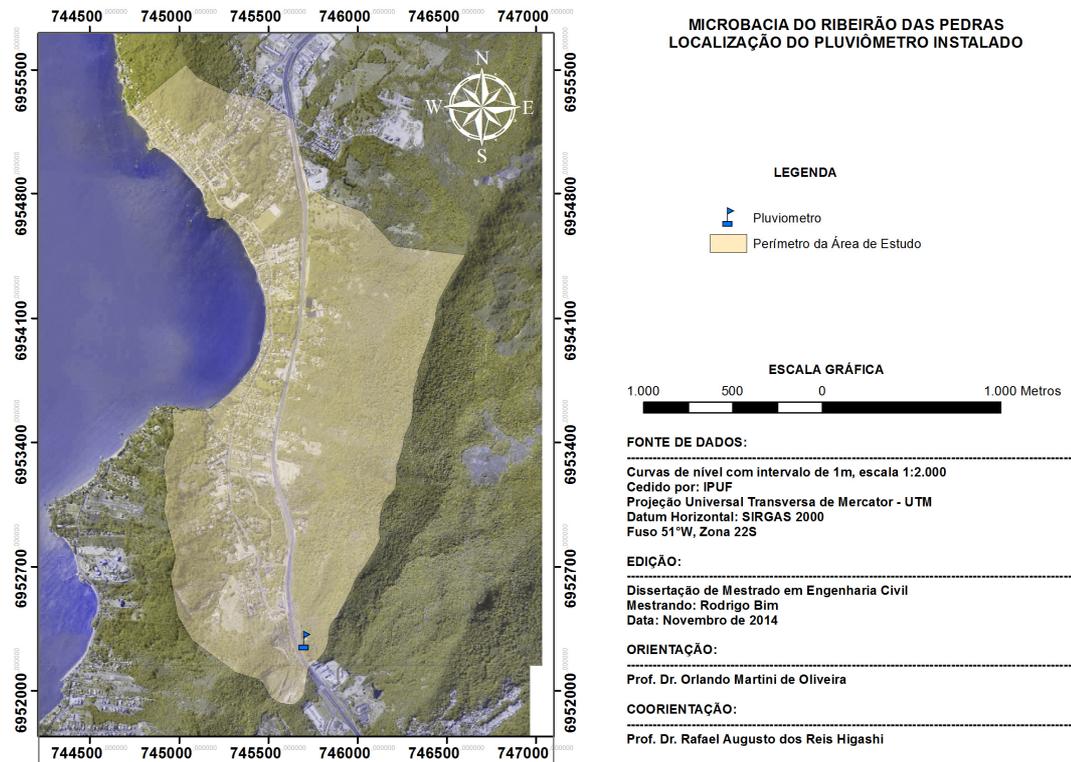


Figura 32. Mapa de localização da Estação Pluviométrica de Santo Antônio de Lisboa instalada na microbacia de estudo.

A estação de Santo Antônio de Lisboa, Figura 32, foi instalada particularmente na microbacia de estudo para atender aos objetivos deste trabalho, com disponibilização dos dados on line, conforme acordo de cooperação firmado com a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e a EPAGRI. Atualmente a estação integra as demais bases de monitoramento existentes em Florianópolis.

Na parte insular da ilha de Santa Catarina, além da estação de Santo Antônio de Lisboa, existem atualmente mais 3 estações pluviométricas ativas de domínio da EPAGRI, nas localidades de Jurerê, Itacorubi e Centro de Florianópolis, respectivamente denominadas de Carijós, Florianópolis e ETE Insular.

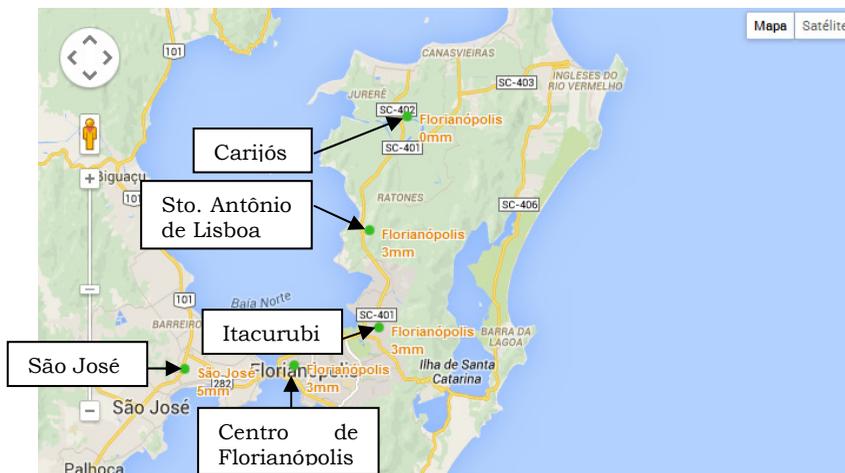


Figura 33. Localização das estações pluviométricas da EPAGRI a partir dos dados de monitoramento on line. Fonte: Adaptado Epagri (2014).

Em complemento a estação pluviométrica instalada na microbacia de estudo, optou-se pelo uso da estação de São José para formação da base de dados de chuva, conforme citado inicialmente, sendo que esta apresenta maior série histórica e continuidade de dados, que estão disponibilizados desde sua instalação no ano de 1911.

A estação de São José é operada pelo INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, cuja divulgação dos dados é de co-responsabilidade da EPAGRI, através de convênio firmado entre ambos.

4.1.4. Tratamento dos Dados

Os dados vetoriais e matriciais para uso na formação do mapa geotécnico devem ser transportados a um plano geográfico georeferenciado, em mesma base cartográfica. Neste caso, se faz necessário o uso de Sistemas de Informações Geográficas – SIG, possibilitando o tratamento dos dados e a criação de novos mapas temáticos a partir das informações preliminares. Segundo Burrough (1986), esse sistema pode ser utilizado no estudo de determinados fenômenos ou em decisões de planejamento, uma vez que considera que os dados armazenados representam um modelo do mundo real.

O tratamento inicial dos dados em ambiente SIG será visto na etapa 2: compilação dos dados, necessários a fabricação do mapa geotécnico, assim como na etapa 5: consolidação dos dados, para produção do mapa de susceptibilidade.

4.2. COMPILAÇÃO DOS DADOS

O processo de compilação ou cruzamento de informações (etapa 2), assim denominado neste estudo, contempla a formação de dois produtos distintos, o mapa geotécnico e as correlações entre chuva e escorregamentos a partir dos dados adquiridos na etapa 1. Os métodos de ambos os produtos serão explicitados nos tópicos a seguir.

4.2.1. Mapa Geotécnico

Conforme citado no capítulo de revisão bibliográfica, o procedimento para o desenvolvimento do mapa geotécnico deve-se aos estudos de Davison Dias (1995), o qual propõe inicialmente a divisão da região do estudo em grandes unidades de acordo com a geologia e pedologia, através de mapas preexistentes.

Atribuindo a pedogênese como ciência orientadora, buscou-se nos mapas preliminares da região de estudo a distinção de solos residuais e sedimentares visando facilitar a identificação do limite de cada unidade geotécnica a ser confirmada nos levantamentos de campo.

Considerando que os solos residuais situam-se nas cotas de maior elevação e com características não hidromórficas (sem presença de lençol freático nos horizontes A e B), foram atribuídos a este os solos Podzólicos existentes na microbacia. Os solos sedimentares, situados nas cotas de menor elevação e com características hidromórficas, foram identificados como Areia Quatzosa. Com base nas fontes de consulta,

foi possível ainda estabelecer outras unidades pedológicas, como o Cambissolo Depósito de Encosta.

Como estimativa inicial do perfil do solo existente na microbacia de estudo, adotou-se a classificação de Higashi et al. (2010), no qual descreve a ocorrência do Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito presente em ambientes costeiros do estado de Santa Catarina como sendo de camadas de horizonte C chegando a 30m de profundidade, composto de materiais mais arenosos, nível de água profundo e horizonte B pouco espesso, geralmente não ultrapassando 1m de espessura.

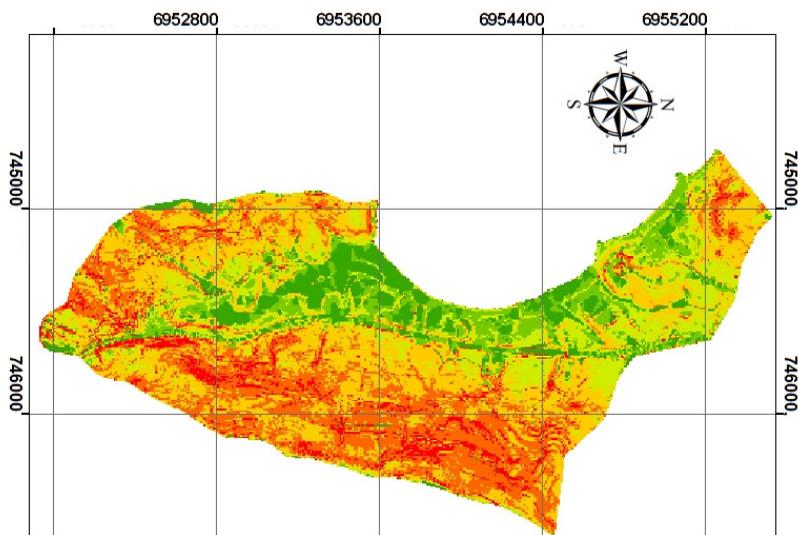
Observam-se condições restritivas voltadas aos solos Podzólicos, incontestavelmente mais susceptível a movimentos de massa do ponto de vista topográfico e pedogenético.

Este fato é confirmado pelos autores Higashi et al. (2010), Raimundo (1998) e Santos (1997), atribuindo ao Podzólico a perda da estrutura com a inundação, elevado grau de erodibilidade, ou ainda planos e falhas remanescentes da rocha. O horizonte C predominantemente espesso e residual deste tipo de solo acaba por apresentar minerais primários e planos de fraqueza herdadas da rocha mãe, considerado por Davison Dias (1995) como sendo um horizonte complexo, pois o grau de desenvolvimento é heterogêneo.

A sequência do método de formação das unidades geotécnicas da microbacia de estudo contempla a sobreposição das cartas geológicas, pedológicas e topográficas em ambiente SIG. O software ArcGIS 9.3®, da ESRI, foi utilizado para integrar as informações e georeferenciar conforme Datum SIRGAS 2000 / UTM zone 22S.

Com essas informações iniciais, o mapa geotécnico é desenvolvido preliminarmente, Figura 35, cuja distinção entre as unidades geotécnicas levou em consideração as características dos horizontes de alteração da rocha, horizontes superficiais, falhas e fissuras entre outros aspectos importantes da estrutura definidos nos mapas geológicos e pedológicos, assim como aspectos da morfologia (relevo suavemente ondulado e fortemente ondulado), que são indicadores das limitações entre unidades, que em um primeiro momento permaneceu com apenas duas unidades geotécnicas criadas, basicamente separando o solo residual (PVg) do solo sedimentar (AQsq).

Seguindo a Classificação da Embrapa (1999), a classe do relevo onde se encontra a microbacia de estudo é, em sua maior parte, formada por relevo forte ondulado.



CLASSES DE RELEVO		DECLIVIDADE (%)
Plano	0 a 3	
Suave ondulado	3 a 8	
Ondulado	8 a 20	
Forte ondulado	20 a 45	
Montanhoso	45 a 75	
Escarpado	Maior que 75	

Figura 34. Classes de relevo e declividade da microbacia do Ribeirão das Pedras.

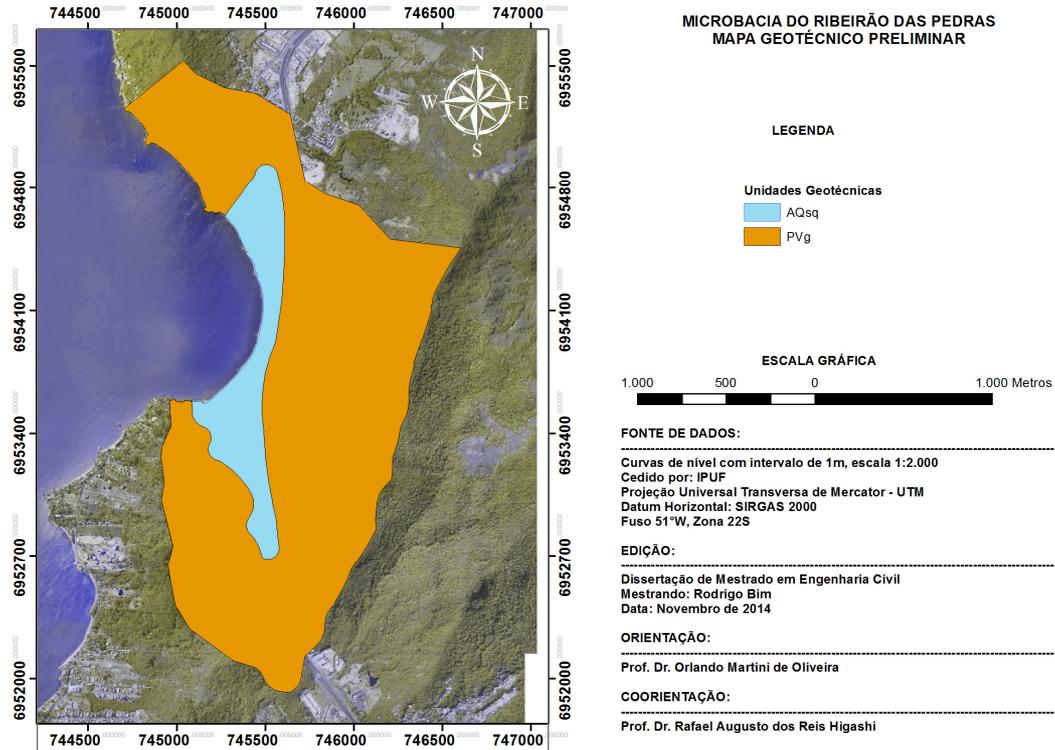


Figura 35. Mapa geotécnico preliminar da microbacia do Ribeirão das Pedras.

Através da topografia com curvas de nível em metro em metro, é possível definir com maior eficácia os vetores limitantes de cada polígono geotécnico, pois seguirão as feições do relevo (land forms), por serem estas indiretamente responsáveis pela pedogênese dos solos encontrados na microbacia do Ribeirão das Pedras, possuindo influências no direcionamento, velocidade e deposição de água, principal componente acelerador das reações que tornam a formar os horizontes de solo.

As estimativas das novas unidades geotécnicas receberam as siglas ABCxyz, convencionadas na metodologia Davison Dias, para representar o solo e sua origem geológica.

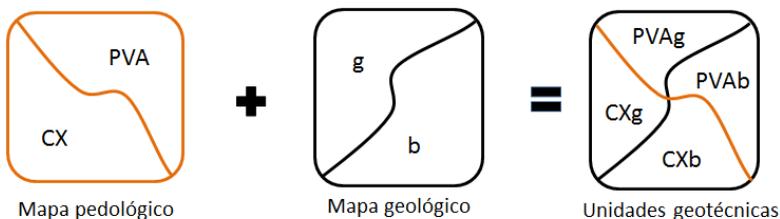


Figura 36. Exemplo de adoção das siglas para formação da nova unidade geotécnica. Fonte: Rosolem (2014).

A partir do mapa geotécnico preliminar pronto, é necessário validar as informações através de intenso trabalho de campo, verificando-se outros parâmetros que permitem distinguir com maior precisão as unidades geotécnicas, como cor do solo, espessura, presença de minerais primários, textura, estrutura e drenagem. Solos hidromórficos foram separados inicialmente por topografia, e depois analisados os graus de desenvolvimento dos horizontes.

Atribuiu-se a metodologia o uso de equipamentos de campo, como trado helicoidal e Penetrômetro Dinâmico Leve – DPL, por serem equipamentos portáteis, de fácil manuseio e obtenção de resultados imediatos a partir de investigações do subsolo, podendo estabelecer toposequências de perfis estratigráficos. Esses equipamentos serão melhor detalhados na etapa 3 – trabalhos de campo.

Visando consolidar os dados do mapa geotécnico preliminar e formar o mapa geotécnico final, foi realizado ainda o levantamento das sondagens SPT existentes no local do estudo.

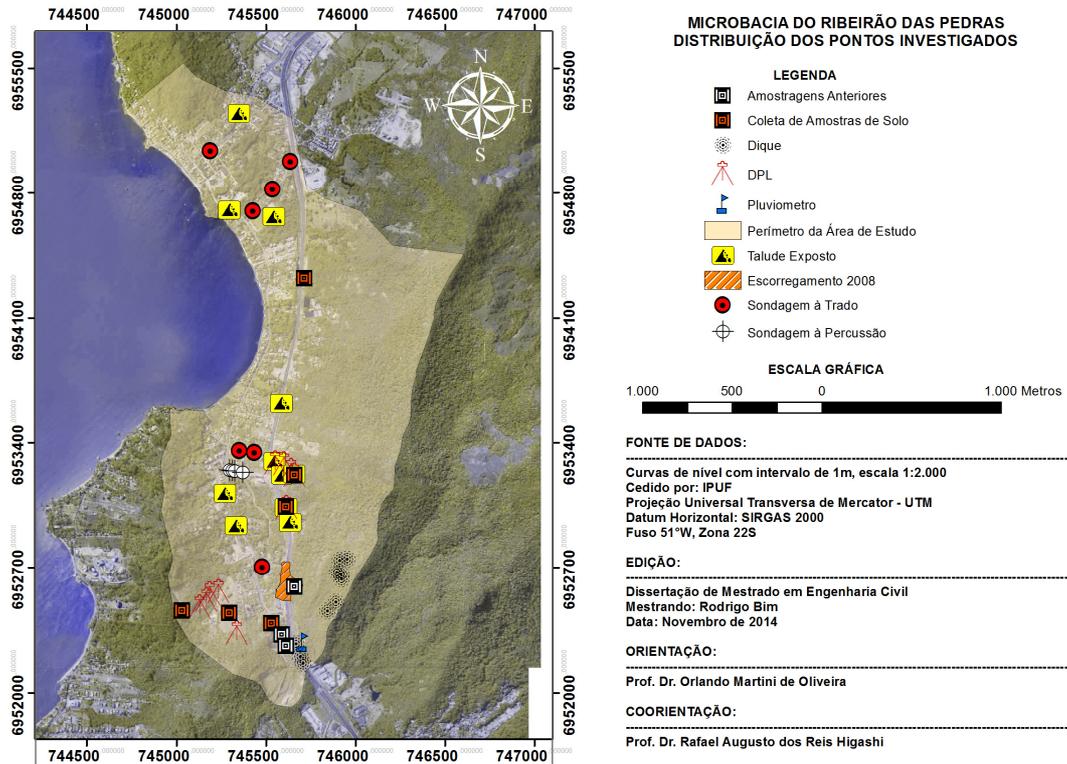


Figura 38. Distribuição dos pontos de investigação e coleta de amostras.

Através das saídas de campo, e principalmente das tradagens, foi possível delimitar com maior exatidão as unidades geotécnicas presentes na microbacia. A Figura 38 demonstra a distribuição dos pontos de investigação. Destaca-se que os pontos concentraram-se em locais com taludes expostos, de média a grande declividade, assim como nas regiões de transição de unidades geotécnicas indicadas pelo mapa geotécnico preliminar. Um maior número de amostragens só não foi permitida pelo prazo, número de colaboradores, limite de permissões para adentrar as propriedades particulares e questões topográficas e de mata fechada onde necessitavam aberturas de picadas.

Outra metodologia expedita foi agregada aos estudos para definição do mapa geotécnico final. Baseado nos experimentos de Godoy (1997) foi coletada amostras de solo para moldagem de esferas, que submetidas a imersão, indicam maior ou menor grau de comportamento laterítico (presença de uma cimentação natural causada pelos óxidos de ferro e alumínio), orientando de forma satisfatória a demarcação da transição nos perfis de sondagem entre solos residuais e sedimentares, conforme demonstrado na Figura 39.



Figura 39. Moldagem de esferas submetidas à imersão para determinação da transição entre solos residuais e sedimentares da microbacia de estudo.

Segundo Godoy (1997) apud Higashi (2006), quanto maior o grau de comportamento laterítico, menor a reação com a água. No contrário, quando a esfera de solo reage imediatamente ao ser imersa, perde totalmente a coesão. Isto acontece em solos arenosos, de menor grau de comportamento laterítico. Esse último comportamento foi visualizado nas amostras de solos coletados na região de estudo, sendo que as esferas submetidas à imersão apontadas como sendo de origem residual tiveram sua desagregação imediata. Aquelas apontadas como sedimentares não desagregaram, permanecendo intactas e com excessiva turbidez.

Após as coletas de campo, todos os dados foram analisados e confrontados com o banco de dados da microbacia do Ribeirão das Pedras, o que permitiu os ajustes finais para uma melhor caracterização e precisão das unidades geotécnicas anteriormente levantadas na etapa preliminar.

As principais inconsistências foram relacionadas ao cruzamento de polígonos das unidades geotécnicas, assim como a sua adequação as curvas de nível em maior escala e as confirmações das campanhas e amostragens de campo, conforme exemplificado na Figura 40 e 41.

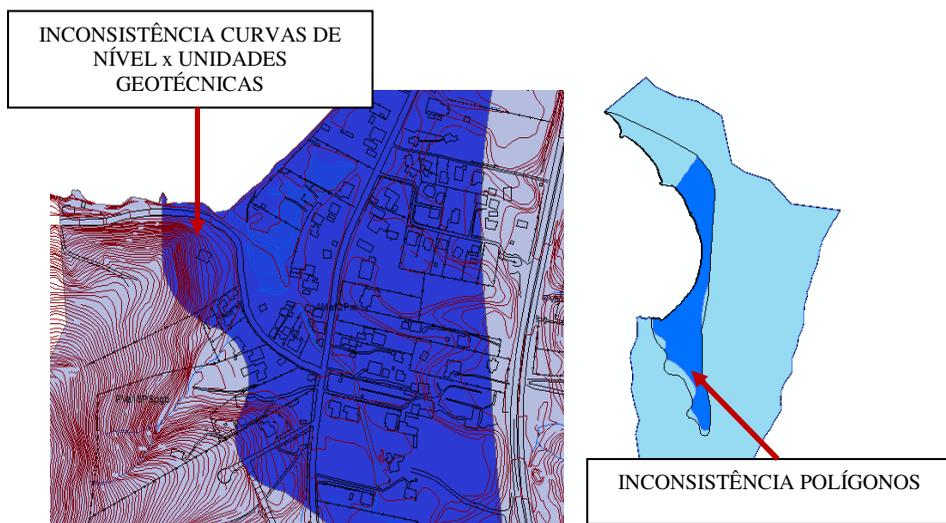


Figura 40. Ajustes finais do Mapa Geotécnico: Polígonos e curvas de nível.

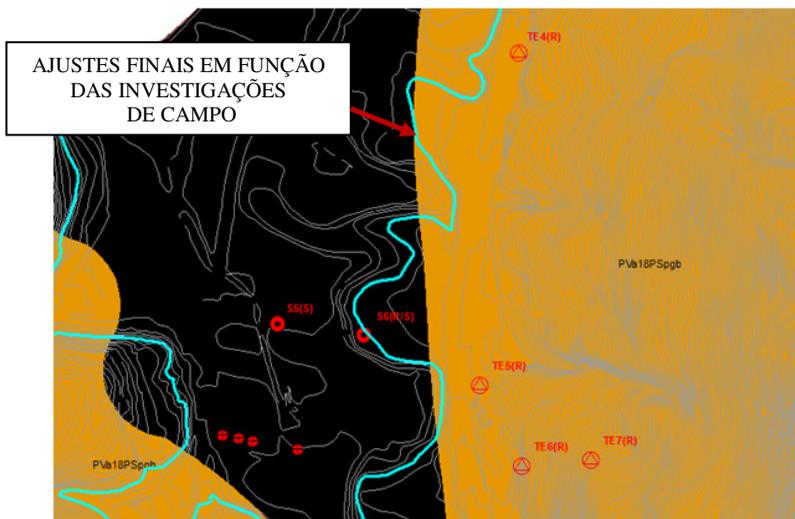


Figura 41. Ajustes finais do Mapa Geotécnico: Investigações de campo.

O mapa geotécnico final será apresentado no capítulo 5 – Resultados.

4.2.2. Correlações Entre Chuvas e Escorregamentos

Buscando-se a determinação de níveis pluviométricos máximos e mínimos necessários para a ocorrência de escorregamentos, também chamados de limiares pluviométricos, utilizou-se correlações a partir de dados da série histórica e/ou estatísticos.

Conforme D’Orsi (2011), os limiares são representados por linhas traçadas imediatamente abaixo da “nuvem” de pontos, representando as condições pluviométricas registradas em cada ocorrência de escorregamentos.

Os limiares foram estabelecidos através do uso de dois métodos distintos, baseados nos estudos de Guidicini e Iwasa (1976) e Tatizana et al. (1987), explanados no capítulo de revisão bibliográfica, adaptados as condições do presente estudo.

Conforme Guzzetti et al. (2007) apud D’Orsi (2011), a adoção dos dois métodos citados acima podem se justificar pela variabilidade das condições pluviométricas, diferenças geológicas, fisiográficas e geomorfológicas da área e, principalmente, pela falta de dados no que se

refere à pluviometria e a caracterização dos escorregamentos no qual os estudos estão sujeitos.

Ainda, o caráter singular de cada autor em relação ao período, intensidade e taxa de recarga derivada da pluviometria, acaba por possuir influência direta nos níveis de água subterrâneos e teor de umidade dos solos, que por sua vez são indicadores da probabilidade de ocorrência dos escorregamentos, reforçando a análise conjunta, sendo estas as principais diferenças entre os métodos adotados.

Tomando-se como base os registros de eventos pluviométricos e as ocorrências de escorregamentos coletados na etapa I – Aquisição de Dados, a definição da correlação na etapa de compilação dos dados seguiu os seguintes critérios:

- a) Utilização de eventos pluviométricos maiores ou iguais a 100 mm ocorridos em 24 horas, sendo que estes representam 84% das ocorrências de escorregamentos no município de Florianópolis, confirmados na etapa de levantamento de dados;
- b) Associação da série histórica de escorregamentos com o critério adotado de pluviosidade (eventos maiores ou iguais a 100 mm ocorridos em 24 horas). Escorregamentos ocorridos em um mesmo dia e sem informação exata da hora do evento foram agrupados em um único evento, adotando o pico horário de chuva das estações pluviométricas de base;
- c) Associação de episódios sem escorregamentos com o critério adotado de pluviosidade (eventos maiores ou iguais a 100 mm ocorridos em 24 horas). Utilizou-se estação pluviométrica complementar à instalada na microbacia para gerar dados mais completos. Desconsiderou-se possíveis efeitos orográficos;
- d) Avaliação do comportamento das chuvas antecessoras: Horária, 1, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 120 e 180 dias a partir da plotagem do gráfico de intensidade horária x acumulado dos eventos com ou sem registros de escorregamentos;
- e) Adaptação do método de Tatizana et al. (1987): Construção de linhas de tendência (limiares) de forma a tangenciar os eventos com registros de escorregamentos e estabelecer a equação da curva. A construção da curva seguiu os critérios de D’Orsi (2011) com plotagem dos eventos, traço manual da linha de divisão e inserção de pontos sobre a mesma para gerar a equação em software (Microsoft Excel);

- f) Adaptação do método de Guidicini e Iwasa (1976) pautado nas análises probabilísticas das repetições dos eventos, considerando principalmente a periodicidade das chuvas e a intensidade pluviométrica antes e durante o evento, com comportamento das chuvas antecessoras, iniciadas no mês de menor volume (julho) até a data do evento: Analisados os acumulados de 1, 3, 7, 15, 30, 60, 90, 120 e 180 dias, com indicação da faixa de periculosidade A, B, C e D a partir do Coeficiente Final – Cf.

Com os passos citados acima, obtém-se as correlações necessárias para cada método através de seus limiares para inserção no cálculo da estabilidade, previsto na etapa 5.

Os gráficos utilizados para análise qualitativa das correlações a partir da contraposição da chuva de 24 horas com os acumulados citados anteriormente, serão apresentadas no capítulo 5 – Resultados. As Figuras 42 e 43 representam o modelo gerado a partir das informações preliminares.

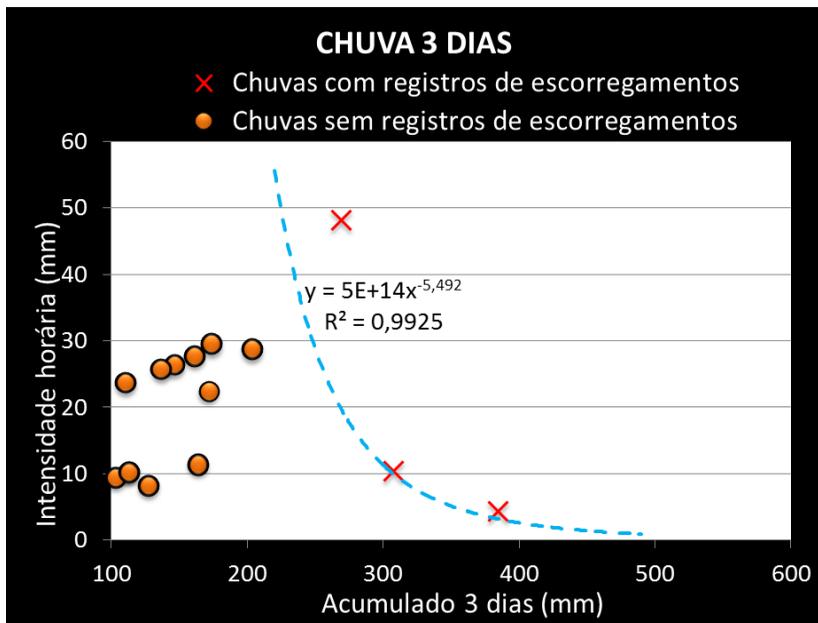


Figura 42. Modelo de limiar pluviométrico gerado a partir do acumulado de 3 dias de chuva – Adaptado do modelo de Tatizana et al. (1987).

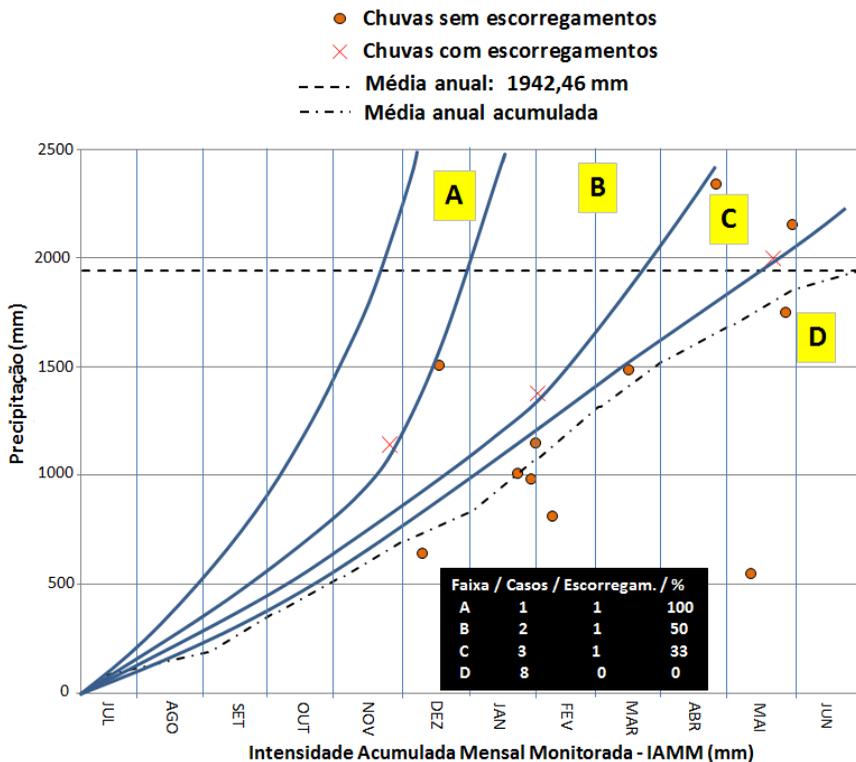


Figura 43. Modelo de limiar pluviométrico a partir das faixas de probabilidade A,B,C e D – Adaptado do modelo de Guidicini e Iwasa (1976).

Da mesma forma que o modelo de Tatizana et al. (1987), os limiares produzidos a partir das linhas de divisão das faixas de probabilidade produzidas pelo modelo de Guidicini e Iwasa (1976), Figura 43, foram transformadas em equações, mantendo-se a regressão linear em 99% da variável dependente, ou seja, coeficiente de determinação ou $R^2 = 0,99$. Este procedimento foi adotado para estabelecer os limites algébricos nas três principais linhas de transição: DC, CB e BA, denominadas respectivamente de linhas C, B e A, conforme Figura 44.

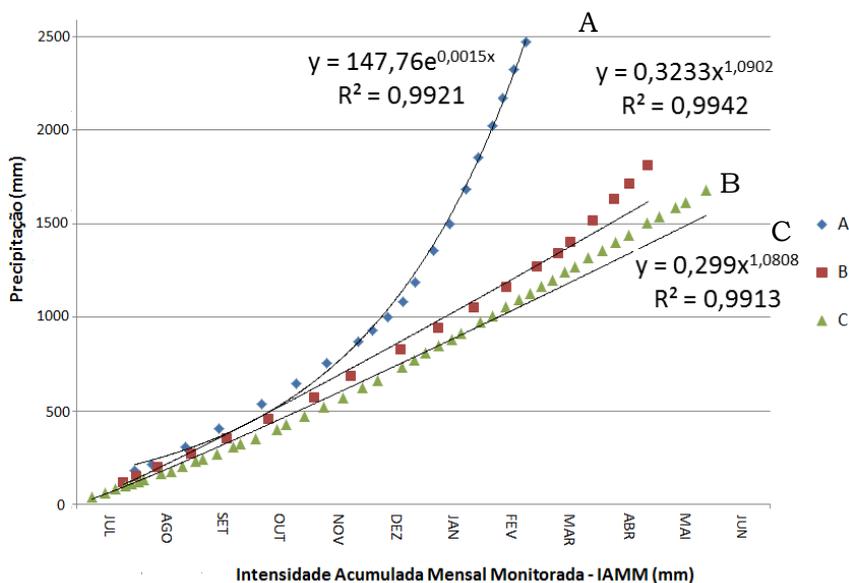


Figura 44. Equações geradas a partir das faixas de probabilidade A, B e C.

É importante salientar que para a compilação dos dados produzidos pela adaptação do método de Tatizana et al. (1987) é utilizada a intensidade horária de chuvas disponíveis na série histórica a partir do mês de maio de 2001 até julho de 2014. Este fato se deve pela limitação de dados disponíveis com essa precisão nas estações pluviométricas consultadas. Será utilizado no presente estudo os limiares de chuvas acumuladas de 3 dias, sendo que este foi o que apresentou melhores resultados.

Para o método de Guidicini e Iwasa (1976), por utilizar intensidade diária de chuva, possibilitaria uso de uma série histórica maior, porém optou-se por uniformizar os períodos de consulta para ambas as correlações, estabelecidas a partir do mês de maio de 2001 até julho de 2014, devido as condicionantes citadas no parágrafo anterior. Além disso, a falta de informação da hora, dia e mês dos registros de escorregamentos dificultaram o uso de um número maior de eventos, assim como a relevância do dado, pois muitos tratam-se de quedas de muros.

Desta maneira, foram contabilizados apenas dados significativos pertencentes a série histórica entre os anos de 2001 à 2014, totalizando 14 episódios dentro dos limites estabelecidos para chuvas acima de 100 mm em 24 horas.

A utilização das equações geradas pelas correlações será melhor detalhada no tópico de consolidação dos dados.

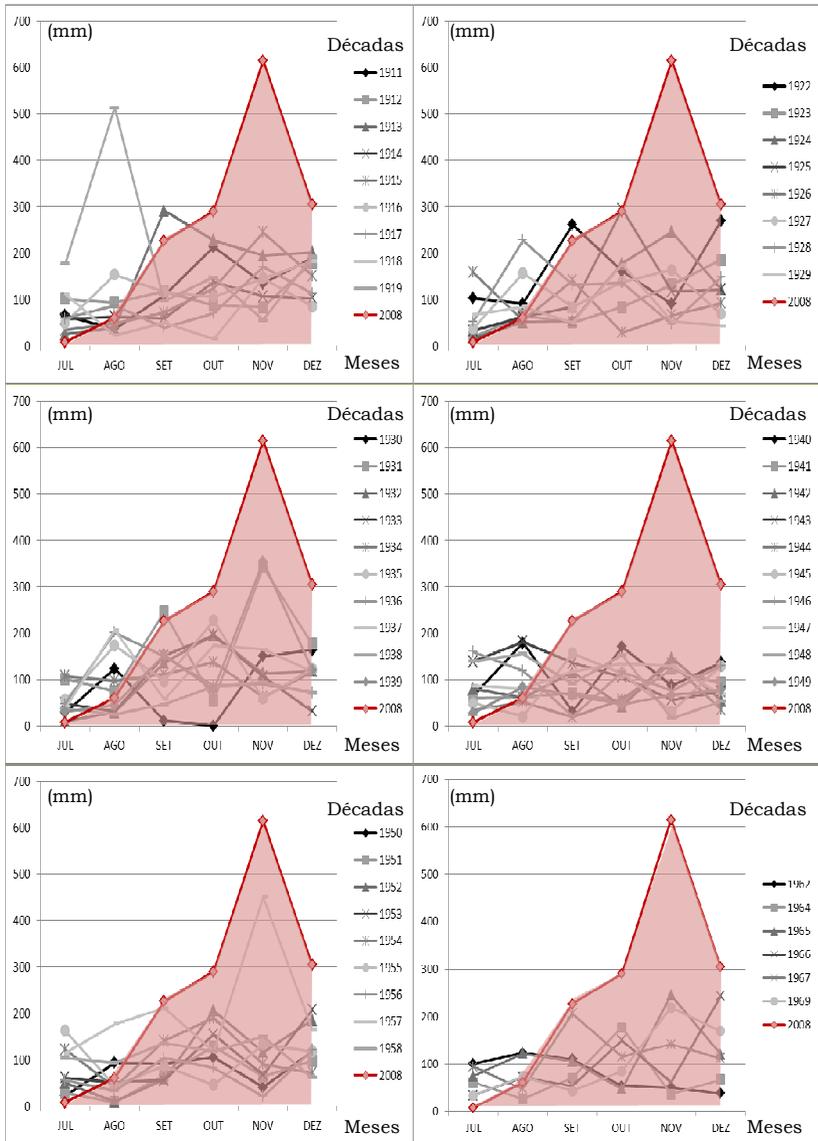
Outro fato importante que merece destaque na análise das correlações é o escorregamento de grandes proporções que ocorreu em novembro de 2008 na micro bacia de estudo, contabilizado no presente estudo, motivado principalmente por chuvas extremas.

Neste sentido, buscou-se obter um parâmetro comparativo deste grande evento com a série histórica, realizando-se um levantamento complementar as correlações, no qual foi possível constatar eventos semelhantes ao ocorrido em 2008.

Levaram-se em consideração os acumulados pluviométricos partindo do mês de menor volume de chuvas até o mês posterior ao escorregamento, obedecendo ao regime sazonal característico da região.

A consulta ocorreu através da estação pluviométrica localizada no município de São José na latitude $27^{\circ}35'$, longitude $48^{\circ}34'$ e altitude 1,84m (mesma estação da análise das correlações), apresentando maior série histórica e continuidade de dados, disponibilizado desde sua instalação no ano de 1911 até o ano de 2014, equidistante 15 km da bacia de estudo.

A Figura 45 apresenta os gráficos comparativos entre as décadas e o acumulado extremo de chuvas ocorrido no ano de 2008. Os anos de 1920, 1921, 1959, 1960, 1961, 1963 e 1968 não foram considerados por apresentarem dados incompletos ou inexistentes.



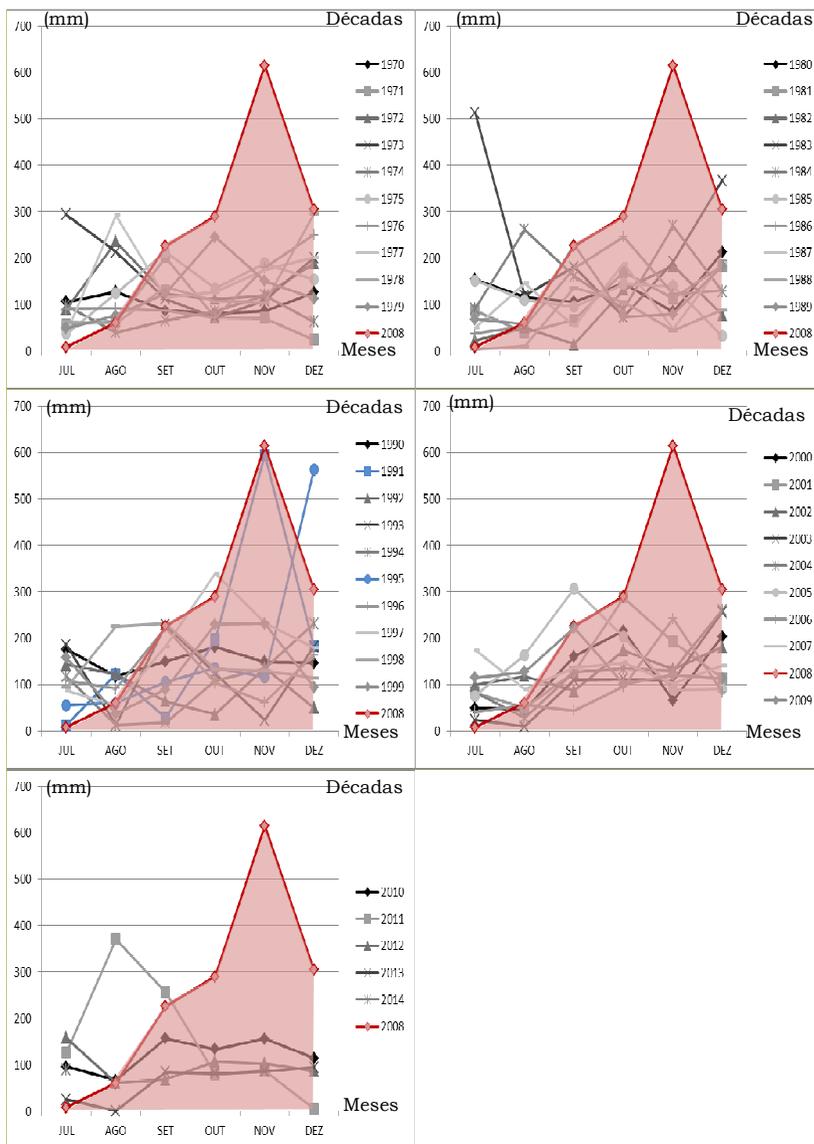


Figura 45. Comparativo de chuvas acumuladas entre décadas com o evento extremo de 2008.

Conforme constatado nos gráficos das chuvas acumuladas entre os meses de julho à dezembro na série histórica dos últimos 103 anos em comparação ao evento de 2008, é possível afirmar que, para este extremo, não houve acumulado de chuva superior no período.

Destacam-se os anos de 1991 e 1995, dentro da década de 90, com evolução dos extremos de chuva e picos próximos ao evento de 2008, porém com recarga inferior a partir do mês de julho.

4.3. TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo objetivam o reconhecimento da micro bacia de estudo, identificando aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos, presença de lençol freático e níveis pluviométricos.

O direcionamento dos trabalhos in situ visam a confirmação dos dados do mapa geotécnico preliminar, coleta de amostras, definição de perfil estratigráfico e instalação de pluviômetro automático, dando sequência às etapas previstas para a formação do mapa de susceptibilidade, sendo detalhados a seguir.

4.3.1. Confirmação de Dados do Mapa Geotécnico Preliminar

Para confirmação dos dados do mapa geotécnico preliminar na etapa dos trabalhos de campo, atribuiu-se inicialmente a observação e demarcação dos pontos dos taludes expostos da rodovia com uso de GPS (Global Positioning System), verificando espessura, cor e textura dos perfis de solo, assim como a identificação de alguns tipos de rochas, permitindo a distinção inicial entre as unidades pedológicas e geológicas, obedecendo as etapas descritas no item 4.2.1.

As expedições de campo com esta finalidade direcionaram os trabalhos inicialmente há locais com as seguintes características:

- Taludes expostos ou antigos escorregamentos: Para determinar o perfil de solo e possíveis coletas;
- Locais com presença de fraturas geológicas: Para determinar a presença de outras litologias mais susceptíveis ao intemperismo ou permeabilidade;
- Nos limites das unidades estabelecidos no mapa geotécnico preliminar: Visando confirmar os dados de transição dos tipos de solo;

Para os locais onde não houve a possibilidade de visualização dos perfis de solo expostos, utilizou-se trado helicoidal e Penetrômetro Dinâmico Leve – DPL, concentrando as investigações de subsolo, necessárias para estabelecer as toposequências a partir da visualização do material, definição de perfis e presença de lençol freático.

O uso do DPL possibilitou ainda à verificação da variação de resistência a penetração do solo, camadas mais susceptíveis a planos de

ruptura, nível de água, assim como a estimativa de possível topo rochoso.

A coleta de amostras de perfis típicos do solo complementar a abordagem visual e os ensaios in situ, possibilitando a caracterização física e a determinação de parâmetros mecânicos previstos na etapa de ensaios de laboratório.

4.3.2. Coleta de Amostras

Para reunir os parâmetros do solo necessários ao estudo, foram procedidas as coletas das amostras deformadas e indeformadas. A amostra deformada refere-se ao solo solto, coletado por pá ou trado, enquanto a amostra indeformada refere-se a uma porção do solo em seu estado natural, coletado por anéis de cisalhamento ou em blocos.

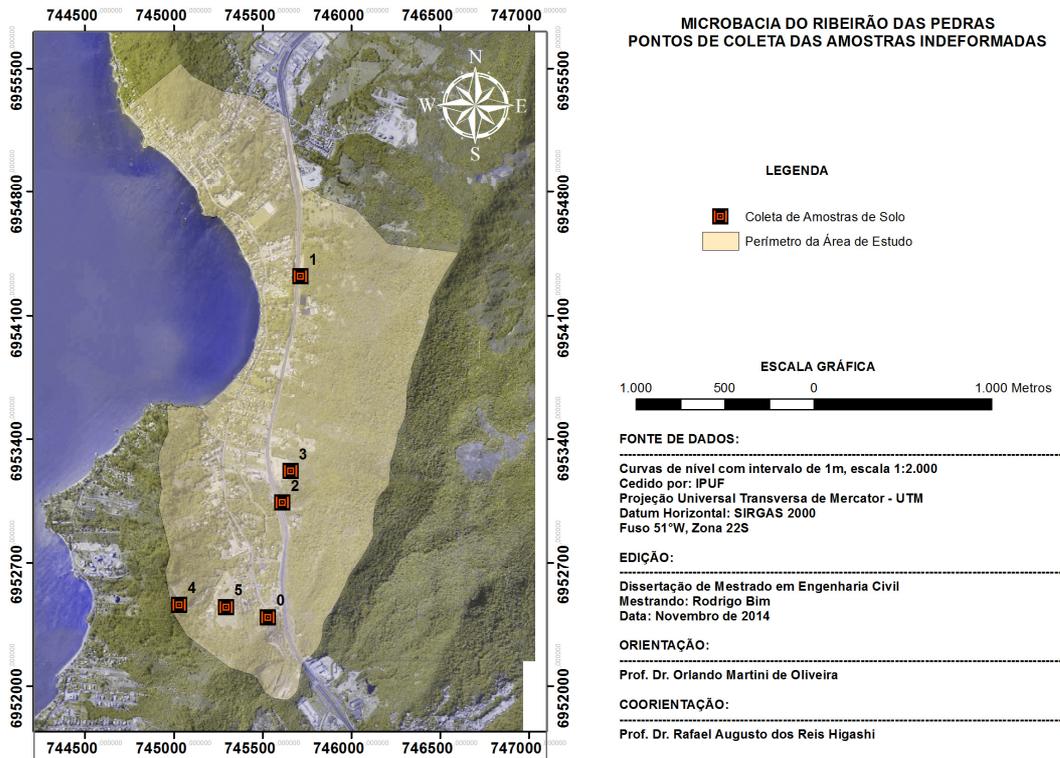


Figura 46. Pontos de coleta de amostras indeformadas.

Ao promover uma melhor representatividade do material coletado indeformado, alguns cuidados são essenciais, como a correta identificação, remoção e transporte da amostra até o laboratório mais próximo, pois a qualidade dos resultados é diretamente proporcional a integridade da amostra em seu estado natural.

O critério adotado para coleta de amostras concentrou-se nas regiões de taludes expostos, em locais com eventuais diferenças de unidades geotécnicas, cotas altimétricas e próximos a antigos escorregamentos.

A partir da identificação principal da cor e textura do solo, foi possível distinguir os horizontes dos taludes, que de forma generalizada, igualou-se com a estimativa inicial, apresentando horizonte C espesso, composto de materiais mais arenosos, nível de água profundo, horizonte B incipiente, não ultrapassando 1 m de espessura e horizonte A na ordem de 20 cm. Confirmado tais características, as coletas concentraram-se no horizonte C, cuja representatividade e características são propícias para o desencadeamento de superfícies de ruptura.

As amostras deformadas foram coletadas e armazenadas em sacos plásticos, preservando-se a umidade natural quando esta foi exigida. As amostras indeformadas, foram obtidas através da remoção de blocos inteiros de solo ou inserção direta do molde metálico de cisalhamento no local da coleta, devidamente envoltos em papel filme e armazenados em caixas de isopor para preservação de sua integridade. A Figura 47 representa o ponto 2 de amostragem, sua forma de coleta e a característica do perfil de solo encontrado na área de estudo, com horizonte A e B pouco espessos e C profundo, facilmente identificável pela coloração e textura.

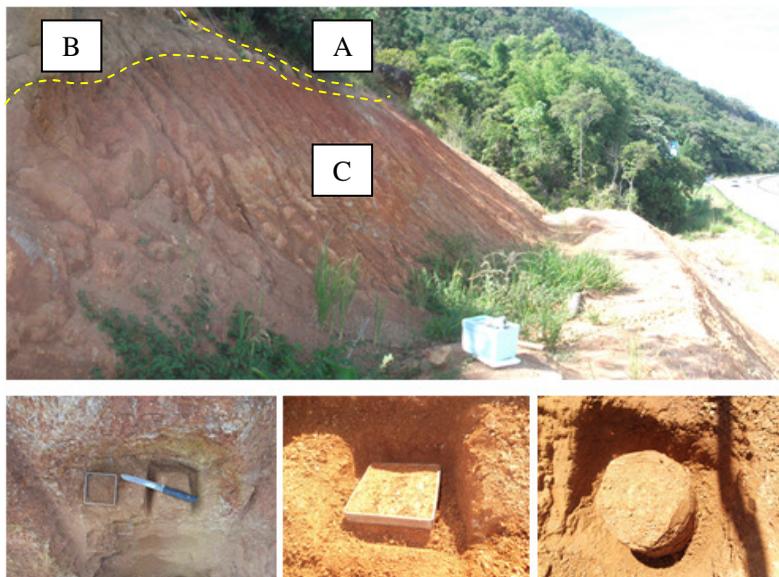


Figura 47. Imagem do local de coleta de amostras – ponto 2.

Conforme os pontos de coleta identificados na Figura 46, foi possível estabelecer um conjunto de parâmetros do solo a partir de ensaios, como Intercepto Coesivo, Ângulo de Atrito Interno, Peso Específico, Permeabilidade, Densidade, Granulometria, Limites de Líquidos e Plasticidade, que serão detalhados na etapa de ensaios de laboratório, assim como no capítulo 5 – Resultados.

Em complementação as amostras coletadas, utilizou-se no presente estudo os resultados de outras amostragens coletadas por Oliveira et al. (2012) e Raimundo (1998) na região do estudo, localizadas na Figura 46.

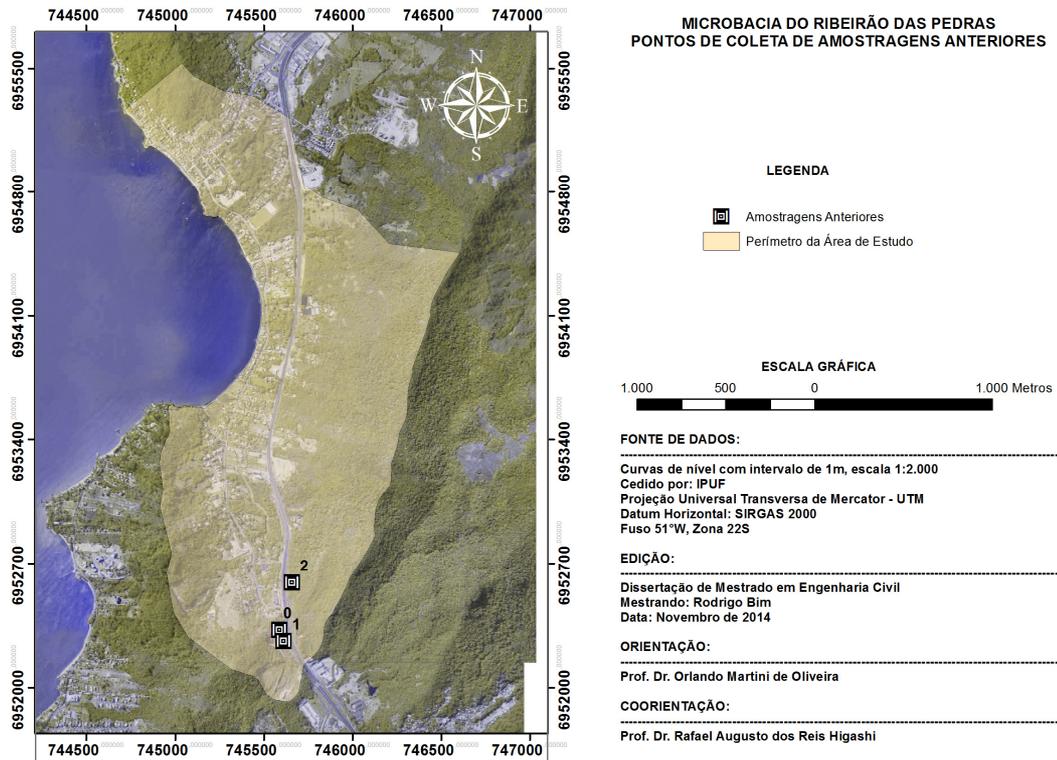


Figura 48. Pontos de coleta de amostragens de estudos anteriores.

4.3.3. Definição de Perfil Estratigráfico - Toposequências

Para acelerar as investigações de subsolo e aquisição de parâmetros preliminares, optou-se pelo uso do Penetrômetro Dinâmico Leve – DPL, equipamento portátil de penetração dinâmica, que opera em taludes de difícil acesso. A Figura 49 demonstra a sua execução no talude do ponto 0 (Figura 52).



Figura 49. Imagem da execução do ensaio do DPL.

O ensaio detecta as camadas estratigráficas, nível de água, resistência de ponta e atrito lateral, podendo ser correlacionados com outros ensaios como o SPT e utilizados na detecção de taludes rompidos (NILSSON, 2004), ou ainda, determinar o grau de compactidade do solo (AZEVEDO, 2009).

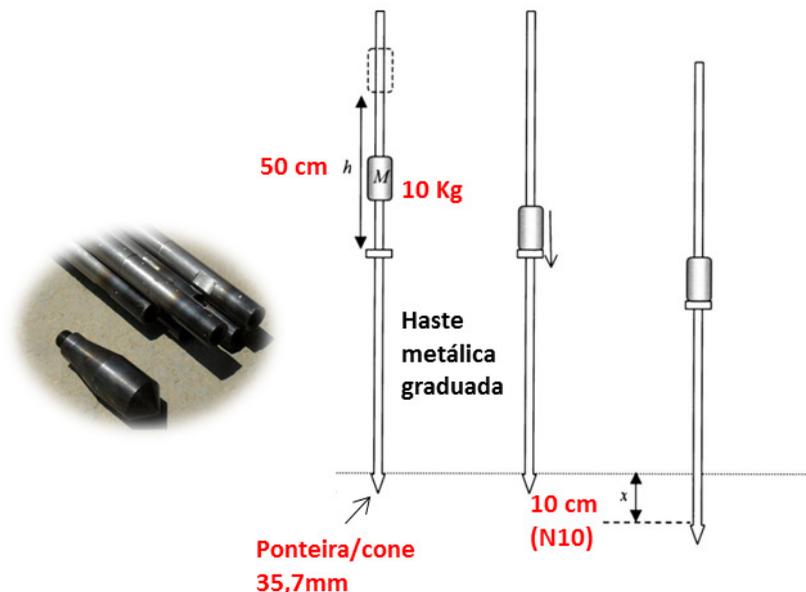


Figura 50. Elementos de composição do DPL. Fonte: Adaptado de Nilsson (2011).

O procedimento consiste na penetração de segmentos de hastes rosqueáveis de 1 metro, introduzido no solo através de golpes de um peso de cravação padronizada de 10 Kg. Com a altura de queda de 50 cm, conta-se a quantidade de golpes necessários para penetração de cada 10 cm (N10), conforme Figura 48, com limite de cravação de 12 metros.

Através de testemunhas de ponteiros e haste, assim como correlações geradas a partir dos boletins, é possível estabelecer a estratigrafia. A padronização do ensaio segue as normas internacionais DIN 4094 e ISSMFE 1989 (AZEVEDO, 2009).

Por ser um equipamento portátil, de fácil manuseio e de rápida execução, atingindo rendimentos na ordem de 50 m por dia, é amplamente recomendado no mapeamento de grandes áreas. A Figura 40 demonstra o perfil penetrométrico extraído no ponto 0 a partir da plotagem do número de golpes x profundidade.

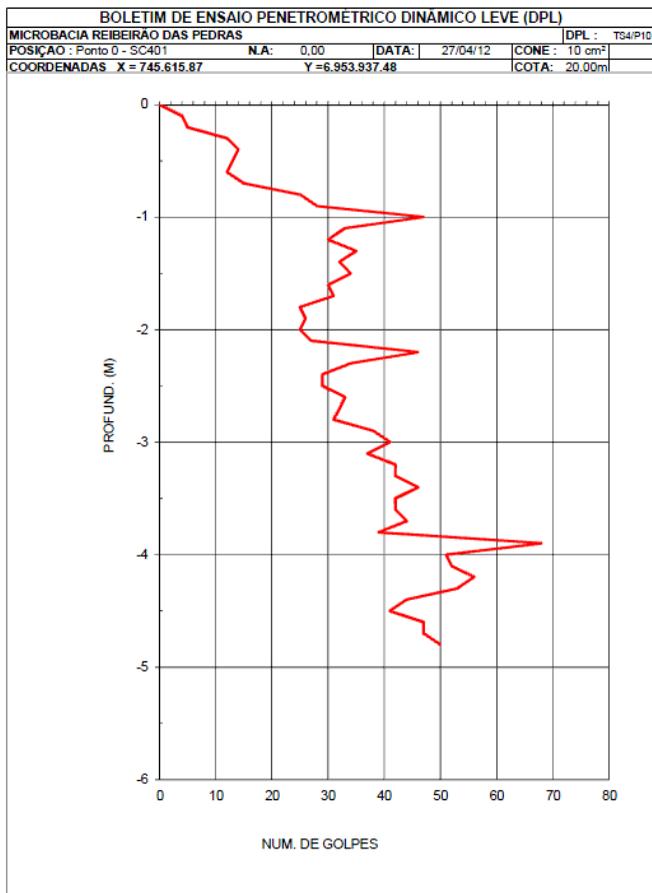


Figura 51. Perfil penetrométrico do talude T1.

O critério adotado para uso do DPL no presente estudo consistiu na aplicação na linha da encosta, desde a parte mais alta até sua base, objetivando o traçado de toposequências, auxiliando no levantamento dos solos e seus horizontes, indicação de nível de lençol freático, topo rochoso e resistência da camada menos favorável.

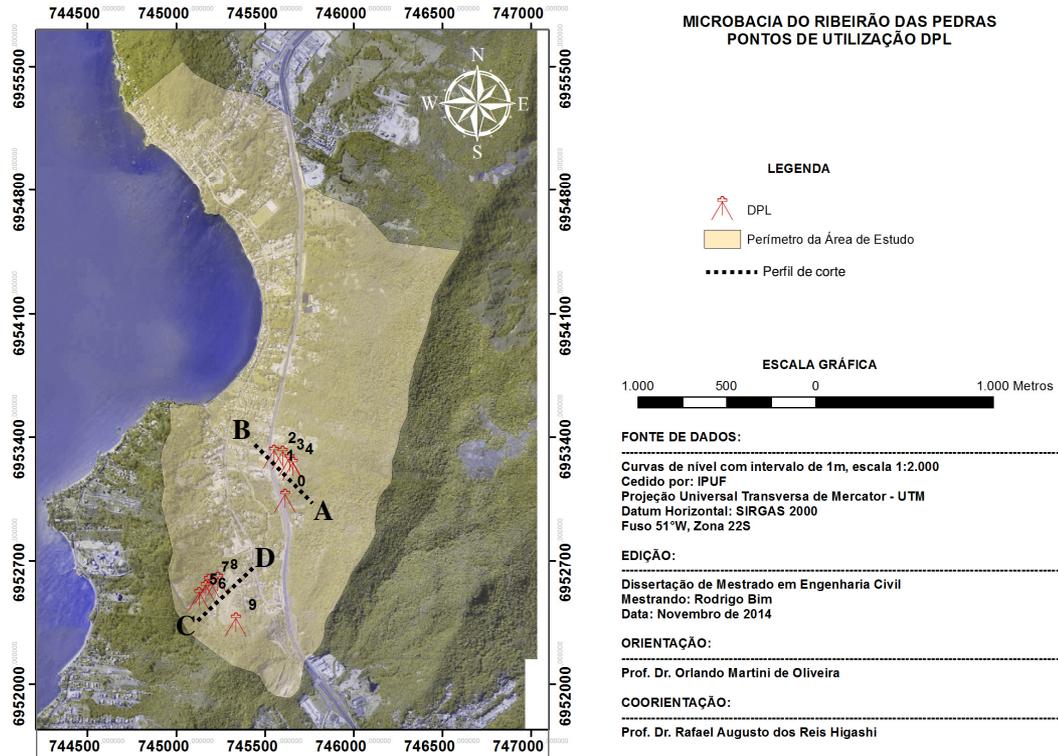


Figura 52. Identificação dos pontos de utilização do DPL.

4.3.4. Instalação de Pluviômetro Automático

Agregado aos trabalhos de campo, a instalação de pluviômetro automático visa estabelecer os níveis de chuva na bacia de estudo. Tal medida pode minimizar possíveis efeitos orográficos, que podem levar a precipitações localizadas, como estabelecer um acompanhamento instantâneo do evento pluviométrico. Com apoio da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI, foi instalado no local do estudo o Pluviologger, equipamento formado pelo conjunto de pluviômetro de balsa, um datalogger, painel solar e bateria e sistema de telemetria via Groupe Special Mobile – GSM, transmitindo dados em intervalos de 10 minutos. (SILVA, 2006)

Abaixo foi detalhada a sequência de montagem orientada pela EPAGRI:

- 1) Infraestrutura: Área deve possuir ausência de cobertura vegetal. Tratando-se de um equipamento de medição de variáveis ambientais automático e autônomo, (baseado em energia solar), o suporte da placa solar deve ser direcionado para o norte, com angulação adequada para o sul do país (aproximadamente 30° de latitude), sendo que a estrutura deve permanecer perpendicular ao solo, afastado 1 metro da cerca necessária para evitar vandalismos, invasão da vegetação rasteira e ataques de animais, conforme imagens da Figura 53:



Figura 53. Imagem da infraestrutura necessária para instalação da estação pluviométrica.

- 2) Calibração: Com auxílio de uma seringa graduada, foi realizada a calibração do equipamento, injetando água sobre a báscula, que a cada 0,2 mm alterna seu posicionamento após ciclo de enchimento e esvaziamento. Através de um sensor, o pulso do ciclo é transmitido para o transmissor (Datalogger).



Figura 54. Imagem do processo de calibração do pluviômetro.

- 3) Montagem: Com a infraestrutura pronta, foi realizada a montagem dos elementos que compo a Pluviologger: báscula, datalogger, painel solar, bateria e sistema de telemetria via GSM. A báscula foi cuidadosamente nivelada e os elementos do conjunto testados, garantindo a transmissão dos dados.



Figura 55. Imagem da montagem final do pluviômetro.

Desde sua instalao na microbacia de estudo em 28 de janeiro de 2013 até a data limite do dia 14 de julho de 2014, no qual foi realizada a amostragem, as chuvas horárias têm sido monitoradas pelo pluviômetro, representando os acumulados mensais nas Figuras 56 e 57.

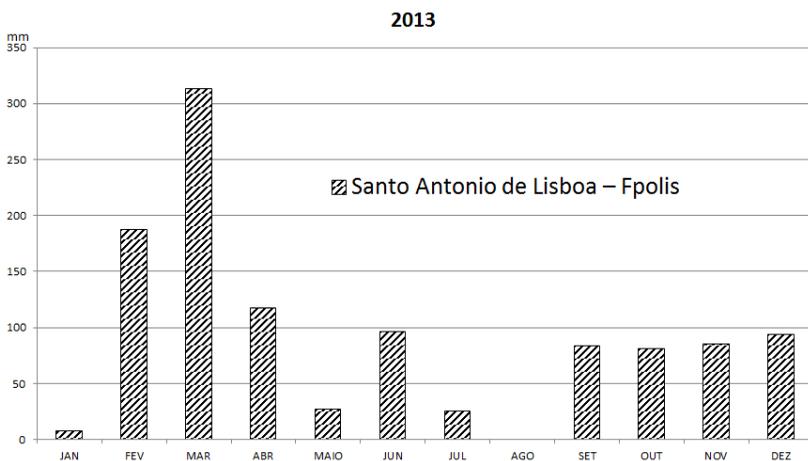


Figura 56. Pluviometria acumulada de chuvas mensais do ano de 2013 – Estação de Santo Antônio de Lisboa.

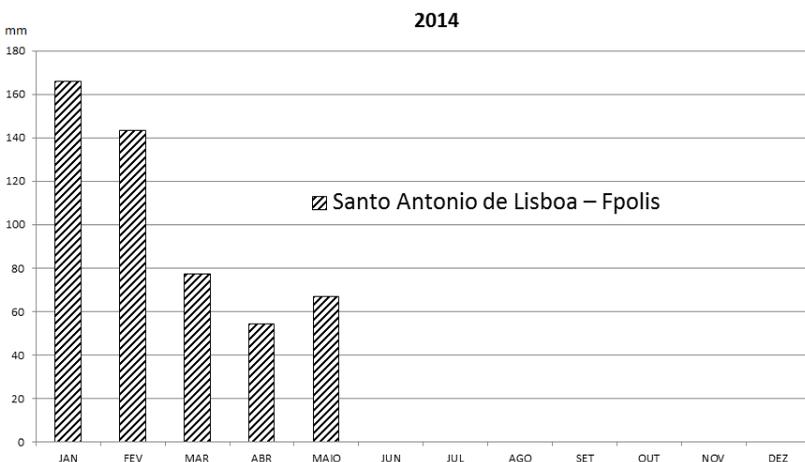


Figura 57. Pluviometria acumulada de chuvas mensais do ano de 2014 – Estação de Santo Antônio de Lisboa.

Observa-se na Figura 56 que o mês de agosto de 2013 não obteve dados em função de problemas na estação de Santo Antônio de Lisboa instalada na microbacia (Figura 32).

Comparando-se a estação de Santo Antônio de Lisboa com as demais estações existentes na ilha no período de novembro de 2013 a julho de 2014, considerando-se apenas os acumulados mensais quando

todos registrassem os dados em uma mesma hora, excluídos os acumulados fora desta condição, é possível perceber as diferenças pluviométricas.

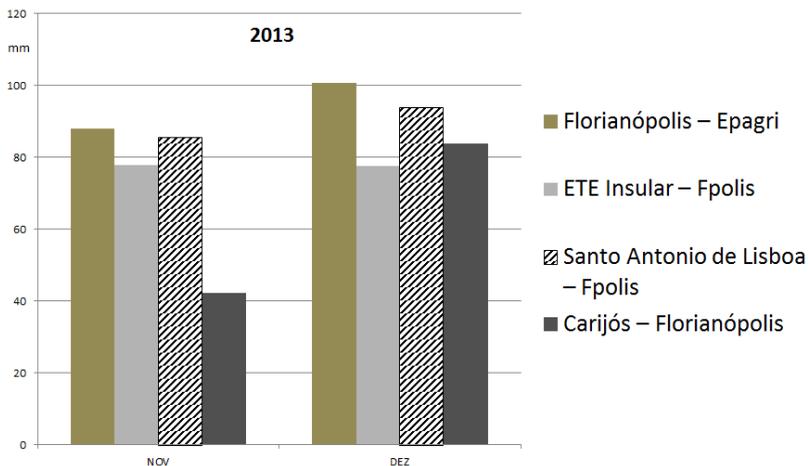


Figura 58. Comparativo entre estações pluviométricas no ano de 2013.

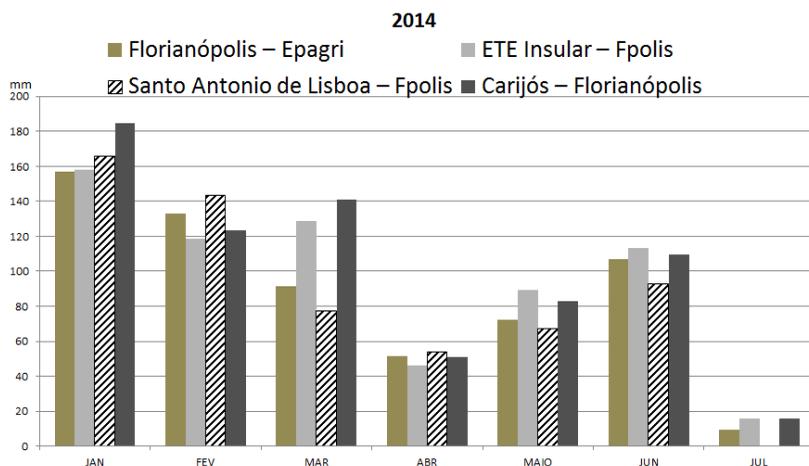


Figura 59. Comparativo entre estações pluviométricas no ano de 2014.

Apesar de não ter sido levada em consideração os efeitos orográficos na série histórica utilizada no estudo, o comparativo apresentado na Figura 58, demonstra que as diferenças chegam a 50 %

se comparado os acumulados de chuva entre as estações de Santo Antônio de Lisboa e Carijos no mês de novembro de 2013, que estão equidistantes apenas 7 km, demonstrando a importância de se ter instalado um pluviômetro no local de interesse para dados mais precisos e possível emissão de alertas.

4.4. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

As amostras representativas da campanha de campo realizada na área de estudo são submetidas a caracterização física (massa específica aparente, limites de liquidez e plasticidade, análise granulométrica, teor de umidade natural), e determinação de parâmetros mecânicos (resistência ao cisalhamento). Além dos parâmetros aqui referenciados, a condutividade hidráulica também será avaliada através do ensaio de permeabilidade visando a utilização no modelo hidrológico de estabilidade.

4.4.1. Caracterização Física do Solo

Para determinar a classificação do solo, é precedida sua caracterização, de maneira a distinguir seus diferentes tipos e categoria de comportamento. Basicamente as classificações usuais levam em conta a análise tátil –visual, textura, genética (geológica e pedológica), classificações geotécnicas convencionais (granulometria e limites de Atterberg) e não convencionais (Miniatura Compactado Tropical – MCT) (OLIVEIRA et al., 1998).

Para classificar e determinar o estado dos solos, utilizou-se as classificações geotécnicas convencionais, baseadas nos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, sendo as mais conhecidas o sistema SUCS, derivada da classificação de Casagrande (1948), inicialmente denominada Sistema de Classificação de Aeroportos, e Classificação do HRB, conhecida como classificação da AASHTO (OLIVEIRA et al., 1998).

Foram utilizados nas análises os ensaios de granulometria, de acordo com a norma NBR 7181/1984, Limites de Atterberg de acordo com a NBR 6459/1984 (limite de liquidez) e NBR 7180/1984 (limite de plasticidade). A determinação da massa específica foi realizada por meio da NBR 6508/1984, Figura 60.



Figura 60. Imagens dos ensaios de caracterização e índices físicos.

4.4.2. Cisalhamento

Segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, os parâmetros de resistência: coesão (c) e o ângulo de atrito interno das partículas (ϕ), foram obtidos pela equação (02).

$$\tau = c + \sigma' \cdot \tan(\phi) \quad (02)$$

Onde:

τ : Tensão de cisalhamento do solo [kPa];

σ' : Tensão efetiva do solo [kPa];
 ϕ : Ângulo de atrito entre os grãos [graus];
 c: Coesão [kPa];

O ensaio de cisalhamento direto, baseado na norma ASTM D3080-04, foi realizado com as amostras indeformadas coletadas em campo. As amostras foram rompidas na condição inundada para obtenção de parâmetros de resistência para uma situação crítica. A Figura 61 demonstra a sequência de montagem do corpo de prova e o seu rompimento no equipamento de cisalhamento.



Figura 61. Preparação e execução do ensaio de cisalhamento direto.

4.4.3. Permeabilidade

Para obtenção dos parâmetros de condutividade hidráulica no solo, foram realizados ensaios de permeabilidade à carga hidráulica variável, segundo NBR 14545/2000.

A amostra de solo indeformado coletado no campo foi retrabalhado em laboratório para atingir as dimensões mínimas para confinamento da amostra em corpo de prova cilíndrico, vedada com anéis de borracha e argila plástica (bentonita). Para a determinação da percolação da água através da amostra de solo, foi estabelecida o gradiente hidráulico¹⁰ baseada na lei de Henry Darcy, expressa na equação (01) abaixo:

$$k_{per} = \frac{v}{i} \quad (04)$$

Onde:

k_{per} : Condutividade hidráulica saturada e/ou permeabilidade [cm·s⁻¹];

v : Velocidade de percolação [cm/s];

i : Gradiente hidráulico [adimensional];

A Figura 62 demonstra a sequência de preparação da amostra e realização do ensaio.

¹⁰ Gradiente Hidráulico: mede a queda de potencial hidráulico por distância de percolação unitária.



Figura 62. Preparação da amostra e realização do ensaio de permeabilidade de carga variável.

4.5. CONSOLIDAÇÃO DOS DADOS EM AMBIENTE SIG

Segundo Oliveira et al. (1998), os métodos de análise de estabilidade conhecidos atualmente são divididos entre: métodos analíticos (teoria do equilíbrio-limite e modelos matemáticos de tensão e deformação), métodos experimentais (modelos físicos de diferentes escalas) e métodos observacionais (retroanálise, ábacos e opiniões de especialistas).

Explorando o modelo analítico de que se propõe o estudo, as variáveis dependentes do solo produzidas na etapa de ensaios laboratoriais, subsequente aos trabalhos de campo, alimentam a tabela de atributos do ambiente SIG, que por sua vez formarão novos mapas temáticos além daqueles produzidos na etapa de compilação de dados, ambos com o software de geoprocessamento ArcGIS 9.3®, da ESRI.

O modelo de análise de estabilidade utilizado no presente estudo é o SHALSTAB que, como visto nos capítulos iniciais, é proposto por Dietrich e Montgomery (1998), no qual considera um único conjunto de parâmetros geotécnicos, coesão, ângulo de atrito interno e peso específico do solo, para toda a área de estudo, além dos

parâmetros da profundidade vertical do solo e fluxo de água subsuperficial, considerando-os como sendo unidirecionais e constantes.

Além disso, o resultado final de saída do modelo em termos de estabilidade de encosta é dependente da relação q/T . Esta relação representa a capacidade do solo em transmitir a água que está infiltrando sobre a forma de taxa de recarga uniforme. Quanto maior esta relação, maior o índice de umidade do solo e a susceptibilidade de escorregamento. Desta maneira, a variável q capaz de desestabilizar uma região está diretamente relacionada com T , no qual é requerida. (MICHEL, 2011)

A partir do modelo de estabilidade que se pretende utilizar, a consolidação dos dados em ambiente SIG se faz necessária, associando-se aos demais produtos gerados nas etapas metodológicas anteriores.

Apresentam-se a seguir as três fases preliminares formuladas neste trabalho para a formação da etapa de consolidação.

4.5.1. Fases para Formação da Etapa de Consolidação dos Dados

Fase 1: Reunião dos parâmetros geotécnicos de entrada do modelo: coesão, ângulo de atrito interno do solo, densidade do solo úmido e profundidade vertical do solo.

Outras variáveis necessárias serão extraídas do Modelo Digital do Terreno – MDT, sendo elas: a [m²] representando a área de contribuição a montante, b [m] o comprimento de contorno da fronteira inferior de cada elemento. As variáveis a b são dadas a partir do trabalho de Beven e Kirkby (1979) e O’loughlin (1986), no qual se determinou o modelo hidrológico de estado uniforme utilizado no SHALSTAB, conforme Figura 63.

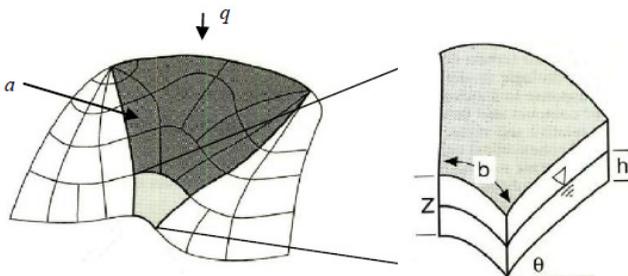


Figura 63. Elementos usados pelo modelo hidrológico. Adaptado de Montgomery e Dietrich (1994), Apud Michel (2011).

Tal modelo simula a altura da coluna d'água durante um período de chuva, considerando-se o fluxo que infiltra até um plano com menor condutividade, geralmente o contato solo-rocha, seguindo então, um caminho determinado pela topografia. (GUIMARÃES et al., 2003)

Fase 2: O próximo passo prevê a superação da limitação do modelo em relação à extrapolação dos parâmetros geotécnicos e a relação entre a capacidade do solo em transmitir a água que está infiltrando sobre a forma de taxa de recarga uniforme.

Davison Dias (1995) considera que os solos pertencentes a uma mesma unidade pedológica/geológica possuem comportamento semelhante, sendo que o resultado do ponto analisado pode ser extrapolado para todos os solos dentro da unidade analisada.

Para que se possam extrapolar os resultados dentro da unidade geotécnica, utilizou-se a ferramenta IDW (Inverse Distance Weighting) na extensão Interpolation do Sapatial Analyst Tools do software ArcGIS®.

O uso desta ferramenta possibilita que uma gama de pontos sejam interpolados por média ponderada da distância entre valores das amostragens, o que permite espacializar os parâmetros geotécnicos. A Figura 62 demonstra a aplicação da extrapolação de dados de coesão do solo na área de estudo. Não houve fixação de intervalos dos resultados, utilizando as faixas geradas pelo programa para que otimize-se um maior número de classes.

Observa-se que a forma circular de delimitação gerada por cada valor na interpolação é restritamente dependente do número de pontos de dados disponíveis, portanto, quanto maior o número de informações geradas pelas coletas, melhor a qualidade de representação das delimitações geradas pelas interpolações. Consequentemente, com maior número de coletas, mais preciso será os resultados.

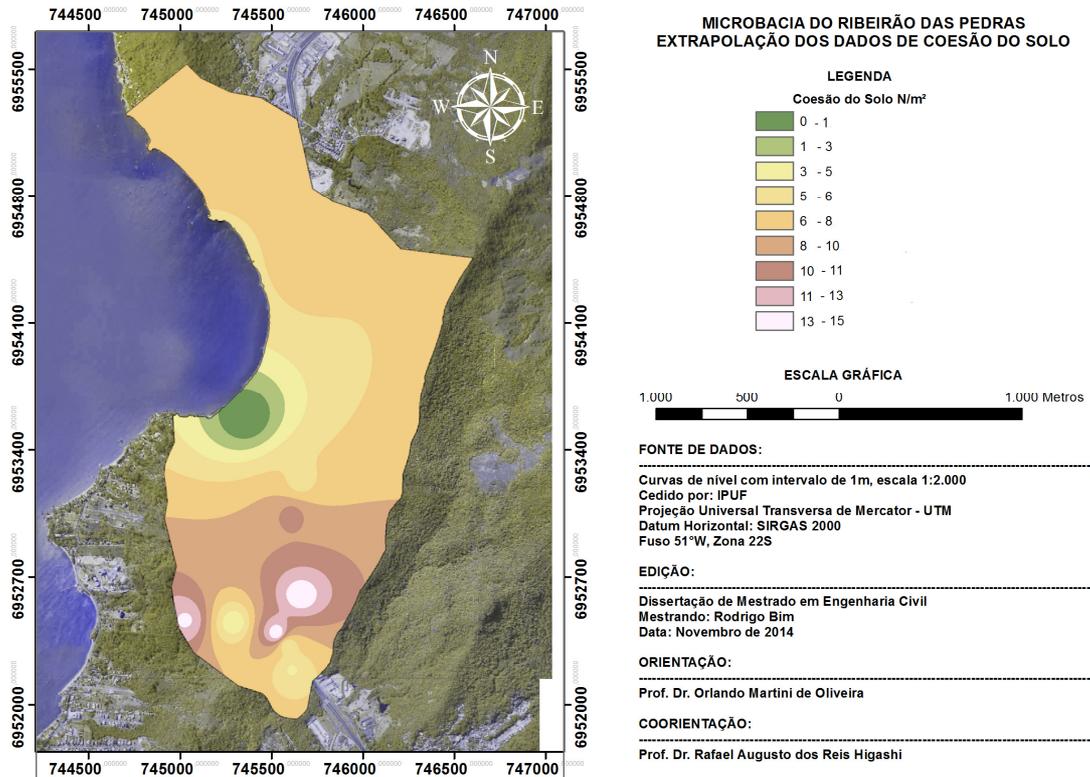


Figura 64. Interpolação dos parâmetros de coesão do solo na microbacia do Ribeirão das Pedras.

Sobre a limitação da capacidade do solo em transmitir a água que está infiltrando sobre a forma de taxa de recarga uniforme, relação q/T , determinou-se o valor de T (Equação (05)), através dos ensaios de permeabilidade executados na microbacia do Ribeirão das Pedras. Portanto, foi possível calcular a q necessária para obter o correto valor da relação q/T a partir dos resultados do SHALSTAB.

$$T = k.z \quad (05)$$

Onde:

T: Transmissibilidade [m^2/dia];

k : Condutividade hidráulica saturada e/ou permeabilidade [cm/s];

z: Espessura do solo [cm];

A taxa de recarga uniforme (q) agora pode ser determinada pelo produto entre T e o resultado preliminar gerado pelo SHALSTAB, através de suas classes de estabilidade originais, que serão mantidas conforme modelo inicial proposto por Dietrich e Montgomery (1998) demonstradas na Tabela 6.

Tabela 6. Classes de estabilidade proposto por Dietrich e Montgomery (1998) adaptáveis ao estudo.

Classes de Estabilidade	Condição	Legenda	Relação q/T
A) Incondicionalmente estável e saturado	$\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\theta \leq \tan\theta \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right)$		Estável
B) Incondicionalmente estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\theta \leq \tan\theta \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right)$		$q/T > -2,2$
C) Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\theta > \tan\theta^2 \tan\theta \left(1 - \frac{a}{b} < \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\theta}\right) \frac{T}{q} \text{sen}\beta\right)$		$-2,2 > q/T > -2,5$
D) Instável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\theta > \tan\theta^2 \tan\theta \left(1 - \frac{a}{b} \geq \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\theta}\right) \frac{T}{q} \text{sen}\beta\right)$		$-2,5 > q/T > -2,8$
E) Instável e saturado	$\left(\frac{a}{b}\right) > \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\theta > \tan\theta^2 \tan\theta \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right);$ $\frac{a}{b} \geq \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\theta}\right) \frac{T}{q} \text{sen}\beta$		$-2,8 > q/T > -3,1$
F) Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan\theta > \tan\beta$ $\left(\frac{a}{b}\right) < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$		$q/T < -3,1$
G) Incondicionalmente instável e saturado	$\tan\theta > \tan\beta$ $\left(\frac{a}{b}\right) > \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$		Instável

O valor de q deverá ser capaz de estabelecer, através de seu equacionamento determinístico pelo modelo de estabilidade de vertente infinita, a variação de estabilidade de uma encosta, sendo que estará diretamente restrita a eventos de chuva. Neste caso, o uso de dados pluviométricos se torna essencial.

Fase 3: Com o pluviômetro instalado na microbacia e uma série histórica, é possível gerar critérios de calibração do modelo a partir dos valores de q, pois terá a chuva como fator desencadeador do processo de instabilidade a partir dos dados intrínsecos locais condicionados em cada pixel que compõe a área da microbacia de estudo.

4.5.2. Desenvolvimento das Equações de Curva Crítica de Chuva na Formação de Fatores de Segurança

Segundo Dhakal e Sidle (2004) apud Michel (2011), de maneira geral, há dois tipos de estudos relacionados às características da precipitação e da recarga associada a escorregamentos, sendo o primeiro pela relação dos escorregamentos à umidade antecedente ocasionada por prolongados períodos de intensas precipitações, e o segundo, pelos curtos períodos de precipitação extremamente intensos, demonstrando a importância da relação entre as características do evento de precipitação com as características geotécnicas que podem deflagrar os escorregamentos, pois a relação entre as características da precipitação (duração e volume) e os escorregamentos ainda não é clara.

Neste sentido, será utilizadas correlações entre chuvas e escorregamentos determinados na etapa de compilação de dados, tanto no método adaptado de Tatizana et al. (1987), que leva em consideração uma precipitação acumulada de 3 dias, quanto no método adaptado de Guidicini e Iwasa (1976), que considera um período maior, avaliando o comportamento das chuvas antecessoras iniciadas no mês de menor volume até a data do evento, ambos expressos a partir de limiares algébricos, conforme equações da curva crítica da Tabela 7;

Tabela 7. Equações da curva crítica empregados a partir dos modelos de Tatizana et al. (1987) e Guidicini e Iwasa (1976).

Modelo Tatizana et al. (1987) Equação da curva crítica	Modelo Guidicini e Iwasa (1976). Equação da curva crítica
$I(T) = 5E14(AC3d)^{-5,492} \text{ (06)}$ onde: I(T) = Intensidade pluviométrica da última hora – modelo Tatizana et al. (1987). AC3d = Acumulado pluviométrico de 3 dias.	$I(G100) = 147,76e^{0,0015(AC)} \text{ (07)}$ onde: I(G100) = Intensidade pluviométrica da última hora baseada na curva acumulada média da precipitação mensal e nas 24 horas do dia do evento na região de probabilidade de 100% - Modelo Guidicini e Iwasa (1976) - Faixa A . AC = Acumulado mensal $I(G50) = 0,3233(AC)^{1,0902} \text{ (08)}$ onde: I(G50) = Intensidade

Continua

Continuação

	<p>pluviométrica da última hora baseada na curva acumulada média da precipitação mensal e nas 24 horas do dia do evento na região de probabilidade de 50% - Modelo Guidicini e Iwasa (1976) - Faixa B. AC = Acumulado mensal</p> <p>I(G33) = 0,299(AC)^{1,0808} (09) onde: I(G33) = Intensidade pluviométrica da última hora baseada na curva acumulada média da precipitação mensal e nas 24 horas do dia do evento na região de probabilidade de 33% - Modelo Guidicini e Iwasa (1976) - Faixa C. AC = Acumulado mensal</p>
--	--

Outro fato que deve ser levado em consideração é que, pelo método de Guidicini e Iwasa (1976), são gerados três equações demonstradas inicialmente na Figura 44, equivalentes às probabilidades de 100%, 50% e 33% para ocorrência de escorregamentos. Neste caso, adotou-se no presente trabalho a média ponderada entre os resultados de I(G100), I(G50) e I(G33), Tabela 7, gerando a Intensidade pluviométrica Média I(GM) a partir da curva crítica.

As equações de curva crítica geradas na Tabela 7 deverão ser empregadas em função do equilíbrio limite, onde a estabilidade do maciço é condicionada ao evento pluviométrico, implicando na adoção de um Fator de Segurança – FS, definido pelos limiares estabelecidos. As expressões (10) e (11) determinam o Fator de Segurança pelo modelo de Guidicini e Iwasa (1976) - FS(G) e o Fator de Segurança pelo modelo de Tatizana et al. (1987) - FS(T):

$$FS(T) = I(T) / IHM \quad (10)$$

onde:

FS(T): Fator de Segurança pelo modelo de Tatizana et al. (1987);

I(T): Intensidade pluviométrica da última hora – modelo Tatizana et al. (1987);

IHM: Intensidade Horária Monitorada;

$$FS(G) = I(GM) / IAMM \quad (11)$$

onde:

FS(G): Fator de Segurança pelo modelo de Guidicini e Iwasa (1976);

I(GM): Intensidade pluviométrica média – modelo Guidicini e Iwasa (1976);

IAMM: Intensidade Acumulada Mensal Monitorada;

Para exemplificar a variação do fator de segurança entre os métodos de Guidicini e Iwasa (1976) e Tatizana et al. (1987) durante chuvas intensas, foram escolhidos dois períodos registrados nas estações pluviométricas utilizadas no presente estudo, sendo a primeira relacionada ao evento extremo que gerou o escorregamento na microbacia, entre os dias 21 a 23 de novembro de 2008, registrada pela estação de São José, e o segundo em um período normal de chuvas entre os dias 20 a 22 de setembro de 2013, registrado pelo pluviômetro instalado na microbacia.

4.5.3. Variação do Fator de Segurança FS(T)

As Tabelas 8 e 9 apresentam a variação do FS(T) durante o evento ocorrido em 2008 e 2013, conforme segue:

Tabela 8. Variação do Fator de Segurança pelo método de Tatizana et al. (1987) entre os períodos de 21 a 23 de novembro de 2008.

IHM (mm)	AC3d (mm)	Data	I(T) (mm)	FS(T)
4,6	55	21/11/2008	138324,2	30070,5
15,5	147,7	22/11/2008	609,16	39,3
10,4	307,8	23/11/2008	10,79	1,0

Tabela 9. Variação do Fator de Segurança pelo método de Tatizana et al. (1987) entre os períodos de 20 a 22 de setembro de 2013.

IHM (mm)	AC3d (mm)	Data	I(T) (mm)	FS(T)
4,8	38,4	20/09/2013	994999,6	207291,6
6,2	81,1	21/09/2013	16391,83	2643,8
12,2	133,2	22/09/2013	1074,46	88,1

Em comparação as Tabelas 8 e 9, percebe-se a variação do fator de segurança FS(T) entre os períodos, sendo que quanto mais próximo a curva limite da equação, menor será o fator de segurança gerado. O evento extremo de 2008 alcançou a marca FS(T) = 1,0 no dia do escorregamento que, corretamente retroanalisado para uso no modelo de

estabilidade proposto, tocou a curva em seu limiar. Os campos destacados correspondem aos parâmetros livres de entrada na equação.

O gráfico da Figura 65 representa a condição comparativa citada no parágrafo anterior entre os dois períodos analisados.

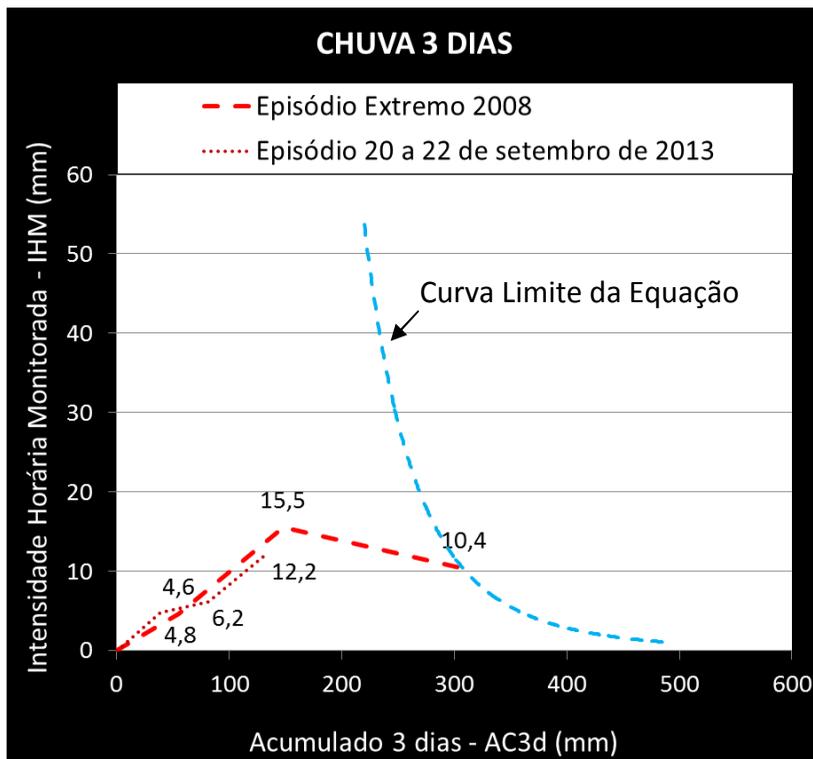


Figura 65. Comparação da variação do FS(T) entre episódios de chuva .

4.5.4. Variação do Fator de Segurança FS(G)

As Tabelas 10 e 11 apresentam a variação do FS(G) durante o evento ocorrido em 2008 e 2013, conforme segue:

Tabela 10. Variação do Fator de Segurança pelo método de Guidicini e Iwasa (1976) entre os períodos de 21 a 23 de novembro de 2008.

IAMM (mm)	AC (mm)	Data	I(GM) (mm)	FS(G)
890,4	1344	21/11/2008	963,52	1,08
982,70	1354	22/11/2008	974,85	0,99
1142,8	1363	23/11/2008	986,30	0,86

Tabela 11. Variação do Fator de Segurança pelo método de Guidicini e Iwasa (1976) entre os períodos de 20 a 22 de setembro de 2013.

IAMM (mm)	AC (mm)	Data	I(GM) (mm)	FS(G)
227,9	761	20/09/2013	445,54	1,96
270,1	771	21/09/2013	451,71	1,67
322,22	780	22/09/2013	457,97	1,42

Em comparação as Tabelas 10 e 11, percebe-se a variação do fator de segurança FS(G) entre os períodos que, da mesma forma que o modelo de Tatizana et al. (1987), quanto mais próximo da curva limite da equação, menor será o fator de segurança gerado. O evento extremo de 2008 para o modelo de Guidicini e Iwasa (1976) alcançou a marca $FS(G) = 0,86$ no dia do escorregamento, pois trata-se de um valor médio das probabilidades, sendo que 22 dias antes do escorregamento, o fator de segurança FS(G) era igual a 1,00 para a probabilidade de 33% de chances de escorregamento que, corretamente retroanalisado para uso no modelo de estabilidade proposto, tocou a curva na faixa C de seu limiar. Os campos destacados correspondem aos parâmetros livres de entrada na equação.

O gráfico da Figura 66 representa a condição comparativa citada no parágrafo anterior entre os dois períodos analisados.

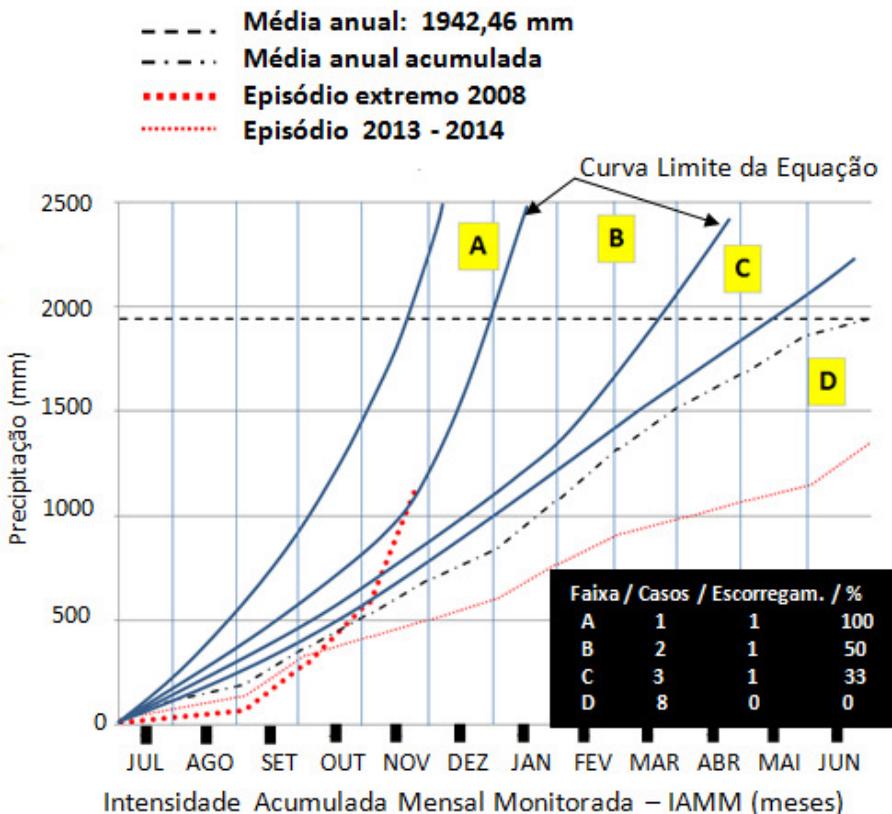


Figura 66. Comparação da variação do FS(G) entre episódios de chuva.

Em suma, o desenvolvimento dos fatores de segurança FS(T) e FS(G) contribuirá para a formação do mapa de susceptibilidade, última etapa prevista para o trabalho, cujas ações serão mescladas com o modelo de estabilidade que será visto na sequência do estudo, com uso do SHALSTAB.

Salienta-se a diferença entre os valores gerados pelos fatores de segurança no evento extremo de 2008, Tabela 8 e 10, nos dois modelos propostos de correlação, cada qual com sua característica própria, analisados a curto e longo prazo a partir de uma série histórica.

A proposta do modelo de Guidicini e Iwasa (1976) é mais conservadora, atingindo níveis críticos de chuva mais rapidamente que o modelo de Tatizana et al. (1987), devido ao acumulado de meses anteriores. O modelo de Tatizana et al. (1987), por sua vez, pode apurar mais precisamente curtos períodos de precipitação extremamente

intensos, não tão eficientes no modelo de Guidicini e Iwasa (1976). Por este fato, a análise conjunta neste caso será mantida, uma vez que diferentes métodos de análise não podem ser tratados como substitutivos, mas sim complementares, como é o caso dos dois modelos escolhidos no estudo.

4.6. APLICAÇÃO DE UM MODELO DE ESTABILIDADE

Em geral, o fenômeno de escorregamento é representado algebricamente por relações de forças atuantes e resistentes, expressos por um fator de segurança definido pela resistência ao cisalhamento do solo e sua capacidade mínima para evitar rompimentos.

Seu cálculo pode ser realizado de diversas maneiras, dependendo das características do fenômeno, como visto anteriormente na Tabela 4, que relaciona o tipo de superfície de ruptura ao método de cálculo mais adequado, sendo que para escorregamentos translacionais rasos (planar) é comum usar o método de estabilidade de talude infinito criado por Taylor (1948), onde o comprimento da encosta é muito maior que a profundidade do solo, conforme Figura 67.



Figura 67. Demonstração gráfica de um talude infinito. Fonte: Adaptado Marinho (2010).

O método de estabilidade por talude infinito será utilizada no presente trabalho por apresentar uma série de simplificações e possibilidade do uso de modelo hidrológico, além das características intrínsecas locais, onde os componentes desestabilizadores da gravidade e os componentes restauradores do atrito e da coesão serão comparados a um plano falho paralelo à superfície do terreno, desprezando-se os efeitos de suas margens. (MICHEL, 2011)

A formulação do modelo de estabilidade baseia-se na lei de Mohr-Coulomb, cuja definição da resistência (equação (12)) é dada no momento da ruptura de uma encosta, onde o peso do solo (força atuante) torna-se igual a resultante das forças resistentes, conforme demonstrado na Figura 68.

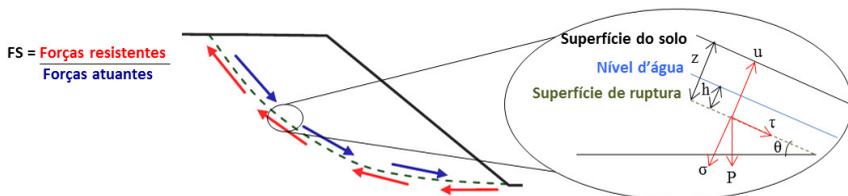


Figura 68. Modelo de estabilidade de um talude qualquer.

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \emptyset \quad (12)$$

onde:

τ [N/m²] é a tensão cisalhante no momento da ruptura;

c [N/m²] é a coesão do solo;

σ [N/m²] é a tensão normal;

u é a poro-pressão [N/m²];

\emptyset [graus] é o ângulo de atrito interno do solo;

A Figura 69 demonstra a decomposição das forças atuantes no sistema de um talude infinito:

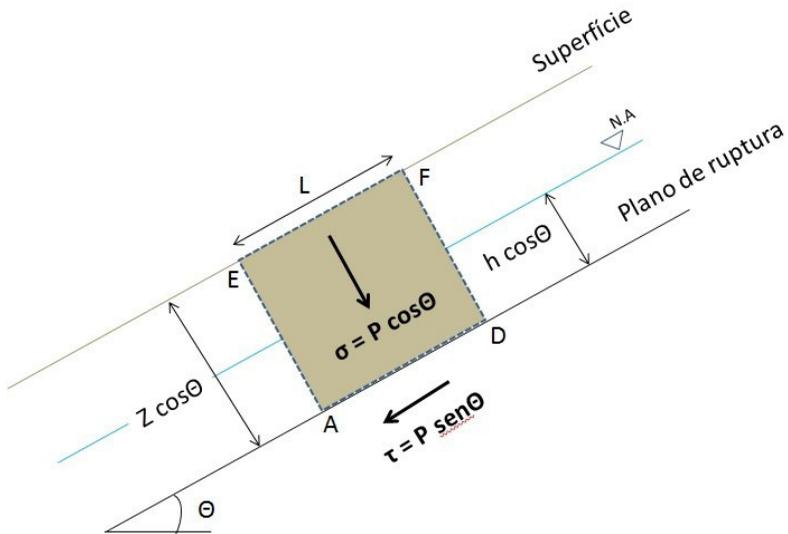


Figura 69. Decomposição de forças no talude infinito. Fonte: Rosolem (2014).

A decomposição da equação do peso do bloco de solo da Figura 69, é dada por:

$$P = \gamma \cdot g \cdot z \cdot \cos \beta \cdot L \quad (13)$$

onde:

γ = Massa específica do solo

g = Aceleração da gravidade

z = Profundidade do solo

L = Comprimento do bloco

A partir da Equação (13), as tensões normais, poropressões e tensão cisalhantes atuantes no sistema são:

$$\sigma = \gamma \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \beta \quad (14)$$

$$\tau = \gamma \cdot g \cdot z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \quad (15)$$

$$\mu = \gamma_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \beta \quad (16)$$

onde:

γ_w = Massa específica da água

g = Aceleração da gravidade

γ = Massa específica do solo

z = Profundidade do solo

σ = Tensão normal

τ = Tensão cisalhante

μ = Poropressão

Substituindo as equações (14), (15) e (16) na Equação (12), temos:

$$\gamma \cdot g \cdot z \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta = c + (\gamma \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\beta - \gamma_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2\beta) \cdot \text{tg } \emptyset \quad (17)$$

A Equação (17) pode ser rearranjada em função de h/z , no qual representa a coluna de água presente no solo necessário para que o talude venha a se desestabilizar, conforme Equação (18):

$$\frac{h}{z} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\emptyset} \right) + \frac{c}{g \cdot z \cdot \cos^2\beta \cdot \tan\emptyset \cdot \gamma_w} \quad (18)$$

Tendo em vista que as condições de estabilidade de talude são diretamente influenciadas por fatores hidrológicos, há a necessidade de introdução de um modelo hidrológico para determinação da variação da umidade no solo, neste caso será utilizado o modelo SHALSTAB, que integra esta condição em suas análises.

4.6.1. Shalstab

O modelo determinístico SHALSTAB baseia-se na modelagem matemática através da combinação de dois fatores distintos: talude infinito e o balanço entre concentração e transmissão de água no solo (modelo hidrológico). A metodologia utiliza o Modelo Digital do Terreno (MDT) em formato raster para coleta dos valores de elevação, pelo qual, posteriormente são calculadas as áreas de contribuição e declividade, contendo em cada pixel um valor morfométrico distinto.

Para o talude infinito, são utilizados os parâmetros do solo, coesão, massa específica, ângulo de atrito e espessura obtidos através de ensaios de campo, espacializados e individualizados aos tipos de solos da microbacia de estudo.

O modelo hidrológico, por sua vez, considera fluxos subsuperficiais constantes, proposto por Beken e Kirky (1979) e O'Loughlin (1986).

A saturação do solo é dada por área de contribuição a montante, transmissibilidade do solo e declividade do terreno em um modelo estacionário, onde assume-se que o fluxo gerado pela infiltração no solo é paralelo ao relevo até atingir uma camada de baixa condutividade,

seguindo por caminhos preferenciais do terreno. (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; MICHEL, 2013; O'LOUGHLIN, 1986)

O'Loughlin (1986) determinou, a partir da Lei de Darcy, que o nível de saturação do solo é obtido através da relação entre a água que entra no sistema sob forma de recarga uniforme e a água que sai do sistema através de escoamento superficial, quando este está saturado, satisfazendo a parcela do modelo estacionário, conforme segue:

$$w = \frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen}\beta} \quad (19)$$

onde:

W = Umidade do solo

a = Área de contribuição a montante

b = comprimento de contorno da fronteira de cada elemento

q = Taxa de recarga uniforme

T = Transmissibilidade do solo

β = Declividade

A transmissibilidade (T), por sua vez, é dada pelo produto entre a condutividade hidráulica saturada e a espessura de solo:

$$T = K_s \cdot z \cdot \text{cos}\beta \quad (20)$$

onde:

T = Transmissibilidade do solo

Ks = Condutividade hidráulica saturada

z = Espessura do solo

β = Declividade

A umidade (W) pode ser dada em função de h/z, ou seja, relação entre a coluna de água no subsolo e a espessura da camada de solo, conforme segue:

$$\frac{h}{z} = \frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen}\beta} \quad (21)$$

A partir da razão h/z, o modelo SHALSTAB possibilita integrar o modelo de estabilidade de talude com o modelo hidrológico de estado uniforme, unindo-se as equações (18) e (21), conforme segue:

$$\frac{q.a}{T.b.\text{sen}\beta} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\emptyset} \right) + \frac{c}{g.z.\cos^2\beta.\tan\emptyset.\gamma_w} \quad (22)$$

Ao reescrever a Equação (22), tem-se a formulação final adotada pelo SHALSTAB a partir das variáveis de taxa de recarga (q) e a transmissibilidade (T), corresponde ao controle hidrológico, conforme Equação (23).

$$\frac{q}{T} = \frac{a}{b} \text{sen}\beta = \left[\frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\emptyset} \right) + \frac{c}{\gamma_w.z.g.\cos^2\beta.\text{tg}\emptyset} \right] \quad (23)$$

As classes de estabilidade definidas por Dietrich e Montgomery (1998) estão descritas na Tabela 12:

Tabela 12. Classes de estabilidade proposto por Dietrich e Montgomery (1998).

Classes de Estabilidade	Condição
A) Incondicionalmente estável e saturado	$\frac{a}{b} > \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\beta \leq \tan\emptyset \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right)$
B) Incondicionalmente estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\beta \leq \tan\emptyset \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right)$
C) Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\emptyset > \tan\beta^2 \tan\emptyset \left(1 - \frac{a}{b} < \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\emptyset}\right) \frac{T}{q} \text{sen}\beta\right)$
D) Instável e não saturado	$\frac{a}{b} < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\emptyset > \tan\beta^2 \tan\emptyset \left(1 - \frac{a}{b} \geq \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\emptyset}\right) \frac{T}{q} \text{sen}\beta\right)$
E) Instável e saturado	$\left(\frac{a}{b}\right) > \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$ $\tan\emptyset > \tan\beta^2 \tan\emptyset \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right);$ $\frac{a}{b} \geq \frac{\gamma}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan\beta}{\tan\emptyset}\right) \frac{T}{q} \text{sen}\beta$
F) Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan\emptyset > \tan\beta$ $\left(\frac{a}{b}\right) < \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$
G) Incondicionalmente instável e saturado	$\tan\emptyset > \tan\beta$ $\left(\frac{a}{b}\right) > \left(\frac{T}{q}\right) \text{sen}\beta;$

As classes identificadas de A a G representam as condições de estabilidade e saturação em função da razão a/b e $\tan\beta$. A transição entre os limites das zonas incondicionalmente instável e estável é dada a partir da $\tan\beta = \tan\emptyset$ (incondicionalmente instável) e $\tan\beta = \tan\emptyset(1 - (\gamma_w / \gamma))$ (incondicionalmente estável), respectivamente. Portanto, regiões

consideradas estáveis e instáveis dependerão dos valores obtidos na razão entre área de contribuição por unidade de contorno, variáveis de acordo com cada região de estudo.

4.6.2. Sequência de Utilização do Modelo Shalstab na Microbacia do Ribeirão das Pedras

Inicialmente o Shallow Slope Stability Model (SHASLTAB) utilizará a **Fase 1** da etapa de consolidação dos dados para formação das classes de estabilidade previstas na Tabela 12, pois nela estão contidos os parâmetros de entrada no modelo. A sequência prática prevê preliminarmente a execução de 8 mapas temáticos distintos, descritos na Tabela 13, necessários a produção do resultado baseado na relação q/T , cuja equação é introduzida no modelo através da ferramenta Raster Calculator do ArcView 9.3. A espessura adotada para a entrada no modelo será de 7 metros, tendo em vista o uso desta referência a partir da profundidade média de ruptura ocorrida no escorregamento de 2008, desconsiderando coesão de raízes e peso da vegetação.

Tabela 13. Mapas temáticos utilizados no modelo SHALSTAB.

MAPA TEMÁTICO	FUNÇÃO
Modelo Digital de Elevações	Demonstração matemática da distribuição espacial que representa graficamente o relevo da superfície do terreno.
Mapa de Declividades	Parâmetros morfológicos para relações trigonométricas e cálculos de fluxos subsuperficiais.
Mapa de Sumidouros	Remoção de erros do MDT que promovam picos e/ou rebaixos para estimativa das direções dos fluxos.
Mapa de Direções de Fluxo	Representa a direção do escoamento da água, analisada segundo a elevação das células vizinhas do MDE pelo método D-8.

Continua

Continuação

Mapa de Contribuição	Criação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir das direções de fluxo. Representa o parâmetro (a/b) da equação combinada dos modelos de Estabilidade de Encosta Infinita e Hidrológico de Estado Uniforme.
Mapa de Coesão	Parâmetros definidos por ensaios laboratoriais das amostras coletadas na área de estudo espacializadas na área de estudo por interpolação limitada por cada unidade geotécnica.
Mapa de Ângulo de Atrito	
Mapa de Peso Específico do Solo	

Com base nos mapas temáticos citados na Tabela 13, será possível aplicar o método de Dietrich e Montgomery (1998) e estabelecer suas classes de estabilidade, conforme Figura 70.

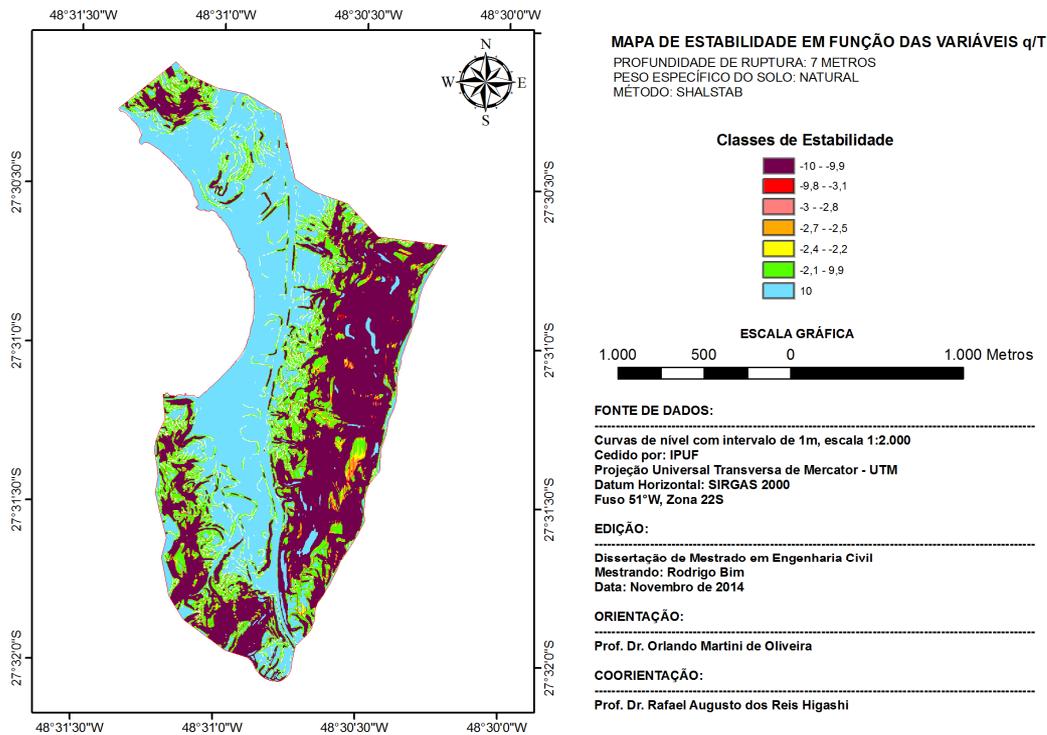


Figura 70. Mapa de estabilidade em função das variáveis q/T .

Conhecidos os valores de T, Tabela 14, através dos ensaios de permeabilidade executados na microbacia do Ribeirão das Pedras, assim como sua espacialização na área de estudos gerados pelo mapa temático da Figura 71, foi possível calcular o valor da taxa de recarga uniforme (q) pelo produto entre T e o resultado preliminar gerado pelo SHALSTAB, conforme demonstrado na Figura 72.

Tabela 14. Valores de Transmissibilidade do solo a partir dos resultados de permeabilidade.

Parâmetro		Espessura do Solo	Permeabilidade	Transmissibilidade
Unidade		z (cm)	k (cm/s)	T (m ² /dia)
Ident.	Ponto de coleta			
T1	2	700	$2,39 \times 10^{-4}$	1,45
T2	1	700	$1,99 \times 10^{-4}$	1,20
T3	0	700	$1,4 \times 10^{-4}$	0,85
T4	3	700	$1,75 \times 10^{-3}$	10,58
T5	5	700	$2,39 \times 10^{-1}$	18,49*
T6	4	700	$3,65 \times 10^{-3}$	22,08

Obs: * Amostra danificada. Utilizou-se média ponderada entre pontos de coleta 3 e 4.

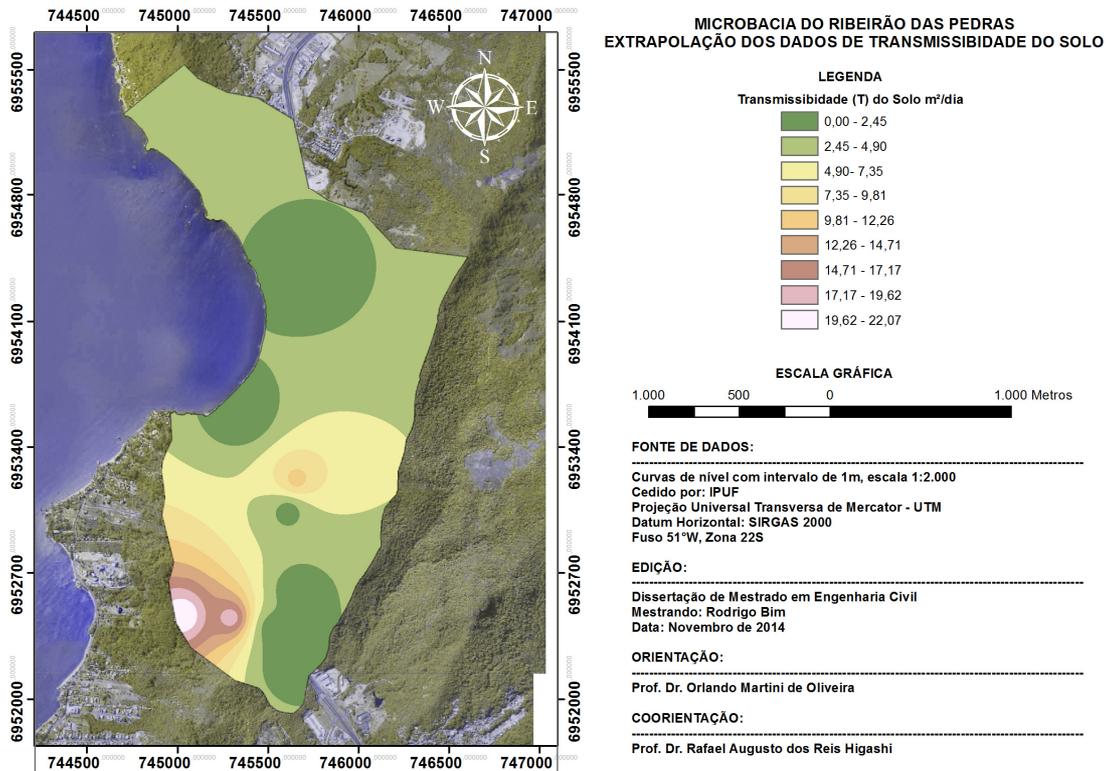


Figura 71. Espacialização de parâmetros T na microbacia do Ribeirão das Pedras.

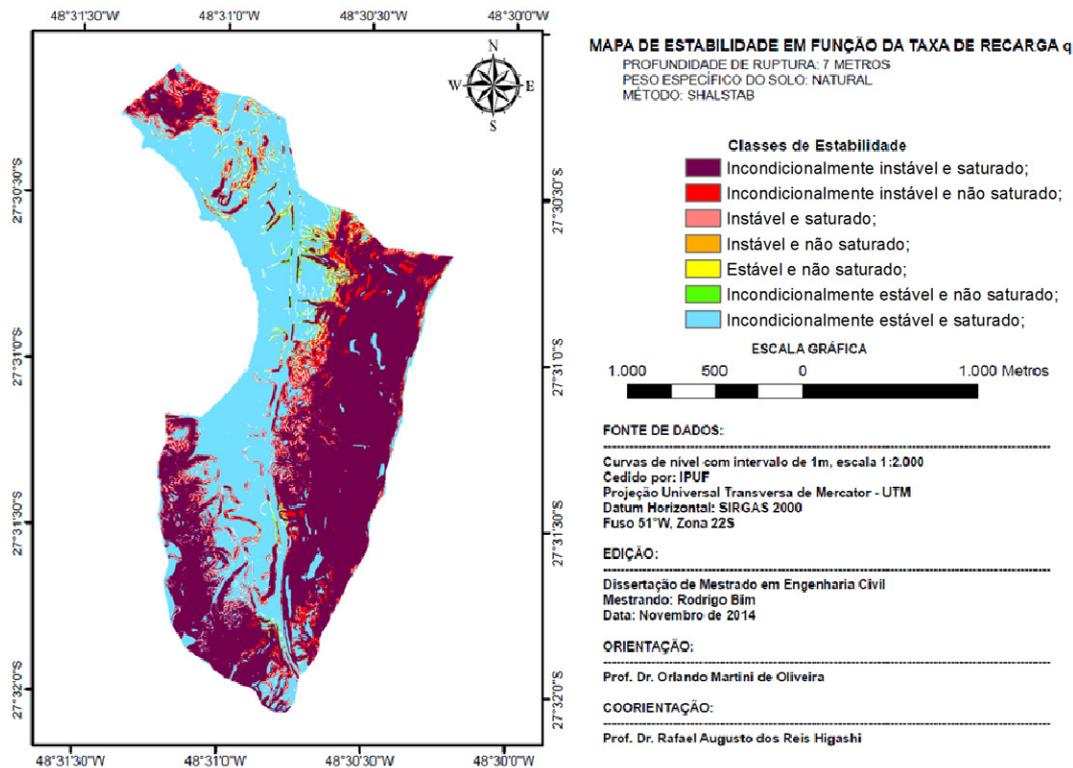


Figura 72. Mapa de estabilidade em função da taxa de recarga q .

Desta maneira, conclui-se a **Fase 2** da etapa de consolidação dos dados.

A aplicação da **Fase 3** da etapa de consolidação, associará a taxa de recarga gerada na Fase 2 (Figura 72) com os fatores de segurança FS(G) e FS(T) definidos pelos limiares das correlações entre chuvas e escorregamentos. Desta maneira, os fatores intrínsecos locais utilizados no modelo de estabilidade de encosta infinita, representados no SHALSTAB, terá a parcela hidrológica de estado uniforme constantemente calibrada de acordo com o regime pluviométrico e os registros de movimentos de massa no local de estudo. Este resultado representará o fechamento da metodologia que se propõe o presente trabalho, gerando o mapa de susceptibilidade a partir da variação pluviométrica local, representada pela Previsibilidade (P). A seguir será demonstrado o cálculo final para geração do mapa de susceptibilidade do Ribeirão das Pedras.

4.7. MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE À ESCORREGAMENTO DO RIBEIRÃO DAS PEDRAS

Para o desenvolvimento do mapa de susceptibilidade a escorregamentos do Ribeirão das Pedras, será utilizada a variação pluviométrica local, gerados pela integração da taxa de recarga q e os Fatores de Segurança nos modelos adaptados de Guidicini e Iwasa (1976) - FS(G) e Tatizana et al. (1987) - FS(T), permitindo sua variação em função da ocorrência de chuvas, representadas pela Previsibilidade (P) conforme segue:

$$P = q / FS(T) \quad (24)$$

$$P = q / FS(G) \quad (25)$$

onde:

P: Previsibilidade;

q : Taxa de recarga

FS(G): Fator de Segurança pelo modelo de Guidicini e Iwasa (1976)

FS(T): Fator de Segurança pelo modelo de Tatizana et al. (1987)

Será adotado o menor valor entre FS(T) e FS(G) para atender o cálculo de P durante um evento pluviométrico.

Portanto, P será o resultado final do mapa de susceptibilidade a escorregamentos da microbacia do Ribeirão das Pedras, conforme exemplificado nas Figuras 73 e 74, a partir dos fatores de segurança

gerados no dia do escorregamento, em 23 de novembro de 2008, conforme Tabela 8 e 10, entre os métodos de Guidicini e Iwasa (1976) e Tatizana et al. (1987) durante o evento extremo de 2008, que teve relevante papel no desencadeamento do escorregamento ocorrido na microbacia de estudo.

No capítulo 5, além do resultado do mapa de susceptibilidade gerado no dia 23 de novembro de 2008, serão demonstrados os resultados dos dias 21 e 22, antecessores ao escorregamento, assim como o comparativo com evento ocorrido em 2013, a partir das Tabelas 9 e 11, entre os dias 20 e 22 de setembro de 2013 na microbacia, simulando a aplicação do mapa de susceptibilidade com o acompanhamento pluviométrico local, alcançando assim o resultado final do que se propôs o trabalho.

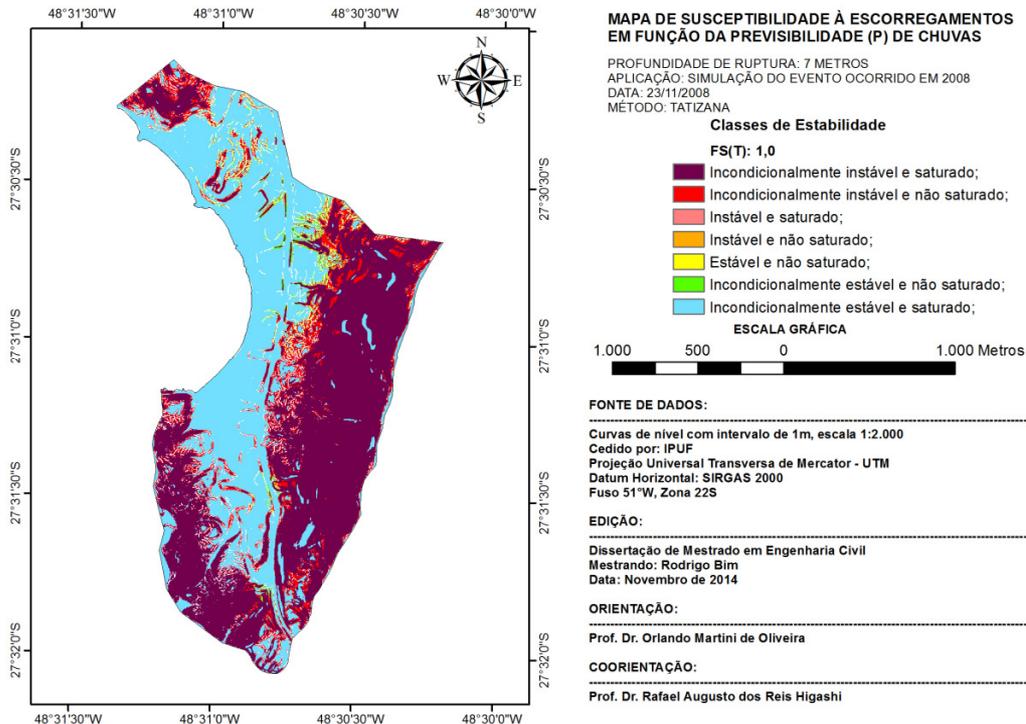


Figura 73. Simulação da aplicação do mapa de susceptibilidade final no evento do dia 23 de novembro de 2008 – Análise pelo modelo de Tatizana et al. (1987).

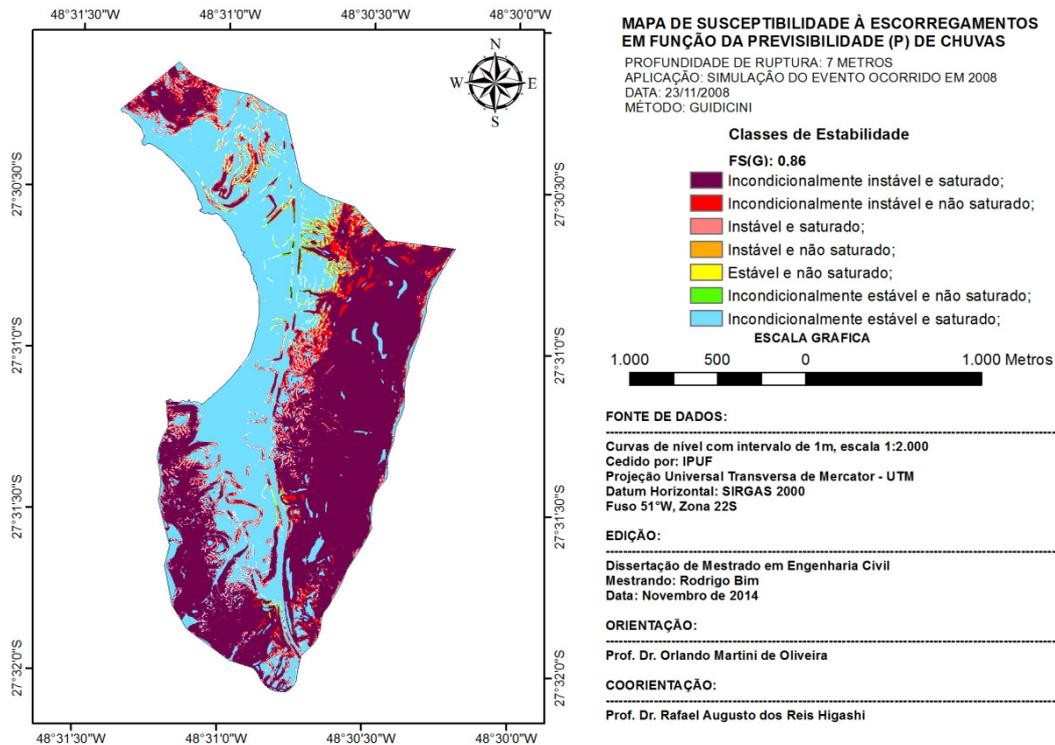


Figura 74. Simulação da aplicação do mapa de susceptibilidade final no evento do dia 23 de novembro de 2008 – Análise pelo modelo de Guidicini e Iwasa (1976).

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os parâmetros geotécnicos obtidos pelos ensaios sob a forma de gráficos e tabelas resumo para os pontos de coleta indicados na microbacia de estudo, assim como para a entrada no modelo Shalstab.

Apresentam-se também os perfis de reconhecimento do solo pelo DPL, mapa geotécnico final e gráfico de análise das correlações entre chuva e escorregamentos utilizados nas etapas de desenvolvimento da metodologia.

Salienta-se que o estudo foi conduzido em parceria com o Trabalho de Conclusão de Curso de Oliveira (2014), cuja apresentação ocorreu em julho de 2014. Dessa forma, parte dos dados aqui indicados poderão ser encontrados em seu trabalho.

Como resultado final, será apresentado o mapa de susceptibilidade com a simulação de 6 cenários a partir dos eventos ocorridos em 2008 e 2013 para a predição de escorregamentos, estabelecendo seus níveis críticos dependentes da variação pluviométrica.

5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS PONTOS DE COLETA

Como resultado da metodologia, tanto a coleta como a análise das amostras seguiram a maneira habitual na Mecânica dos Solos, verificando-se preliminarmente a cor, textura e espessura para cada camada/horizonte de solo. A opção de escolha pelo horizonte C para os pontos de coleta das amostragens, como explanado no presente trabalho, deu-se por ser a camada mais espessa e representativa, que de forma regular estende-se pelo manto de decomposição das rochas na área de estudo. A Tabela 15 apresenta o resumo dos locais amostrados e seu enquadramento nas respectivas unidades geotécnicas.

Tabela 15. Resumo dos locais amostrados.

Ident.	Ponto de Coleta	Cota Topográfica (m)	Unidade Geotécnica	Coordenada UTM	
				X	Y
T1	2	18	Cde	745613	6953038
T2	1	15	Cde	745714	6954321
T3	0	60	PV _g	745531	6952387
T4	3	43	PV _g	745658	6953217
T5	5	46	PV _g	745295	6952444
T6	4	100	PV _g	745032	6952457

Relaciona-se os resultados dos ensaios geotécnicos baseados nos 6 pontos de coletas no horizonte C da microbacia do Ribeirão das Pedras, iniciando-se pela granulometria discriminada na Tabela 16 e no gráfico da Figura 75.

Tabela 16. Resultado da Granulometria nos pontos amostrados.

Ident.	Ponto de Coleta	(%) ARGILA	(%) SILTE	(%) AREIA FINA	(%) AREIA MÉDIA	(%) AREIA GROSSA	(%) PEDR. FINO	(%) PEDR. MÉDIO	(%) PEDR. GROSSO	(%) PEDRA MÃO
T1	2	16	20	16	14	16	18	0,4	---	---
T2	1	34	21	4	7	18	16	0,2	---	---
T3	0	17	16	11	19	28	9	---	---	---
T4	3	30	16	13	10	12	19	0,2	---	---
T5	5	23	18	14	8	8	27	1,7	---	---
T6	4	21	18	18	14	11	17	---	---	---

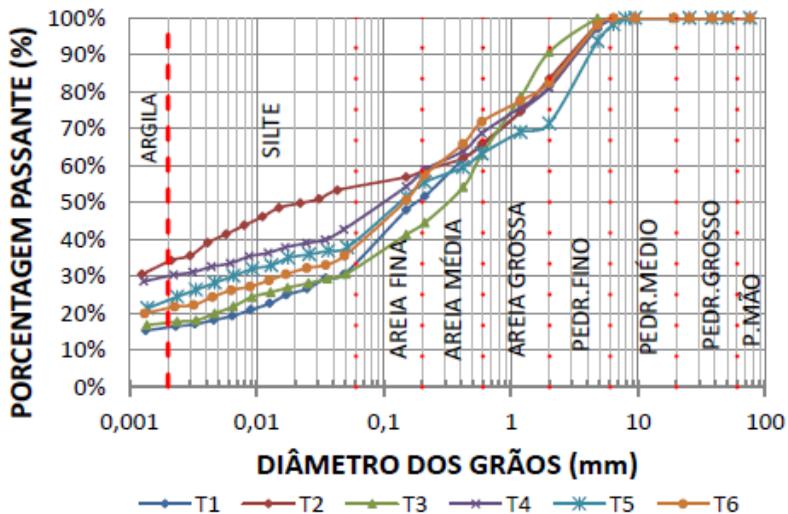


Figura 75. Gráfico da variação granulométrica dos pontos amostrados - % passante.

Na Tabela 16 podem ser observados os valores das frações granulométricas argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa e pedregulhos. Há maior concentração de finos, principalmente argila e silte, ofertando características de um material argilo-siltoso. O material mais granular é oriundo da formação de solo a partir do Granito Ilha, cuja característica é mais grosseira, favorecendo a permeabilidade. Contudo, pacotes de materiais mais argilosos, sob a forma de planos (veios) ou sobre a forma de filmes recobrando os grãos, são encontrados na região, como evidenciados nos estudos de Raimundo (1998).

Na Figura 75 tem-se o gráfico das porcentagens passantes em função do diâmetro dos grãos.

Na Tabela 17 são apresentados os índices físicos e a densidade dos sólidos obtidos nas amostras indeformadas, importantes na análise do comportamento do solo, para controle de amostras e cálculos de esforços atuantes.

Tabela 17. Resultado dos Índices Físicos nos pontos amostrados.

Ident.	Ponto de Coleta	ÍNDICES FÍSICOS							
		γ	γ_s	Umid. Nat.	δ	η	e	A	Sr
		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(%)	g/cm ³	(%)		(%)	(%)
T1	2	17,1	18,41	26,34	2,75	49,72	0,99	26,5	73,5
T2	1	18	19,29	19,06	2,71	43,03	0,76	31,5	68,4
T3	0	17,71	18,6	26,33	2,67	46,38	0,87	18,3	81,6
T4	3	16,01	17,72	25,3	2,64	50,56	1,02	34,6	65,3
T5	5	16,12	17,92	24,1	2,65	49,94	1	35,9	64,0
T6	4	17,46	19,19	16,2	2,65	42,09	0,73	40,6	59,3

Obs: Peso específico natural (γ), Peso específico saturado (γ_s), Densidade Real dos Grãos (δ), Porosidade (η), Índice de Vazios (e), Grau de Aeração (A), Grau de Saturação (Sr).

Seguindo a classificação IAEG (1974), há uma variação entre média a muito alta em relação à porosidade e índice de vazios das amostras. Quanto ao grau de saturação, a classificação varia do muito úmido ao altamente saturado.

A avaliação da plasticidade também foi realizada para as amostras coletadas, em conformidade com os limites de Atterberg, no qual se define os diferentes estados de consistência dos solos que, por sua vez, variam com o grau de umidade, textura e natureza dos sólidos. Os valores dos limites de liquidez (LL), Plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP) estão discriminados na Tabela 18.

Tabela 18. Resultado dos Índices Físicos nos pontos amostrados.

Ident.	Ponto de Coleta	Limites de Atterberg		
		LL (%)	LP (%)	IP (%)
T1	2	57%	44%	13%
T2	1	69%	36%	33%
T3	0	55%	32%	23%
T4	3	64%	44%	20%
T5	5	59%	37%	22%
T6	4	44%	30%	14%

A amostra T2 apresentou índice de plasticidade de 33%, caracterizado por possuir maior fração de argila contida em sua estrutura.

De forma geral, baseado na carta de plasticidade de Casagrande, Figura 76, para o horizonte C do perfil de solo residual, classificaram-se como siltes inorgânicos na faixa de média à alta compressibilidade.

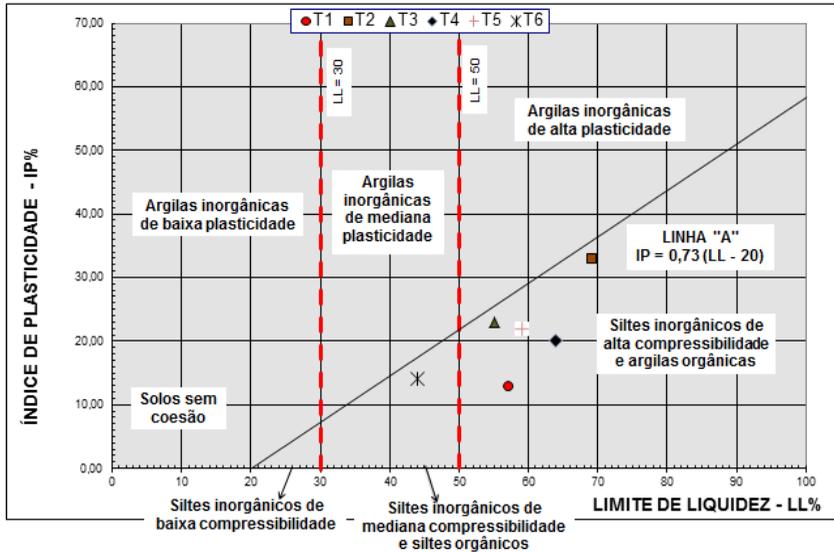


Figura 76. Carta de plasticidade de Casagrande.

Com os resultados da granulometria e plasticidade, foi possível classificar os solos dentro do Sistema Unificado de Classificação de Solos (S.U.C.S) e da Classificação do Highway Research Board (H.R.B), conforme Tabela 19.

Tabela 19. Classificação do solo segundo sistema S.U.C.S e H.R.B nos pontos amostrados.

Ident.	Ponto de coleta	Limites de Atterberg	
		S.U.C.S	H.R.B
T1	2	MH	A-7-5
T2	1	MH	A-7-5
T3	0	MH	A-7-5
T4	3	MH	A-7-5
T5	5	MH	A-7-5
T6	4	OL	A-7-5

Segundo a classificação H.R.B e S.U.C.S pela Carta de Plasticidade, os solos analisados são, de forma geral, argilosos e siltosos altamente elásticos, sujeitos a grandes variações volumétricas.

Em relação à determinação da densidade real dos grãos, os ensaios nos pontos de coleta apresentaram valores com variação entre 2,65 e 2,75 [g/cm³], conforme Tabela 17.

Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito do solo, determinados no ensaio de resistência ao cisalhamento direto, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Parâmetros de resistência nos pontos amostrados.

Ident.	Ponto de coleta	Resistência ao Cisalhamento Direto - Inundado	
		Coesão (kPa)	Angulo de Atrito Interno (Ø) (°)
T1	2	10,58	34
T2	1	6,92	37
T3	0	15,1	34
T4	3	6,11	40,6
T5	5	3,62	38
T6	4	13,72	29,1

As envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb resultantes do ensaio de cisalhamento direto realizado nas amostras inundadas encontram-se detalhadas nas Figuras 77 à 83.

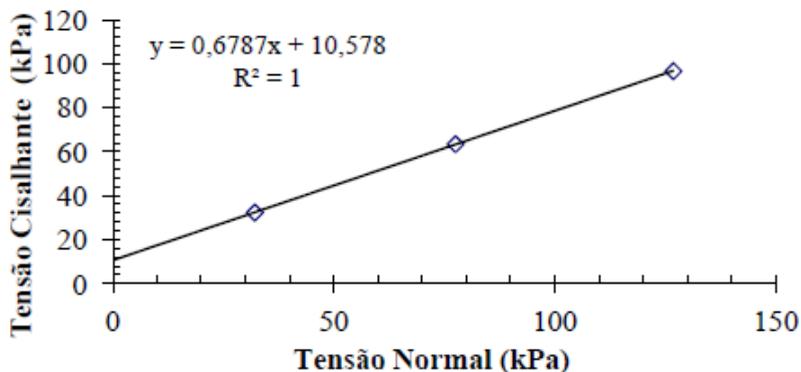


Figura 77. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T1 .

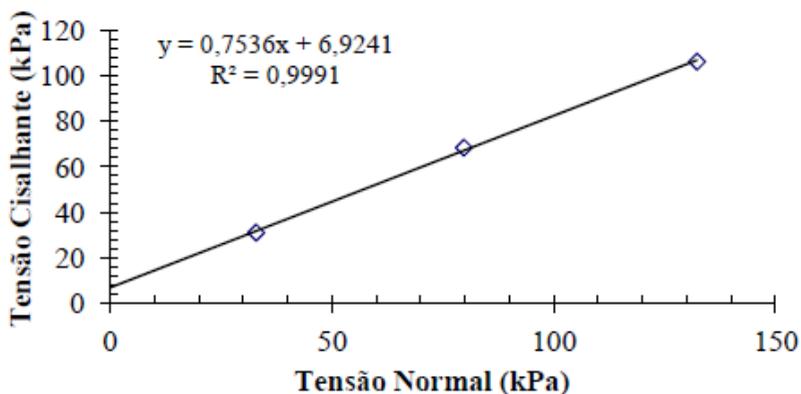


Figura 78. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T2.

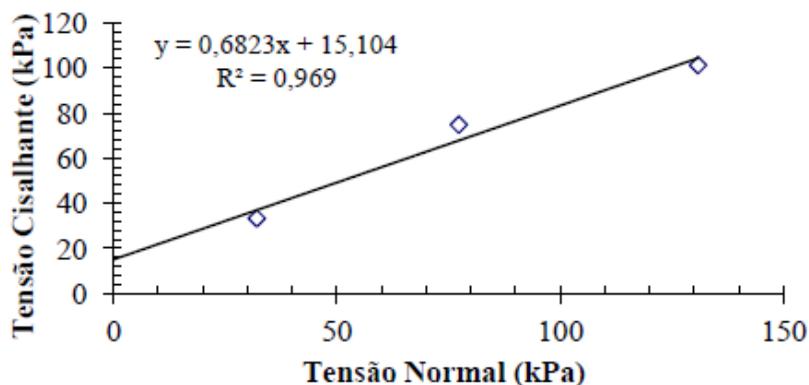


Figura 79. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T3.

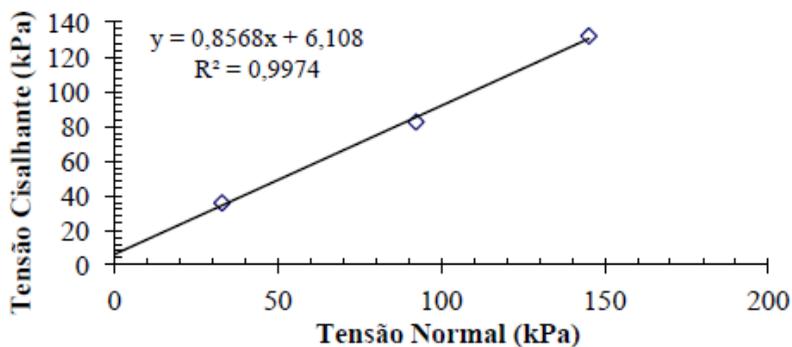


Figura 80. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T4.

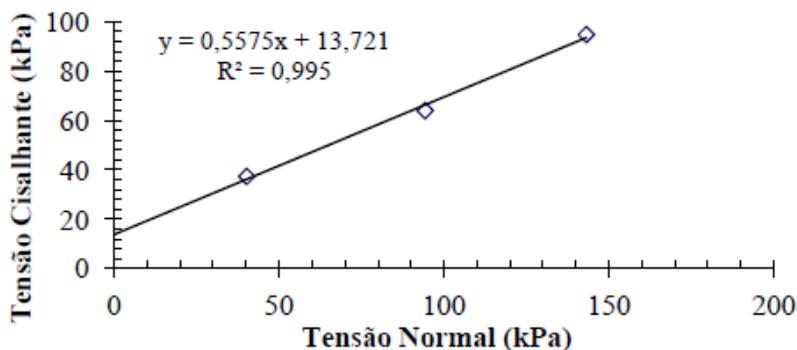


Figura 81. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T5.

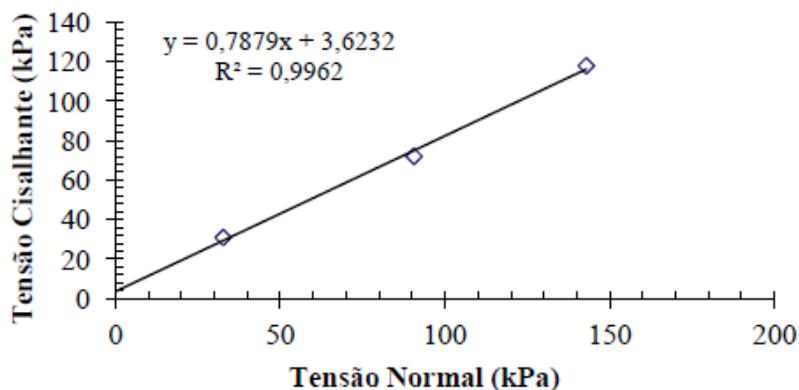


Figura 82. Resultados do ensaio de cisalhamento direto do talude T6.

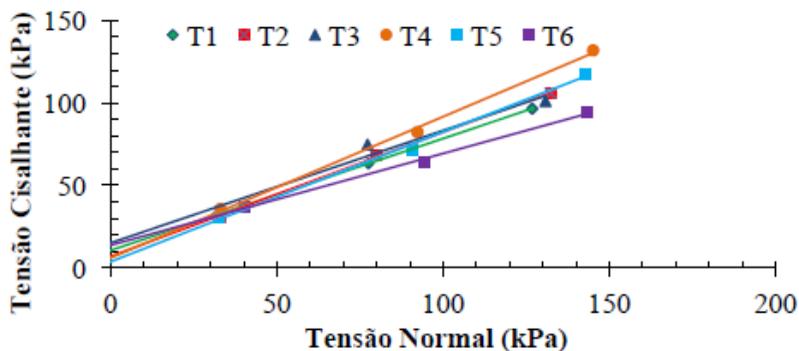


Figura 83. Comparativo dos resultados de cisalhamento.

Em complementação aos dados obtidos de coesão e ângulo de atrito, foram utilizados resultados de outros autores na área de estudo, conforme Tabela 21.

Tabela 21. Parâmetros de resistência de outros autores consultados.

Autor	Ponto de coleta	Resistência ao Cisalhamento Direto - Inundado	
		Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito Interno (φ) (°)
Oliveira et al. (2012)	2	15	31
Raimundo (1998)	1	4,8	35,9
Raimundo (1998)	0	5,2	35,9

Cita-se ainda os estudos de Santos (1997), no qual realizou ensaios de resistência também nos solos de origem sedimentar, unidade geotécnica AQsq, em Florianópolis, cujo resultado foi de coesão nula e ângulo de atrito entre 27° e 29°. Por apresentar esta mesma unidade geotécnica na microbacia de estudo, foi considerado no presente estudo na etapa de extrapolação dos dados. Portanto, os valores máximos e mínimos de coesão e ângulo de atrito da microbacia são respectivamente 15,1(kPa) e 40,6 (°), 0 (kPa) e 29,1 (°).

Os resultados de coesão e ângulo de atrito, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, foram conduzidos por amostras inundadas, conferindo-lhe a condição extrema em simulação em relação à umidade. Não foi realizado ensaios de resistência com a umidade natural, o qual recomenda-se para futuros estudos em comparação aos resultados gerados com as amostras inundadas, possibilitando a verificação dos efeitos de sucção.

Em complemento as Figuras 64 e 71, na etapa de extrapolação dos dados, as Figuras 84 e 85 apresentam respectivamente os resultados de distribuição do ângulo de atrito e peso específico do solo na microbacia de estudo a partir das amostras ensaiadas:

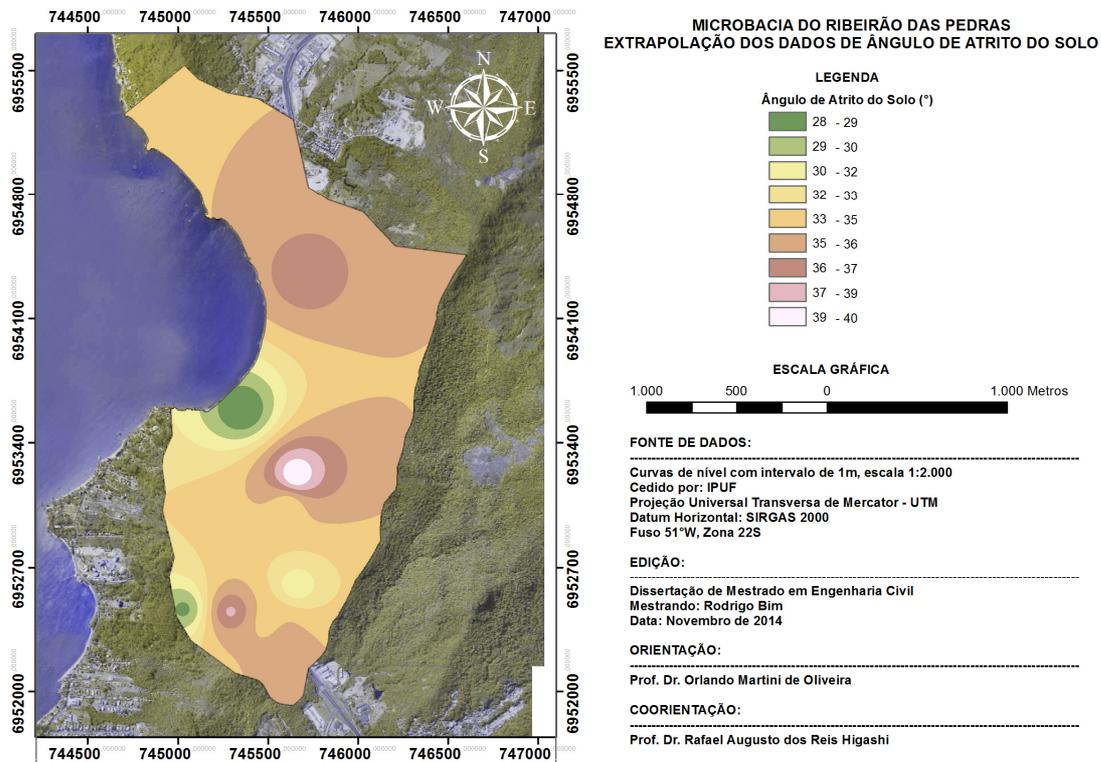


Figura 84. Interpolação dos parâmetros de ângulo de atrito do solo na microbacia do Ribeirão das Pedras.

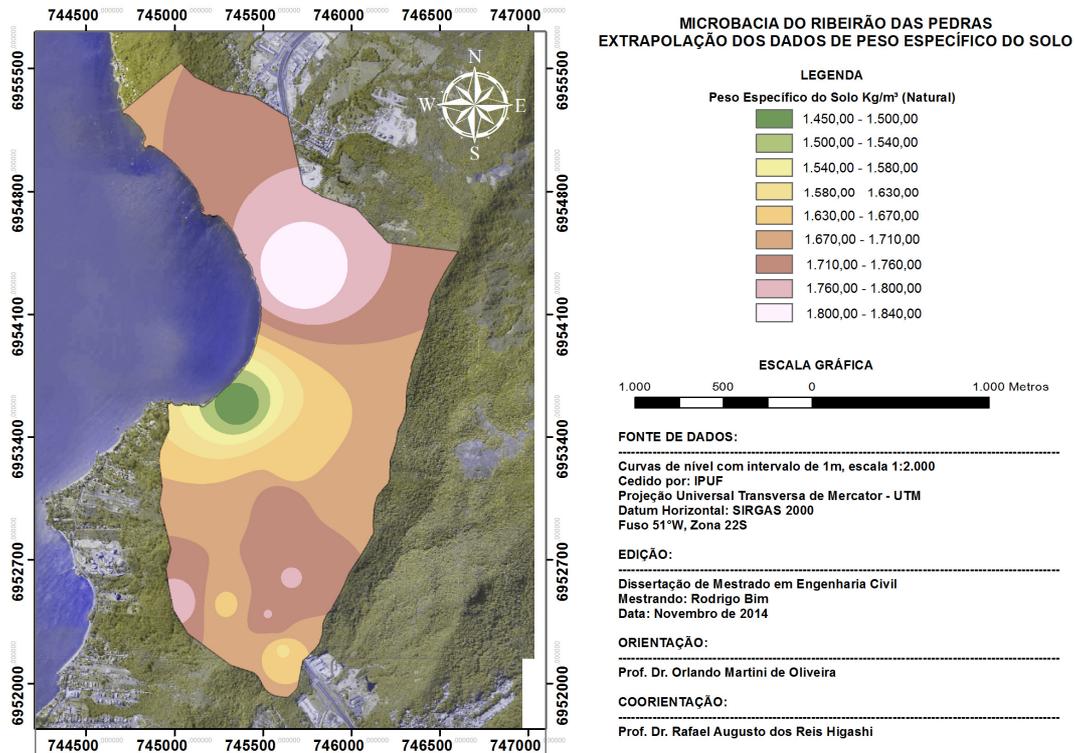


Figura 85. Interpolação dos parâmetros de peso específico do solo na microbacia do Ribeirão das Pedras.

Como citado anteriormente, os resultados de interpolação foram realizados pela ferramenta IDW (Inverse Distance Weighting) na extensão Interpolation do Sapatial Analyst Tools do software ArcGIS®, o que possibilitou que os pontos contendo os parâmetros obtidos nos ensaios (Figuras 84 e 85), sejam interpolados por média ponderada da distância entre valores das amostragens, extrapolando os parâmetros na microbacia.

Os intervalos dos resultados são baseados nas faixas geradas pelo programa, no qual detém um maior número de classes. A forma circular de delimitação de cada classe em alguns pontos não apresentou boa consistência, pois há poucos pontos de amostragens, cuja qualidade de interpolação é dependente de um número maior de informações na área da microbacia.

5.2. RESULTADO DOS PERFIS DE RECONHECIMENTO DO SOLO POR DPL – TOPOSEQUÊNCIAS

Para a formação das toposequências, um conjunto de ensaios distribuídos em uma seção de encosta foi realizada com uso do DPL. A distribuição dos pontos encontra-se na Figura 52 da etapa metodológica.

Apenas duas toposequências foram possíveis de serem executadas na área de estudo em virtude da disponibilidade limitada e da quebra do equipamento, cujas tentativas executadas nos pontos 0 e 9 do mapa de distribuição, representadas no boletim penetrométrico da Figura 88, foram incompletas.

A Tabela 22 apresenta o resumo dos locais ensaiados e seu enquadramento nas respectivas unidades geotécnicas. As seções completas estão discriminadas nas Figuras 86 e 87.

Tabela 22. Resumo dos locais ensaiados com uso do DPL.

Ident.	Ponto de Utilização DPL	Cota Topográfica (m)	Unidade Geotécnica	Coordenada UTM	
				X	Y
TS1 P1	4	43	PVg	745658	6953217
TS1 P2	3	34	Cde	745642	6953243
TS1 P3	2	19	Cde	745603	6953280
TS1 P4	1	11	Cde	745553	6953286
TS2 P5	5	56	PVg	745132	6952477
TS2 P6	6	42	PVg	745167	6952517

Continua

Continuação

TS2 P7	7	32	Cde	745186	6952551
TS2 P8	8	14	Cde	745235	6952563
TS3 P9	9	88	PVg	745339	6952334
TS4 P10	0	20	Cde	745615	6953037

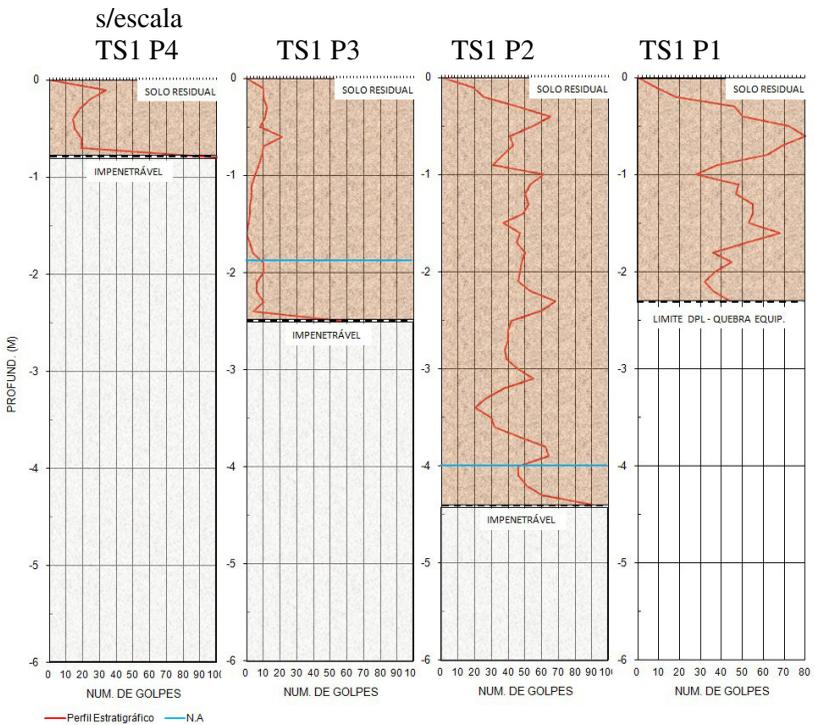
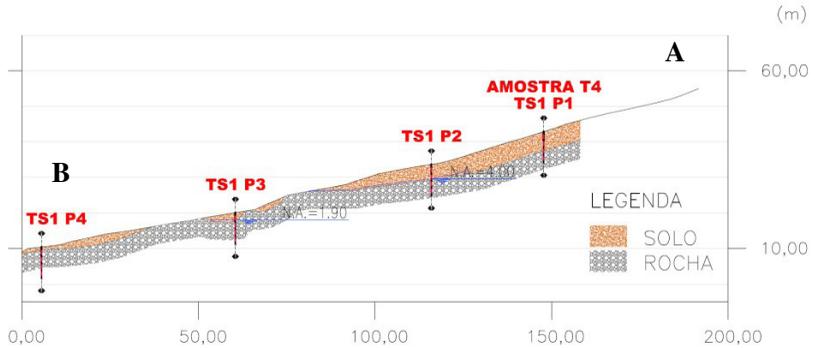


Figura 86. Seção Penetrométrica- Toposequências e boletins dos pontos 1 ao 4.

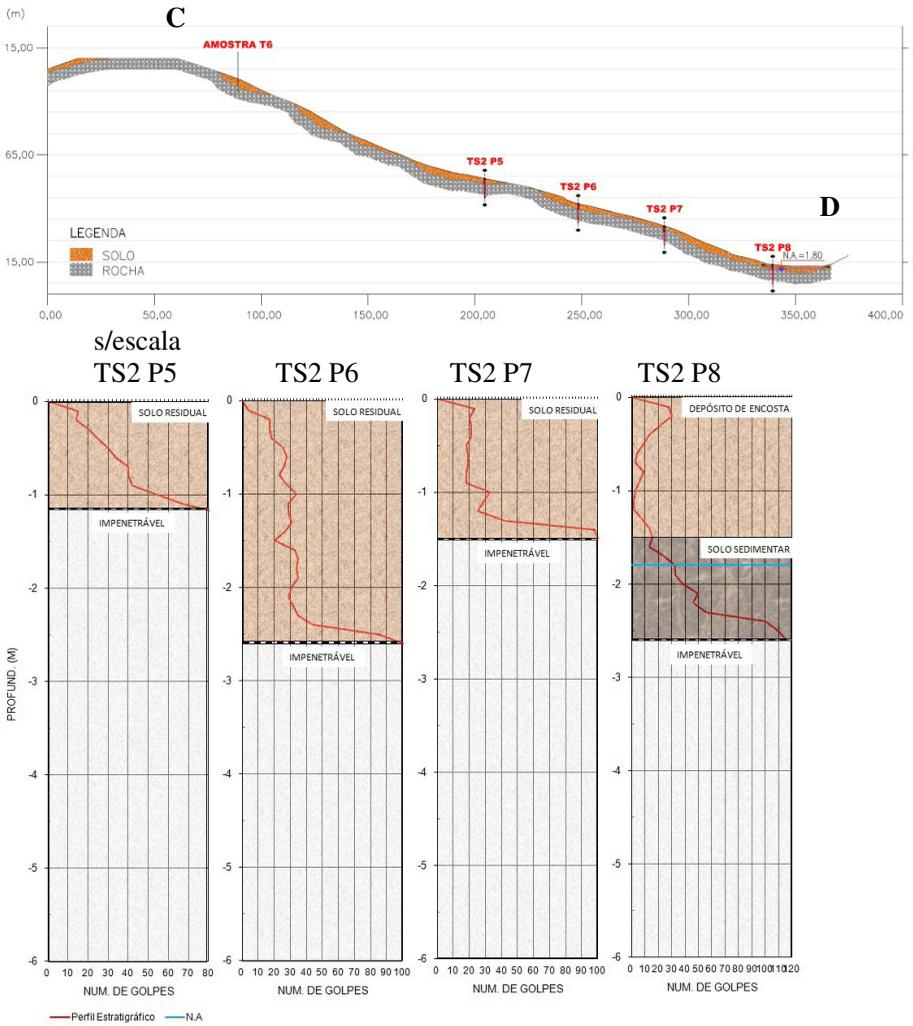


Figura 87. Seção Penetrométrica- Toposequências e boletins dos pontos 5 ao 8.

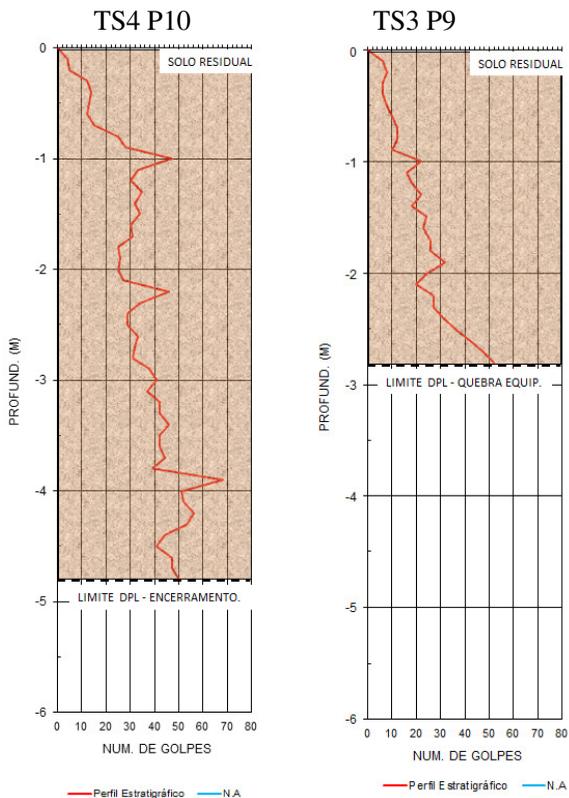


Figura 88. Boletins penetrométricos dos pontos 0 e 9.

Os boletins penetrométricos demonstraram variações de resistência de ponta ao longo do perfil amostrado, que analisados a partir das seções completas (toposequências), além de indicar camadas de solo mais vulneráveis a planos de ruptura, evidenciaram um decréscimo de resistência à penetração nas unidades geotécnicas classificadas como depósitos de encostas (Cde) em comparação aos podzólicos (PVg). A unidade Cde está associada a classe dos Cambissolos, cujo solo não hidromórfico possui textura bastante variável em função do material de origem e da energia de transporte das partículas, ocorrendo nas regiões de transição entre morro e planície. Por apresentar origem coluvionar, há uma maior falta de estrutura no solo, causada pelo movimento relativo da massa, o que pode explicar o decréscimo de resistência a penetração no ensaio realizado.

Foram encontrados níveis de lençol freático nos pontos TS1 P3 e TS1 P4, região de afloramentos de rocha sã, na transição das lajes com

o solo, favorecido pela baixa permeabilidade e consequente a formação de lâmina da água, principalmente após períodos de chuva. Nesta região observou-se também um decréscimo de resistência à penetração, podendo caracterizar escorregamentos rasos no contato solo-rocha.

5.3. RESULTADO DO MAPA GEOTÉCNICO FINAL

Baseado no mapa preliminar e após as confirmações das campanhas e amostragens de campo, permitiu-se os ajustes finais para uma melhor caracterização e precisão das unidades geotécnicas anteriormente levantadas. O mapa geotécnico final da Figura 89, identifica a presença de 4 unidades geotécnicas, que associadas ao relevo, classificaram-se em:

- Areias Marinhas (AQsq): Região de planície;
- Cambissolo Depósito de Enconsta (Cde): Região de transição entre morro e planície de relevo suave à ondulado;
- Podzólico Vermelho-Amarelo de Substrato Granito (PVg): Ocorrência nas regiões de relevo forte ondulado a escarpado;
- Podzólico Vermelho-Amarelo de Substrato Diabásio (PVd): Dividi-se com a ocorrência dos Podzólicos Vermelho-Amarelo de Substrato Granito, e são associados a diques de diabásio que cortam os corpos graníticos da ilha, desde a região de relevo suave à escarpado.

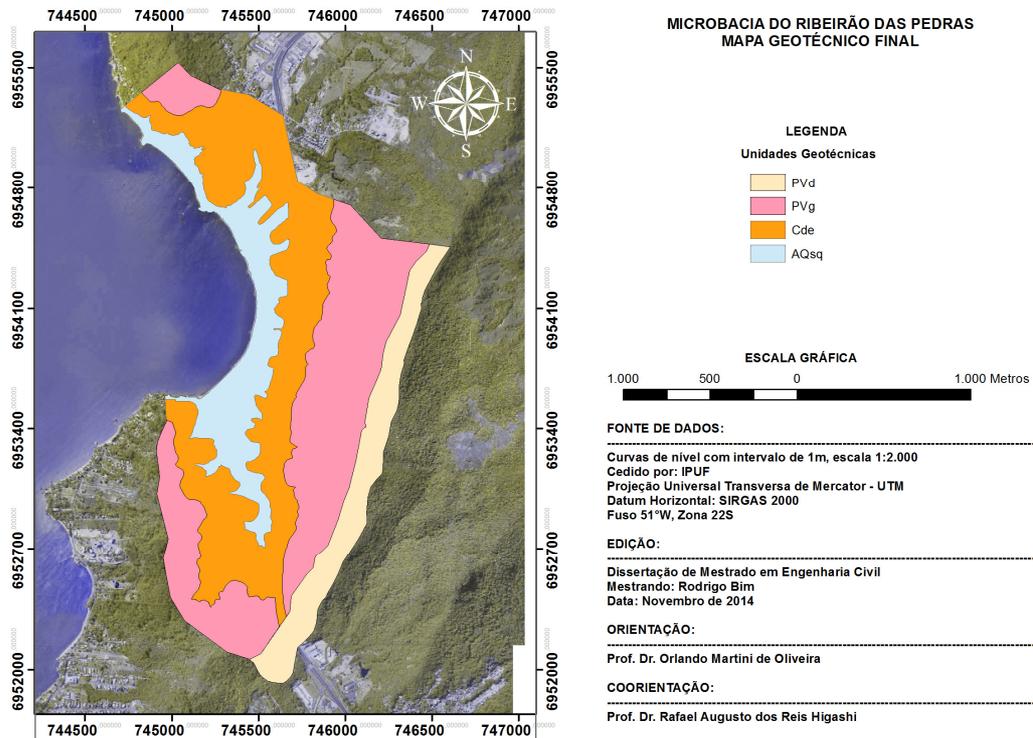


Figura 89. Mapa Geotécnico Final do Ribeirão das Pedras.

5.4. RESULTADO DAS CORRELAÇÕES ENTRE CHUVA E ESCORREGAMENTOS

Conforme citado na etapa de desenvolvimento metodológico, serão apresentados nas Figuras 90, 91, 92, 93 e 94 os resultados preliminares utilizados na análise das correlações a partir da contraposição da chuva horária com os acumulados de 1,3,7,15,30,60,90,120 e 180 dias.

Percebe-se nos gráficos que de 3 à 15 dias de chuvas há uma boa distinção entre eventos com e sem ocorrência de escorregamentos.

Conforme Raimundo (1998), outra análise possível de ser realizada ao observar estes gráficos está relacionada a magnitude das precipitações e sua evolução com o acréscimo da chuva acumulada, definindo-se um patamar característico para a ocorrência inevitável de escorregamentos, que no caso da microbacia do Ribeirão das Pedras concentraram-se no patamar a partir dos 250mm para chuvas de 3 dias. Para acumulados de 7 e 15 dias, há alterações nas dispersões, porém ainda com definições do patamar entre o início das ocorrências e os eventos em sua ausência, admitindo-se respectivamente acumulados de 280 e 350mm.

Para o presente estudo, o melhor resultado das dispersões para chuvas de 24 horas foi o acumulado de 250mm, no qual claramente caracterizou o patamar das ocorrências, adotando-se o critério de maior segurança, pois os demais ficaram muito próximos ou sobrepostos, além de possuírem acumulados com valores superiores, ou seja, contra a segurança.

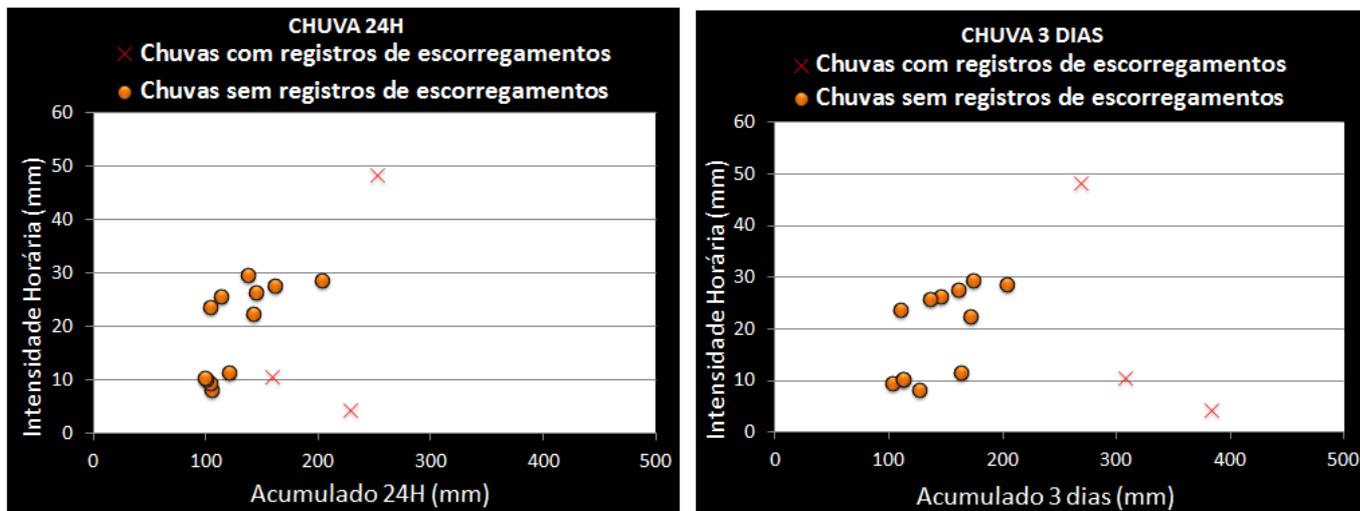


Figura 90. Gráfico de dispersão para acumulados de 1 e 3 dias.

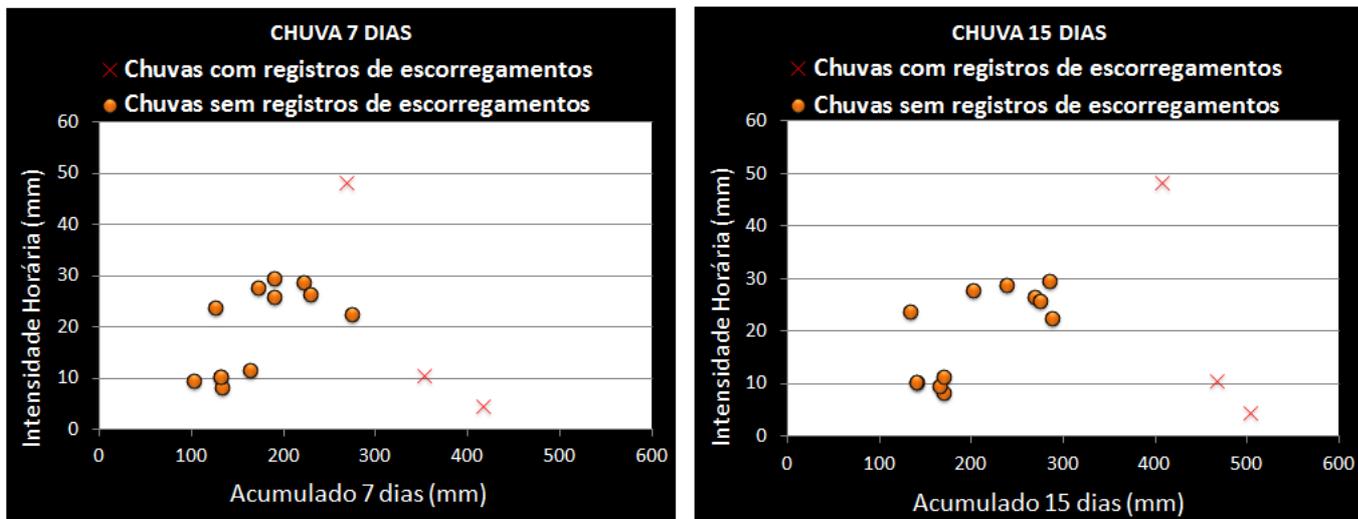


Figura 91. Gráfico de dispersão para acumulados de 7 e 15 dias.

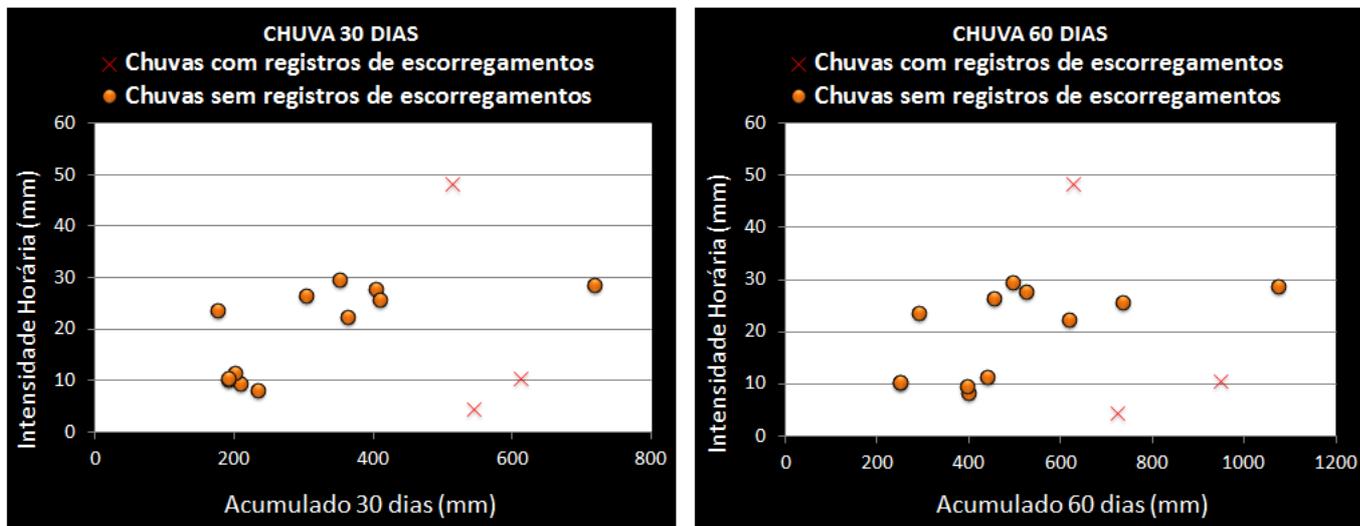


Figura 92. Gráfico de dispersão para acumulados de 30 e 60 dias.

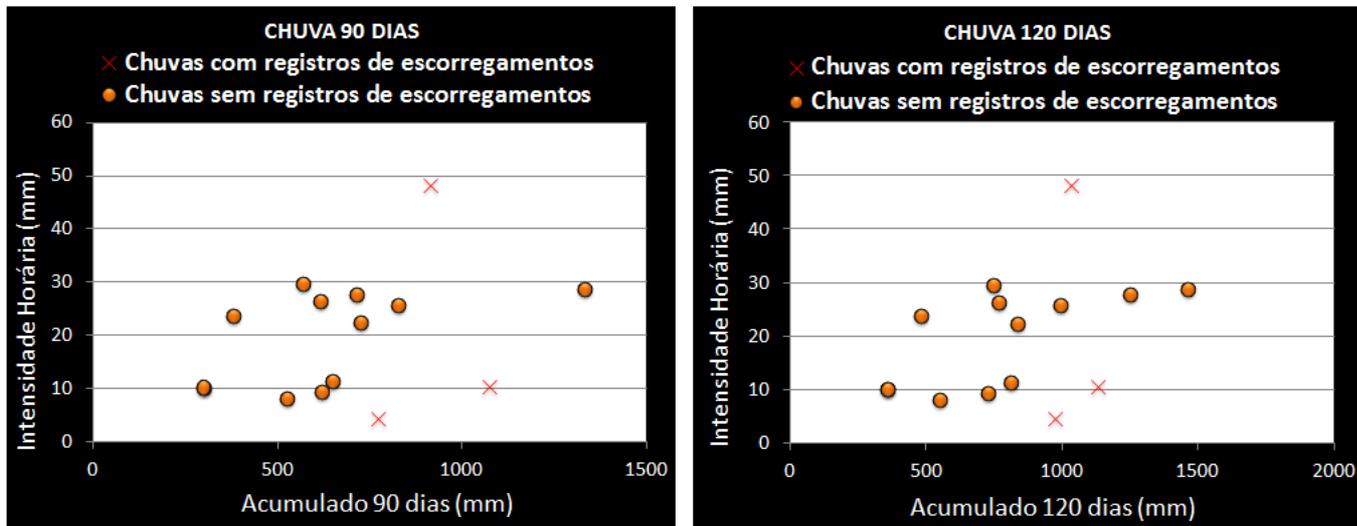


Figura 93. Gráfico de dispersão para acumulados de 90 e 120 dias.

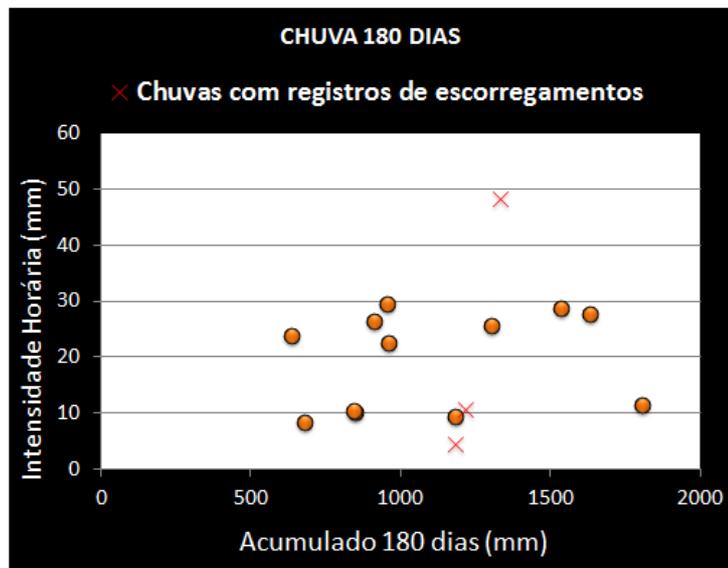


Figura 94. Gráfico de dispersão para acumulados de 180 dias.

5.5. RESULTADO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE

Como resultado final do presente estudo, optou-se por apresentar o mapa de susceptibilidade de forma indireta, ou seja, com o acréscimo gradual da pluviometria em dias antecessores ao da chuva crítica (que ocasionou o escorregamento), exemplificando o uso dos fatores de segurança desenvolvidos no estudo. Deste modo, há possibilidade de um acompanhamento da evolução e reclassificação da susceptibilidade ao longo do tempo, baseado no acumulado de longos períodos de chuva ou de grandes intensidades em curto prazo.

Conforme Tabela 23 e Figuras 95 à 106, são representados 6 cenários a partir dos eventos ocorridos em 2008 e 2013, com chuvas diárias acima de 100 mm para a predição de escorregamentos.

Tabela 23. Cenários de comparação dos Fatores de Segurança para predição de escorregamentos pelos métodos adaptados de Tatizana et al. (1987) e Guidicini e Iwasa (1976) gerados a partir do Shalstab para os eventos de novembro de 2008 e setembro de 2013.

Cenários	Data do Evento	Fator de Segurança (FS)	
		Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987)	Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976)
1	21/11/2008	30.070,50	1,08
2	22/11/2008	39,3	0,99
3	23/11/2008	1,0	0,86
4	20/09/2013	207.291,6	1,96
5	21/09/2013	2.643,81	1,67
6	22/09/2013	88,1	1,42

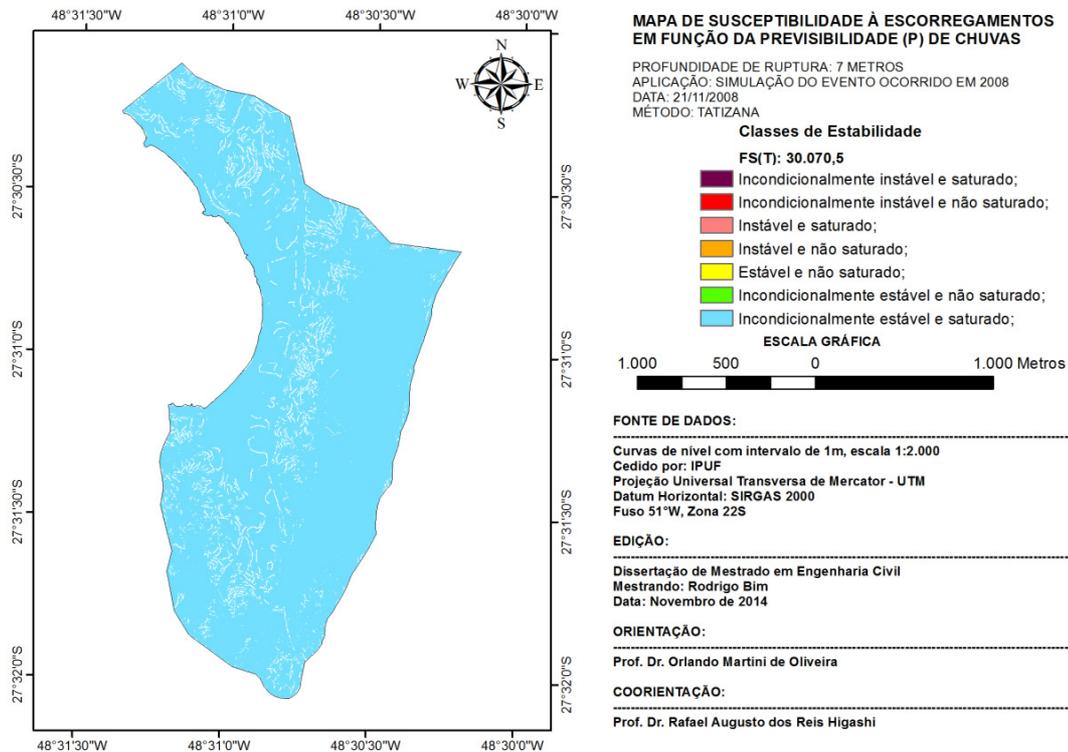


Figura 95. Cenário 1 – Modelo Adaptado de Tatziana et al. (1987).

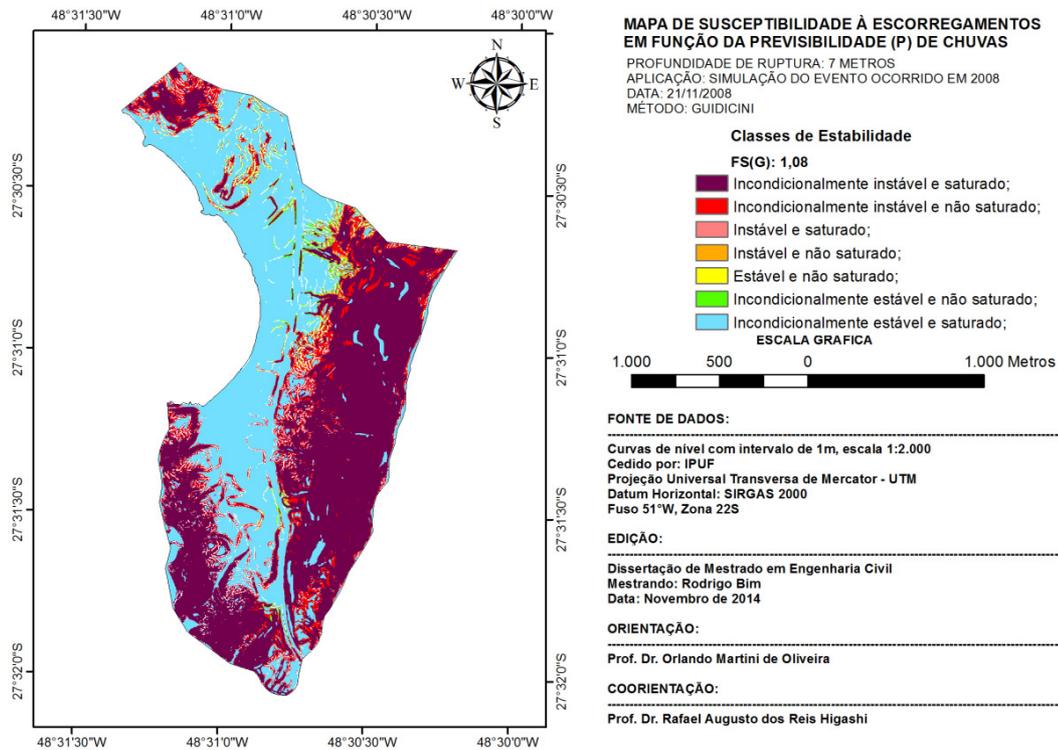


Figura 96. Cenário 1 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).

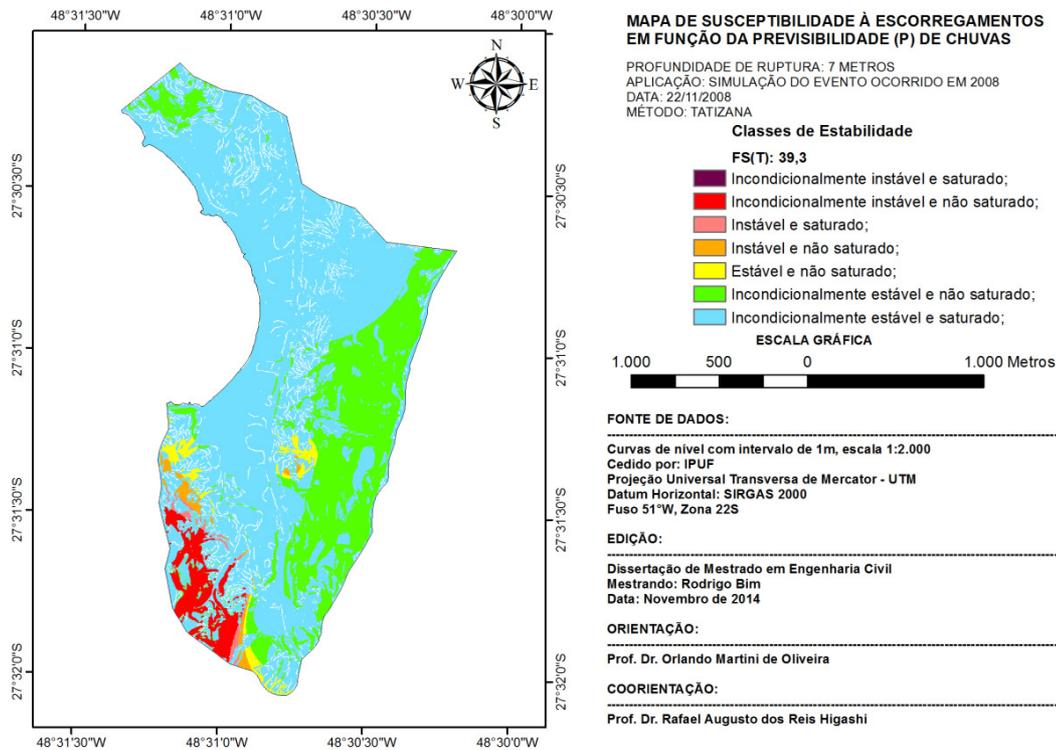


Figura 97. Cenário 2 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987).

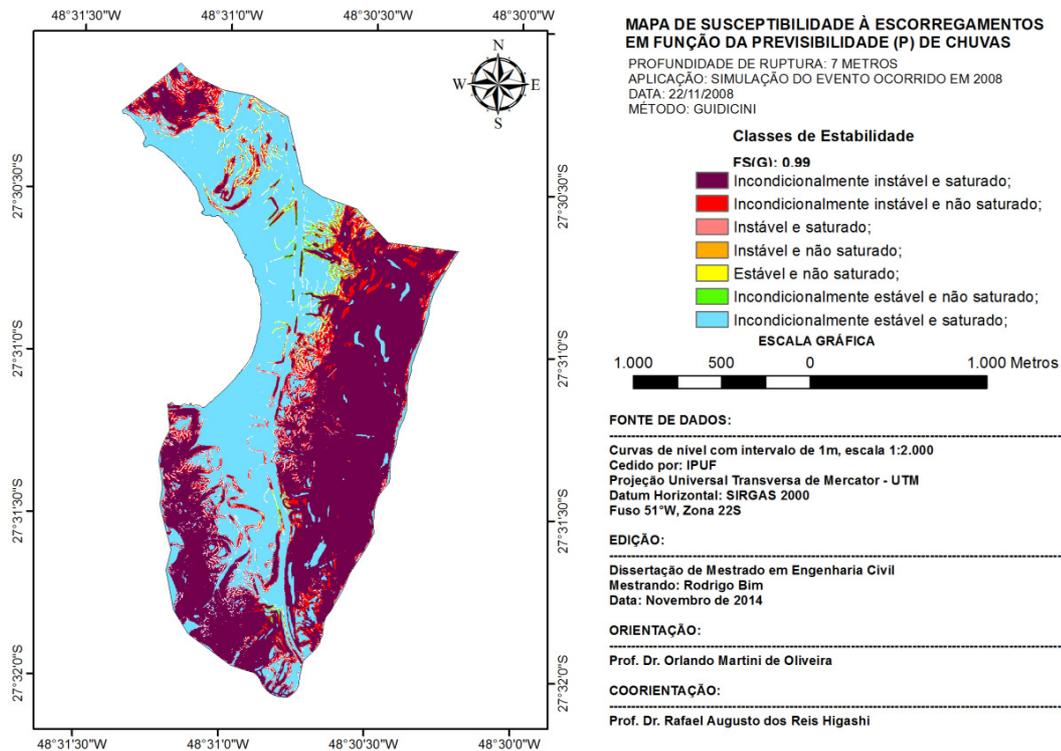


Figura 98. Cenário 2 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).

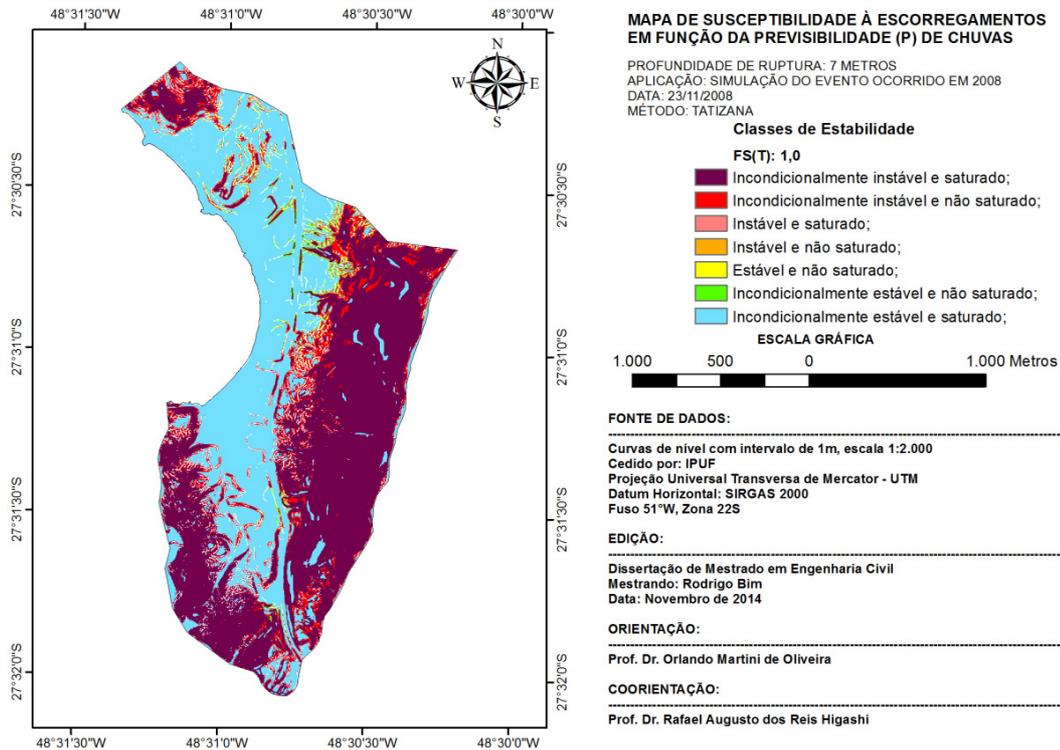


Figura 99. Cenário 3 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987).

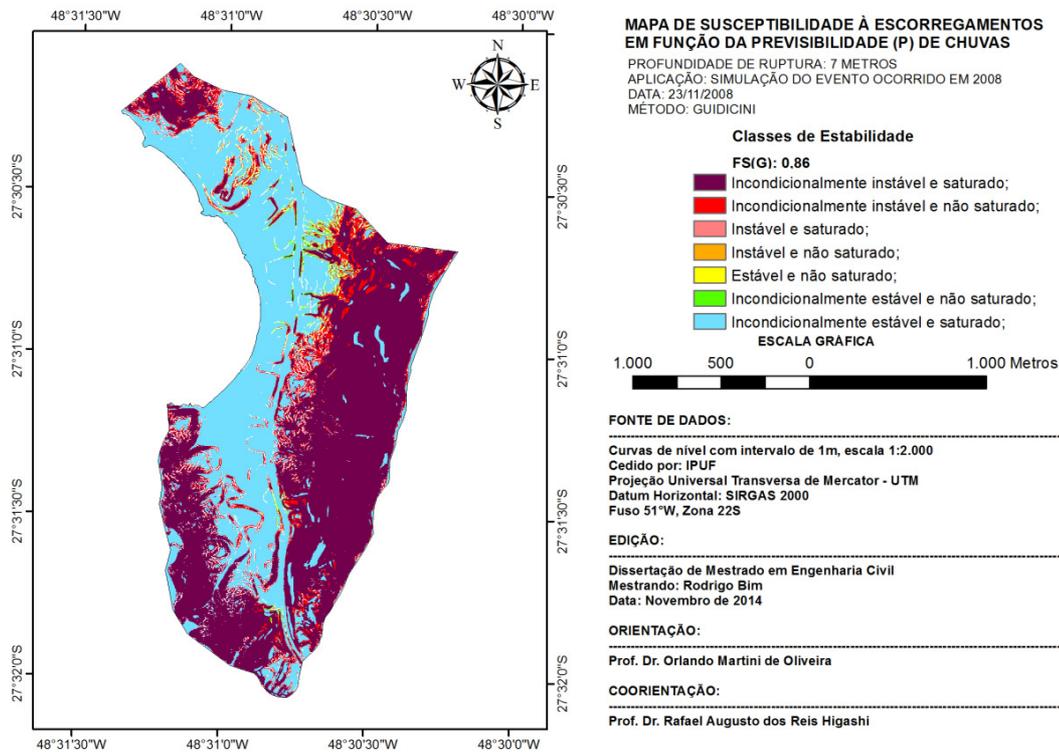


Figura 100. Cenário 3 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).

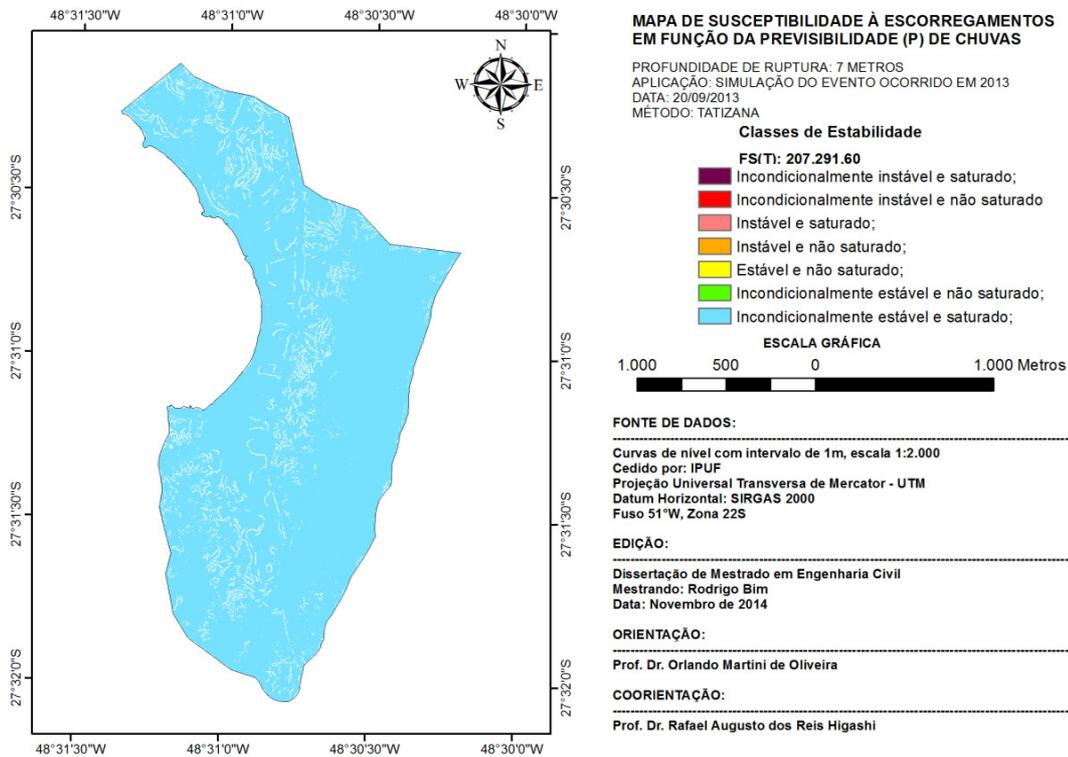


Figura 101. Cenário 4 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987).

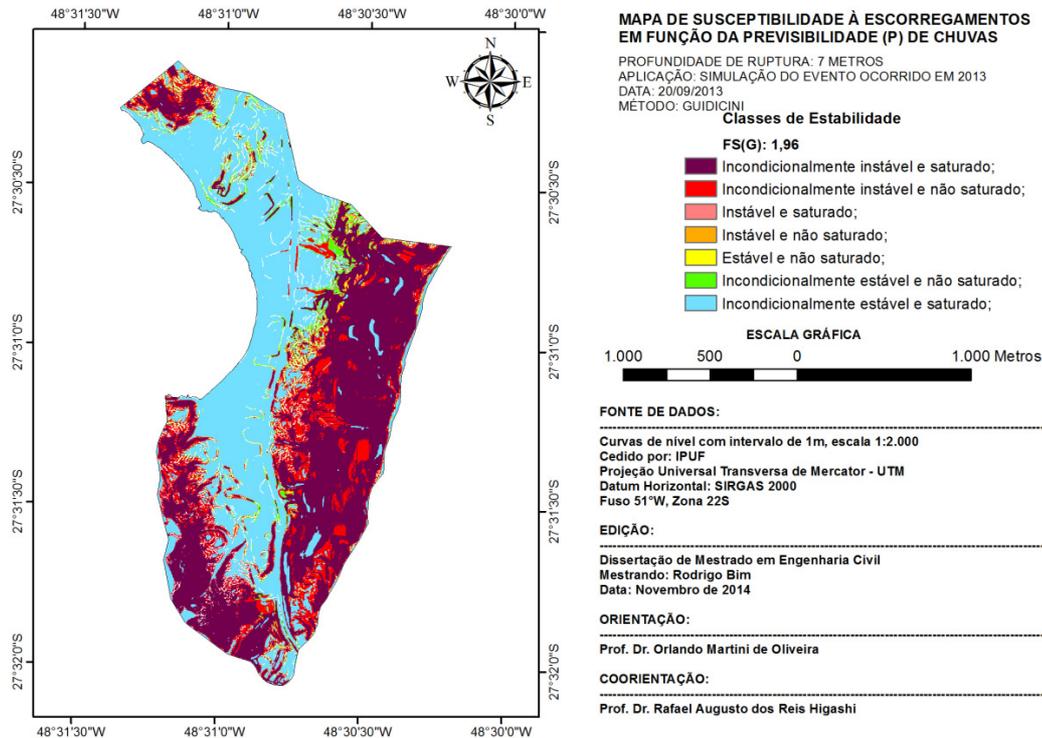


Figura 102. Cenário 4 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).

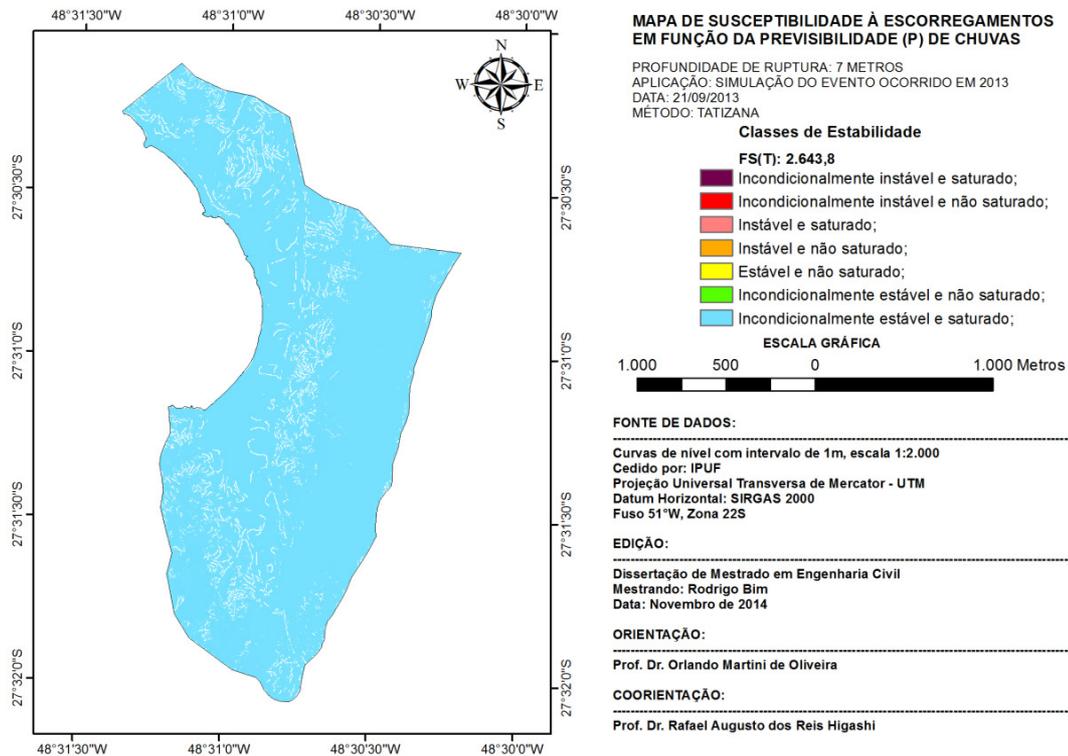


Figura 103. Cenário 5 – Modelo Adaptado de Tatizana et al (1987).

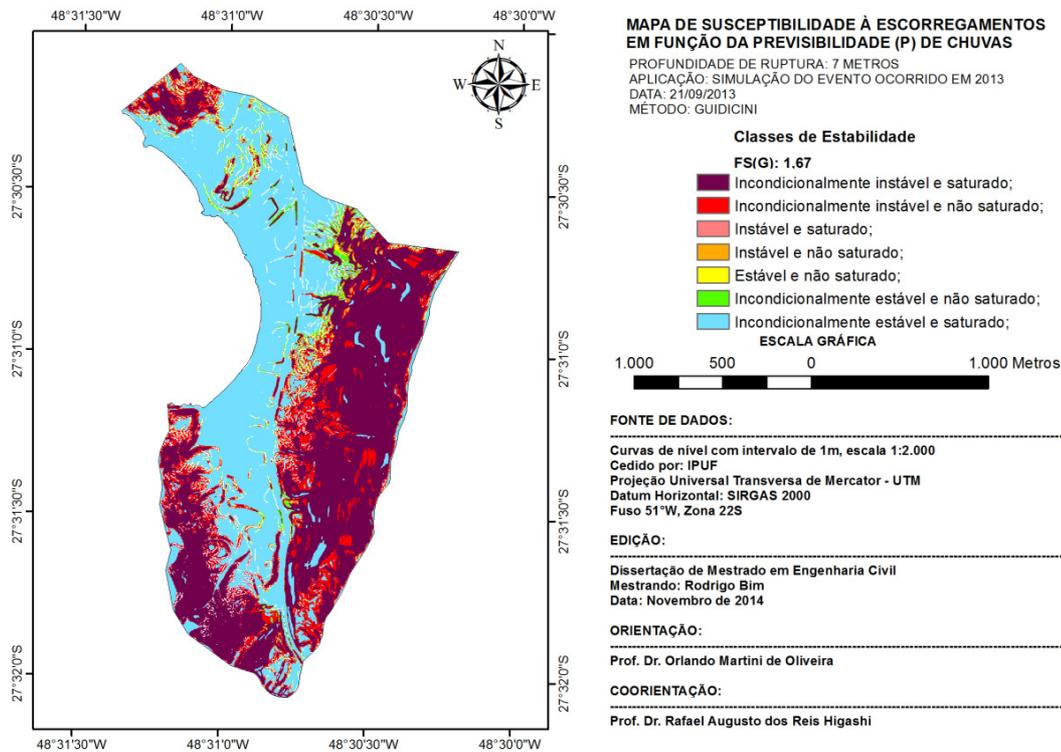


Figura 104. Cenário 5 – Modelo Adaptado de Guidicini e Iwasa (1976).

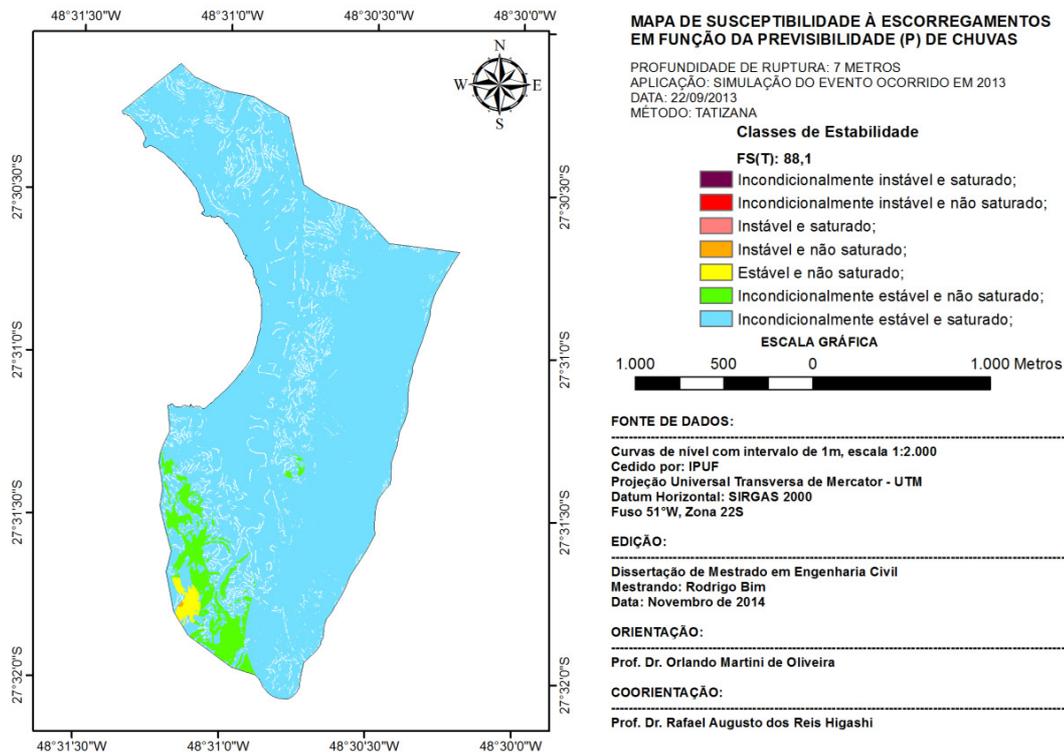


Figura 105. Cenário 6 – Modelo Adaptado de Tatizana et al. (1987).

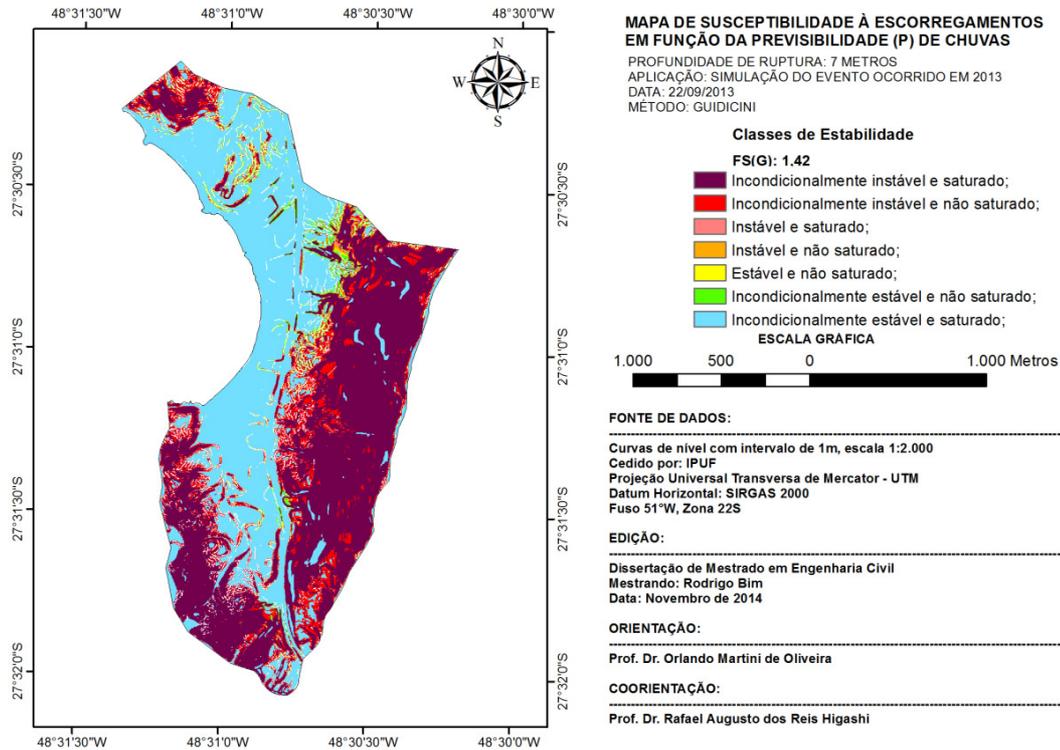


Figura 106. Cenário 6 – Modelo Adaptado de Guidicini Iwasa (1976).

Os cenários demonstrados no mapa final de susceptibilidade em função da Previsibilidade (P), Figuras 95 à 106, compararam os Fatores de Segurança (FS) para predição de escorregamentos pelos métodos adaptados de Tatizana et al. (1987) e Guidicini e Iwasa (1976) gerados a partir do Shalstab no período de 3 dias antecessores aos eventos de maior pluviometria em dois períodos distintos, ocorridos em novembro de 2008 e setembro de 2013, obedecendo o critério de melhor correlação de chuvas antecessoras com os eventos de escorregamentos históricos na região.

A Previsibilidade (P), a partir da divisão entre taxa de recarga (q) e o fator de segurança (FS) obtido pelos limites de cada modelo de correlação, evidenciou a relação direta com a transmissibilidade do solo, principalmente na Figura 97 no qual a classe de estabilidade mais crítica, evoluída no período de acréscimo de pluviometria, delimitou-se primeiramente nas regiões de elevada permeabilidade.

Em ambos os modelos adaptados de correlação desenvolvidos neste trabalho, chegou-se aos níveis críticos de susceptibilidade a escorregamentos dependentes da variação pluviométrica, no qual o modelo de Guidicini e Iwasa (1976) aparentemente foi mais conservador ao atingir mais rapidamente o nível crítico em suas faixas de probabilidade em comparação ao modelo de Tatizana et al. (1987).

Em complementação ao mapa final de susceptibilidade em função da Previsibilidade (P) de chuvas, será apresentado no anexo A ilustrações de seu uso com fator de segurança crítico (FS=1,00) cruzando com imagens de ocupação do solo na microbacia, assim como o mapa geotécnico final, objetivando a sua espacialização em formato imersivo em 3 dimensões, no qual é possível destacar os locais com maior proximidade as áreas já antropizadas, assim como o local de monitoramento do pluviômetro.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pôde-se constatar que a microbacia do Ribeirão das Pedras está submetida a uma região potencialmente sujeita a desastres naturais relacionados a movimentos de massa.

Além das características geológicas, pedológicas geomorfológicas e climatológicas, descritas no presente trabalho e propícia aos movimentos das vertentes, destacam-se, de maneira conclusiva, as correlações a partir do cruzamento entre o número de escorregamentos e dados pluviométricos da série histórica no município de Florianópolis, no qual a microbacia está inserida.

Em relação aos estudos apresentados, algumas considerações se fazem necessárias para melhor esclarecer os critérios adotados, tendo em vista que para determinados assuntos o trabalho abordou de forma sucinta, mas obedecendo aos objetivos do qual se propunha. Neste sentido, desprezaram-se nas análises os dados de vegetação, efeitos orográficos, uso de parâmetros de solo em horizontes mais superficiais, umidade natural para os ensaios de resistência e simulação com planos de ruptura em diferentes profundidades.

Entre a década de 70 até junho de 2014, a capital catarinense apresentou 614 ocorrências de escorregamentos, distribuídos entre solo, rocha e sistemas mistos (solo e rocha), o que representa respectivamente 81%, 16% e 3% da totalidade apurada no estudo.

Ao cruzar informações das ocorrências com dados pluviométricos, observou-se que 84% dos escorregamentos ocorreram com intensidades de chuva maior ou igual a 100 mm em 24 horas.

O acumulado de chuva mensal entre os meses de menor e maior incidência pluviométrica (meses de julho à dezembro), desde o início das medições históricas, a partir de 1911 até 2014, indicaram extremos de chuva com índices acumulados no mês superando a marca de 600 mm.

Destaca-se o evento pluviométrico ocorrido em 2008 que, dentre toda a série histórica já registrada, não houve acumulado superior no período.

Os extremos pluviométricos ocorridos em 1991 e 1995 foram semelhantes ao ano de 2008, porém com recarga de chuva inferior a partir do mês de julho.

Conclui-se ainda que o tempo de recorrência para extremos de chuva acima de 300 mm, acumulados em um mês, mais que dobrou nas últimas quatro décadas, despertando a necessidade em se conhecer áreas

susceptíveis a movimentos de massa e estabelecer mecanismos preventivos.

Há grande necessidade de se ter instalado uma rede de pluviômetros, tendo em vista que as variações apuradas no estudo chegaram a alcançar 50% de diferença entre as estações pluviométricas de Santo Antônio de Lisboa (instalada na microbacia) e Carijós (estação equidistante apenas 7 km), demonstrando importante parcela atribuída a efeitos orográficos a ser considerada para futuros monitoramentos.

Foi possível identificar quatro unidades geotécnicas na microbacia de estudo com ênfase aos PVg e Cde de maior ocorrência e concentração nas áreas de maior susceptibilidade a movimentos de massa.

A obtenção dos parâmetros do solo foi atribuída ao Horizonte C de maior espessura, sendo classificados como argilosos e siltosos altamente elásticos e compressivos, sujeitos a grandes variações volumétricas com densidade entre 2,65 à 2,75 g/cm³.

Quanto a resistência ao cisalhamento (amostra inundada do solo), apresentou-se coesão variando 3,6 à 15,1 kPa e ângulo de atrito 29,1 à 40,6°.

A condutividade hidráulica das amostras de solo nos ensaios de permeabilidade variou de $2,39E^{-1}$ à $1,4E^{-4}$.

Os boletins penetrométricos, a partir das toposequências, demonstraram variações de resistência de ponta ao longo do perfil amostrado, indicando camadas de solo mais vulneráveis a planos de ruptura, principalmente nas unidades geotécnicas classificadas como depósitos de encostas (Cde) em comparação aos podzólicos (PVg). A unidade Cde por apresentar origem coluvionar há uma predisposição maior de movimentação pela falta de estrutura no solo, o que pode explicar o decréscimo de resistência a penetração no ensaio realizado.

Foram encontrados níveis de lençol freático nos pontos de afloramentos de rocha sã, na transição das lajes com o solo, favorecido pela baixa permeabilidade e conseqüente a formação de lâmina da água, principalmente após períodos de chuva. Nestes locais houve um decréscimo de resistência à penetração, podendo caracterizar escorregamentos rasos no contato solo-rocha.

Em relação as correlações entre chuvas e escorregamentos, foram obtidas pelos modelos adaptados de Tatizana et al. (1987) e Guidicini e Iwasa (1976) permitindo renovação dos dados de forma contínua para análises de curto e longo prazo.

Ao observar a magnitude das precipitações e sua evolução em curto prazo, foi possível concluir que o patamar característico para a

ocorrência de escorregamentos na microbacia do Ribeirão das Pedras terá início a partir dos 250mm de chuvas acumuladas em 3 dias.

A análise em longo prazo ficou condicionada ao acumulado mensal a partir do mês de menor volume de chuvas até atingir as faixas de probabilidade de 100, 50 e 33% de ocorrência de escorregamentos determinado no estudo.

O modelo Shalstab produziu resultados de susceptibilidade a partir do abastecimento de informações de elementos aparentemente fixos do meio (coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo), e de elementos transitórios (topografia), necessitando simulações de planos de ruptura em profundidades pré-determinadas, no qual simulou-se apenas na cota de 7 metros a partir da profundidade média do escorregamento ocorrido na microbacia em 2008.

Desta maneira, se qualquer um dos elementos do Shalstab for modificado a avaliação terá resultados divergentes. Neste quesito, é de suma responsabilidade manter algumas variáveis transitórias sempre atualizadas, lembrando que a confiabilidade dos resultados leva em consideração a delimitação de áreas de contribuição e declividade geradas pelo modelo digital do terreno, podendo ser menor se não for respeitado uma escala adequada na escolha das restituições topográficas, que no caso da microbacia de estudo foi de 1:2000.

O mapa final de susceptibilidade foi gerado pelo modelo determinístico Shalstab, agregando o termo Previsibilidade (P) a partir da divisão entre taxa de recarga (q) e o fator der segurança (FS) calculado a partir da quantidade de chuva acumulada, calibrada pelos modelos de correlação.

A partir dos 6 cenários de susceptibilidade à escorregamentos em função da previsibilidade de chuvas, observou-se a relação direta com a transmissibilidade do solo, que além de outras características físico-morfológicas carregadas em cada pixel do mapa, teve o contorno de demarcação da classe de estabilidade mais crítica nas regiões de elevada permeabilidade.

Os modelos adaptados de correlação desenvolvidos neste trabalho demonstraram seus níveis críticos de susceptibilidade a escorregamentos dependentes da variação pluviométrica, no qual o modelo de Guidicini e Iwasa (1976) atingiu mais rapidamente o nível crítico em suas faixas de probabilidade em comparação ao modelo de Tatizana et al. (1987).

O mapa final de susceptibilidade criado com uso de fator de segurança em função da previsibilidade de chuvas pode ser extrapolado para uso no município de Florianópolis, pois utilizou-se a correlação entre chuvas e escorregamentos de sua própria base histórica. Contudo,

a análise de parâmetros de solo terá que ser reavaliada para cada local de interesse, assim como suas características topográficas e geotécnicas.

Os resultados gerados, de modo geral, atenderam satisfatoriamente aos objetivos inovadores ao qual se propunha, porém a validação do modelo necessitaria de um número maior de amostragens.

Em caráter conclusivo, demonstrou-se ser aplicável aos Planos Municipais de Risco – PMRRs, monitoramento de encostas e sistemas de alerta, pois o mapa de susceptibilidade agregou importante parcela na antecipação e renovação dos dados, tendo sua determinação vinculada à quantidade de chuva acumulada, registrada por pluviômetro, e a instantânea, prevista para ocorrer em 24, 48 e 72 horas a partir de boletins meteorológicos.

Em relação a aplicabilidade, além do reconhecimento dos locais mais susceptíveis a escorregamento, o presente estudo possibilita ao gestor público a tomada de medidas de alerta em setores ocupados e com alta susceptibilidade a movimentos de massa durante o evento pluviométrico, ou simplesmente com projeções das previsões de chuva, aproveitando a antecipação informada por radares meteorológicos, o que aceleraria o processo de transmissão da informação, preparo das equipes e desocupação das áreas críticas.

Neste sentido o mapeamento, como aqui proposto, demonstra uma importante parcela para continuidade e aprimoramentos em estudos futuros, principalmente no que diz respeito ao monitoramento de encostas, que somadas e a elaboração de sistemas de alerta, poderão ser peças fundamentais na redução de vítimas por este tipo de fenômeno.

ANEXO A

Neste ANEXO estão apresentados ilustrações dos mapas produzidos no estudo diretamente aplicadas em formato imersivo (3 dimensões) com o auxílio do Google Earth® e fotos aéreas do local conforme segue:

- Ilustração do mapa geotécnico final da microbacia do Ribeirão das Pedras sobrepostas com imagens de ocupação do solo (p. 204);

- Ilustração do mapa final de susceptibilidade em função da Previsibilidade (P) de chuvas com fator de segurança crítico (FS=1,00) da microbacia do Ribeirão das Pedras sobrepostas com imagens de ocupação do solo (p. 205);

- Ilustração da sobreposição do mapa geotécnico final, mapa final de susceptibilidade em função da Previsibilidade (P) de chuvas com fator de segurança crítico (FS=1,00) e imagens de ocupação do solo da microbacia do Ribeirão das Pedras (p. 206);

- Ilustração com indicação dos mapas de susceptibilidade e geotécnico em sobreposição a imagens de ocupação do solo dos locais com maior proximidade das áreas já antropizadas, fotos aéreas, assim como o local de monitoramento do pluviômetro (p. 207 à 210);



Ilustração 1: Mapa geotécnico final da microbacia do Ribeirão das Pedras sobrepostas com imagens de ocupação do solo.

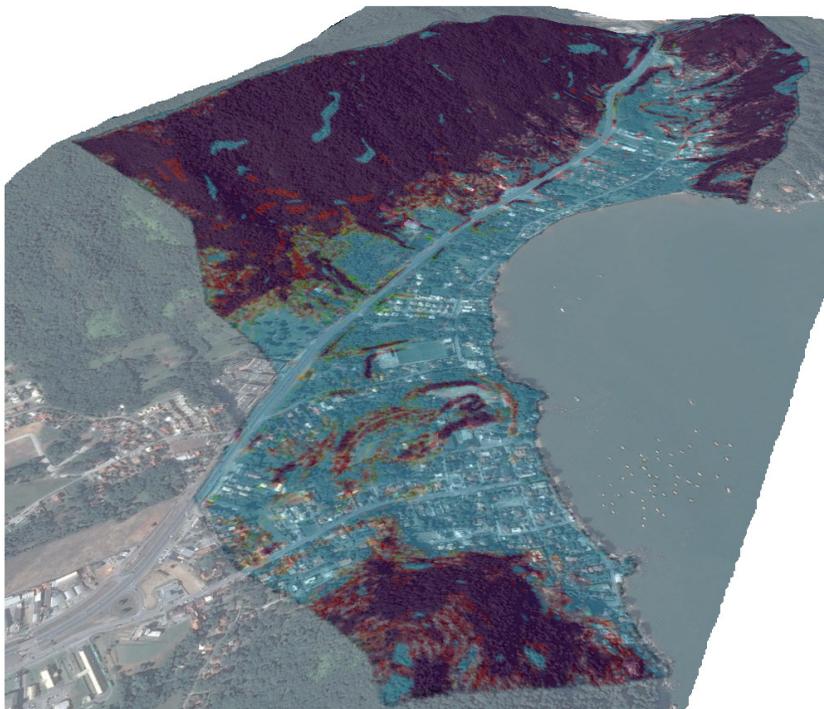


Ilustração 2: Mapa final de susceptibilidade em função da Previsibilidade (P) de chuvas com fator de segurança crítico (FS=1,00) da microbacia do Ribeirão das Pedras sobrepostas com imagens de ocupação do solo.

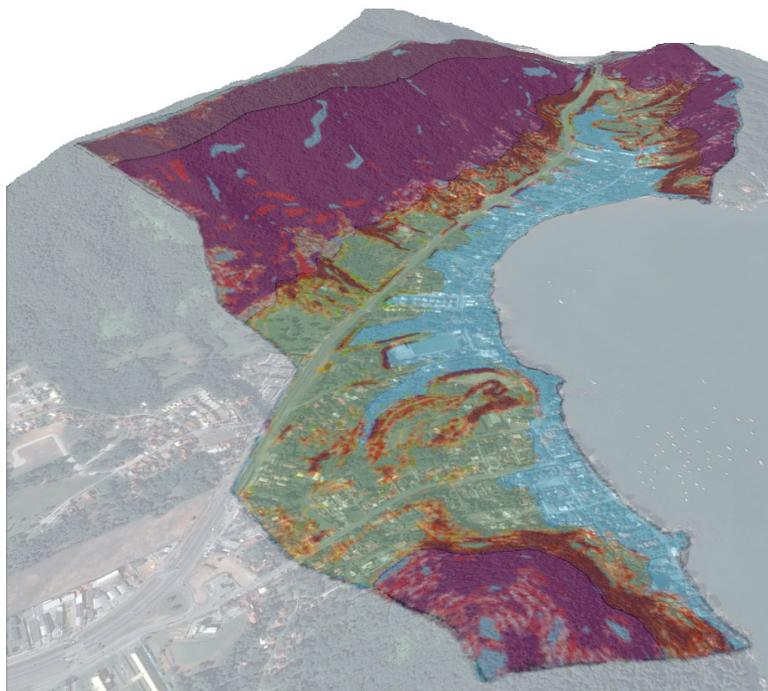


Ilustração 3: Sobreposição do mapa geotécnico final, mapa final de susceptibilidade em função da Previsibilidade (P) de chuvas com fator de segurança crítico (FS=1,00) e imagens de ocupação do solo da microbacia do Ribeirão das Pedras.

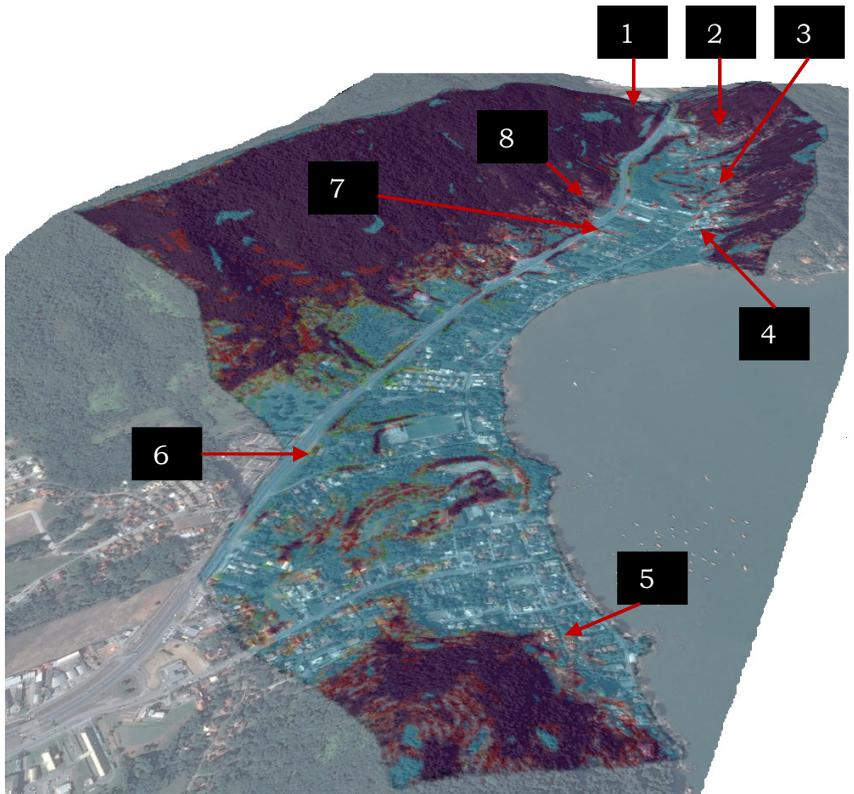
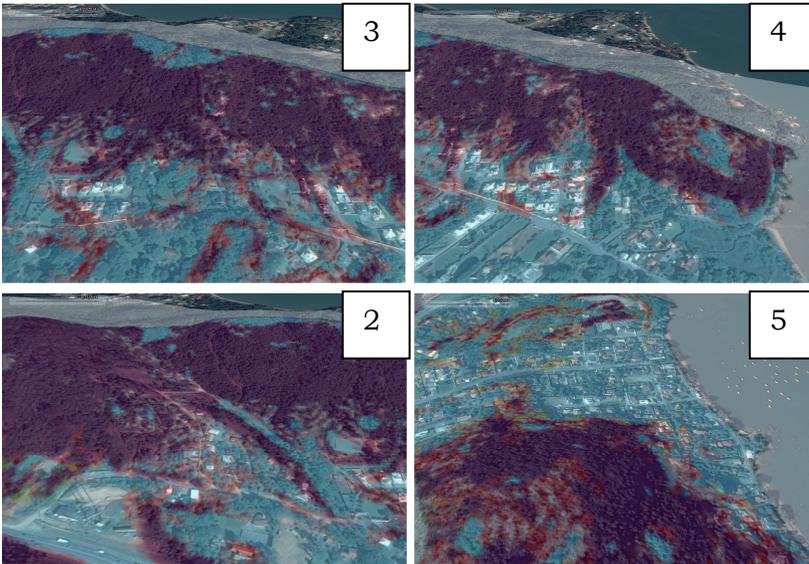


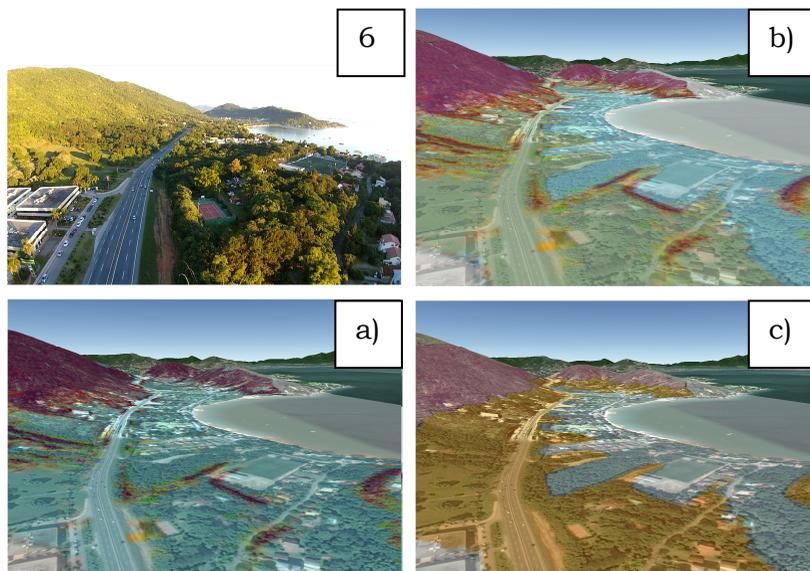
Ilustração 4: Microbacia do Ribeirão das pedras com indicação das áreas susceptíveis a escorregamentos (FS 1,00) e indicação dos locais com maior proximidade as ocupações antrópicas, assim como a localização do monitoramento por pluviômetro.



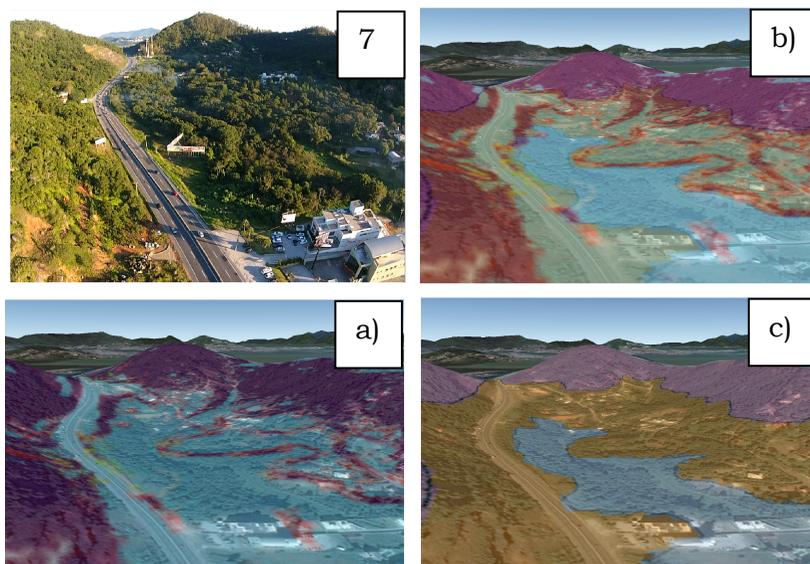
Área 1: Local do monitoramento por pluviômetro.



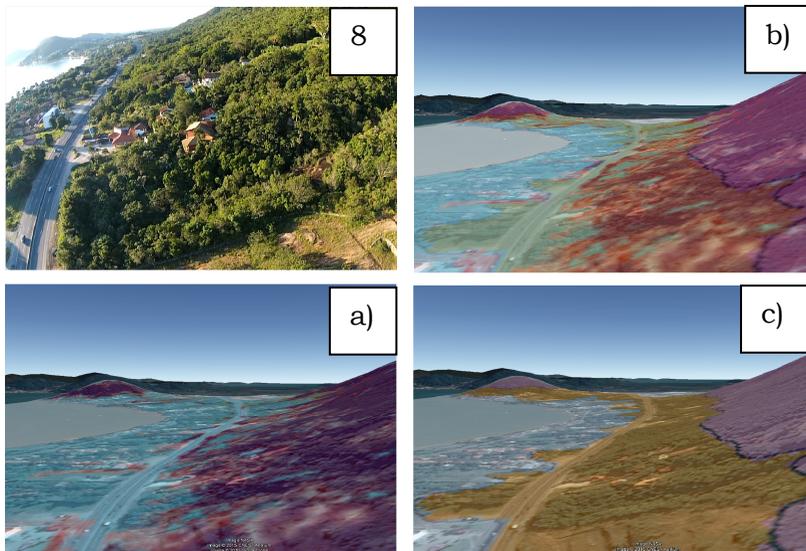
Áreas 2,3,4 e 5: Detalhe da sobreposição do mapa das áreas susceptíveis a escorregamentos (FS 1,00) com maior proximidade a locais antropizados.



Área 6: Fotografia aérea do local e sobreposições dos mapas: a) susceptibilidade à escorregamento (FS 1,00), b) mapa geotécnico e de susceptibilidade, c) mapa geotécnico, com maior proximidade a locais antropizados.



Área 7: Fotografia aérea do local e sobreposições dos mapas: a) susceptibilidade à escorregamento (FS 1,00), b) mapa geotécnico e de susceptibilidade, c) mapa geotécnico, com maior proximidade a locais antropizados.



Área 8: Fotografia aérea do local e sobreposições dos mapas: a) susceptibilidade à escorregamento (FS 1,00), b) mapa geotécnico e de susceptibilidade, c) mapa geotécnico, com maior proximidade a locais antropizados.

REFERÊNCIAS

AHRENDT, A. (2005). **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: Aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP.** 360 p. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ANDRADE, S.F. **Estudo de Estratégias Bioclimáticas no clima de Florianópolis.** Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, na área de Ergonomia. UFSC, 1996.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP.** 1994. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo.

AUGUSTO FILHO, O., VIRGILI, J.C. 1998. **Estabilidade de taludes** In: Oliveira, A.M.S.; Brito,S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia: ABGE, 1998. Cap.15.

AZEVEDO, C. Guimarães, M. **Proposição de uma equação de correlação entre resultados de sondagens Tipo DPL e valores NSPT.** Décimo tercer Encuentro Regional Ibero-Americano de CIGRÉ, Maio, 2009.

BIM, R. ; HIGASHI, R. R. . **Mapeamento Geotécnico de Áreas de Risco Através de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Simulações Computacionais.** In: XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.608/12.** 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acesso em 07/02/2013.

BURROUGH, Peter A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment.** Clarendon Press. Oxford, 1986.

CARVALHO, C. S. e GALVÃO, T (org) (2006). **Ministério das Cidades/Cities Alliance Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais.** Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, (111 p.).

CASTRO, ANTÔNIO LUIZ COIMBRA DE. **Manual de Planejamento em Defesa Civil / Antônio Luiz Coimbra de Castro.** – Brasília: Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Defesa Civil, 1999.

CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil /** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED UFSC, 2012. 94 p.

CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Santa Catarina /** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED UFSC, 2011. 89 p.

COLLISON, A. J. C.; ANDERSON, M. G.; LLOYD, D. M. (1995) - **Impact of Vegetation on Slope Stability in a Humid Tropical Environment: A Modelling Approach.** Proc. Instn. Civ. Engrs. Wat., Marit. e Energy. Vol. 112, June, p. 168-175.

CRISTO, S. S. V. **Análise de susceptibilidade a riscos naturais relacionados às enchentes e deslizamentos do setor Leste da Bacia Hidrográfica do Rio Itacorubi, Florianópolis – SC.** 2002. 211 f. Dissertação (Mestrado em geografia) - Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002

D'ORSI, RICARDO NEIVA. **Correlação entre Pluviometria e Escorregamentos no Trecho da Serra dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ (Estrada Rio-Teresópolis) /** Tese Doutorado – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011. 287p.

DAVISON Dias, R. **Proposta de Metodologia de Definição de Carta Geotécnica Básica em Regiões Tropicais e Subtropicais**. In: Revista do Instituto Geológico, São Paulo, SP, 1995, p.51-55.

DEFESA CIVIL. 2014. **IX Fórum Nacional de Defesa Civil – Boas Práticas Municipais – Desenvolvendo Cidades Resilientes**. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=1684abfc-15f8-402d-91ab-e9e89e364b33&groupId=185960> . Acesso em: 01 ago. 2014.

DIAS, F. D. ; HERRMANN. M. L. P. **Análise da susceptibilidade a deslizamentos no bairro Saco Grande Florianópolis/SC**. Rev. Univ. Rural., Ser. Ciên. Exatas e da Terra. Vol. 21 (1): 91-104, 2002.

DIAS, Leonardo Santana de Oliveira. **Identificação de áreas suscetíveis a deslizamento de terra utilizando sistema de informações geográficas** / Leonardo Santana de Oliveira Dias. Salvador, 2006.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. (1998). **SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential**. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 29 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 1999. 412p.

FERNANDES N. S. **Zoneamento geoambiental em microbacia hidrográfica do semiárido paraibano** / Silvana Fernandes Neto – 2003. Universidade Federal de Campina Grande. 121 f.il. color.

GODOY, H. (1997). **Identificação e Classificação Geotécnica de Latossolos do Estado de São Paulo pelo Método das Pastilhas MCT**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências - USP. São Paulo-SP. 132p.

GRIM, A. M. **Clima da Região Sul do Brasil**. In: CAVALCANTI, N. J. et al. (Org.). **Tempo e clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, v. , p. 259-27.

GUARESI, Clebson Mendonça. **Modelo de Banco de Dados Geotécnicos Vinculados a um Sistema de Informações Geo-Referenciadas da Grande Florianópolis** / Clebson Mendonça Guaresi. 96pgs. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2004.

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. (1983) - **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2a ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.

GUIDICINI, G.; IWASA, Y. **Ensaio de Correlação entre Pluviosidade e Escorregamento em Meio Tropical**. São Paulo: IPT, 1976. 48 p.

HERRMANN, M. L de P. (org.). **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: IOESC, 2007, 146 p.

HERRMANN, M. L. P. **Levantamento dos desastres naturais ocorridos em Santa Catarina no período de 1980 a 2000**. Florianópolis: IOESC, 2001. 89 p.

HERRMANN, M. L. P.; PELLERIN, J. R. G. M.; SAITO, S. M. **Análise das ocorrências de escorregamentos no Estado de Santa Catarina com base nos formulários de Avaliação de Danos da Defesa Civil – 1980 a 2003**. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. (CD-ROM).

HIGASHI, R.A.R. **Mapeamento Geotécnico**, out. a dez de 2011. 79 f. Notas de Aula. ppt.

HIGASHI, R.A.R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Área de Concentração: Infra-Estrutura e Gerência Viária) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 486p. 2006.

HIGASHI, R.A.R.; MICHEL G.P. **Uso do Shalstab na Análise espacial da estabilidade de encostas visando a implantação de vias – aplicação em sub-bacias do Rio Tubarão.** In: 6º Seminário Nacional Modernas Técnicas Rodoviárias. Anais. Florianópolis: ABMS, 1994. v.4. p.1245-1252. 2010.

HIGHLAND, L. M. and BOBROWSKY, P., 2008. **The Landslide Handbook - A Guide to Understand Landslide.** US Geological Survey Circular 1325, Reston, Virginia. 129p.

INMET, **Instituto Nacional de Meteorologia.** Disponível em: http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php Acesso em: 20/08/2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. 1980. **Carta Geotécnica do Estado de São Paulo.** São Paulo: IPT. (Publicação 2089).

INTEGRAÇÃO NACIONAL, MINISTÉRIO. **Aspectos Jurídicos nas atividades de Defesa Civil.** 2013c. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=1b7fc012-b6d8-4feb-be2a-c0c9f589287f&groupId=10157>. Acesso em 07/02/2013.

INTEGRAÇÃO NACIONAL, MINISTÉRIO. **Curso Capacitação Defesa Civil.** 2013a. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=ade2740e-dcc5-431c-ae29-24df599adee3&groupId=185960>. Acesso em 07/02/2013.

INTEGRAÇÃO NACIONAL, MINISTÉRIO. **Curso S2ID.** 2013b. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=ef4651d8-e5dd-4113-b133-ec13508e19bd&groupId=10157>. Acesso em 07/02/2013.

IPUF, Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis. **Estudos Ambientais da Grande Florianópolis: síntese temática – geologia / solos e aptidão agrícola / geomorfologia.** Florianópolis: IBGE/IPUF/GRANDFPOLIS, 1997. 292 p

KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B.; GOERL, R.F.; GIGLIO, J.N.; REGINATTO, G.M.P. (2010) **Hydrological disasters reduction: lessons from hydrology, in Science and Technology for Environmental Studies**. Ed. por Sens, M.L.; Mondardo, R.I. Florianópolis: Editora Copiart Ltda, (no prelo).

KOBIYAMA, Masato. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2006. 124p.

KOPENZINSKI, Isaac. **Mineração X meio ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

LACERDA, Willy A. (1997) – **Stability of Natural Slopes along the Tropical Coast of Brazil**. In: Proceedings of the International Symposium on Recent Developments in Soil and Paviment Mechanics (1. : Rio de Janeiro : 1997) Anais. A. A. Balkema: Rotterdam, p. 17-39.

LADWIG, Nilzo I. (1998) – **As Unidades de Conservação Ambiental e o Cadastro Técnico Multifinalitário – Estudo de Caso: UCAD/UFSC (Unidade de Conservação Ambiental Desterro)**. Florianópolis/SC, 120p.

LONGHITANO, G. A. **VANTs para Sensoriamento Remoto: Aplicabilidade na Avaliação e Monitoramento de Impactos Ambientais Causados por Acidentes com Cargas Perigosas / G.A. Longhitano. – Ed.rev. – São Paulo, 2010. 148 p.**

MACEDO, E.S.; OGURA, A.T.; SANTORO, J. **Defesa Civil e escorregamentos: o plano preventivo do litoral paulista**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 9, 1999, São Pedro (SP). Anais. São Paulo: ABGE,1999, CD-ROM.

MARCELINO, E. V.; GOERL, R. F. **Distribuição espaço-temporal de inundações bruscas em Santa Catarina (período 1980-2003)**. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. (CD-ROM).

MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto e SIG.** São José dos Campos. 218p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.

MARINHO, FERNANDO A. M. **Conceitos sobre estabilidade de taludes.** 2010. Disponível em: <http://www.ciram.com.br/ciram_arquivos/arquivos/gtc/downloads/curso_1_multip/marinho.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2015.

MICHEL, G. P.; GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R. **Estimativa da quantidade de chuva necessária para deflagrar escorregamentos.** In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2011:Maceió) Maceió: ABRH, Anais, 20p., 2011. CD-rom.

MINISTÉRIO DAS CIDADES / IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios.** In: CARVALHO, C.S., MACEDO, E.S., OGURA, A.T. (Orgs.). Brasília: Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007.

MONTEIRO, M. A. **Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano.** Geosul, Florianópolis, v. 16, n. 31, p. 69-78, jan./jun. 2001. Disponível em: <<http://150.162.1.115/index.php/geosul/article/viewFile/14052/12896>>. Acesso em: 02 març. 2013.

MOTA, N.M.B. (2003). **Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.

NILSSON, T. U. **Comparações entre DPL Nilsson e SPT.** IV SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL (IV GEOSUL). Curitiba, 2004. Disponível em: <<http://www.nilsson.com.br/Downloads/GEOSUL.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

OGURA, et al. **Programa de Recuperação Socioambiental da Serra do Mar: mapeamento de risco de escorregamentos nos bairros Cota, município de Cubatão.** In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 5., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2009. v.2, p.231-236. 8 p. (IPT. Comunicação Técnica 168750).

OLIVEIRA, A. M. S. e Brito, S. N. A., 1998. **Geologia de Engenharia**, CNPQ, FAPESP, 573p.

OLIVEIRA, Felipe P. (2014). **Mapeamento geotécnico preliminar e aplicação do Modelo SHALSTAB na análise de escorregamentos da Bacia de Santo Antônio de Lisboa – Florianópolis/SC** – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 191 p.

OLIVEIRA, H. R. **Gerenciamento da integridade de dutos: proposta de abordagem aos riscos geotécnicos em gasodutos de transmissão.** 2005. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OLIVEIRA, O. M.; Bim, R.; ESPINDOLA, M. S. **Aspectos Geotécnicos do Escorregamento de Encosta da Rodovia SC-401/Florianópolis.** In: XVI COBRAMSEG, 2012, Recife/PE. XVI COBRAMSEG, 2012.

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado** / O.M.Oliveira – São Paulo, 2004. 330 p.

ORTH. D. **O cadastro técnico multifinalitário: avaliação de ocupação do solo de praia de Cacupé - Ilha de Santa Catarina - Florianópolis.** 1 Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifanitário - Anais 1994.

PEDROSA, M. G. A. (1994) - **Análise de Correlações entre Pluviometria e Escorregamentos de Taludes.** Rio de Janeiro. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ.

PICHLER E. 1957. **Aspectos geológicos dos escorregamentos de Santos**. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, 6(2) 69-77.

PLANALTO. 2013. **Imprensa**. Disponível em: <<http://www2.planalto.gov.br/imprensa/releases/presidenta-dilma-lanca-o-plano-nacional-de-gestao-de-riscos-e-resposta-a-desastres-naturais-e-inaugura-novas-instalacoes-do-centro-nacional-de-gerenciamento-de-risco-e-desastres-cenad>> . Acesso em: 01 ago. 2013.

POPPER, K.R. **O universo aberto - Argumentos a favor do indeterminismo**. Lisboa D. Quixote, 1988.

PRIBERAM. **Dicionário da Língua Portuguesa**. Disponível em: <<http://www.priberam.pt/dlpo/Default.aspx?pal=resili%C3%Aancia>> . Acesso em: 31 ago. 2013.

RAIMUNDO, Huri Alexandre. **Aspectos Geotécnicos e Pluviométricos Associados à Instabilidade de Encostas em Florianópolis - SC**. Florianópolis, 1998. 325p. UFSC, Santa Catarina.

RAMALHO, G. G. C. 1994. **Mapeamento Geotécnico de Viçosa com Uso de Sistema de Informações Geográficas**. 110 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.75p

REGO NETO, C. B. **Morro da Cruz - Florianópolis/SC: condicionantes geológico-geotécnicos ao uso do solo**. Rio de Janeiro. 150p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1988.

RODRIGUEZ, T. G.; ALBUQUERQUE, P. J. R.; **Verificação da Adequabilidade de Correlações entre os Ensaios SPT-T e DPL para um Solo Coluvionar da Região de Campinas/SP**, 11/2011, XIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Vol. 1, pp.1-10, São Paulo, SP, Brasil, 2011.

ROSOLEM, G. P. N. **Mapeamento de Áreas Suscetíveis a deslizamentos rasos na bacia do rio Forquilhas – São José**. Florianópolis. 164p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

S2ID. 2014. **Banco de Dados de Registros de Desastres Sistema Integrado de Informações sobre Desastres - S2ID.** Disponível em: <<http://150.162.127.14:8080/bdrd/bdrd.html>> Acesso em: 01 ago. 2014.

SAITO, S.M. **Estudo analítico da suscetibilidade a escorregamentos e quedas de blocos no Maciço Central de Florianópolis-SC,** Florianópolis, 2004, 132p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SANTOS, Glaci T. (1997). **Integração de Informações Pedológicas, Geológicas e Geotécnicas Aplicadas ao Uso do Solo Urbano em Obras de Engenharia. Porto Alegre.** Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PPGEM/UFRGS.

SILVA DIAS MAF. **As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos.** Nota técnica. 2009. São José dos Campos, INPE. 67p.

SILVA, Marcelo M. (2006). **Rede de Estações Hidro Meteorológicas da Epagri.** Congresso brasileiro de meteorologia (CBMET) Edição XIV - Florianópolis – 2006. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-4df1e92e79f5318c287decca38d93ee2.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

SIMBIOSIS, **Empresa Junior de Ciências Biológicas.** Disponível em: <http://www.simbiosis.ufsc.br/index.php/servicos/brasil-junior/item/48-trilhas-ucad.html> Acesso em: 07/02/2013.

TATIZANA, C. et al. (1987). **Análise da correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, 1987a, São Paulo, SP. Anais. São Paulo: ABGE, v.2, p.225-236.

TAYLOR, D. W. (1948). **Fundamentals of Soil Mechanics.** John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 104-204, pp. 406-479.

TCU, Tribunal de Contas da União. **Acordão nº 772/2010, 15 de Abril de 2010.** Disponível em: <http://portal2.tcu.gov.br/portal/pls/portal/docs/2049158.PDF> Acesso em: 02/02/2012.

TERRA, NOTÍCIAS. **Novo Mapeamento de Teresópolis Está Concluído, Diz Exército.** Disponível em: < <http://noticias.terra.com.br>>. Acesso em: 24 ago. 2012.

TERZAGHI, Karl (1950) - **Mechanism of Landslides.** In: FROM THEORY TO PRACTICE IN SOIL MECHANICS. New York, John Wiley e Sons. p. 202-245.

TOMINAGA, LÍDIA KEIKO; SANTORO, JAIR; AMARAL, ROSANGELA DO. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo : Instituto Geológico, 2009. 196 p.

VALENTE, A. L. S. **Uso de SIG na determinação de áreas com restrições à ocupação urbana na ub-bacia do Arroio Feijó, RS.** In: Congresso e Feira para usuários de geoprocessamento, 2. 1996, Curitiba. Anais... Curitiba: SAGRES, p.849-856, 1996.

VAN WESTEN, C. J. (1993). **Application of geographic information system to landslide hazard zonation.** ITC Publication, Enschede, The Netherlands, 15: 245p.

VARNES, D. J. (1974). **The Logic of Geological Maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes.** U.S. Geological Survey Prof Paper 837.

VARNES, D. J. (1978). **Slope movements, types and processes.** In Landslides and Engineering Praticce. E. B. Eckel (ed). Special Report nº29, Highway Research Board, p.20-47.

WOLLE, C. M. (1985) - **Estabilidade de Encostas Naturais em solos Tropicais.** In: 1OCOLÓQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS (1985 : Porto alegre) Anais.Porto Alegre: UFRGS.

WOLLE, C. M. e Carvalho, C. S.: **Deslizamentos em encostas na Serra do Mar-Brasil, Solos e Rochas, 27–36, 1989.**

ZUQUETTE, L. V. **A importância do mapeamento geotécnico no uso e na ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.** 1993. 369p. Tese de Livre Docência, – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras.** 1987. 219p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

ZUQUETTE, L.V. e NAKAZAWA, V.A. **Cartas de Geologia de Engenharia.** In: OLIVEIRA, A.M.S. e BRITO, S.N.A. (Eds.). *Geologia de Engenharia.* São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 17, p.283-300.