



Universidade dos Açores
Departamento de Ciências Agrárias

Avaliação da Suscetibilidade a Movimentos de Vertente na Zona Oeste da Ilha Terceira

Alonso Teixeira Miguel

Doutoramento em Gestão Interdisciplinar da Paisagem

Angra do Heroísmo

2016



Universidade dos Açores
Departamento de Ciências Agrárias

Avaliação da Suscetibilidade a Movimentos de Vertente na Zona Oeste da Ilha Terceira

Alonso Teixeira Miguel

Tese realizada para obtenção do grau de Doutor em Gestão Interdisciplinar da Paisagem, sob orientação científica do Professor Doutor António Félix Flores Rodrigues.

Angra do Heroísmo

2016

*"Se um dia a montanha vier na tua direção e não fores Maomé,
corre, porque é um movimento de vertente"*

Fausto Guzzetti (2005)

AGRADECIMENTOS

Ao longo de um árduo, mas gratificante processo de aprendizagem, foram muitas as pessoas que me ajudaram e sem as quais o percurso teria, certamente, sido ainda mais tenebroso, pelo que me cabe endereçar os seguintes agradecimentos:

- ✓ À minha mulher, Patrícia Alexandra Vieira Arruda, pelo amor incondicional e por todo o empenho, dedicação, compreensão, suporte e incentivo prestados durante todos estes anos, muitas vezes em prejuízo próprio, que foram uma das chaves para o cumprimento de várias etapas do meu percurso académico, profissional e pessoal.
- ✓ Aos meus pais, João Miguel e Libéria Celina Miguel, por todo o apoio e por todos os valores e ensinamentos que me transmitiram ao longo da vida.
- ✓ Aos meus irmãos Anabela Rodrigues, Sandra Miguel, Celina Miguel, Carla Leite, Vera Miguel e João Miguel, pelo suporte e amizade com que me presentearam desde a minha infância.
- ✓ Aos meus sogros, José Henrique Silveira Arruda e Maria Leonor Vieira Arruda, pelo suporte, carinho e amizade sempre demonstrados.
- ✓ Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes e que, muitas vezes, me deram o alento e o incentivo de que necessitava.

Mais concretamente para a realização deste doutoramento, foram também muitas as pessoas envolvidas e que, desinteressadamente, me apoiaram ao longo das diversas etapas, a quem deixo os meus profundos agradecimentos:

- ✓ Ao Professor Doutor António Félix Flores Rodrigues, pela orientação científica deste doutoramento, pelo ímpar espírito crítico, por todos os contributos e por todo o empenho, dedicação e acompanhamento ao longo deste projeto, muitas vezes determinante nas etapas mais difíceis.

- ✓ Ao Eng.º João Filipe Mendes Fernandes, estimado colega e amigo, pela infinita disponibilidade e amizade e pela importância vital que teve em diversos momentos, cujos distintos conhecimentos me permitiram ultrapassar diversos obstáculos difíceis.
- ✓ Ao Doutor Rui Tiago Fernandes Marques, por toda a disponibilidade demonstrada e pelo apoio prestado, cujos conhecimentos técnicos e científicos, enquanto especialista em Riscos Geológicos, foram absolutamente marcantes na realização da presente tese.
- ✓ Ao Professor Doutor Eduardo Brito de Azevedo, pela gentil cedência de dados e informações fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.
- ✓ Ao Professor José Luís Zêzere, por todos os comentários e esclarecimentos gentilmente prestados a um desconhecido.
- ✓ Ao Dr. Artur Manuel Leal de Lima, pela amizade demonstrada e pela compressão e flexibilidade concedidas a nível profissional, para que fosse possível prosseguir com este projeto.
- ✓ Ao Professor Doutor Tomaz Cavaleiro Ponce Dentinho, pela importância que teve na minha inscrição no presente curso de doutoramento.
- ✓ À Patrícia Arruda e à Carla Costa pelas revisões e comentários ao trabalho.
- ✓ Ao Ricardo Arruda e à Michele Aguiar, pela companhia e auxílio prestados durante a fase de trabalho de campo.
- ✓ A todos os professores do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho.

Em memória da minha querida irmã, Sónia Conceição Teixeira Miguel, e do meu estimado amigo, José António Cunha Tavares. Com a sua partida o céu ganhou duas novas estrelas cintilantes.

ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
RESUMO	1
ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 INTERDISCIPLINARIDADE DA PAISAGEM	9
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	10
1.3 INVESTIGAÇÃO SOBRE INSTABILIDADE GEOMORFOLÓGICA EM PORTUGAL E NOS AÇORES	15
1.4 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2. FUNDAMENTOS GERAIS SOBRE MOVIMENTOS DE VERTENTE	21
2.1 DEFINIÇÕES DE MOVIMENTO DE MASSA, MOVIMENTO DE TERRENO E MOVIMENTO DE VERTENTE.....	21
2.2 CLASSIFICAÇÃO E TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	24
2.2.1 Desabamento.....	24
2.2.2 Balançamento.....	25
2.2.3 Deslizamento.....	26
2.2.4 Expansão lateral	29
2.2.5 Escoada.....	30
2.3 COMPOSIÇÃO E DIMENSÕES MORFOLÓGICAS DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE... 32	
2.3.1 Morfologia dos movimentos de vertente.....	32
2.3.2 Dimensões dos movimentos de vertente	34
2.4 CARACTERIZAÇÃO DA ATIVIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE	36
2.4.1 Estado de atividade dos movimentos de vertente	36
2.4.2 Distribuição da atividade dos movimentos de vertente.....	37
2.4.3 Estilo da atividade dos movimentos de vertente.....	39
2.4.4 Velocidade de deslocação dos movimentos de vertente	40
2.5 CAUSAS DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE	42
2.5.1 Fator de Segurança	42
2.5.2 Classificação dos fatores envolvidos na ocorrência de movimentos de vertente.....	43

2.6 MODELO CONCETUAL DE RISCO	46
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	51
3.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO.....	51
3.2 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA	55
3.2.1 Clima do arquipélago dos Açores.....	55
3.2.2 Clima da ilha Terceira	57
3.3 ENQUADRAMENTO GEODINÂMICO.....	60
3.3.1 Sismicidade histórica	62
3.3.2 Atividade eruptiva histórica	63
3.4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA	65
3.5 CARACTERIZAÇÃO ADMINISTRATIVA, DEMOGRÁFICA E INFRAESTRUTURAL	69
3.5.1 Caracterização administrativa	69
3.5.2 Caracterização demográfica	70
3.5.3 Caracterização do edificado e das acessibilidades	74
4. INVENTARIAÇÃO E ANÁLISE DE MOVIMENTOS DE VERTENTE	77
4.1 OBJETIVOS	77
4.2 ASPETOS GERAIS SOBRE INVENTARIAÇÃO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE	78
4.3 INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE	81
4.4 MAPA DE DENSIDADE DE MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	90
4.5 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE	92
4.5.1 Seleção e caracterização dos parâmetros e índices morfométricos.....	92
4.5.2 Estatística descritiva e distribuição de valores	98
4.5.3 Avaliação da normalidade das distribuições de valores	104
4.5.4 Determinação do grau de associação entre todos os parâmetros e índices morfométricos.....	108
4.6 DETERMINAÇÃO DA MAGNITUDE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE	114
4.6.1 Utilização das distribuições dimensão-frequência.....	115
4.6.1.1 Variável que quantifica a dimensão	115
4.6.1.2 Tipo de distribuição	116
4.6.1.3 Classificação e representação gráfica das distribuições	117
4.6.1.4 Características das distribuições dimensão-frequência	118
4.6.2 Análise da magnitude-frequência	120
4.6.3 Determinação da probabilidade de excedência	125
5. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE	133
5.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	133

5.2 ASPETOS GERAIS SOBRE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE	134
5.3 DIFERENÇAS CONCETUAIS E OPERACIONAIS NA AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE	136
5.3.1 Assunções gerais dos modelos de suscetibilidade	136
5.3.2 Escala de trabalho.....	137
5.3.3 Unidades cartográficas.....	140
5.3.4 Metodologias de análise.....	145
5.3.4.1 Métodos geomorfológicos.....	147
5.3.4.2 Métodos heurísticos.....	148
5.3.4.3 Análise de inventários.....	149
5.3.4.4 Métodos determinísticos	149
5.3.4.5 Métodos estatísticos.....	150
5.3.5 Seleção do método para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente	152
5.3.6 Descrição do Método do Valor Informativo	154
5.4 DADOS DE ENTRADA PARA MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NA ÁREA DE ESTUDO	157
5.4.1 Movimentos de vertente	158
5.4.2 Fatores de predisposição	162
5.4.2.1 Fatores de predisposição derivados do MNE	168
5.4.2.2 Fatores de predisposição geo-ambientais - não derivados do MNE.....	189
5.4.3 Avaliação da independência condicional dos fatores de predisposição	202
5.5 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO	204
5.6 QUANTIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA E HIERARQUIZAÇÃO DOS FATORES DE PREDISPOSIÇÃO	213
5.7 CLASSIFICAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE	215
5.8 AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NA ZONA OESTE DA ILHA TERCEIRA	218
5.8.1 Hierarquização dos fatores de predisposição.....	218
5.8.2 Ajuste do modelo de suscetibilidade aos dados de entrada	221
5.8.3 Validação do modelo de suscetibilidade e determinação da respetiva capacidade preditiva..	225
5.8.4 Classificação do mapa de suscetibilidade selecionado.....	229
5.8.5 Identificação dos elementos em risco	235
6. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS	239
6.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	239
6.2 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS E CENÁRIOS FUTUROS	240
6.3 CENÁRIOS DE CONCENTRAÇÃO DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA	241

6.4 CENÁRIOS FUTUROS DE PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA UTILIZADOS NA MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE	243
6.5 MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE COM BASE EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS	246
6.5.1 Mapas de suscetibilidade para o cenário 4.5	246
6.5.2 Mapas de suscetibilidade para o cenário 8.5	249
6.6 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS EM RISCO TENDO EM CONTA OS CENÁRIOS ESTUDADOS.....	253
6.6.1 Cenário 4.5.....	253
6.6.2 Cenário 8.5.....	257
6.6.3 Análise comparativa da suscetibilidade a movimentos de vertente modelada para os cenários 4.5 e 8.5.....	260
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	265
7.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	265
7.2 PRINCIPAIS LINHAS DE INVESTIGAÇÃO A DESENVOLVER.....	273
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	275
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

INTRODUÇÃO

Figura 1.1 - Número de catástrofes naturais que ocorreram, a nível mundial, entre 1900 e 2015.....	11
--	----

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Esquema representativo da abrangência dos termos movimento de massa, movimento de terreno e movimento de vertente	23
Figura 2.2 - Ilustração de um desabamento.....	24
Figura 2.3 - Ilustração de um balançamento	25
Figura 2.4 - Ilustração de um deslizamento rotacional	27
Figura 2.5 - Ilustração de um deslizamento translacional de rutura planar	28
Figura 2.6 - Ilustração de uma expansão lateral	30
Figura 2.7 - Ilustração de uma escoada.....	31
Figura 2.8 - Elementos morfológicos que constituem um movimento de vertente "tipo"	32
Figura 2.9 - Dimensões mensuráveis (parâmetros morfométricos) dos movimentos de vertente "tipo"	35
Figura 2.10 - Exemplos dos diferentes estados de atividade para um balançamento.....	37
Figura 2.11 - Ilustração da distribuição da atividade dos movimentos de vertente.....	38
Figura 2.12 - Ilustração do estilo de atividade dos movimentos de vertente	39
Figura 2.13 - Escala de velocidade dos movimentos de vertente	40
Figura 2.14 - Fatores envolvidos na ocorrência de movimentos de vertente.....	45
Figura 2.15 - Ilustração da variação do Fator de Segurança ao longo do tempo, pela ação dos fatores que influenciam a estabilidade das vertentes	45
Figura 2.16 - Modelo concetual do risco	48

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Mapa de localização geográfica do Arquipélago dos Açores	51
Figura 3.2 - Mapa de localização geográfica da área de estudo na ilha Terceira.....	52
Figura 3.3 - Mapa de localização geográfica da área de estudo na zona Oeste da ilha Terceira.....	53
Figura 3.4 - Mapa da precipitação anual acumulada da área de estudo	59
Figura 3.5 - Mapa do arquipélago dos Açores exibindo as principais estruturas morfo-tectónicas e sismicidade referente ao período de 1997-2009	60
Figura 3.6 - Principais alinhamentos tectónicos da ilha Terceira	61

Figura 3.7 - Localização dos principais sismos históricos registados nos Açores e carta epicentral dos eventos registados entre 1980 e 2006	62
Figura 3.8 - Carta vulcanológica da ilha Terceira.....	66
Figura 3.9 - Mapa geológico da área de estudo.....	67
Figura 3.10 - Mapa das divisões administrativas da ilha Terceira.....	69
Figura 3.11 - Evolução demográfica para o arquipélago dos Açores, no período compreendido entre 1911 e 2011	71
Figura 3.12 - Evolução demográfica para a ilha Terceira e para o concelho de Angra do Heroísmo, no período compreendido entre 1911 e 2011.....	72
Figura 3.13 - Evolução demográfica para as freguesias de Doze Ribeiras, Santa Bárbara e Serreta, no período compreendido entre 1911 e 2011.....	73
Figura 3.14 - Mapa de distribuição do edificado, estradas principais e estradas secundárias pela área de estudo	75

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Exemplos de movimentos de vertente identificados e cartografados por análise monoscópica de ortofotomapas, através de SIG (ArcGis 10.1), com auxílio de altimetria à escala de 1:25.000	81
Figura 4.2 - Imagem exemplificativa da grelha utilizada para sistematização do trabalho em SIG (ArcGis 10.1), com dimensões de 250 m x 250 m.....	82
Figura 4.3 - Exemplos de movimentos de vertente identificados e cartografados em trabalho de campo desenvolvido no âmbito da presente dissertação	83
Figura 4.4 - Distribuição dos movimentos de vertente por freguesia.....	86
Figura 4.5 - Distribuição dos movimentos de vertente do IMV por tipologia.....	87
Figura 4.6 - Exemplos de deslizamentos translacionais identificados e cartografados na área de estudo..	88
Figura 4.7 - Mapa de localização dos movimentos de vertente inventariados na zona de estudo.....	89
Figura 4.8 - Mapa de densidade de movimentos de vertente da zona de estudo.....	91
Figura 4.9 - Histograma de frequências do comprimento da cicatriz (COMP 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.....	99
Figura 4.10 - Histograma de frequências da largura da cicatriz (LARG 2D/3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.....	100
Figura 4.11 - Histograma de frequências da profundidade máxima de rotura (PROF 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal	100
Figura 4.12 - Histograma de frequências da altura da cicatriz (ALT 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal	101
Figura 4.13 - Histograma de frequências do perímetro da cicatriz (PER 3D) para o inventário de movimento de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal	101
Figura 4.14 - Histograma de frequências da área da cicatriz (AREA 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal	102
Figura 4.15 - Histograma de frequências do volume de material instabilizado (VOL 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal	102
Figura 4.16 - Histograma de frequências do ângulo da cicatriz (ANG 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.....	103

Figura 4.17 - Histograma de frequências do índice de circularidade (I-CIR 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.....	103
Figura 4.18 - Histograma de frequências do índice de alongamento (I-ALO 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.....	104
Figura 4.19 - Gráficos Quantil-Quantil (Q-Q plots) para a largura (LARG 2D/3D) e área (AREA 3D) das cicatrizes antes e depois da correspondente transformação logarítmica.....	108
Figura 4.20 - Matriz de dispersão entre os parâmetros e índices morfométricos dos movimentos de vertente do IMV	111
Figura 4.21 - Representação gráfica da FDP da DLN-3P, parametrizada pelo método da máxima verosimilhança para o inventário de movimentos de vertente (IMV).....	125
Figura 4.22 - Representação gráfica da FDC da DLN-3P, parametrizada pelo método da máxima verosimilhança para o inventário de movimentos de vertente (IMV).....	127
Figura 4.23- Relação entre a área da cicatriz (AREA 3D) e o volume instabilizado (VOL 3D) dos movimentos de vertentes de IMV.....	130

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Classificação das metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente	146
Figura 5.2 - Esquema concetual de análise estatística bivariada para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente em SIG	157
Figura 5.3 - Mapa de distribuição dos 207 movimentos de vertente inventariados na área de estudo (IMV).....	160
Figura 5.4 - Exemplificação do resultado da conversão dos movimentos de vertente cartografados de formato vetorial para formato matricial	161
Figura 5.5 - Mapa hipsométrico da área de estudo	171
Figura 5.6 - Mapa de declive (DEC) da área de estudo	173
Figura 5.7 - Mapa de exposição das vertentes (EXP) da área de estudo	176
Figura 5.8 - Esquema representativo da morfologia das vertentes resultante das conjugações entre o perfil longitudinal e o perfil transversal das vertentes	178
Figura 5.9 - Mapa do perfil longitudinal das vertentes (PLV) da área de estudo.....	179
Figura 5.10 - Mapa do perfil transversal das vertentes (PTV) da área de estudo.....	179
Figura 5.11 - Esquema concetual dos algoritmos D8 e Dinf na determinação das direções de fluxo, para o cálculo da área de contribuição	183
Figura 5.12 - Mapa da área de contribuição (ACT) da área de estudo.....	184
Figura 5.13 - Mapa do inverso do wetness index (IWI) da área de estudo.....	187
Figura 5.14 - Mapa de precipitação anual acumulada (PAA) da área de estudo	190
Figura 5.15 - Mapa da distância aos cursos de água (DCA) da área de estudo	192
Figura 5.16 - Mapa da densidade de drenagem (DDR) da área de estudo.....	194
Figura 5.17 - Mapa geológico (GEO) da área de estudo.....	197
Figura 5.18 - Mapa de uso do solo (USO) da área de estudo	199
Figura 5.19 - Representação esquemática de uma curva de sucesso ou de predição	210
Figura 5.20 - Curvas de sucesso (SRC) determinadas para cada fator de predisposição	219

Figura 5.21 - Curvas de sucesso para os algoritmos definidos com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta as diferentes combinações de fatores de predisposição.....	222
Figura 5.22 - Representação da distribuição geográfica dos movimentos de vertente incluídos no grupo de modelação (IMV-MOD, a azul) e no grupo de validação (IMV-VAL, a vermelho)	227
Figura 5.23 - Curva de sucesso (SRC) e curva de predição (PRC) para o algoritmo definido com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta os 11 fatores de predisposição utilizados	228
Figura 5.24 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente antes do processo de classificação final (escala contínua de valores)	230
Figura 5.25 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente da área de estudo, desenvolvido com base no Método do Valor Informativo (com 11 fatores de predisposição), classificado tendo em conta a percentagem de área instabilizada prevista pela curva de sucesso (SRC)	233
Figura 5.26 - Distribuição da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade	234
Figura 5.27 - Ilustração da sobreposição dos elementos expostos com o mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente da área de estudo.....	235
Figura 5.28 - Distribuição do edificado da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade.....	236
Figura 5.29 - Distribuição (%) das estradas principais e das estradas secundárias da área de estudo por classe de suscetibilidade	237

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Distribuição espacial da Precipitação Anual Acumulada (PAA) na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 4.5	244
Figura 6.2 - Distribuição espacial da Precipitação Anual Acumulada (PAA) na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 8.5	245
Figura 6.3 - Distribuição espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 4.5	247
Figura 6.4 - Distribuição da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 4.5	248
Figura 6.5 - Distribuição espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 8.5.....	250
Figura 6.6 - Distribuição da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 8.5	251
Figura 6.7 - Distribuição das estradas principais por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 4.5 e respetivas variações em relação à situação atual. 255	
Figura 6.8 - Distribuição das estradas secundárias por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 4.5 e respetivas variações em relação à situação atual 256	
Figura 6.9 - Distribuição das estradas principais por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 8.5 e respetivas variações em relação à situação atual. 258	
Figura 6.10 - Distribuição das estradas secundárias por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 8.5 e respetivas variações em relação à situação atual 260	

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1- Abrangência dos termos movimento de vertente, movimento de terreno e movimento de massa	22
Tabela 2.2 - Classificação dos deslizamentos	26
Tabela 2.3 - Estado de atividade dos movimentos de vertente	36
Tabela 2.4 - Grau de destruição provável associado a cada classe de velocidade dos movimentos de vertente	41

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Valores médios da temperatura do ar, humidade relativa do ar, insolação e precipitação observados em Angra do Heroísmo (74m), correspondentes ao período entre 1961 e 1990.....	58
--	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Características do inventário de movimentos de vertente	86
Tabela 4.2 - Parâmetros e índices morfométricos utilizados para a análise e caracterização dos movimentos de vertente	92
Tabela 4.3 - Medidas estatísticas referentes aos parâmetros e índices morfométricos utilizados para a caracterização dos movimentos de vertente	98
Tabela 4.4 - Resultados da aplicação do teste de Kolmogorov - Smirnov para os parâmetros e índices morfométricos dos movimentos de vertente	107
Tabela 4.5 - Matriz de correlação entre os parâmetros e índices morfométricos do IMV logaritmizados, com base no coeficiente de correlação de Pearson	110
Tabela 4.6 - Resultados do teste de ajuste Kolmogorov-Smirnov referentes ao ajuste da DLN-3P, parametrizada através do método da máxima verosimilhança	124
Tabela 4.7 - Probabilidade de excedência para diferentes cenários de magnitude de área de um dado movimento de vertente na área de estudo, tendo em conta a DLN-3P	128
Tabela 4.8 - Probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente em diversos intervalos de magnitude de área, tendo em conta a DLN-3P.....	128

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Adequabilidade das metodologias de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente às escalas de trabalho.....	139
Tabela 5.2 - Principais limitações associadas a cada tipo de unidade cartográfica para avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente.....	143

Tabela 5.3 - Classificação das metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente	146
Tabela 5.4 - Variação da informação referente ao inventário de movimentos de vertente (IMV), decorrente do processo de transformação entre os formatos vetorial e matricial	162
Tabela 5.5 - Listagem de fatores de predisposição a utilizar em estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, tendo em conta a escala de trabalho e/ou o método de análise selecionados ..	165
Tabela 5.6 - Frequências absolutas e relativas de área e área instabilizada por classe de altitude (ALT)	172
Tabela 5.7 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de declive (DEC).....	174
Tabela 5.8 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de exposição (EXP).....	177
Tabela 5.9 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de perfil longitudinal de vertente (PLV).....	180
Tabela 5.10 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de perfil transversal de vertente (PTV).....	180
Tabela 5.11 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de área de contribuição (ACT).....	184
Tabela 5.12 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de inverso do wetness index (IWI).....	188
Tabela 5.13 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de precipitação anual acumulada (PAA).....	191
Tabela 5.14 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de distância aos cursos de água (DCA).....	193
Tabela 5.15 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi), por classe de densidade de drenagem (DDR).....	195
Tabela 5.16 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi) por classe de geologia (GEO).....	197
Tabela 5.17 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (Fi) por classe de uso do solo (USO).....	201
Tabela 5.18 - Critérios e níveis de qualidade de modelos e respetivos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente.....	208
Tabela 5.19 - Valores da área abaixo das curvas de sucesso (AAC das SRC's) e hierarquização dos fatores de predisposição	220
Tabela 5.20 - Comparação entre os resultados obtidos para a AAC das SRC's dos fatores de predisposição que ocupam as primeiras duas posições e a última posição da hierarquia, no presente trabalho e no trabalho de Marques (2013), desenvolvido para a Povoação	221
Tabela 5.21 - Ajuste do modelo aos dados de entrada. Resumo das áreas abaixo das curvas de sucesso (AAC's das SRC's), com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta o inventário de movimentos de vertente completo (IMV-TOT), considerando as diferentes combinações de fatores de predisposição.....	223
Tabela 5.22 - Resumo das principais diferenças entre o grupo de movimentos de vertente de modelação (IMV-MOD) e de validação (IMV-VAL), em formato matricial	226
Tabela 5.23 - Critérios de separação das classes de suscetibilidade, através da percentagem de área instabilizada prevista com base na interpretação da curva de sucesso (SRC)	231

Tabela 5.24 - Razão de eficiência (rE) das classes de suscetibilidade definidas para o mapa final e classificação das mesmas de acordo com a proposta apresentada por Guzzetti *et al.* (2006b)..... 231

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Descrição dos RCP (Representative Concentration Pathways) apresentados no AR5 do IPCC (2013) 242

Tabela 6.2 - Distribuição do edificado por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 4.5 e respectivas variações em relação à situação atual 253

Tabela 6.3 - Distribuição do edificado por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 8.5 e respectivas variações em relação à situação atual 257

Tabela 6.4 - Quadro síntese da distribuição dos vários elementos considerados pelas diferentes classes de suscetibilidade a movimentos de vertente, para as três projeções dos cenários 4.5 e 8.5 e na situação atual 261

Tendo em conta o complexo enquadramento geodinâmico do arquipélago dos Açores, que leva a que as ilhas sejam frequentemente afetadas por uma grande diversidade de perigos naturais, de entre os quais se destacam os movimentos de vertente, o objetivo geral da presente dissertação consistiu em avaliar a suscetibilidade a movimentos de vertente na zona Oeste da ilha Terceira, como contributo para um conhecimento mais aprofundado da incidência geográfica destes fenómenos a nível local, numa ótica de gestão interdisciplinar da paisagem e de planeamento e ordenamento do território.

A realização do presente trabalho implicou a criação de um inventário de movimentos de vertente histórico, constituído por 207 movimentos de vertente, identificados e cartografados sob a forma de polígonos, com base na análise monoscópica de ortofotomapas e em trabalho de campo. Os referidos movimentos de vertente correspondem a deslizamentos translacionais superficiais que, em alguns casos, evoluíram para escoadas detríticas, com profundidade máxima do plano de rotura de 3,5 m. Os movimentos de vertente cartografados, apresentam, no total, uma área planimétrica de, aproximadamente, 43.800 m² e um volume de material instabilizado estimado de cerca de 97.300 m³, distribuídos pelas freguesias da Serreta (62,56%), Doze Ribeiras (30,14%) e Santa Bárbara (7,30%).

A caracterização morfométrica dos movimentos de vertente foi efetuada através do cálculo de oito parâmetros e dois índices morfométricos, determinados em medições planimétricas (2D) e superficiais (3D). Através de uma análise comparativa, concluiu-se que a utilização dos parâmetros morfométricos tridimensionais, tendo em conta o elevado declive de grande parte da área de estudo, era mais adequada para a determinação da magnitude dos movimentos de vertente, evitando uma adulteração da frequência de eventos de diferentes magnitudes ou gamas de magnitudes. Ainda no decorrer deste processo, concluiu-se que a utilização de ferramentas automáticas para a determinação do comprimento e da largura dos movimentos de vertente, que estão na base do cálculo de outros parâmetros morfométricos, teria induzido erros graves nos

resultados dessas medições no presente trabalho, pelo que os mesmos foram determinados manual e individualmente para cada movimento de vertente do inventário.

Para a determinação do grau de associação entre os diferentes parâmetros e índices morfométricos, foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson, que permitiu concluir que, em termos gerais, todos os parâmetros apresentam elevados graus de associação positiva, revelando uma elevada interdependência entre os mesmos, com exceção do ângulo da cicatriz e dos índices de alongamento e de circularidade.

Para a quantificação da magnitude dos movimentos de vertente foi utilizada, como medida, a área da cicatriz. Pela avaliação do ajuste de 61 distribuições de probabilidade teóricas, através da aplicação de testes estatísticos, concluiu-se que a distribuição log-normal de três parâmetros garante o melhor ajuste possível à distribuição de valores da área da cicatriz. Foi detetada a existência de um *rollover*, que permitiu concluir que os movimentos de vertentes de menor dimensão não são os mais frequentes da distribuição. Foi ainda determinada a probabilidade de excedência para diversos intervalos de magnitude.

A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na zona Oeste da ilha Terceira foi feita recorrendo ao Método do Valor Informativo, em ambiente SIG, utilizando como dados de entrada no modelo onze fatores de predisposição (variáveis independentes) e o inventário de movimentos de vertente (variável dependente). A influência de cada um dos fatores de predisposição considerados e a sua hierarquização para inclusão no modelo de suscetibilidade foi determinada através do cálculo da área abaixo da curva de sucesso, tendo-se concluído que o declive era, destacadamente, o fator mais influente para a ocorrência de movimentos de vertente na zona de estudo. A adição sequencial de fatores de predisposição ao modelo permitiu concluir que, apesar de não ser o melhor algoritmo da análise, seria possível a utilização dos onze fatores de predisposição no modelo de suscetibilidade final, em resultado de uma área abaixo da curva de sucesso muito elevada, que permitiu classificar o modelo como *excelente ou extremamente satisfatório*.

Para a validação do modelo selecionado e para avaliação da respetiva capacidade preditiva foram gerados, a partir do inventário de movimentos de vertente original, um grupo de modelação e um grupo de validação e determinadas as áreas abaixo da curva de sucesso e da curva de predição, cujos resultados voltaram a permitir classificar o

modelo como *excelente ou extremamente satisfatório*. Conclui-se que o modelo desenvolvido tem capacidade de predizer 90% dos movimentos de vertente em apenas cerca de 6% da área de estudo mais suscetível a movimentos de vertente.

O modelo foi classificado em quatro classes qualitativas de suscetibilidade, avaliadas pelas respectivas razões de eficiência, permitindo concluir que 7,02% da área de estudo apresenta suscetibilidade a movimentos de vertente muito elevada ou elevada, enquanto 16,31% e 76,67% da área de estudo apresenta, respetivamente, suscetibilidade moderada e reduzida ou nula a movimentos de vertente.

O cruzamento dos elementos de vulnerabilidade da área de estudo com o mapa de suscetibilidade resultante do modelo desenvolvido, permitiu concluir que 3,89% dos edifícios estão localizados em zonas de suscetibilidade elevada a muito elevada e que 15,45% das estradas principais e 17,12% das estradas secundárias se localizam em zonas abrangidas pelas três classes de suscetibilidade a movimentos de vertente mais elevada.

Os mapas de suscetibilidade criados com base em dois cenários de alterações climáticas globais (RCP 4.5 e RCP 8.5), para três horizontes temporais distintos (2039, 2069 e 2099), demonstraram uma tendência para a estabilização da área contida em todas as classes de suscetibilidade, com exceção do cenário 8.5, na previsão para 2099, onde se verificou um aumento considerável de área abrangida pela classe de suscetibilidade moderada, em detrimento do verificado para a classe de suscetibilidade reduzida ou nula.

Foi possível concluir ainda que, para os dois cenários estudados, comparativamente à situação atual, se verifica, genericamente, uma redução da suscetibilidade a que o edificado e as estradas principais ficam sujeitas e um agravamento da suscetibilidade no que se refere às estradas secundárias, com especial destaque para o cenário 8.5.

ABSTRACT

Given the complex geodynamic context of the Azores archipelago, responsible for the great diversity of natural hazards that affect the islands, among which are landslides, the main goal of this thesis is to evaluate landslide susceptibility in the West area of Terceira island, as a contribute for local knowledge of the geographical distribution of these phenomena, regarding interdisciplinary landscape management and land-use planning.

As required, an historical landslide inventory was developed in this work, which is composed by 207 landslides identified and mapped as polygons, based on aerial photo-interpretation and field work. These landslides are mainly superficial translational slides, which in some cases evolved to debris flows, with rupture depth of 3.5 m or less. In total, the mapped landslides present a planimetric area of approximately 43.800 m² and an estimated volume of 97.300 m³, spread through Serreta (62,56%), Doze Ribeiras (30,14%) e Santa Bárbara (7,30%) parishes.

For the landslides morphometric characterization, eight parameters and two morphometric indexes were calculated, throughout both planimetric (2D) and three-dimensional (3D) measurements. As a result of a comparative analysis between the two methodologies, it was concluded that, given the high slopes verified in the study area, the 3D measurements are better suited for the determination of the landslides magnitude, avoiding bias in the frequency of landslides of different magnitudes. During this process, it was also concluded that the use of automatic tools to determine the landslides length and width, which are used in order to calculate other morphometric parameters, would have lead to serious errors in the resulting values for this study. Therefore, the measurements were manually and individually determined for each landslide.

The correlation degree between the morphometric parameters and indexes was evaluated using the Pearson coefficient, that allowed to verify the existence of high

interdependency between all the parameters, except for the scar angle and the two indexes.

The landslides magnitude was evaluated using the landslides scar area. Applying statistical tests, 61 theoretical probability distributions were adjusted to the scar area values distribution. As a result of this evaluation, it was demonstrated that the best fit to the data distribution was the log-normal distribution of three parameters, based on which the magnitude probability was ascertained.

The landslide susceptibility evaluation in the West area of Terceira island was carried out using the Information Value, in a GIS environment, using eleven predisposing factors (independent variables) and the landslide inventory (dependent variable) as input data to the model. The influence of each predisposing factor and their ranking for inclusion in the model were accessed by calculating the area under the success curve. The main conclusion was that the slope is, by far, the most important predisposing factor contributing to the landslides occurrence in the study area. The susceptibility model was adjusted by adding factors to the model in a sequence mode, based on the pre-defined ranking. Throughout this process, it was possible to verify that, despite not being the best algorithm, it was possible to use all the predisposing factors considered, given that the area under the success curve was very high, allowing to classify the model as *excellent* or *very satisfactory*.

To validate the model and to evaluate its predictive ability, using the eleven predisposing factors, the landslides inventory was split, randomly, generating a modelling group and a validation group, and then the areas under the success curve and under the prediction curve were determined. Once again, the results permitted the classification of the model as *excellent* or *very satisfactory*. In fact, it was concluded that the model is able to predict 90% of the landslides in only about 6% of the most susceptible area in the study area.

The susceptibility model was then classified into four qualitative classes, evaluated by their ratio of effectiveness, leading to the conclusion that 7.02% of the study area has high or very high susceptibility to landslides and that 16.31% and 76.67% of the area has moderate or low or null susceptibility to landslides, respectively.

Crossing the vulnerable elements with the final susceptibility map, made it possible to conclude that 3.89% of the buildings in the study area are located in high susceptibility areas. Also it was concluded that 15.45% of the main roads and 17.12% of the secondary roads are located in areas covered by the three classes of higher landslide susceptibility.

The landslide susceptibility maps developed based on two climate change scenarios (RCP 4.5 e 8.5), for three different time projections (2039, 2069 e 2099), demonstrated a trend for stabilizing the area covered by all susceptibility classes, except for the 2099 projection, on the 8.5 scenario, which points out a significant increase in the area covered by the moderate susceptibility class, over a decrease in the low or null susceptibility class.

It was also possible to verify, for both climate change scenarios, comparing to the present situation, a reduction in the susceptibility level to which the buildings and main roads are exposed, and an increase in susceptibility regarding the secondary roads, especially in the 8.5 scenario.

1. INTRODUÇÃO

1.1 INTERDISCIPLINARIDADE DA PAISAGEM

Existem inúmeras abordagens à paisagem, já que cada vez mais ciências se interessam por este conceito, sendo a paisagem considerada como a chave que permite dar resposta a muitas questões de gestão do espaço, eventualmente devido ao potencial de integração que oferece (Pinto-Correia, 2000). Na realidade, a paisagem alargou a sua primitiva e limitada consideração estética a uma interpretação mais ampla, abrangendo também a sua história, os aspetos biológicos e físicos que a informam e as sociedades e culturas que a modelam, transformam e lhe dão sentido humano (Ribeiro Telles, 1994).

A paisagem constitui um sistema complexo e dinâmico, onde os diferentes fatores naturais e culturais se influenciam uns aos outros e evoluem conjuntamente, ao longo do tempo, determinando e sendo determinados pela estrutura global (Forman e Godron 1986).

De acordo com Magalhães (2007), a paisagem constitui a figura que a superfície da Terra assume, como resultado da interação dinâmica dos múltiplos fatores que para ela concorrem, abióticos e bióticos, incluindo o homem, correspondentes a outras tantas disciplinas do conhecimento: no sub-solo (*e.g.* geologia, litologia, hidrogeologia, geomorfologia), à superfície (pedologia, fitossociologia e zoologia) e na atmosfera, (climatologia e os agentes modificadores, físicos, químicos e biológicos, transportados pelas massas de ar), bem como as disciplinas relativas ao estudo das relações humanas, sob as várias formas (sociologia, antropologia, psicologia ambiental). Assim sendo, a compreensão da paisagem requer o conhecimento de múltiplos fatores, constituindo uma realidade multifacetada (Cancela d'Abreu *et al.*, 2004)

Numa perspetiva geomorfológica, o conceito de paisagem, enquanto sistema, é considerado dinâmico, visto que o seu funcionamento resulta da resposta a uma série de forças que atuam sobre ela, de forma a atingir um equilíbrio dinâmico através de um

ajustamento das formas do próprio sistema. Assim, o estudo e interpretação da geologia - geomorfologia de uma região, feita numa base ecológica, permite o conhecimento biofísico do território, contribuindo para a tomada de decisões a nível de projeto e planeamento (Abreu, 2008).

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Em muitas partes do mundo, perigos naturais como sismos, cheias, movimentos de vertente, secas, incêndios, ciclones e tempestades, *tsunamis* e erupções vulcânicas são responsáveis por catástrofes que resultam na perda de vidas humanas e em impactos negativos nos ecossistemas e na economia (ISDR, 2001).

Segundo Varnes *et al.* (1984), os desastres naturais (*natural hazards*) consistem na probabilidade de ocorrência de potenciais fenómenos destrutivos numa determinada área, para um dado período de tempo.

Desde 1900, registaram-se mais de 9 mil desastres naturais em todo o mundo. No entanto, mais de 80% desses eventos apenas ocorreram depois de 1974. No período compreendido entre 1974 e 2003 morreram 2 milhões de pessoas e 5 milhões foram afetadas por desastres naturais, com prejuízos estimados em mais de 60 mil milhões de euros (Guha-Sapir *et al.*, 2004). Tais registos poderão estar, de alguma forma, enviesados pelo crescimento das tecnologias de informação e comunicação, que sofreram uma grande evolução desde 1974.

A recente tendência de intensificação da ocorrência de catástrofes naturais (EM-DAT, 2012), ilustrada na figura 1.1, constitui uma séria ameaça ao desenvolvimento sustentável. O contínuo crescimento da população mundial, aliado aos padrões de evolução económica, que têm originado uma urbanização descontrolada, bem como uma maior difusão da pobreza, levaram a que muitas pessoas fossem forçadas a viver em zonas com grande propensão para a ocorrência de desastres naturais, colocando-se numa situação de vulnerabilidade.

Segundo Guha-Sapir *et al.* (2004), existem evidências e previsões científicas que indicam que as alterações climáticas globais irão aumentar o número de eventos meteorológicos extremos, criando desastres naturais mais frequentes e intensos. Este cenário será ainda agravado pelo crescimento da população mundial e a sua concentração em centros urbanos.

As Nações Unidas, através da Resolução da Assembleia-Geral n.º 42/169, de 11 de Dezembro de 1987, declararam a década de 90, do século passado, como a Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais (IDNDR). Nesse âmbito, definiu-se desastre natural como sendo um fenómeno natural com “*uma grave interferência no funcionamento de uma comunidade ou sociedade, causando perdas humanas, materiais, e económicas ou ambientais generalizadas que excedem a capacidade de recuperação da comunidade ou sociedade, utilizando apenas recursos próprios*”. Em termos práticos, o objetivo principal dessa iniciativa consistiu na redução da perda de vidas humanas, da destruição de propriedade e dos prejuízos sociais e económicos causados por fenómenos naturais, aumentando a perceção social da importância da redução de desastres (ISDR, 2001).

A investigação da natureza dos impactos é vital para compreender integralmente o processo das catástrofes naturais, sendo a chave para uma redução efetiva dos mesmos, através de ações de pré-planeamento e de ordenamento do território, especialmente em ilhas de pequenas dimensões, onde a capacidade de resposta é limitada (Méheux *et al.*, 2007).



Figura 1.1 - Número de catástrofes naturais que ocorreram, a nível mundial, entre 1900 e 2015 (adaptado de EM-DAT, 2016).

A contabilização de catástrofes naturais no gráfico anterior teve por base o cumprimento de pelo menos um dos seguintes critérios: 1) provocar a morte de 10 ou mais pessoas; 2) afetar 100 ou mais pessoas; 3) resultar em declaração de estado de emergência; e 4) obrigar ao pedido de assistência internacional.

Segundo Carrara *et al.* (1999), os eventos catastróficos estão frequentemente interligados por relações causais. Por exemplo, terremotos geralmente originam movimentos de vertente de várias dimensões, enquanto grandes erupções vulcânicas podem causar o desabamento de vertentes e extensos *lahars* (deslizamentos de escorrências de lava vulcânica). Além disso, se, por um lado, grandes tempestades normalmente são responsáveis por cheias instantâneas e movimentos de vertente, por outro, os movimentos de vertente e escorrências de lava frequentemente obstruem os leitos dos rios e ribeiras, provocando conseqüentemente cheias.

Estas complexas interligações implicam uma abordagem interdisciplinar e integrada na avaliação de perigos naturais e em termos de mitigação do risco a eles associado. Por outro lado, requerem investimentos de longo prazo, tanto a nível estrutural (*e.g.* regulação de rios, estabilização de vertentes, reforço de infraestruturas), bem como ao nível de medidas não estruturais, como por exemplo o planeamento e uso sustentável dos recursos, incluindo o uso do solo (Alexander, 1995).

Segundo Varnes *et al.* (1984), os movimentos de vertente (*landslides*) não são tão impressionantes, nem causam tantos prejuízos financeiros, quanto os sismos, grandes cheias ou outras catástrofes naturais. Todavia, à escala global, são muito mais abrangentes e, ao longo do tempo, podem vir a causar mais danos materiais do que qualquer outro tipo de evento geológico.

Assim, os movimentos de vertente são considerados como um dos grandes perigos naturais em grande parte do mundo (Carrara *et al.*, 2003), sendo frequentemente responsáveis por perdas consideráveis, tanto financeiras como em termos de vidas humanas, sendo que a severidade dos seus impactos agrava-se com o aumento do desenvolvimento urbano e com a alteração do uso do solo, o que justifica que os movimentos de vertente comecem a ser alvo de uma grande quantidade de investigações científicas e de estudos nas áreas da engenharia e em termos de políticas de uso do solo por todo o mundo (Popescu, 2002).

A ocorrência de movimentos de vertente modifica significativamente a superfície do planeta, pelo que, estes eventos assumem um papel importante na evolução das paisagens (Harman e Doe, 2001; Galli *et al.*, 2008, Guzzetti *et al.*, 2012), podendo também afetar alguns serviços dos ecossistemas.

Em todo o mundo, os movimentos de vertente, vulgarmente designados por deslizamentos de terra ou escorregamentos de terra, causam cerca de 1000 mortes por ano e são responsáveis por prejuízos materiais na ordem dos 4 biliões de dólares americanos (Lee e Pradhan, 2007), ou seja, cerca de 3,25 mil milhões de euros.

Nos últimos 250 anos, tem-se assistido à construção de edifícios e outras infraestruturas em cima de antigos movimentos de vertente, pelo que, havendo seres humanos a viver, trabalhar e conduzir em cima ou nas imediações de vertentes instáveis, o risco à ocorrência de movimentos de vertentes aumenta consideravelmente (van Den Eeckhaut *et al.* 2010).

Neste sentido e numa lógica de ser necessário conhecer para proteger, torna-se essencial delimitar áreas de risco a desastres naturais, adquirir um conhecimento detalhado do funcionamento dos fenómenos perigosos e proceder à avaliação das suas consequências potenciais. Apenas assim será possível minimizar os prejuízos e perdas, por exemplo, através da recolocação das populações e atividades económicas, da implementação de medidas de mitigação e de uma correta gestão do território, no que respeita às futuras intervenções humanas. Deste modo, a identificação e delimitação das áreas de perigo e de risco, no quadro do ordenamento e da gestão do território, constituem condições indispensáveis para a prevenção e minimização dos prejuízos decorrentes dos fenómenos e atividades perigosos (Zezêre *et al.*, 2005).

Para melhor prever futuras ocorrências de deslizamentos de terra e aumentar a proteção contra estes fenómenos, são realizadas análises de suscetibilidade a movimentos de vertente (Carrara *et al.*, 1995). Os modelos preditivos de movimentos de vertente, geralmente, tentam identificar onde os movimentos de vertente poderão vir a ocorrer, numa determinada região, com base num conjunto de características ambientais relevantes (Guzzetti, *et al.*, 1999).

Segundo Ramos *et al.* (2010), o desafio prioritário do ordenamento territorial é o de conseguir a interligação geográfica harmoniosa das atividades económicas, que sustentam qualquer sociedade e que criam a riqueza necessária para o bem-estar social,

com o funcionamento dos sistemas naturais, que fornecem recursos imprescindíveis, mas que também, devido à sua dinâmica, podem constituir situações de perigo. Nesta perspectiva, o ordenamento do território deverá assentar em dois vetores essenciais: 1) “dar espaço” aos sistemas naturais para que se possam autorrenovar e autorregenerar; e 2) manter as pessoas e bens afastados dos perigos com incidência espacial, levando à diminuição do risco. Ou seja, adotar os princípios da prevenção e da precaução, que estão na base do desenvolvimento sustentável de qualquer sociedade.

Os pressupostos anteriormente enunciados têm especial importância em pequenas ilhas, uma vez que as mesmas estão expostas a um grande número de perigos naturais, cujos impactos se fazem sentir tanto em termos biofísicos como em termos dos sistemas humanos (Méheux *et al.*, 2007).

O arquipélago dos Açores é geologicamente recente e está localizado numa região ativa do ponto de vista vulcânico e tectónico, pelo que não é de surpreender que esteja sujeito a muitos perigos naturais. No entanto, os perigos associados a fenómenos geológicos não se confinam a terremotos e erupções vulcânicas, sendo que também movimentos de vertente, cheias e erosão em vales e áreas costeiras, são outros dos perigos a ter em conta (Malheiro, 2006). De acordo com Gaspar *et al.* (2004), os eventos geológicos nos Açores, foram responsáveis no passado pela morte de milhares de pessoas, bem como por grande destruição e perdas materiais (Gaspar *et al.*, 2004).

Os Açores são uma área particularmente vulnerável à instabilidade de vertentes devido a fatores geológicos, geomorfológicos e meteorológicos (Marques, 2013). A sua natureza vulcânica e a morfologia das suas ilhas, nomeadamente a existência de vertentes escarpadas, originadas por materiais pouco consistentes, propiciam a ocorrência de movimentos de vertente que, normalmente, são desencadeados por sismos, erupções vulcânicas ou eventos meteorológicos extremos (Marques, 2004).

Num passado recente, movimentos de vertente foram responsáveis por várias catástrofes naturais de dimensões consideráveis nos Açores. A ocorrência destes fenómenos pode ser desencadeada por precipitação intensa e de longa duração, frequentemente agravada por instabilidade geológica causada pela atividade humana, prejudicando as dinâmicas dos ecossistemas: alterações nas redes de drenagem, mudanças em termos de ocupação do solo (*e.g.* remoção do coberto vegetal), abertura de novas estradas, taludes mal construídos, aterros sanitários e lixeiras, entre outros (Malheiro, 2006).

1.3 INVESTIGAÇÃO SOBRE INSTABILIDADE GEOMORFOLÓGICA EM PORTUGAL E NOS AÇORES

Em Portugal, o estudo de movimentos de vertente desenvolveu-se de forma mais intensa na década de 60 do século XX (Zêzere *et al.*, 1997). Comparativamente com outros países, em Portugal a quantidade de investigação desenvolvida nesta área é menor, no entanto, a evolução tem sido positiva, tendo sido desenvolvidos alguns trabalhos de relevo nos últimos anos (*e.g.* Rebelo, 1991; Zêzere, 1997 e 2002; Bateira e Soares, 1997; Bateira *et al.*, 1998a e 2008; Zêzere *et al.*, 1999, 2004, 2005a, 2007, 2008; Bateira, 2001; Garcia, 2002; Santos, 2003; Dimuccio *et al.*, 2004; Rochete, 2004; Quaresma, 2008; Pereira, 2009; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013).

Em termos de legislação nacional, apenas em 2007 se começou a equacionar a prevenção e gestão de riscos naturais, pela introdução da Lei n.º 58/2007, de 4 de Setembro, publicada em Diário da República (1.ª série, N.º 170, 4 de Setembro de 2007), que aprova o PNPOT - Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território. No âmbito do PNPOT, a prevenção dos riscos naturais, entre os quais se encontram os movimentos de vertente, foi definida como uma prioridade do modelo territorial, demonstrando uma mudança de paradigma na cultura de prevenção e redução dos riscos.

Marques (2013), num estudo sobre movimentos de vertente (identificação, caracterização e análise da suscetibilidade), centrado no concelho da Povoação (ilha de São Miguel), efetuou um levantamento detalhado de todos os trabalhos de relevo, focados na temática relativa a instabilidade geomorfológica, realizados nos Açores, onde identifica os trabalhos apresentados por Constância (1960) e por Zbyszewski (1961), que se refere à "erosão torrencial", como sendo os primeiros a abordar a evolução geomorfológica da paisagem e a relacionar a ocorrência de movimentos de vertente com a formação de fajãs, como resultado de atividade sísmica. O autor destaca ainda os seguintes estudos, que de alguma forma se relacionam com movimentos de vertente em diversas ilhas dos Açores:

São Miguel - Marques e Madeira (1975 e 1977), Rebelo (1985 e 1997), Raposo (1987 e 1988), Malheiro e Fraga (1996), Bateria *et al.* (1998b), Gaspar *et al.* (1997 *in* Marques, 2013), Guest *et al.* (1997 *in* Marques, 2013), Peterson e Coutinho (1997 *in* Marques, 2013), Valadão (2002), Valadão *et al.* (2002), Gomes (2003), Goulart (2004), Marques

(2004), Medeiros (2004), Resendes (2004), Amaral (2005), Amaral *et al.* (2005 *in* Marques, 2013, 2007a *in* Marques, 2013, 2007b, 2009c, 2009d e 2009e *in* Marques, 2013), Gomes *et al.* (2005), Marques e Amaral (2005 *in* Marques, 2013), Marques *et al.* (2005 *in* Marques, 2013, 2007b, 2008c, 2008d, 2009a, 2009b, 2010a *in* Marques, 2013, 2010b *in* Marques, 2013, 2011a *in* Marques, 2013), Malheiro (2006), Wallenstein *et al.* (2007) e Amaral (2010 *in* Marques, 2013);

Flores - Forjaz (1988a *in* Marques, 2013 e 1988b *in* Marques, 2013), Malheiro e Fraga (1995 *in* Marques, 2013 e 2008 *in* Marques, 2013), Malheiro (2006), Pacheco *et al.* (2007), Marques *et al.* (2008a *in* Marques, 2013 e 2010d) e Amaral (2009a *in* Marques, 2013);

Faial - Madeira *et al.* (1998 *in* Marques, 2013), Malheiro *et al.* (1998 *in* Marques, 2013), Lameiras (2006), Malheiro (2006) e Marques *et al.* (2007a *in* Marques, 2013, 2008b *in* Marques, 2013 e 2010b *in* Marques, 2013);

São Jorge - Vieira (2005) e Malheiro (2006);

Santa Maria - Marques *et al.* (2010c *in* Marques, 2013, 2011b *in* Marques, 2013);

Pico - Amaral *et al.* (2009b *in* Marques, 2013).

Em relação à ilha Terceira, onde se localiza a área de estudo deste trabalho, apenas há a registar um trabalho sobre a temática de movimentos de vertente, apresentado por Silva (2010), que se centra na análise da ocupação e uso do solo no concelho de Angra do Heroísmo e a respetiva influência nos "movimentos de terra e de vertente". No entanto, a carta de suscetibilidade apresentada no referido trabalho, que deriva da sobreposição de mapas de fatores de predisposição, no limite, traduz-se apenas numa avaliação qualitativa (*e.g.* método heurístico), com base em critérios de ponderação subjetivos, sem ter por base qualquer tipo de análise quantitativa ou modelo estatístico/probabilístico/determinístico, nem tão pouco um inventário de movimentos de vertente, pelo que não reflete uma avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente robusta.

1.4 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com a presente dissertação de doutoramento pretende-se avaliar a suscetibilidade da zona Oeste da ilha Terceira a movimentos de vertente, através de um modelo estatístico bivariado e com recurso a SIG (Sistemas de Informação Geográfica), analisando, posteriormente, a variação da suscetibilidade a movimentos de vertente em diversos cenários de alterações climáticas globais.

Para tal, foram definidos os seguintes **objetivos específicos para a dissertação**:

- 1) Inventariação e cartografia dos movimentos de vertente na zona Oeste da ilha Terceira, através de fotointerpretação, nomeadamente por interpretação monoscópica de ortofotos, e de levantamento de campo de pormenor;
- 2) Caracterização morfométrica dos movimentos de vertente e análise das relações entre os diferentes parâmetros e índices morfométricos considerados;
- 3) Definição das curvas de frequência-magnitude para o inventário de movimentos de vertente criado, com base na análise de um conjunto de distribuições teóricas de probabilidade;
- 4) Hierarquização dos fatores de predisposição considerados e avaliação da variabilidade das taxas de sucesso para os diferentes algoritmos de suscetibilidade, no intuito de definir os fatores a incluir ou a excluir do algoritmo de suscetibilidade final;
- 5) Desenvolvimento de um modelo de avaliação da suscetibilidade da área de estudo à ocorrência de movimentos de vertente, através do Método do Valor Informativo (método estatístico bivariado), com recurso a SIG;
- 6) Validação do modelo final através de uma partição aleatória do inventário de movimentos de vertente, criando um grupo de modelação e um grupo de validação, estimando o grau de ajuste do modelo através da taxa de sucesso, com base no grupo de modelação, e a respetiva capacidade preditiva através do taxa de predição, usando o grupo de validação;
- 7) Identificação dos elementos em risco na área de estudo, concretamente no que diz respeito ao edificado, às estradas principais e às estradas secundárias, e avaliação da sua distribuição pelas diferentes classes de suscetibilidade definidas;

- 8) Modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente em cenários de alterações climáticas globais, recorrendo a cenários produzidos pelo IPCC (*Intergovernmental panel on Climate Change*), para diversos horizontes temporais;
- 9) Análise da variação espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo para os diferentes cenários de alterações climáticas globais considerados;
- 10) Identificação dos elementos em risco na área de estudo tendo em conta os modelos criados com base nos cenários de alterações climáticas globais e análise comparativa da variação da sua distribuição pelas diferentes classes de suscetibilidade definidas, entre os vários cenários e o cenário atual.

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

Introdução - Neste ponto foi feita uma abordagem inicial à temática dos perigos naturais e dos movimentos de vertentes, em concreto. Definiu-se ainda o problema sobre o qual a dissertação se debruça, tendo-se apresentado os respetivos objetivos gerais e específicos.

Capítulo 2 - Consiste numa revisão da bibliografia, onde são apresentados os fundamentos teóricos mais relevantes referentes ao estudo de movimentos de vertente, incidindo sobre a terminologia, conceitos e definições existentes na bibliografia especializada, especificando os adotados para este trabalho. São ainda abordados outros temas, como as principais causas para a ocorrência destes fenómenos e o modelo concetual do risco a movimentos de vertente.

Capítulo 3 - Corresponde à caracterização da área de estudo, localizada, como anteriormente referido, na zona Oeste da ilha Terceira, administrativamente inserida no concelho de Angra do Heroísmo. É feita uma análise das principais características geomorfológicas, geológicas, climáticas, administrativas, demográficas e infraestruturais.

Capítulo 4 - Engloba a apresentação do inventário de movimentos de vertente, criado no âmbito deste trabalho para área de estudo, explicitando a metodologia utilizada, bem como a caracterização morfométrica e tipológica dos movimentos de vertente cartografados. Por outro lado, é feita a avaliação de um conjunto de distribuições teóricas de probabilidade, no intuito de definir qual o melhor ajustamento para a

distribuição de frequência-magnitude (área) dos movimentos de vertente do inventário. Este capítulo abrange o trabalho desenvolvido para concretizar os objetivos específicos 1, 2 e 3.

Capítulo 5 - Enquadra o estado da arte sobre avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, apresentando as diferentes metodologias de análise, escalas de trabalho e tipologias de unidade cartográficas, justificando as opções tomadas na presente investigação. São também apresentados os fatores de predisposição à ocorrência de movimentos de vertente considerados para a definição do algoritmo de suscetibilidade, bem como os critérios e metodologias adotados para a sua definição. É ainda apresentada a metodologia de validação do modelo desenvolvido e discutidos os resultados obtidos na modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, avaliados através do cálculo das Áreas Abaixo das Curvas (AAC) das Curvas de Sucesso (SRC) e das Curvas de Predição (PRC). Por fim, é feita uma análise da distribuição dos elementos em risco pelas diferentes classes de suscetibilidade definidas. Este capítulo abrange o trabalho realizado para alcançar os objetivos específicos 4, 5, 6 e 7.

Capítulo 6 - É analisada a variação espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente em diferentes cenários futuros de alterações climáticas globais, com base no modelo de suscetibilidade desenvolvido para a área de estudo, bem como a variação na distribuição dos elementos em risco pelas classes de suscetibilidade definidas, estabelecendo-se uma análise comparativa com os resultados verificados na atualidade. Este capítulo inclui o trabalho desenvolvido para dar resposta aos objetivos específicos 8, 9 e 10.

Capítulo 7 - Neste último capítulo são tecidas considerações finais, apresentando-se as principais conclusões retiradas relativamente aos objetivos estabelecidos na dissertação. São ainda apresentadas algumas linhas de investigação consideradas como mais relevantes e estratégicas no que se refere a futuros trabalhos de investigação desta natureza nos Açores, particularmente na ilha Terceira.

2. FUNDAMENTOS GERAIS SOBRE

MOVIMENTOS DE VERTENTE

2.1 DEFINIÇÕES DE MOVIMENTO DE MASSA, MOVIMENTO DE TERRENO E MOVIMENTO DE VERTENTE

Os movimentos de vertente, *per si* ou associados a outros fenómenos como sismos, erupções vulcânicas, fogos ou tempestades de chuva, são uma das principais causas de mortes, acidentes e prejuízos materiais em todo o mundo, no que diz respeito a catástrofes naturais (WP/WLI, 1993b). Tendo em conta a relevância dos impactos negativos associados aos movimentos de vertente, tornou-se necessária a definição de uma terminologia rigorosa e uniforme.

No âmbito da Década Internacional para a Redução de Catástrofes Naturais (1990-2000), a UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) promoveu a criação de um grupo de trabalho, denominado de *Working Party on World Landslide Inventory* (WP/WLI), que desenvolveu um trabalho de uniformização da terminologia e metodologias de inventariação utilizadas no estudo de movimentos de vertente (WP/WLI, 1990, 1991, 1993a, 1993b).

Zêzere (1997) apresenta um trabalho de síntese sobre a terminologia e conceitos relacionados com os movimentos de vertente, evidenciando a origem dos autores e a abrangência dos termos. O autor foca a problemática de existirem termos em vários idiomas que são utilizados com significados múltiplos, apontando que, no entanto, a terminologia de base relativa aos movimentos de vertente difundida a nível internacional é essencialmente de origem anglo-saxónica.

O WP/WLI definiu *landslide* (movimento de vertente) como “um movimento de descida, numa vertente, de uma massa de rocha, terra ou detritos”, a partir da proposta de Cruden (1991). O termo exclui os movimentos verticais de abatimento e

assentamento (subsidência), as avalanches de neve (WP/WLI, 1993b) e os efeitos da expansão e retração de solos argilosos (Zêzere, 1997).

Como tal é evidente a necessidade de se utilizar uma terminologia rigorosa a nível internacional. À imagem do que acontece na maioria dos trabalhos realizados em Portugal nos últimos anos, neste trabalho adotou-se a classificação e terminologia proposta pelo WP/WLI (1993a e 1993b).

De acordo com Zêzere (1997), os movimentos de vertente apenas abrangem os casos de desabamento, balançamento, deslizamento, expansão lateral, escoada ou fluxo e movimentos complexos, como se pode verificar pela informação sistematizada na tabela 2.1.

Tabela 2.1- Abrangência dos termos movimento de vertente, movimento de terreno e movimento de massa, proposta por Zêzere (1997).

Termo	Abrangência
Movimentos de Massa	Movimentos de Terreno
	Movimentos associados ao gelo e à neve
Movimentos de Terreno	Movimentos de Vertente
	Subsidência (abatimentos, assentamentos)
	Expansão/retração em solos argilosos
Movimentos de Vertente	Desabamento
	Balançamento
	Deslizamento
	Expansão Lateral
	Escoada
	Movimentos complexos

Segundo Varnes (1978), o termo movimento de terreno é praticamente equivalente ao termo movimento de massa, salvaguardando a exclusão de casos de subsidência e dos movimentos ligados à ação do gelo e da neve. Assim, os movimentos de terreno englobam, para além dos movimentos de vertente, as deslocações com dominante vertical (abatimentos e assentamentos) e os movimentos associados à expansão/retração dos solos argilosos. Segundo Flageollet (1989 *in* Zêzere, 1997) os movimentos de terreno implicam uma rotura e o movimento simultâneo da massa afetada, englobando *"todas as formas de deslocação que se podem verificar (e.g. abatimentos,*

desabamentos, deslizamentos, escoadas,) e todos os materiais que podem ser deslocados", sendo, por isso, mais abrangentes do que os movimentos de vertente.

Como se pode observar na sistematização presente na figura 2.1, os movimentos de massa são a classe mais abrangente, englobando os movimentos de terreno e os movimentos de vertente. Segundo Hutchinson (1968 *in* Zêzere, 1997), os movimentos de massa compreendem "*todos os movimentos induzidos pela gravidade, com exclusão daqueles em que o material é mobilizado por um agente de transporte como o gelo, neve, água ou ar, designados por transporte em massa*".

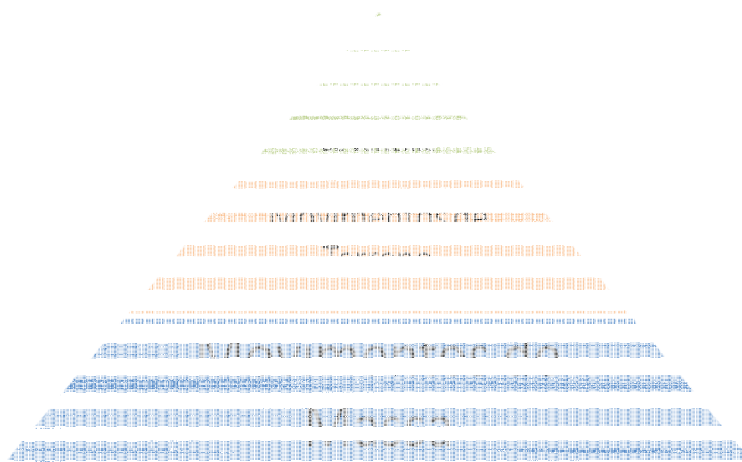


Figura 2.1 - Esquema representativo da abrangência dos termos movimento de massa, movimento de terreno e movimento de vertente.

2.2 CLASSIFICAÇÃO E TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

Existem diversas classificações para as tipologias de movimentos de vertente a nível internacional, descritas por Zêzere (1997). Neste trabalho, segue-se a classificação utilizada por Dikau *et al.* (1996), baseada nas propostas de Varnes (1978) e da WP/WLI (1993b), em que o principal fator de diferenciação é o tipo de mecanismo do movimento de vertente, sendo que o material afetado é considerado como fator secundário.

2.2.1 DESABAMENTO

O desabamento (*fall*), exemplificado na figura 2.2, é definido como “*uma deslocação de solo ou rocha a partir de uma vertente abrupta, ao longo de uma superfície onde os movimentos tangenciais são nulos ou reduzidos. O material desloca-se predominantemente pelo ar, por queda, saltação ou rolamento*” (WP/WLI, 1993b). O movimento de vertente é brusco e caracteriza-se por uma velocidade rápida a muito rápida. No entanto, segundo Cruden e Varnes (1996), excetuando situações em que a massa deslocada é escavada, a queda será precedida por movimentos de deslizamento e balançamento que separam o material deslocado da massa não perturbada.

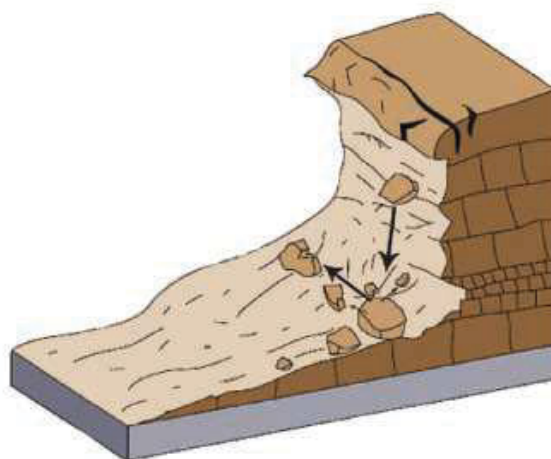


Figura 2.2 - Ilustração de um desabamento (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrowsky, 2008).

A queda livre de massas de solo e rochas ocorre em vertentes cujo declive excede os 76 graus. Abaixo deste declive a massa deslocada pode produzir um ressalto, dependendo das propriedades dos materiais e da geometria do terreno (Hungry e Evans, 1988 *in*

Cruden e Varnes, 1996). Em vertentes com ângulos de 45 graus de declive, ou inferiores, as partículas passam a ter caminhos de movimentação (rolamento), verificando-se uma transição gradual da saltação para o rolamento à medida que a trajetória da saltação e os graus de incidência diminuem (Cruden e Varnes, 1996).

2.2.2 BALANÇAMENTO

Um balançamento (*topple*), ilustrado na figura 2.3, caracteriza-se por “*uma rotação de uma massa de solo ou rocha, a partir de um ponto ou eixo situado abaixo do centro de gravidade da massa afetada*” (WP/WLI, 1993b).



Figura 2.3 – Ilustração de um Balançamento (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrowsky, 2008).

O balançamento é conduzido pela ação das forças laterais exercidas por unidades adjacentes ou por fluidos presentes em diáclases e fraturas (Cruden e Varnes, 1996), sendo, segundo Romana (1991 *in* Zêzere, 1997), frequente em massas rochosas com descontinuidades inclinadas de modo contrário ao declive.

O desenvolvimento deste processo varia entre extremamente lento e extremamente rápido e pode evoluir para desabamento ou deslizamento, dependendo da geometria da massa movimentada, da geometria da superfície de separação e da orientação e extensão das descontinuidades cinéticas ativas (Cruden e Varnes, 1996).

De acordo com Goodman e Bay (1976 *in* Cruden e Varnes, 1996) os balançamentos podem ser classificados tendo em conta o tipo de processos envolvidos, podendo dividir-se em balançamentos por flexura, em bloco e em bloco por flexura.

2.2.3 DESLIZAMENTO

Um deslizamento (*slide*) é definido com um “*movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de rotura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial*” (WP/WLI, 1993b). Segundo Zêzere (2000 in Pereira, 2009), “*a massa deslocada durante o movimento permanece em contacto com o material subjacente não afetado, apresentando graus de deformação bastante variáveis, consoante o tipo de deslizamento*”.

Inicialmente, os deslizamentos tendem a apresentar alguns sinais que indicam que o processo está em curso, tais como, de acordo Cruden e Varnes (1996), estrias ao longo do plano de rotura e nos flancos, indicadoras da direção da deslocação.

Segundo Ayala (1991 in Marques, 2013), a movimentação por deslizamento é ativada quando a resistência ao corte dos terrenos é ultrapassada pelo aumento da tensão cisalhante a que os materiais estão sujeitos na vertente, apresentando velocidades bastante variáveis.

Tabela 2.2 - Classificação dos deslizamentos proposta por Dikau *et al.* (1996), adaptada por Zêzere (1997).

Tipo de deslizamento		Tipo de Material		
		Rocha	Detritos	Solo
Rotacional		Simple	Simple	Simple
		Múltiplo	Múltiplo	Múltiplo
		Sucessivo	Sucessivo	Sucessivo
Translacional	Rotura compósita	Deslizamento de rocha em bloco (<i>block slide</i>)	Deslizamento de detritos em bloco (<i>block slide</i>)	Deslizamento de solo em bloco (<i>slab slide</i>)
	Rotura planar	Deslizamento de rocha (<i>rock slide</i>)	Deslizamento de detritos (<i>debris slide</i>)	Deslizamento lamacento (<i>mudslide</i>)

Os deslizamentos podem ser subdivididos em função do tipo de rotura tangencial e das características do material afetado, tal como se pode observar na tabela 2.2, tendo a seguinte descrição:

a) Deslizamento rotacional

Os deslizamentos rotacionais (*slumps*), ilustrados na figura 2.4, ocorrem ao longo de superfícies de rotura curvas, em meios geralmente homogêneos e isotrópicos (Sirieys, 1984, *in* Zêzere, 1997), apresentando uma forma topográfica característica com o plano de deslizamento côncavo. O movimento envolve uma rotação, materializada por um abatimento na parte montante do deslizamento e por um levantamento do seu sector frontal, formando aclives mais ou menos pronunciados (Zâruba e Mencl, 1982 *in* Zêzere, 1997).

Os referidos aclives permitem a retenção da água, que forma pequenos charcos, determinando o prolongamento das manifestações de instabilidade. Quando existe água em abundância, a área de acumulação do deslizamento rotacional, normalmente muito fissurada, pode ser alvo de processos de escoada ou de fluxo (Erskine, 1973 *in* Zêzere, 1997).

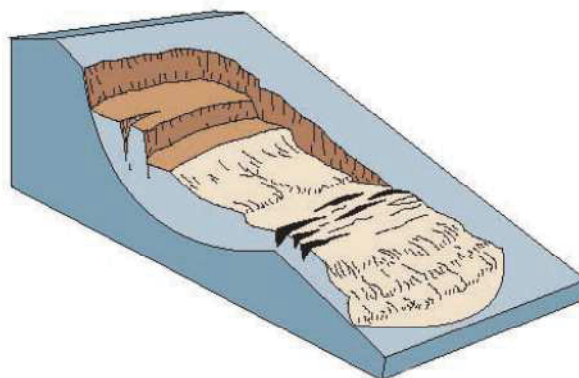


Figura 2.4 - Ilustração de um deslizamento rotacional (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrowsky, 2008).

b) Deslizamento translacional com rotura compósita

Este tipo de movimento, situa-se na transição entre os deslizamentos rotacionais e os deslizamentos translacionais planares. A forma do seu plano de rotura tende a apresentar duas secções: 1) uma forma circular ou planar de forte inclinação a montante; e 2) um estilo distintamente translacional e inclinação muito mais reduzida a jusante (Zêzere, 1997). Segundo Hutchinson (1988 *in* Marques, 2013), a geometria dos planos de rotura deste tipo de deslizamentos condiciona o desenvolvimento de tensões na massa deslocada, acompanhado por movimentações diferenciais.

A forte distorção interna reflete-se numa topografia típica com contra-escarpas e fossos (Bromhead, 1992 *in* Pereira, 2009). Este tipo de deslizamentos indica frequentemente a presença de uma fina camada ou fronteira entre o material alterado e não alterado, que controla a localização da superfície de rotura (Hutchinson, 1988 *in* Cruden e Varnes, 1996). Em deslizamentos compósitos únicos, a largura do fosso pode ser proporcional à profundidade da superfície de rotura (Cruden e Varnes, 1996).

Tal como se pode observar na tabela 2.2, Dikau *et al.* (1996) subdividem estes movimentos de vertente, tendo em conta as características do material afetado, em: 1) deslizamentos de rocha em bloco; 2) deslizamentos de detritos em bloco; e 3) deslizamentos de solo em bloco

C) Deslizamentos translacionais com rotura planar

Os deslizamentos translacionais planares, ilustrados na figura 2.5, ocorrem ao longo de superfícies de rotura planares ou ligeiramente onduladas, sendo que a massa deslocada ultrapassa frequentemente a superfície do deslizamento (Varnes, 1978).

Estes deslizamentos são típicos de meios anisotrópicos e apresentam usualmente um claro controlo estrutural. O plano de rotura desenvolve-se ao longo de superfícies de fraqueza marcadas por uma resistência ao corte reduzida, por exemplo, falhas, planos de estratificação, diáclases ou o contacto entre uma cobertura detrítica e o substrato rochoso (Nemcok, 1977 *in* Zêzere, 1997; Varnes, 1978).

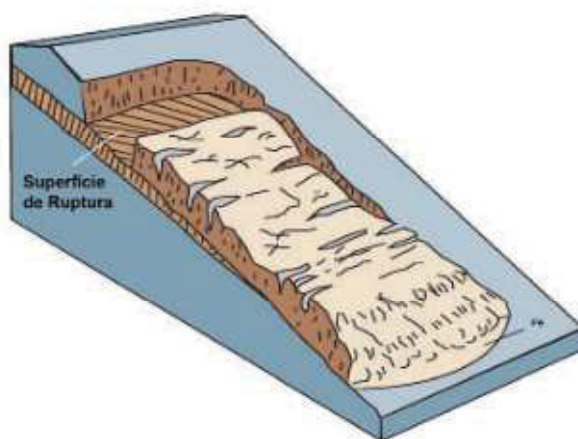


Figura 2.5 - Ilustração de um deslizamento translacional de rutura planar (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrowsky, 2008).

Tendo em conta o tipo de material afetado, como se pode verificar na tabela 2.2, os deslizamentos translacionais de rotura planar podem ser subdivididos em 3 categorias: 1) deslizamentos de rocha (*rock slide*); 2) deslizamentos de detritos (*debris slide*); e 3) deslizamentos lamacentos (*debris slide*).

Os deslizamentos de rocha são típicos de contextos montanhosos, em vertentes com descontinuidades estruturais concordantes com o declive (Zêzere, 2000 *in* Pereira, 2009). De acordo com Van Ash (1980, *in* Marques, 2013), partindo da análise geométrica e mecânica deste tipo de movimentos de vertente, quando a inclinação dos planos de estratificação é inferior ao valor do declive da vertente, estão reunidas condições favoráveis ao seu desencadeamento.

Os deslizamentos de detritos, são a forma de instabilidade mais comum nas vertentes naturais (Carson e Kirby, 1975 *in* Marques, 2013), tratando-se de deslizamentos pouco profundos, com planos de rotura paralelos à superfície topográfica, frequentemente coincidentes com o contato entre os depósitos de vertentes e o substrato rochoso (Zêzere, 2000 *in* Pereira, 2009). A velocidade de deslocação e a extensão percorrida variam na razão direta do declive e na razão inversa da quantidade de argila presente no material afetado (Hutchinson, 1988 *in* Marques, 2013).

Brunsdén (1984 *in* Zêzere, 1997) define os deslizamentos de lama como uma forma de movimento na qual "*massas de argilas brandas, silte ou areia muito fina, avançam lentamente, por deslizamento, ao longo de planos de rotura descontínuos, originando formas lombadas ou alongadas*". Keefer e Johnson (1983 *in* Pereira, 2009), destacam a forma em língua com frente arredondada, o perfil longitudinal sinusoidal (côncavo a montante e convexo a jusante) e a presença de orlas laterais a flanquear a área afetada, como aspetos morfológicos característicos, sendo que, Brunsdén e Ibsen (1996 *in* Marques, 2013) identificam três grandes unidades morfológicas, designadas por área de rotura, sector de transporte com forma de canal e área de acumulação.

2.2.4 EXPANSÃO LATERAL

A expansão lateral (*lateral spreading*), exemplificada na figura 2.6, é definida como "*uma extensão de um solo coesivo ou massa rochosa combinada com uma subsidência geral da massa fraturada do material coesivo em material mais brando subjacente. A superfície de rotura não é uma superfície de intenso cisalhamento. As expansões podem*

resultar da liquefação ou fluidificação (e extrusão) de material mais brando" (Cruden e Varnes, 1996).

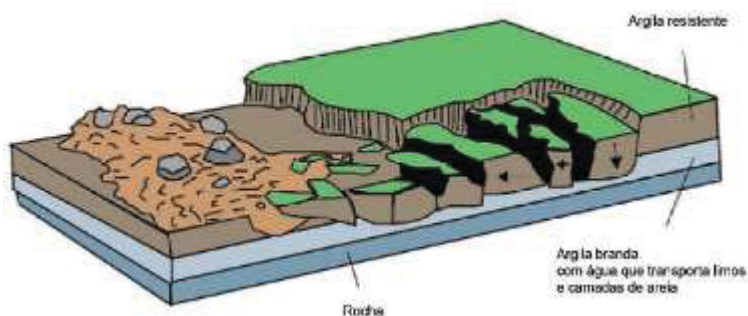


Figura 2.6 - Ilustração de uma expansão lateral (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrowsky, 2008).

Varnes (1978) distinguiu expansões típicas de rocha, que se estendem sem formar uma superfície de ruptura identificável, de movimentos em solos coesivos que se sobrepõem a materiais liquefeitos ou materiais que fluem plasticamente. Segundo Cruden e Varnes (1996), os materiais coesivos podem sofrer subsidência, translação, rotação ou desintegração e liquefação.

A expansão lateral em rocha é um processo com uma movimentação muito lenta, que resulta de deformações visco-plásticas profundas ligadas à tensão gravítica (Pasuto e Soldati, 1996 *in* Zêzere, 1997). No entanto, a expansão lateral em solos é um mecanismo extremamente rápido, caracterizado pelo “colapso de uma camada de solo a uma certa profundidade, seguido do assentamento das camadas subjacentes mais resistentes ou da ruptura progressiva de toda a massa afetada” (Buma e Van Asch, 1996 *in* Zêzere, 1997).

2.2.5 ESCOADA

A escoada (*flow*), também designada por fluxo, ilustrada na figura 2.7, é “um movimento espacialmente contínuo onde as superfícies de tensão tangencial são efêmeras e frequentemente não preservadas. A distribuição da velocidade na massa deslocada assemelha-se à de um fluido viscoso” (WP/WLI, 1993b).

De acordo com Carson e Kirby (1975 *in* Zêzere, 1997), as tensões distribuem-se por toda a massa afetada, conduzindo, geralmente, a uma grande deformação interna dos

materiais e à existência de velocidades diferenciadas, quase sempre maiores junto à superfície”.

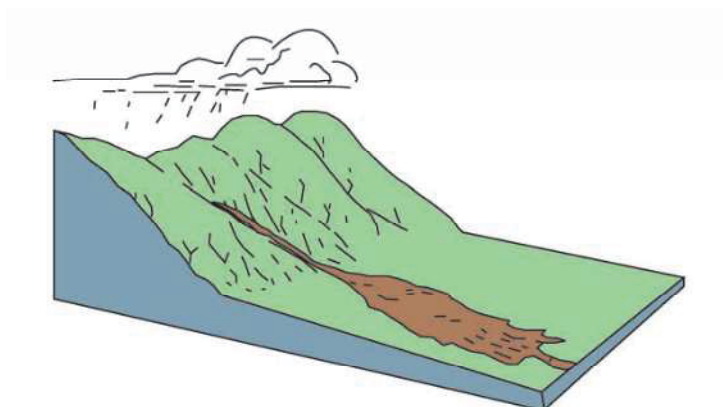


Figura 2.7 - Ilustração de uma escoada (Cruden e Varnes, 1996, adaptado por Highland e Bobrowsky (2008).

Neste tipo de movimento de vertente, verifica-se uma *“transição gradual de deslizamentos para fluxos dependendo do conteúdo de água, mobilidade e evolução do movimento. Os deslizamentos de detritos podem transformar-se em fluxos de detritos extremamente rápidos ou em avalanches de detritos à medida que o material deslocado perde coesão, ganha água ou encontra declives mais íngremes”* (Cruden e Varnes, 1996).

As escoadas em rochas são deformações gravíticas profundas e movimentos lentos e mais ou menos permanentes no tempo, que afetam massas rochosas muito diaclasadas ou estratificadas, em vertentes montanhosas (Zêzere, 1997).

As escoadas de detritos consistem numa *“mistura de materiais heterogêneos finos (areia, silte e argila), e grosseiros (calhaus e blocos), com uma quantidade de água variável, formando uma massa (...) que se desloca em direção à base da vertente, normalmente por impulsos sucessivos induzidos pela força da gravidade e pelo colapso repentino dos materiais de suporte”* (Corominas *et al.*, 1996 in Zêzere, 1997). A água tem um papel importante na fluidificação do processo e na saturação dos solos e detritos. As escoadas mais típicas têm uma densidade elevada (a carga sólida ultrapassa de forma frequente 50% da massa do material) e seguem canais pré-existent, na desembocadura dos quais o material se deposita sob a forma de cone ou leque (Corominas *et al.*, 1996 in Zêzere 1997).

2.3 COMPOSIÇÃO E DIMENSÕES MORFOLÓGICAS DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

2.3.1 MORFOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

A constituição típica dos movimentos de vertente, foi definida pela *International Association of Engineering Geology (IAEG) - Commission on Landslides* (1990), através da apresentação de um diagrama do movimento de vertente, apresentado na figura 2.8, tendo em conta critérios morfológicos que caracterizam as diversas secções que o compõe, cuja nomenclatura foi traduzida para língua portuguesa por Zêzere (1997).

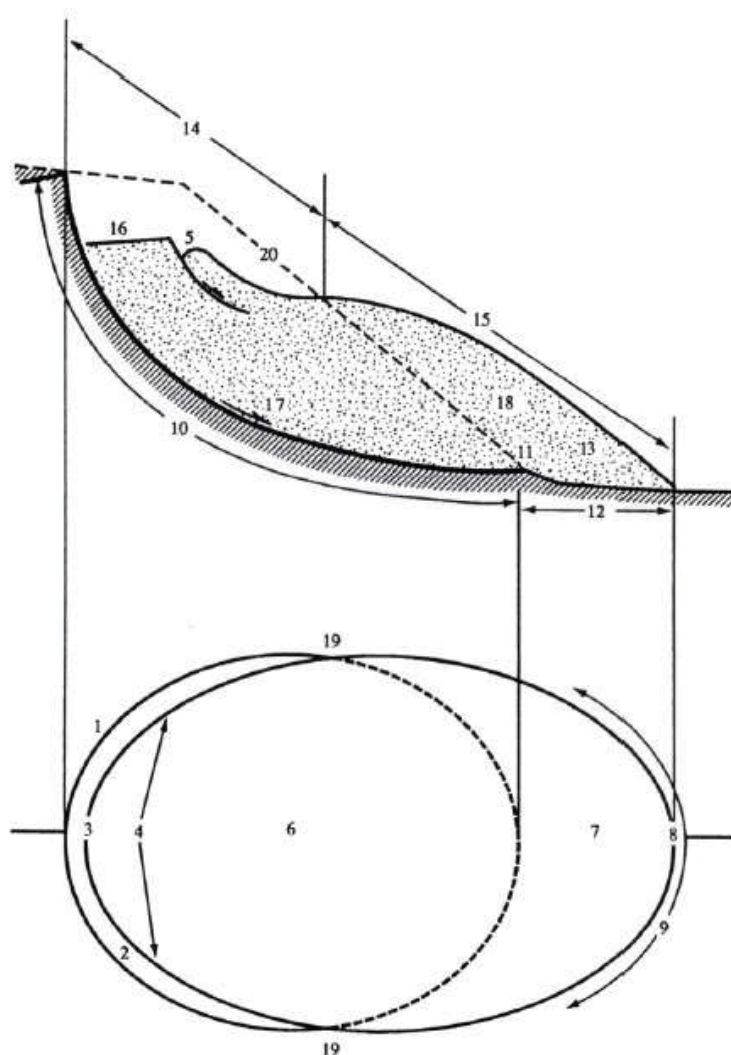


Figura 2.8 - Elementos morfológicos que constituem um movimento de vertente "tipo" (adaptado de WP/WLI, 1993).

De acordo com Oliveira, a numeração da figura 2.8 corresponde aos seguintes elementos, respetivamente:

- 1 - Coroa/cabeceira/crista (*crown*) - Área adjacente à parte superior da cicatriz principal, praticamente não afetada pelo movimento. A eventual presença de fissuras testemunha o efeito de tração neste setor;
- 2 - Cicatriz principal (*main scarp*) - Superfície inclinada ou vertical em solo não deformado, frequentemente côncava, que limita o movimento de vertente na sua parte superior;
- 3 - Topo (*top*) - Ponto mais elevado ao longo do contato entre o material deslocado e a cicatriz principal;
- 4- Cabeça (*head*) - Faixa de contacto entre o material deslocado e a cicatriz principal;
- 5 - Cicatriz secundária (*minor scarp*) - Semelhante à cicatriz principal, mas visível no seio do material deslocado. É originada por movimentos diferenciais dentro da massa deslocada;
- 6 - Corpo principal (*main body*) - Parte do material deslocado que se localiza por cima do plano de rotura, entre a cicatriz principal e o limite jusante do plano de rotura;
- 7 - Pé (*foot*) - Parte da massa afetada que se desloca para além do limite jusante do plano de rotura e se sobrepõe à superfície topográfica original;
- 8 - Extremidade jusante (*tip*) - Ponto que define a extremidade jusante do material deslocado;
- 9 - Frente (*toe*) - Faixa que define o limite jusante da massa afetada, em geral com uma forma convexa;
- 10 - Plano de rotura/superfície de deslizamento (*surface of rupture*) - Superfície ao longo da qual ocorre o movimento tangencial. Localiza-se no contato entre o material deslocado e o material não deformado;
- 11 - Limite jusante do plano de rotura (*toe of surface of rupture*) - Interceção, a jusante, entre o plano de rotura e a superfície topográfica original;
- 12) - Superfície de separação (*surface of separation*) - Superfície que separa os terrenos não afetados e o material deslocado que constitui o pé do deslizamento, a jusante do plano de rotura;
- 13 - Material deslocado (*displaced material*) - Material deslocado da sua posição original por influência de um movimento de vertente;

14 - Área de depleção (*zone of depletion*) - Área do movimento de vertente em que o material deslocado se encontra abaixo da superfície topográfica original;

15 - Área de acumulação (*zone of accumulation*) - Área do movimento de vertente em que o material deslocado se encontra acima da superfície topográfica original;

16 - Depleção (*depletion*) - Volume de material perdido, definido pelos limites da cicatriz principal, superfície da massa abatida superfície topográfica original;

17 - Massa abatida (*depleted mass*) - Massa do material deslocado que se sobrepõe ao plano de rotura e fica abaixo do nível da superfície topográfica original;

18 - Acumulação (*accumulation*) - Volume do material deslizado que se situa acima do nível da superfície topográfica original;

19 - Flanco (*flank*) - Limite lateral do movimento de vertente. Quando se usam os termos direito e esquerdo, estes referem-se ao movimento observado de montante;

20 - Superfície topográfica original (*original ground surface*) – Superfície topográfica anterior à ocorrência do movimento de vertente (deformação).

2.3.2 DIMENSÕES DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

A IAEG - *Comission on Landslides* (1990), à imagem do realizado para morfologia dos movimentos de vertente, definiu ainda as diversas dimensões que caracterizam o movimento de vertente "tipo", tendo em conta critérios morfométricos, ilustrados na figura 2.9.

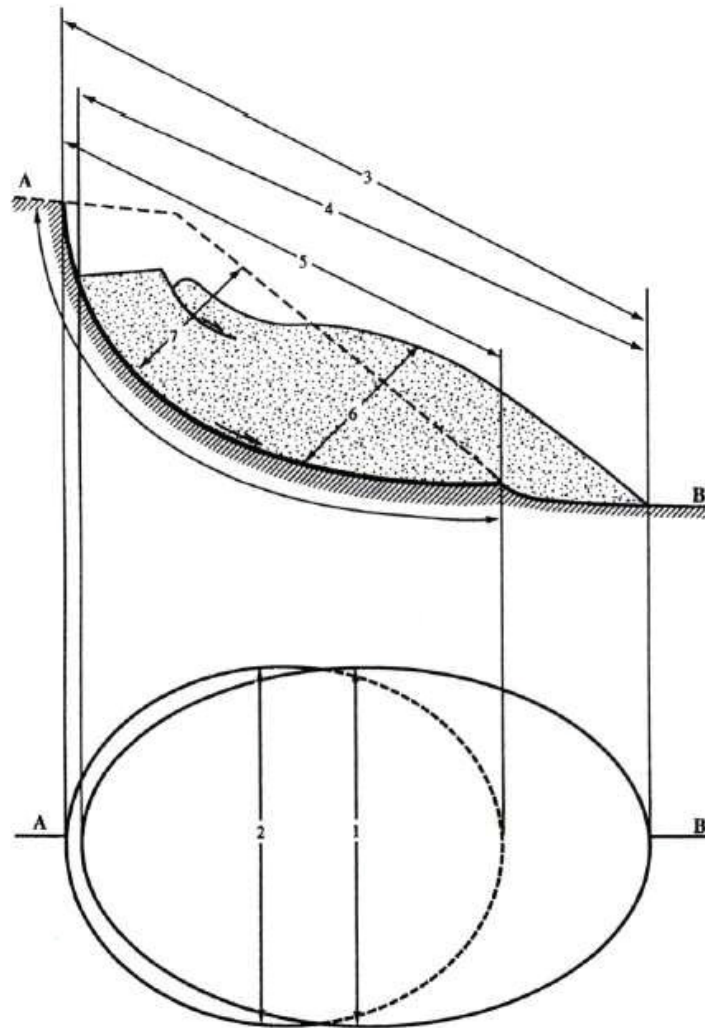


Figura 2.9 - Dimensões mensuráveis (parâmetros morfométricos) dos movimentos de vertente "tipo" (adaptado de WP/WLI, 1993).

Segundo Oliveira (2012) os parâmetros de dimensão mensurável, expressos na figura 2.9, correspondem a:

- 1 - Largura máxima do movimento de vertente (*width of displaced*);
- 2 - Largura máxima da área de depleção (*width of surface of rupture*);
- 3 - Comprimento total (*total length*);
- 4 - Comprimento da massa deslocada (*Length of displaced mass*);
- 5 - Comprimento do plano de ruptura (*length of a surface of rupture*);
- 6 - Espessura máxima da massa deslizada (*Depth of displaced mass*);
- 7 - Profundidade da superfície de ruptura (*Depth of surface of rupture*).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA ATIVIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

A caracterização da atividade associada aos movimentos de vertente reflete a evolução temporal e espacial das manifestações de instabilidade desde o momento de deformação/rotura inicial até à data em que é efetuada a sua inventariação (Cruden e Varnes, 1996).

A atividade dos movimentos de vertente é caracterizada por aspetos relacionados com a sua ocorrência, tais como o estado da atividade, a distribuição da atividade e o estilo da atividade (Varnes, 1978; WP/WLI, 1993a).

2.4.1 ESTADO DE ATIVIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

O estado de atividade descreve todos os aspetos conhecidos em relação ao *timing* dos movimentos de vertente, isto é, reflete a sua evolução temporal, que é fundamental para a distinção entre movimentos ativos e inativos (WP/WLI, 1993a).

Na tabela 2.3 são apresentados e sucintamente descritos os diferentes estados de atividade dos movimentos de vertente, posteriormente ilustrados na figura 2.10.

Tabela 2.3 - Estado de atividade dos movimentos de vertente, de acordo com a proposta apresentada pelo WP/WLI (1993a), que se baseou nos pressupostos de Varnes (1978).

Estado de atividade	Descrição
Ativos	Movimentos de vertente atualmente em atividade.
Suspensos	Movimentos de vertente que apresentaram atividade no último ciclo estacional (ano climatológico), mas que não estão presentemente ativos.
Reativados	Movimentos de vertente reativados após um determinado período de inatividade.
Inativos	Movimentos de vertente que não apresentaram atividade no último ciclo estacional.
Dormentes	Reativáveis - As condições que o originaram continuam presentes.
Abandonados	Não reativáveis - As condições que o originaram já não se verificam.
Estabilizados	Movimento artificialmente corrigido (causas desativadas).
Relíquias	Condições ambientais de origem são diferentes das atuais.

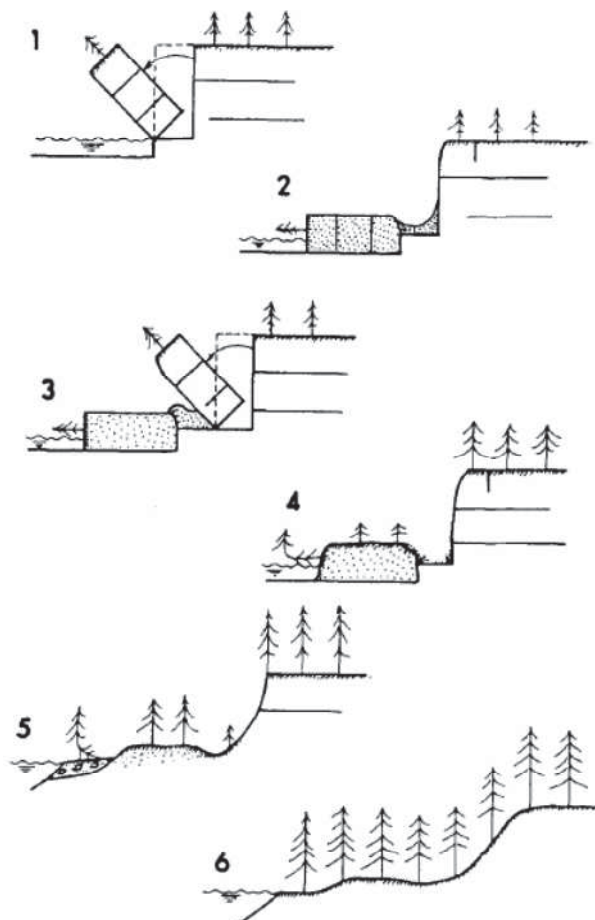


Figura 2.10 - Exemplos dos diferentes estados de atividade para um balançamento (retirado de WP/WLI, 1993a). Os números presentes na figura têm a seguinte correspondência: 1 - Ativo; 2 - Suspenso; 3 - Reativado; 4 - Dormente; 5 - Abandonado; 6 - Relíquia.

2.4.2 DISTRIBUIÇÃO DA ATIVIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

A distribuição da atividade avalia a variação espacial da atividade dos movimentos de vertente, sendo classificada, de acordo com WP/WLI (1993a, 1993b), em:

- 1) Avanço - o plano de rotura progride na direção do movimento do material deslocado;
- 2) Retrogressão - o plano de rotura expande-se para montante, na direção oposta à do movimento do material deslocado;
- 3) Alargamento - o plano de rotura evolui na direção de um ou de ambos os flancos do movimento de vertente;
- 4) Progressão múltipla - o plano de rotura progride em duas ou mais direções;

5) Diminuição - o volume do material mobilizado é progressivamente menor em cada reativação;

6) Movimento - Os movimentos verificam-se sem qualquer modificação perceptível no plano de rotura e no volume do material deslizado;

7) Confinamento - O desenvolvimento do movimento é incipiente, apresentando uma cicatriz mas não um plano de rotura visível na base da massa afetada. A deslocação a montante é compensada pela compressão dos materiais envolvidos e não se prolonga muito de forma significativa para jusante.

Na figura 2.11 são apresentados exemplos de tipos de distribuição da atividade dos movimentos de vertente.

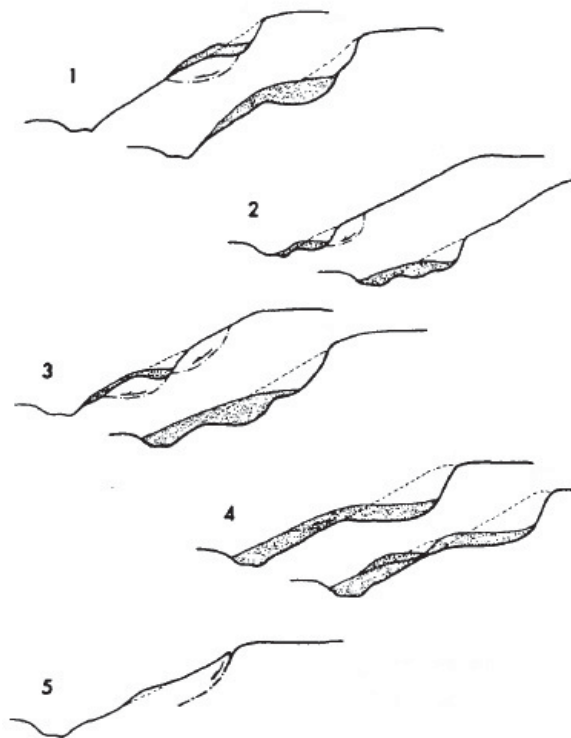


Figura 2.11 - Ilustração da distribuição da atividade dos movimentos de vertente (adaptado de WP/WLI, 1993a). Os números presentes na figura têm a seguinte correspondência: 1 - Avanço; 2 - Retrogressão; 3 - Progressão múltipla; 4 - Diminuição; 5 - Confinamento.

2.4.3 ESTILO DA ATIVIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

O estilo de atividade reflete o "modo como os diferentes movimentos contribuem para o movimento de vertente" (WP/WLI, 1993a; Cruden e Varnes, 1996).

Segundo a WP/WLI (1993a, 1993b), a classificação do estilo dos movimentos de vertente (figura 2.12) subdivide-se em movimentos: simples, múltiplos, sucessivos, complexos e compósitos, cuja descrição, segundo Cruden e Varnes (1996), é a seguinte:

- 1) Movimentos simples - Correspondem a um movimento único, muitas vezes sob a forma de um bloco pouco deformado, em que ocorre uma única rotura e tipo de movimento;
- 2) Movimentos múltiplos - Apresentam um desenvolvimento repetido do mesmo tipo de deslocação, com partilha de material deslocado ou da superfície de rotura, normalmente seguido pelo alargamento da rotura;
- 3) Movimentos sucessivos - são semelhantes aos movimentos múltiplos, sem que, no entanto, haja partilha do material deslocado ou da superfície de rotura.
- 4) Movimentos de vertente complexos - Apresentam uma combinação de um ou mais tipos de movimento, quer em diferentes partes da massa afetada, quer em diferentes estádios do desenvolvimento do movimento.
- 5) Movimentos compósitos - Apresentam uma combinação de, pelo menos, dois ou mais movimentos de vertente em diferentes sectores da massa deslocada, em simultâneo.

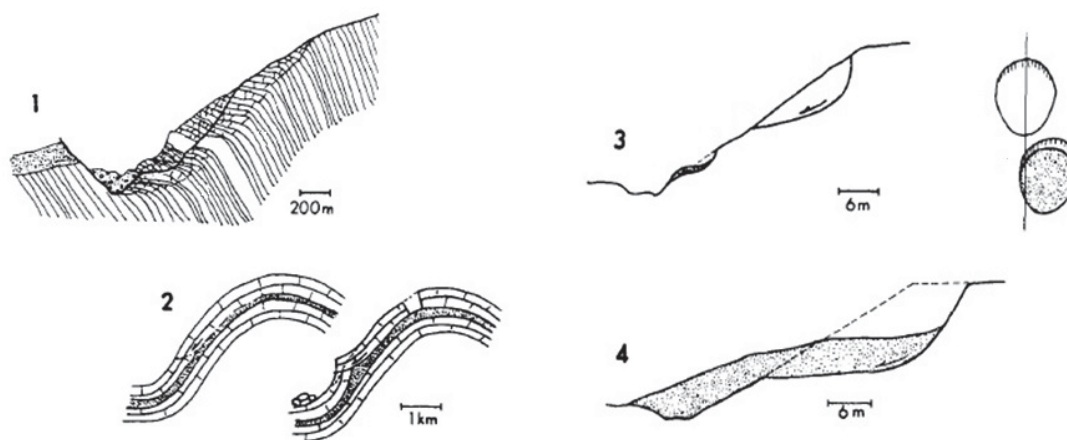


Figura 2.12 - Ilustração do estilo de atividade dos movimentos de vertente (adaptado de WP/WLI, 1993a). Legenda: 1 - Complexo; 2 - Compósito; 3 - Sucessivo; 4 - Simples.

2.4.4 VELOCIDADE DE DESLOCAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

Cruden e Varnes (1996) propuseram uma escala de classes de velocidade dos movimentos de vertente, modificada de Varnes (1978), ilustrada na figura 2.13, onde cada classe corresponde a um determinado grau de destruição provável.

A velocidade de um movimento de vertente está intimamente relacionada com o tipo de movimento de vertente em questão, pelo que a definição da velocidade do movimento de vertente implica uma monitorização da movimentação dos movimentos mais lentos e a realização de medições para a estimativa da velocidade atingida para os movimentos mais rápidos (Cruden e Varnes, 1996).

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/seg)	Velocidade Típica
7	Extremamente rápido	5×10^3	5 m/seg
6	Muito rápido	5×10^1	3 m/min
5	Rápido	5×10^{-1}	1.8 m/h
4	Moderado	5×10^{-3}	13m/mês
3	Lento	5×10^{-5}	1.6 m/ano
2	Muito lento	5×10^{-7}	16mm/ano
1	Extremamente lento		

Figura 2.13 - Escala de velocidade dos movimentos de vertente (adaptado de Cruden e Varnes, 1996).

Na tabela 2.4, é apresentado o grau de destruição associado às diferentes classes de velocidade dos movimentos de vertente.

Tabela 2.4 - Grau de destruição provável associado a cada classe de velocidade dos movimentos de vertente (adaptado de Cruden e Varnes, 1996).

Classe de Velocidade	Possível Grau de Destruição
1	Imperceptível sem recurso a instrumentação. Construção possível com precauções.
2	Algumas estruturas permanentes não danificadas pelo movimento.
3	Estruturas podem ser mantidas com frequente trabalho de manutenção se a velocidade durante a fase de aceleração não for muito grande.
4	Algumas estruturas podem ser mantidas temporariamente.
5	Possível evacuação; estruturas, bens e equipamentos destruídos.
6	Algumas perdas de vidas; velocidade demasiado elevada para permitir a fuga a todas as pessoas.
7	Catástrofe de maior violência; edifícios destruídos pelo impacto do material deslocado; várias mortes; possibilidade de fuga reduzida.

2.5 CAUSAS DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

2.5.1 FATOR DE SEGURANÇA

Os movimentos de vertente podem ser causados por um ou mais fatores, entre os quais se encontram as condições do terreno (*e.g.* litologia) e os processos geomorfológicos, físicos e antrópicos (Cruden e Varnes, 1996), sendo que, segundo Popescu (2002), raramente a ocorrência de um movimento de vertente pode ser atribuída a um único fator.

Segundo Zolotarev (1974 *in* Varnes, 1978), o processo que leva ao desenvolvimento do movimento de vertente tem início na formação da própria rocha, quando as suas propriedades básicas são determinadas, e inclui todos os eventos subsequentes de movimentos crustais, erosão e meteorização.

Em cada vertente atuam, simultaneamente, forças que tendem a promover movimentos verticais e forças que tendem a resistir a esse movimento, pelo que a estabilidade das vertentes depende de um equilíbrio entre forças estabilizadoras e as forças que promovem a instabilização (Popescu, 2002), sendo que, do ponto de vista mecânico, os movimentos de vertente ocorrem como consequência de um desequilíbrio entre essas forças.

A interação entre as forças que promovem a estabilização dos taludes e as forças que provocam instabilidade é traduzida por uma grandeza física conhecida como Fator de Segurança (*FS*), que, em termos matemáticos, de acordo com Abramson *et al.* (2002), se define como a razão entre a resistência ao corte, também denominada de resistência ao cisalhamento (forças estabilizadoras ou resistentes) e a tensão tangencial, também designada de tensão de corte ou tensão cisalhante (forças desestabilizadoras), ao longo de um superfície de rotura real ou potencial, de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Equação 2.1: } FS = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças instabilizadoras}} = \frac{\text{Resistência ao corte}}{\text{Tensão tangencial}}$$

Quando a resistência ao corte é superior à tensão tangencial ($FS > 1$), a vertente é estável, sendo que quando a tensão tangencial é igual ou superior à resistência ao corte ($FS \leq 1$), a vertente é considerada instável.

Assim sendo, para que uma vertente se torne instável tem de verificar-se um aumento da tensão tangencial ou uma diminuição da resistência ao corte. Naturalmente, tratando-se de sistemas naturais complexos, de acordo com Popescu (1994), é necessário ter em atenção que a probabilidade de ocorrência de um movimento de vertente não é função linear de FS e que varia tendo em conta a respetiva tipologia.

Existem diversos métodos para proceder ao cálculo do Fator de Segurança (*e.g.* Método do Talude Infinito; Método de Lowe e Karafiath; Método de Spencer), detalhadamente descritos por Abramson *et al.* (2002).

Terzaghi (1950 *in* Popescu, 2002)) dividiu as causas de movimentos de vertente em causas externas e causas internas. Segundo o autor, as causas externas (*e.g.* alterações na geometria do talude; retirada de material do sopé da vertente; sobrecarga da crista da vertente; crescimento de vegetação; choques e vibrações; alterações no regime hídrico) resultam num aumento da tensão tangencial, enquanto que as causas internas (*e.g.* rotura progressiva; meteorização física e/ou química; erosão) resultam numa redução da resistência ao corte.

2.5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS FATORES ENVOLVIDOS NA OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

Crozier (1986) propôs a classificação das vertentes em estáveis, marginalmente estáveis, ou potencialmente instáveis, e ativamente instáveis, em função da progressiva redução da margem de estabilidade das vertentes. As vertentes estáveis são aquelas em que a margem de estabilidade é suficientemente alta para resistir às forças instabilizadoras. Vertentes marginalmente estáveis são as que cederão no momento em que as forças instabilizadoras atingirem um certo nível de atividade. Por fim, vertentes ativamente instáveis são aquelas em que as forças desestabilizadoras produzem movimento contínuo ou intermitente.

De acordo com Popescu (2002), a ampla variedade de tipologias de movimentos de vertente implica grande diversidade de condições que podem gerar instabilidade nas vertentes e a variedade de processos que os desencadeiam.

Os fatores envolvidos na ocorrência de movimentos de vertente podem ser classificados, tendo em conta seu papel no processo, como condicionantes ou desencadeantes (Popescu, 1994).

De acordo com Popescu (1994), os fatores condicionantes, ("*preparatory causal factors*"), estabelecem as condições responsáveis pela instabilidade das vertentes, tendo em conta a complexa relação existente entre as condições do terreno e um conjunto de processos (*e.g.* geomorfológicos, físicos e antrópicos) que atuam na instabilização das vertentes, a longo ou a curto prazo.

Tendo em conta a classificação das vertentes proposta por Crozier (1986), anteriormente referida, e de acordo com a sua dinâmica, os fatores condicionantes podem ainda subdividir-se em:

1) Fatores de predisposição - São estáticos e intrinsecamente ligados às características do terreno (*e.g.* declive, geologia, uso do solo), influenciando significativamente a variação espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente. Além de influenciarem a margem de estabilidade das vertentes, podem funcionar como catalisadores de outros fatores de instabilidade (*e.g.* perda de coesão dos materiais em presença de água) (Glade e Crozier, 2005);

2) Fatores preparatórios - São dinâmicos e induzem a redução da margem de estabilidade das vertentes, sem que, todavia, desencadeiem movimentos de vertente. Ou seja, catalisados pelos fatores de predisposição, os fatores preparatórios influenciam o estado de equilíbrio das vertentes, sendo responsáveis pela sua passagem de um estado estável para marginalmente estável, em processos que ocorrem em escalas temporais longas (*e.g.* erosão) ou curtas (*e.g.* desflorestação) (Glade e Crozier, 2005).

Por fim, os fatores desencadeantes são responsáveis pela alteração do estado de uma vertente de marginalmente estável para ativamente instável, provocando efetivamente o início dos movimentos de vertente (Glade e Crozier, 2005). De acordo com Schuster e Wieczorek (2002), os fatores desencadeantes podem ser de origem natural ou antrópica e referem-se a estímulos externos, como a precipitação intensa, a fusão rápida da neve ou gelo, os sismos, as erupções vulcânicas, a erosão costeira ou de cursos de água e a rotura de barragens naturais, que causam uma resposta imediata ou quase imediata sob a forma de movimentos de vertente, pelo rápido aumento das tensão tangencial e/ou redução da resistência ao corte do terrenos.

Segundo Popescu (1996), os fatores condicionantes, tornam a vertente instável a longo prazo, enquanto os processos dinâmicos, por inerência, estimulam o desencadeamento da instabilidade, tal como se pode observar na figura 2.14.

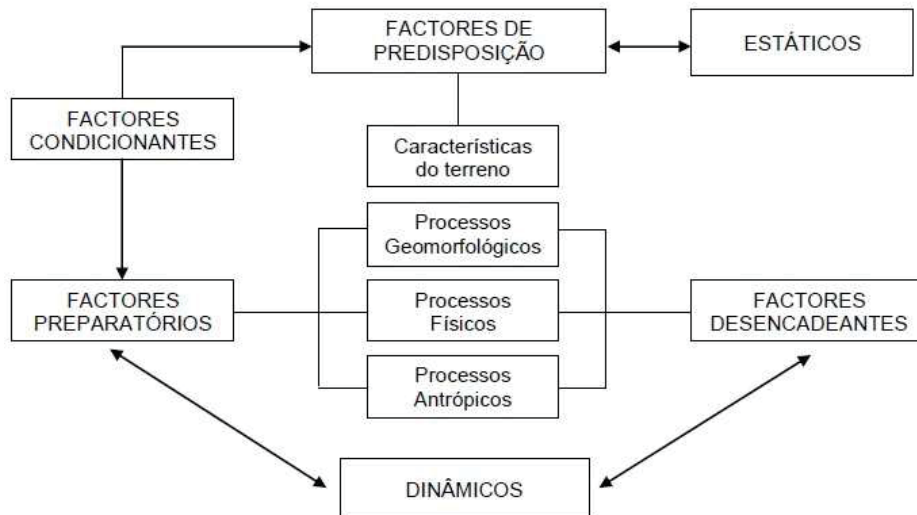


Figura 2.14 - Fatores envolvidos na ocorrência de movimentos de vertente (adaptado de Popescu, 1994).

Na figura 2.15, é sistematizada a forma como, ao longo do tempo, os diferentes tipos de fatores afetam a estabilidade das vertentes e contribuem para a ocorrência de movimentos de vertente. Como se pode constatar, resumir a ocorrência de movimentos de vertente apenas à ação de fatores desencadeantes é manifestamente redutor, não permitindo, uma cabal explicação de um processo complexo, que se inicia muito antes da ocorrência da rotura.

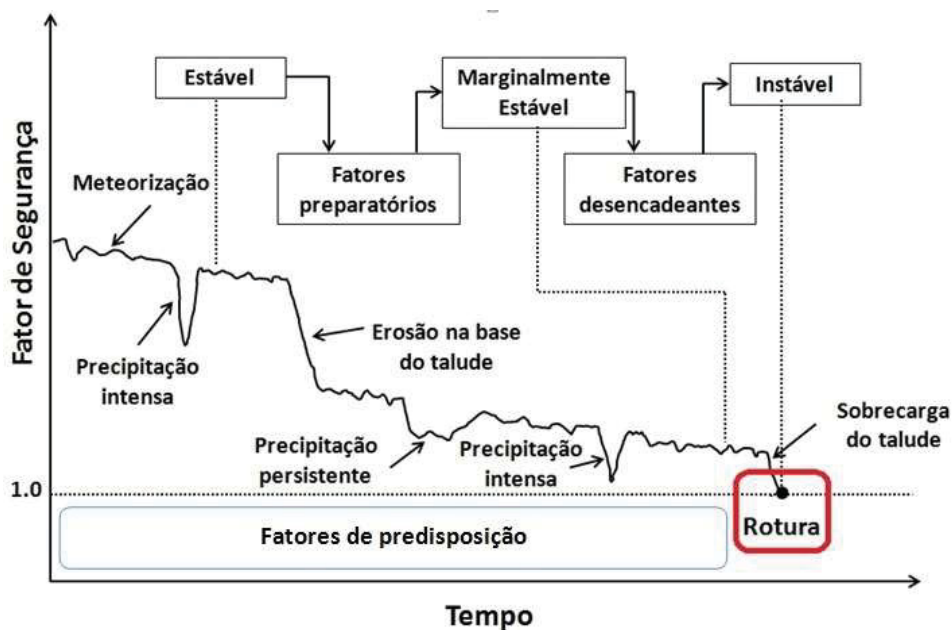


Figura 2.15 - Ilustração da variação do Fator de Segurança ao longo do tempo, pela ação dos fatores que influenciam a estabilidade das vertentes (adaptado de Cruden e Varnes, 1996).

2.6 MODELO CONCETUAL DE RISCO

Ao longo das últimas décadas, tem havido um esforço para homogeneização da terminologia associada à temática do risco geomorfológico, dada a grande variedade de conceitos e definições utilizadas internacionalmente. Uma das principais tentativas de uniformização foi encetada em 1979, pelo UNDRO (*United Nations Disaster Relief Organization*), estabelecendo um correspondência com os termos utilizados pela UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), com base no qual, posteriormente, foi publicado o manual de termos da UNISDR (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction*).

Também em Portugal, alguns trabalhos se centraram na problemática da variedade de termos utilizados, tendo dado um contributo importante para a sistematização da terminologia referente à avaliação de risco a movimentos de vertente, dos quais se destacam os trabalhos de Zêzere (1997) e de Julião *et al.* (2009).

Neste trabalho, a terminologia e conceitos utilizados têm por base os termos e definições da UNDRO (1979), divulgados, em 1984, por Varnes e pela IAEG-CLOMMS (*Association of Engineering Geology – Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes*), bem como o Guia Metodológico de Julião *et al.* (2009). De seguida, apesar de se apresentar informação mais detalhada no capítulo 5 deste trabalho, descreve-se sucintamente alguns dos termos e conceitos mais relevantes para esta temática:

1) Perigosidade (*Hazard*) - Corresponde à probabilidade de ocorrência de um movimento de vertente, com um determinado período de retorno e com uma determinada magnitude. Assim sendo, a perigosidade abrange as componentes espacial, temporal e de intensidade (ou dimensão) do fenómeno (Guzzetti, 1999), permitindo, segundo Aleotti e Chowdhury (1999), responder às seguintes questões: 1) Onde os movimentos de vertente irão ocorrer?; 2) Quando os movimentos de vertente irão ocorrer?; e 3) Com que magnitude irão ocorrer?

De acordo com Guzzetti *et al.* (2005), quando o cálculo individual destas 3 componentes se traduz num resultado probabilístico quantitativo e se as mesmas forem independentes entre si, o resultado final da perigosidade pode ser obtido pelo produto dessas 3 componentes.

No entanto, a avaliação da perigosidade é marcada por uma série de constrangimentos, nomeadamente a natureza descontínua (no tempo e no espaço) dos movimentos de vertente, a dificuldade em identificar os fatores desencadeantes e as relações de causa-efeito e a falta de informação histórica completa sobre a frequência destes processos (Aleotti e Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999). Assim sendo, na impossibilidade de, muitas vezes, se determinar a componente temporal e potencial destrutivo (magnitude), introduziu-se o conceito de suscetibilidade.

2) Suscetibilidade (*Susceptibility*) - Corresponde à probabilidade espacial da ocorrência de um movimento de vertente, sob a influência de um determinado conjunto de condições geoambientais (Soeters e van Westen, 1996; Guzzetti *et al.*, 2005, 2006b), independentemente do seu período de retorno ou da sua magnitude. Ou seja, reflete a propensão de uma determinada área para gerar instabilidade no terreno (Glade e Crozier, 2005; Guzzetti *et al.*, 2006b).

Assim sendo a determinação da suscetibilidade a movimentos de vertente permite, de acordo com Aleotti e Chowdhury (1999), responder apenas a questões espaciais como:

1) Onde vão provavelmente ocorrer os movimentos de vertente?; 2) Que tipos de roturas poderão acontecer?; e 3) Como é que irão ocorrer?

3) Vulnerabilidade - Corresponde ao grau de danos exetável para um determinado conjunto de elementos expostos (elementos vulneráveis ou em risco), quando afetados pela ocorrência de um fenómeno de uma determinada magnitude (Varnes e IAEG-CLOMMS, 1984), assumindo valores que variam entre 0 e 1, em que 0 significa sem danos (propriedades) ou perdas (seres vivos) e 1 corresponde a perda total ou morte.

4) Risco - Corresponde à quantificação das perdas expetáveis derivadas da ocorrência de um determinado fenómeno perigoso, com uma determinada magnitude, num determinado período ocorrência, de um fenómeno de uma determinada magnitude (Varnes e IAEG-CLOMMS, 1984; Glade e Crozier, 2005).

Assim, o risco obtém-se pelo produto da perigosidade pela vulnerabilidade e pelo valor dos danos ou perdas (perigosidade x vulnerabilidade x valor) (Glade e Crozier, 2005), permitindo responder, segundo Aleotti e Chowdhury (1999), às seguintes questões: 1) Quem ou o que será afetado?; 2) De que forma será afetado?; e 3) Qual o valor das perdas?

No entanto, segundo van Westen *et al.* (2006), a produção de cartografia de risco com expressão do valor das perdas é um desafio longe de estar ultrapassado, especialmente em avaliação em escalas médias.

Dada a dificuldade na quantificação do valor das perdas ou danos, introduziu-se o conceito de "risco específico", que resulta de uma simplificação do conceito de risco, traduzida pela multiplicação da perigosidade pela vulnerabilidade, sem ter em conta o valor dos danos e/ou perdas. No entanto, estes dois conceitos não devem ser confundidos, já que, tendo em conta as definições anteriormente enunciadas, o risco é um conceito muito mais amplo, que resulta da multiplicação do "risco específico" (perigosidade x vulnerabilidade) pelo valor das perdas ou danos.

Na figura 2.16, ilustra-se o modelo conceitual de risco, que esquematiza a interação entre a perigosidade e os elementos referentes à vulnerabilidade, na produção do risco.

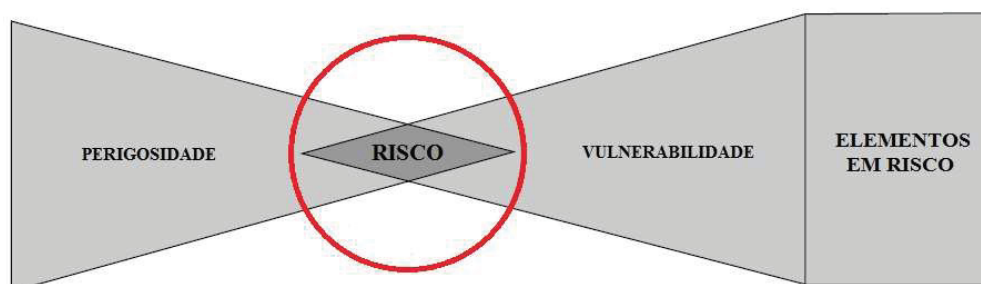


Figura 2.16 - Modelo Conceitual do risco (adaptado de Alexander, 2002 in Glade e Crozier, 2005).

Uma vez que este trabalho se centra exclusivamente na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, importa ainda reforçar o facto de que a suscetibilidade a movimentos de vertente é parte integrante e uma etapa (componente espacial) fundamental do processo de determinação da perigosidade e do risco de movimentos de vertente. Assim, a suscetibilidade não considera a probabilidade temporal de ocorrência de movimentos de vertente, isto é, a probabilidade de quando ou com que frequência os movimentos de vertente irão ocorrer, nem tão pouco com que magnitude (a sua dimensão e poder destrutivo).

Segundo Brabb (1984), os mapas que apresentam uma divisão do território em classes baseadas na propensão para ocorrência de movimentos de vertente, devem ser

considerados mapas de suscetibilidade e não, como por vezes acontece, mapas de perigosidade (Corominas *et al.*, 2003), constituindo, no entanto, a base para a realização de mapas de perigosidade (Soeters e van Westen, 1996).

Na bibliografia (*e.g.* Varnes, 1984; Aleotti e Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999) são referidos 4 princípios básicos para a avaliação da perigosidade a movimentos de vertente, cujo primeiro passo é a avaliação da suscetibilidade:

- 1) Os tipos de movimentos de vertentes podem ser identificados e cartografados. Segundo Guzzetti *et al.* (1999), estes deixam rastros morfológicos que podem ser reconhecidos, tanto no campo, como por deteção remota;
- 2) As principais condições que causam a instabilidade são controladas por fatores físicos identificáveis. Estes podem ser recolhidos e usados para construir modelos de predição de ocorrência de movimentos de vertente (Guzzetti *et al.*, 1999);
- 3) Os movimentos de vertente futuros devem ocorrer em condições geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e climáticas semelhantes às verificadas nos movimentos registados no passado. Segundo Guzzetti *et al.* (1999), a compreensão de movimentos de vertente ocorridos no passado é essencial para a avaliação da perigosidade a movimentos de vertente;
- 4) O grau de perigosidade pode ser avaliado. Desta forma, o território pode ser dividido em classes de perigosidade de acordo com as diferentes probabilidades.

A avaliação da perigosidade a movimentos de vertente e o seu mapeamento, em condições ótimas, deveria observar todas estas suposições. Não respeitar estas premissas limita a aplicabilidade de qualquer avaliação de perigosidade, independentemente da metodologia a utilizar. Infelizmente, a aplicação satisfatória de todos estes princípios afigura-se, normalmente, difícil, tanto operacionalmente como concetualmente (Guzzetti *et al.*, 1999).

De acordo com Soeters e van Westen (1996), a predição da perigosidade geomorfológica é baseada no conhecimento dos movimentos de vertentes ocorridos no passado, que fornece informações fundamentais para a previsão da localização de futuras ocorrências.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

O arquipélago dos Açores é constituído por 9 ilhas de natureza vulcânica e situa-se no Oceano Atlântico Norte. Em termos geográficos, localiza-se a cerca de 1900 km a oeste de Portugal Continental, sendo balizado, em termos de latitude, pelos paralelos $36^{\circ}55'43''$ N (extremo Sul da ilha de Santa Maria) e $39^{\circ}43'23''$ N (extremo Norte da ilha do Corvo) e, quanto à longitude, pelos meridianos $24^{\circ}46'15''$ W (Ilhéu das Formigas, ilha de São Miguel) e $31^{\circ}16'24''$ W (Ilhéu do Monchique, ilha das Flores).

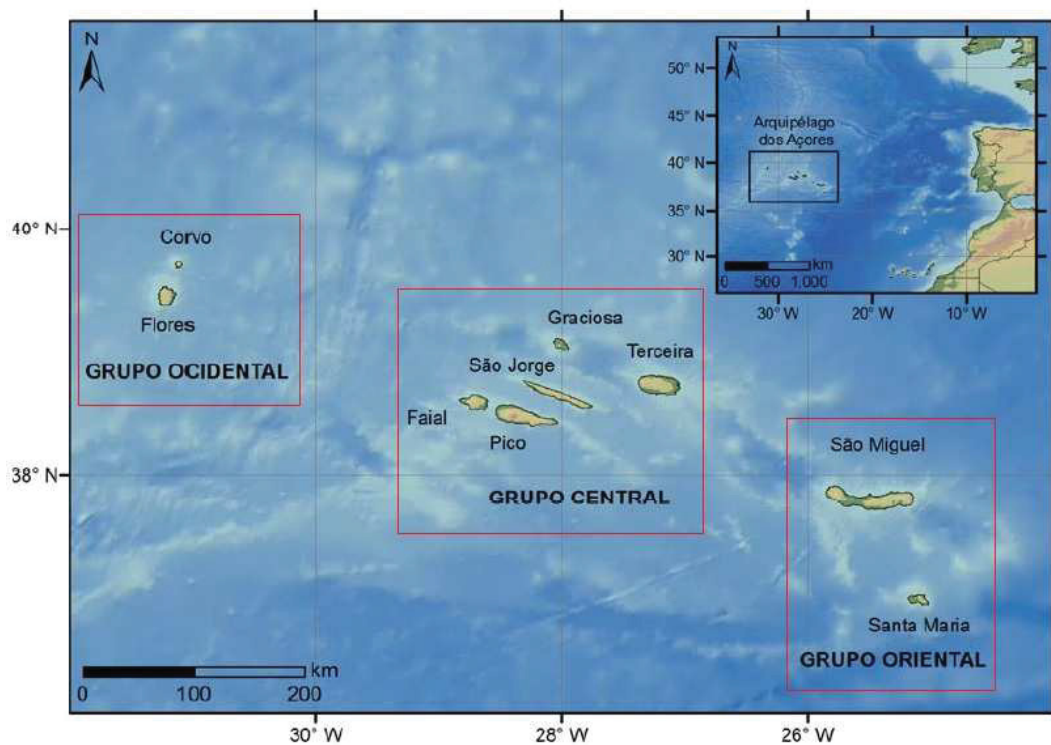


Figura 3.1 - Mapa de localização geográfica do Arquipélago dos Açores, apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84 (adaptado de Marques, 2013).

Como se pode verificar na figura 3.1, o arquipélago encontra-se alinhado em diagonal (noroeste-sudeste) ao longo de cerca de 630 km, ocupando sensivelmente 2.352 km² de território terrestre, e subdividindo-se, por motivos de proximidade geográfica entre as respetivas ilhas, em 3 grupos distintos: 1) Grupo Oriental, composto pelas ilhas de Santa Maria e São Miguel; 2) Grupo Central, que inclui as ilhas Terceira, São Jorge, Graciosa, Pico e Faial; e 3) Grupo Ocidental, correspondente às ilhas Flores e Corvo.

As ilhas apresentam altitudes bastantes variadas, desde 402 metros de altitude máxima na Graciosa até aos 2351 metros na ilha do Pico (Azevedo, 1996), tendo surgido, de acordo com Hildenbrand *et al.* (2014), todas no período Quaternário, com exceção da extremidade Leste da ilha de Santa Maria.

A área de estudo do presente trabalho, situa-se na zona Oeste da ilha Terceira, no concelho de Angra do Heroísmo, englobando as freguesias de Doze Ribeiras, Santa Bárbara e Serreta.

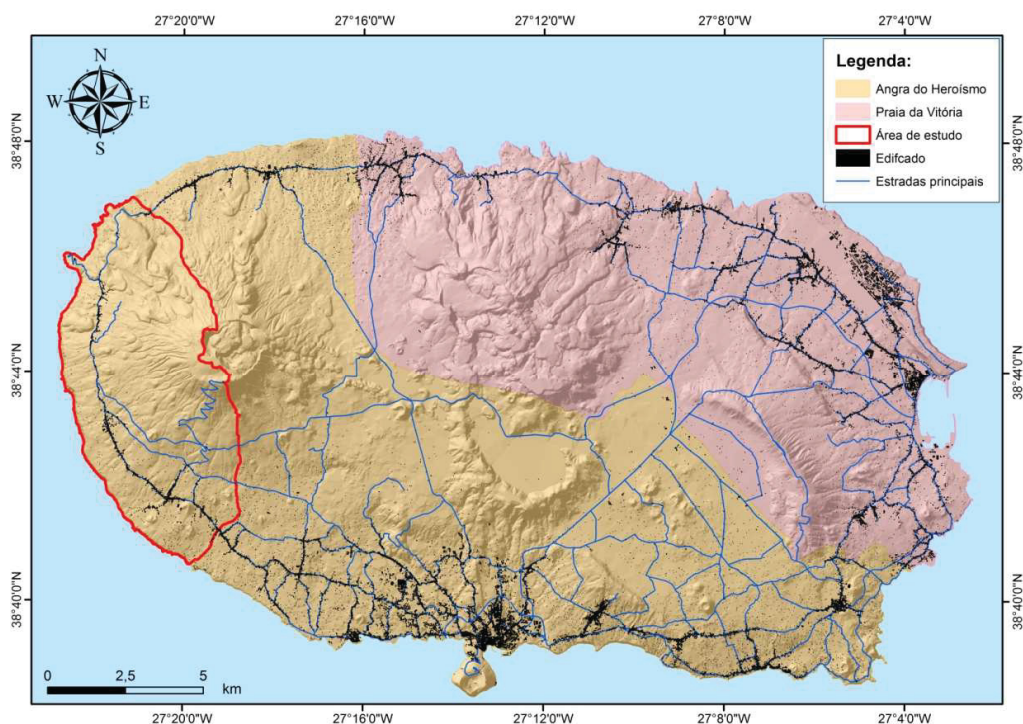


Figura 3.2 - Mapa de localização geográfica da área de estudo na ilha Terceira, apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

No entanto, para a delimitação da área de estudo, para avaliação da respetiva suscetibilidade a movimentos de vertente, apresentada na figura 3.2, não foram utilizados os limites administrativos como critério de divisão, tendo em conta alguns aspetos específicos do trabalho. Assim, a delimitação da área de estudo foi efetuada considerando um conjunto de 17 bacias hidrográficas, localizadas totalmente dentro dos limites administrativos das 3 freguesias anteriormente referidas (14 bacias) ou que drenam, ainda que parcialmente, para o interior desses limites (3 bacias). Esta opção foi tomada por se considerar que traria maior coerência, em termos hidrológicos e geomorfológicos, do que a utilização dos limites administrativos. Na figura 3.3, é apresentada a área de estudo do presente trabalho com maior grau de detalhe.

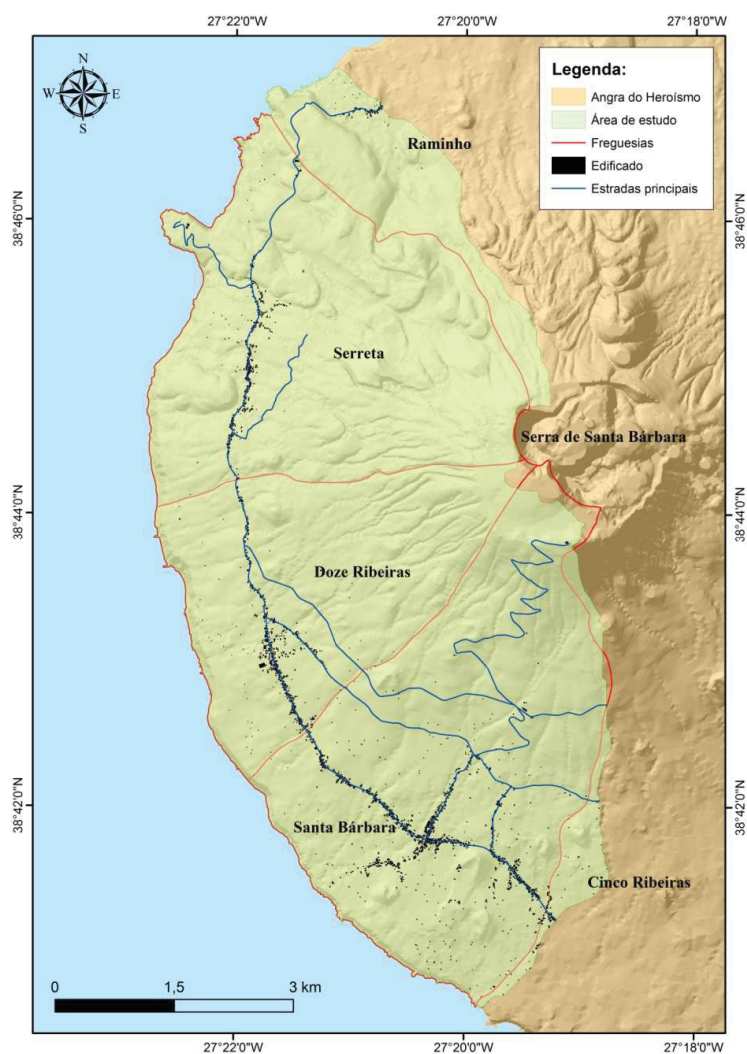


Figura 3.3 - Mapa de localização geográfica da área de estudo na zona Oeste da ilha Terceira, apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Como se pode verificar, a delimitação da área de estudo é um pouco mais abrangente do que os limites administrativos correspondentes às freguesias de Santa Bárbara, Doze Ribeiras e Serreta, que totalizam 41,19 km².

A zona de estudo, porém, apresenta uma área de 45,66 km², dos quais 31,58% pertencem à Serreta, 35,92% a Santa Bárbara e 22,71% às Doze Ribeiras, correspondendo os restantes 9,79% a território pertencente administrativamente à freguesia do Raminho e, residualmente, às Cinco Ribeiras.

3.2 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

3.2.1 CLIMA DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES

O clima dos Açores é, genericamente, ditado pela sua localização geográfica no contexto da circulação climática global atmosférica e oceânica e pela influência da massa aquática da qual emerge. Localizado na bacia do Atlântico Norte, a norte da influência dos ventos alíseos e em pleno cinturão subtropical setentrional de células de altas pressões, o arquipélago encontra-se situado em zona de transição e de confrontação de massas de ar de proveniência tropical e massas de ar mais frio, temperado ou polar. Dado o seu afastamento das costas continentais, as massas de ar daí provenientes atingem o arquipélago já descaracterizadas e influenciadas pelo respetivo percurso marítimo (Azevedo, 1996). Apesar disso, por vezes, o ar em circulação na atmosfera transporta suspensões sólidas, cinzas e areais finas do deserto do Saara, que podem afetar esporadicamente a qualidade de ar do arquipélago (Rodrigues, 2001).

A identificação e compreensão dos mecanismos de circulação geral que condicionam o clima nos Açores obrigam a uma interpretação tridimensional do sistema climático à escala sinóptica de toda a bacia do Atlântico Norte (Azevedo, 1996).

Segundo Azevedo (1996), as condicionantes dinâmicas do clima do arquipélago são condicionadas pelo campo de pressões sobre o Atlântico Norte, das quais se destacam as cristas e talvegues associadas ao regime geral, a evolução dos anticiclones semipermanentes atlânticos e subtropicais e a corrente geral de Oeste. De acordo com o autor, pontualmente e sobretudo no final do verão, tendo em conta a posição setentrional onde se encontra o arquipélago, pode verificar-se a passagem de ciclones tropicais oriundos de baixas latitudes, em fase de dissipação mas ainda potencialmente devastadores. Na realidade, muitos dos eventos de instabilidade hidro-geomorfológica derivam de tempestades associadas à passagem desses ciclones já em fase de dissipação.

A este respeito Azevedo (2001) afirma que, apesar de mais frequentes no inverno, os períodos tempestuosos podem ocorrer em fins de verão e no outono por efeito de esporádicas tempestades tropicais em evolução próximo do arquipélago, pelo que violentas tempestades, de origem tropical ou provocadas por células depressionárias provenientes das latitudes mais setentrionais do Atlântico Norte Ocidental, são responsáveis por episódios de precipitação, quer intensa quer persistente, com os consequentes impactos nos regimes de drenagem (na sua maioria de caráter torrencial),

bem como em termos de movimentos de vertente decorrentes da saturação e alteração da agregação dos solos, da alteração da estabilidade de vertentes e taludes.

O clima dos Açores é fortemente determinado pelo papel do oceano, sendo este fundamental para os processos de ciclogénese e uma importante fonte de vapor de água para a atmosfera, determinante pela sua ação termorreguladora, derivada das trocas energéticas que se verificam à sua superfície, e pela reserva de energia que proporciona e que permite que, durante a maior parte do ano, à latitude dos Açores, o oceano ceda energia à atmosfera (Ferreira, 1980 *in* Azevedo, 1996). A precipitação que atinge o arquipélago possui características de ambientes marinhos, em resultado da evaporação das águas do oceano nas zonas das correntes do Atlântico Norte, geralmente mais quentes, tal como demonstrado pela respetiva composição isotópica (Rodrigues e Rodrigues, 2002).

De acordo com Agostinho 1942 (*in* Azevedo, 1996) a corrente quente do Golfo, apesar do seu trajeto principal se desenvolver em maiores latitudes, atinge os Açores ou as suas proximidades pelos seus meandros derivativos, pelo que assume grande importância no que diz respeito à fonte de energia que constitui e pela barreira que oferece à incursão de águas mais frias de proveniência mais setentrional, justificando que o arquipélago apresente condições de amenidade singulares, nomeadamente no que se refere à temperatura, quando comparado com outras localidades costeiras localizadas em latitude equivalentes.

Pela sua posição central na bacia do Atlântico Norte, os Açores são afetados por regimes de circulação provenientes de vários quadrantes, de acordo com a evolução do campo de pressão ao longo do ano, sendo que no inverno, devido à posição mais a sul do Anticiclone dos Açores, verifica-se uma descida da frente polar que se aproxima do arquipélago. No verão, dado o movimento ascendente do Anticiclone dos Açores, a frente polar e os respetivos efeitos associados, afastam-se dos Açores (Azevedo, 1996).

O clima das ilhas apresenta, assim, de acordo com Azevedo (2001), uma sazonalidade relativamente bem marcada que se reflete nos diferentes elementos do seu clima, onde é possível reconhecer as quatro estações do ano, típicas de climas temperados. Os invernos, sendo chuvosos, não se manifestam excessivamente rigorosos, onde a ocorrência de neve apenas ocorre de forma esporádica e em zonas altas. A precipitação ocorre durante todo o ano, sendo que a precipitação de origem frontal é reforçada pela

precipitação de origem orográfica no interior de cada ilha. Os verões são amenos e significativamente mais ensolarados do que o resto do ano.

No geral, ainda que se verifique uma variação das condições climáticas ao longo do arquipélago e que se observe uma significativa variação espacial dentro de cada ilha, o clima no litoral das ilhas pode ser classificado, genericamente, de mesotérmico húmido com características oceânicas (Azevedo, 2011).

De acordo com Azevedo (2001), segundo a classificação de Köppen, o clima dos Açores insere-se na categoria dos climas *“temperados quentes (grupo C), caracterizados por apresentarem verão e inverno e a temperatura média do mês mais frio ser inferior a 18°C mas superior a -3°C”*. Porém, segundo o autor, a distribuição espacial das ilhas leva a que o clima possa ser classificado (de este para oeste) de transição entre os subgrupos *Cs* e *Cf*, respetivamente, *“transitando de clima chuvoso temperado com verão seco, a clima chuvoso temperado, húmido em todas as estações”*. Ainda de acordo com o mesmo sistema, *“a amenidade do clima das ilhas pode ser enfatizada pela conjugação da letra b a estes dois códigos passando ambos, *Csb* e *Cfb*, a significar que a temperatura média do mês mais quente não ultrapassa em média os 22°C. As características oceânicas acentuam-se de Oriente para Ocidente, revelando-se as ilhas das Flores e Corvo as que apresentam características mais oceânicas”* (Azevedo, 2011).

3.2.2 CLIMA DA ILHA TERCEIRA

As condições climáticas da ilha Terceira estão na transição entre as características de climas temperados marítimos e as dos climas subtropicais (Azevedo, 1996).

O clima da ilha Terceira é caracterizado por amenidade térmica, elevados índices de humidade do ar e por um regime de ventos persistentes, sendo a sua caracterização sazonal particularmente ditada pelo regime pluviométrico. Apesar de haver uma distinção nítida entre duas épocas do anos e de na "estação fresca" as temperaturas serem mais baixas e de se registar maior pluviosidade, a precipitação manifesta-se ao longo de todo o ano, mesmo nos meses de estio, porém com menor expressão. Diferenciando-se dos climas oceânicos típicos, a variabilidade inter-anual da precipitação é nítida, concentrando significativamente a precipitação nos meses de inverno (Azevedo, 1996).

O clima normal da ilha Terceira pode ser interpretado adotando os valores médios das observações efetuadas junto ao litoral, como indicadores das condições climáticas médias à escala regional (e.g. Azevedo, 1996). Com base em observações efetuadas em Angra do Heroísmo, na estação climatológica do Instituto de Meteorologia (IM), na tabela 3.1 é apresentado um resumo dos valores médios referentes à temperatura do ar, humidade relativa, insolação e precipitação, para o período entre 1961 e 1990.

Tabela 3.1 - Valores médios da temperatura do ar, humidade relativa do ar, insolação e precipitação observados em Angra do Heroísmo (74m), correspondentes ao período entre 1961 e 1990 (IM in CLIMAAT, 2016).

Mês	Temperatura T (°C)					Humidade relativa RH (%)			Insolação		Precipitação (mm)	
	Média Mensal	Média Máx.	Média Mín.	Máxima Observ.	Mínima Observ.	Média 09h	Média 15h	Média 21h	Total Horas	%	Total Mês	Máxima Diária
Janeiro	13,6	15,8	11,4	19,5	3,7	85	79	83	80,8	27	133,3	66,2
Fevereiro	13,2	15,4	10,9	19,8	4,2	85	79	84	85,5	28	127,1	69,6
Março	13,7	16	11,4	20,4	5,5	84	77	83	108,1	29	104	56,5
Abril	14,4	16,8	12	21	5,7	82	75	82	132,8	34	92,1	76,4
Mai	15,9	18,5	13,4	24,6	6,4	84	78	84	165,7	38	52,5	36,9
Junho	18	20,7	15,4	25,7	10,2	84	78	84	154,3	35	49,8	54
Julho	20,4	23,3	17,2	28	12,5	83	75	82	199,9	44	34,2	45,5
Agosto	21,5	24,5	18,5	28,4	13,7	85	75	83	209,4	50	52,9	65,4
Setembro	20,7	23,4	18,5	28,7	12,8	85	75	84	160,6	43	90,7	114,8
Outubro	18,4	20,8	15,9	25,4	10,3	85	77	84	128,4	37	121,3	88,5
Novembro	16	18,3	13,8	23	6,6	86	80	85	92,2	32	131,9	84,6
Dezembro	14,6	16,7	12,5	20,5	5,6	85	80	84	77,1	26	135,8	85,9
Ano	16,7	19,2	14,2	28,7	3,7	84	77	84	1594,8	35	1125,6	114,8

Com base nos valores apresentados na tabela anterior, contata-se uma variação regular na temperatura ao longo do ano, verificando-se o valor médio mais alto em Agosto (21,5° C). Relativamente à média dos valores extremos, a máxima é encontrada também em Agosto (24,5° C), sendo que, no entanto, para a mínima, se verifica um valor igual para Agosto e Setembro (18,5° C). Os valores mais altos observados para a máxima e mínima correspondem, respetivamente, aos meses de Setembro (28,7° C) e Agosto (13,7° C). A amplitude média da variação diurna da temperatura, correspondente à diferença das médias das temperaturas máximas e mínimas diárias, é pequena, típica de um clima oceânico (Azevedo, 1996), atingindo valores mais altos nos meses de verão

(6,1° C em Julho) e os mais baixos nos meses de inverno (4,2° C em Dezembro). As temperaturas médias dos dias mais frios não descem abaixo de 3,7° C (em Janeiro).

A humidade relativa é elevada ao longo do ano, apresentando um valor médio anual acima de 76%, às 15h, e acima dos 83% nas outras duas medições. Em termos de valores extremos, verifica-se que, tendencialmente, a média dos mínimos diários atinge valores mais baixos em Abril, enquanto que a média dos máximos diários assume valores mais altos em Novembro.

Relativamente à insolação, traduzida pela média do número de horas de sol descoberto no mês e pela razão entre as mesmas e o número de horas do período diurno, revela um elevado índice de nebulosidade, característico das ilhas dos Açores (Azevedo, 1996), variando, em relação ao número de horas do período diurno, entre 26% em Dezembro e 50% em Agosto. A insolação média total anual é de 1.595 horas.

No que diz respeito à precipitação, constata-se que ocorre em todos os meses do ano, apresentando, todavia, valores nitidamente superiores entre Outubro e Março, acumulando durante esse período cerca de dois terços da precipitação do total do ano. A média da máxima diária mais elevada é registada no mês de Setembro (114,8 mm). No total, o valor da precipitação média anual atinge 1.125,6 mm. Na figura 3.4, é apresentado o mapa da distribuição anual acumulada para área de estudo, elaborado com base em dados cedidos pelo Projeto CLIMAAT (2016).

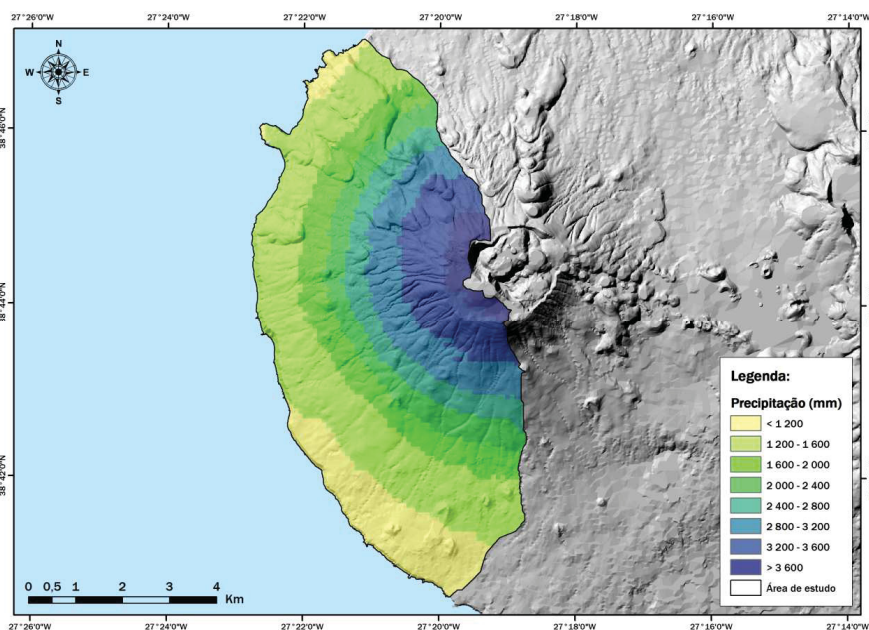


Figura 3.4 - Mapa da precipitação anual acumulada da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

3.3 ENQUADRAMENTO GEODINÂMICO

Os edifícios vulcânicos correspondentes às diversas ilhas do arquipélago dos Açores emergem a partir de uma plataforma submarina, denominada de Plataforma dos Açores, aproximadamente triangular, definida pela linha batimétrica dos 2.000 metros (Needham e Francheteau, 1974).

Esta região do Atlântico Norte corresponde à tripla junção das placas litosféricas Americana, Africana e Euroasiática, sendo a dinâmica regional dominada pela presença de importantes estruturas tectónicas, de entre as quais se destacam a Crista Média Atlântica (CMA), a Zona de Fratura Este dos Açores (ZFEA), a Zona de Fratura Norte dos Açores (ZFNA) e o Rifte da Terceira (RT), que se refere a um complexo alinhamento tectónico que se prolonga desde CMA até ao limite Oeste da Falha Glória (FG) (Searle, 1980), cuja representação é apresentada na figura 3.5.

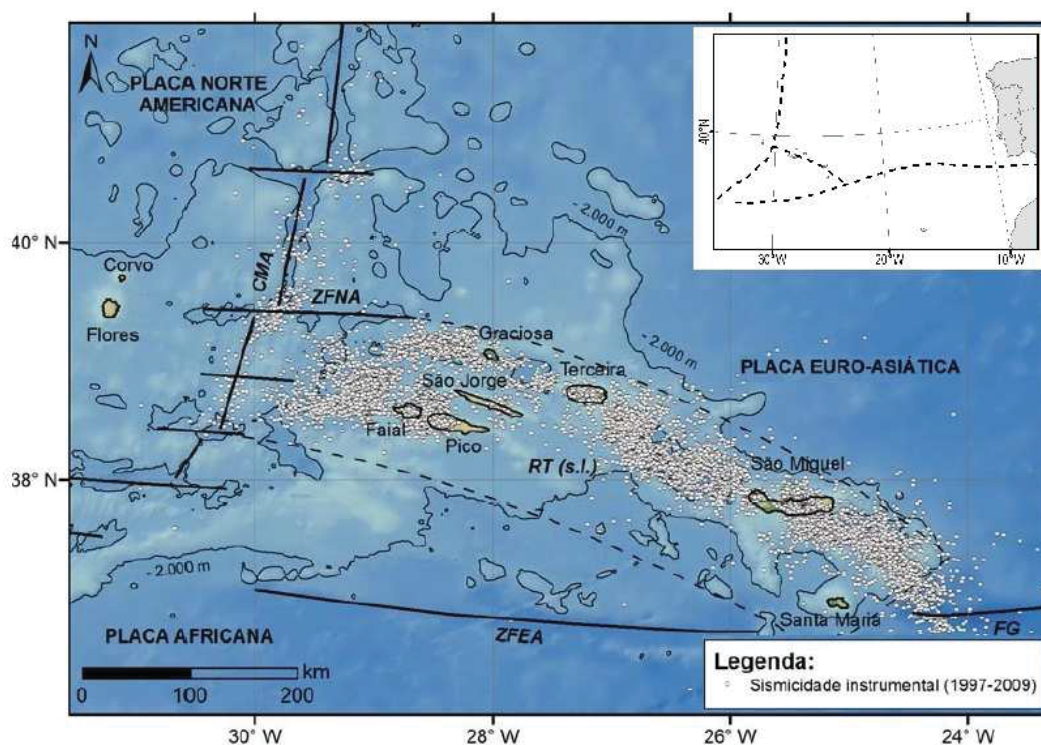


Figura 3.5 - Mapa do arquipélago dos Açores exibindo as principais estruturas morfo-tectónicas e sismicidade referente ao período de 1997-2009 (adaptado de Marques, 2013).

A este respeito, Rodrigues (1993) afirma que a história geológica do arquipélago dos Açores está diretamente relacionada com a evolução geodinâmica do Atlântico Norte,

resultando da contínua atividade vulcânica submarina associada à CMA e às suas falhas transformantes, sendo que a plataforma oceânica onde se situa o arquipélago, bem como cada um dos edifícios insulares que nela assentam, são afetados por uma série de fraturas, as quais, ao terem servido de condutas de ascensão e emissão de magmas gerados em profundidade, estão diretamente relacionados com a sua origem.

O RT é caracterizado por um comportamento distensivo e de desligamento, associado a fenómenos sismogénicos e vulcânicos. Esta estrutura, apresenta orientação NW-SE definida pelo alinhamento de uma série de bacias, cristas e maciços, compreendendo, de SE para NW, a Fossa das Formigas, os ilhéus das Formigas, a Bacia de São Miguel, a ilha de São Miguel, a Fossa Sul do Hirondele, o Banco D. João de Castro, a Fossa Norte do Hirondele, a Crista Submarina da Terceira, a ilha Terceira, a Bacia Este da Graciosa, a ilha Graciosa e a Bacia Oeste da Graciosa.

De acordo com Self (1976), o RT marca a topografia da ilha Terceira, onde se localiza a área de estudo deste trabalho, através de uma zona de fissura que a bissecta de noroeste para sudeste, evidenciada pelo alinhamento dos aparelhos vulcânicos dos Cinco Picos, de Guilherme Moniz e de Santa Bárbara. Para uma melhor análise, a figura 3.6 ilustra os principais alinhamentos tectónicos verificados na ilha Terceira.

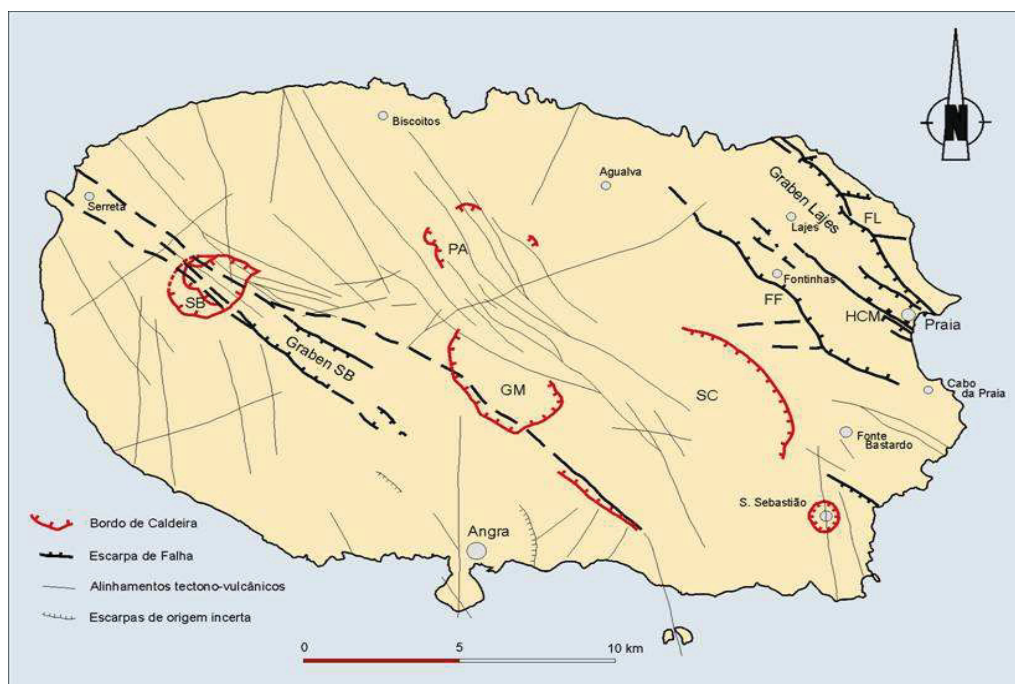


Figura 3.6 - Principais alinhamentos tectónicos da ilha Terceira (CVARG, 2016).

3.3.1 SISMICIDADE HISTÓRICA

O complexo enquadramento geodinâmico onde se insere o arquipélago dos Açores leva a que este seja afetado por uma intensa atividade sísmica e a que apresente uma importante atividade vulcânica, bem documentadas nos acervos históricos (França *et al.*, 2003), centradas ao longo das principais estruturas tectónicas anteriormente mencionadas, caracterizando-se pela ocorrência de eventos de magnitude geralmente intermédia a baixa. Apesar disso, desde o povoamento dos Açores, no século XV, verificaram-se cerca de 25 sismos (figura 3.7) com intensidades superiores a VII na Escala de Mercalli Modificada (MM-56).

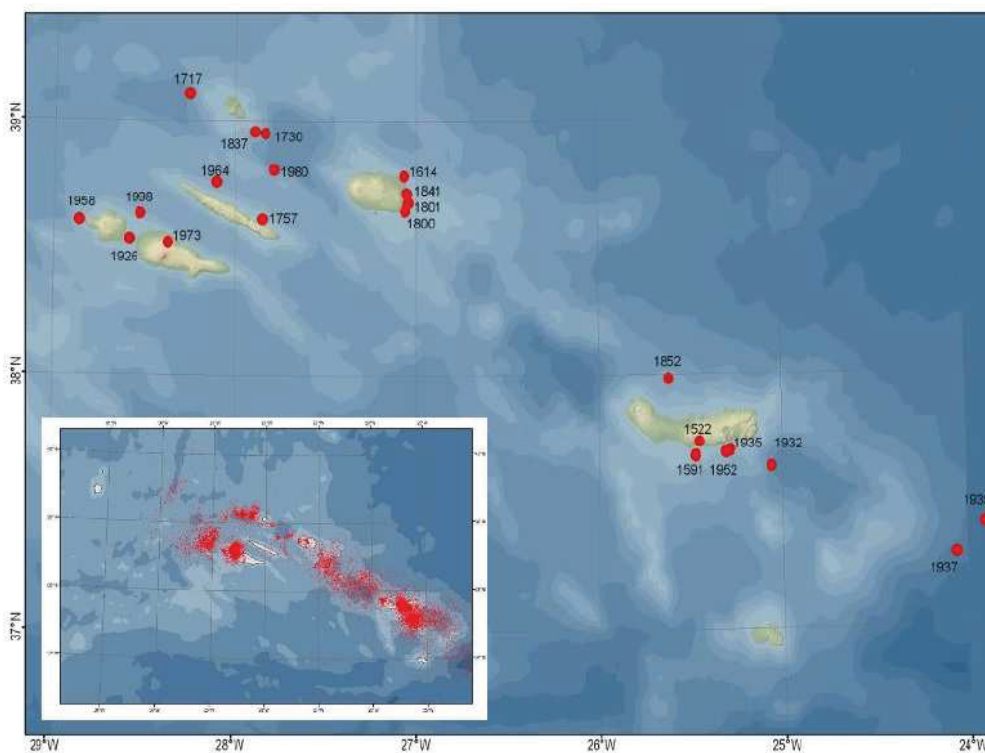


Figura 3.7 - Localização dos principais sismos históricos registados nos Açores (adaptado de Silveira, 2002) e carta epicentral dos eventos registados entre 1980 e 2006 (CIVISA, 2006).

De acordo com Silveira (2002), os sismos mais destruidores e de maior magnitude de que há registo na região ocorreram em 1757 (na ilha de São Jorge) e em 1980 (no Grupo Central), tendo ultrapassado os 7 graus na Escala de Richter. No entanto, o sismo responsável pelo maior número de vítimas teve lugar na ilha de S. Miguel, em 1522,

dizimando Vila Franca do Campo e causando cerca de 5.000 vítimas mortais, para o que contribuíram os volumosos movimentos de vertente desencadeados.

Relativamente a impactos danosos ocorridos na ilha Terceira, onde o presente trabalho é desenvolvido, destaca-se a ocorrência dos seguintes sismos, de acordo com França *et al.* (2003):

1) O Sismo de 24 de Maio de 1614, que provocou a *"destruição de mais de 1600 fogos (num total de 1800) e de cerca de 30 templos, a morte de mais de 200 pessoas (150 das quais na Vila da Praia), a ocorrência de desabamentos e de escorregamentos de terras e, ainda, a observação de rotura superficial associada a este terramoto, designadamente nas Lages e Vila Nova"*;

2) O sismo de 9 de Julho de 1757, *"considerado como o maior sismo ocorrido no arquipélago (M=7,4), este abalo provocou 1034 mortes em S. Jorge, 11 no Pico e 1 na Terceira, tendo sido sentido em todas as ilhas, com exceção de Flores e Corvo. Este evento caracterizou-se pela ocorrência de grandes movimentos de massa (desabamentos, quebradas e escorregamentos de terras) os quais originaram novas fajãs (como por exemplo na Ponta Nova), ou permitiram o incremento das dimensões de outras"*;

3) O sismo de 1 de Janeiro de 1980, considerados como *"o mais forte abalo ocorrido nos Açores após o terramoto de 1757, que causou 61 vítimas e danos consideráveis no parque habitacional da ilha Terceira, em particular do concelho de Angra do Heroísmo"*.

3.3.2 ATIVIDADE ERUPTIVA HISTÓRICA

A paisagem vulcânica dos Açores é constituída por cerca de 1.750 vulcões monogenéticos (que incluem cones de escórias e de *spatter*, domos, *coulées*, anéis de tufos, cones surtseianos e fissuras eruptivas), quer dispersos pelos flancos e caldeiras de vulcões poligenéticos, quer integrando as 11 zonas de vulcanismo fissural basáltico (*e.g.* cordilheiras ou plataformas vulcânicas) existentes nos Açores (Nunes *et al.*, 2010).

A atividade eruptiva histórica no Arquipélago dos Açores inclui um total de 26 erupções, entre eventos submarinos e subaéreos, que cobrem uma grande variedade de estilos eruptivos e magnitudes, 12 das quais dizem respeito a erupções subaéreas, nas

ilhas de São Miguel, Terceira, São Jorge, Pico e Faial, na sua grande maioria de natureza básica e predominantemente efusivas (França *et al.*, 2003). De acordo com estes autores, os últimos eventos eruptivos mais importantes ocorridos nos Açores foram de natureza submarina e basáltica (*s.l.*), tendo ocorrido, respetivamente, em 1957/58 nos Capelinhos, na extremidade Ocidental da ilha do Faial, e em 1998/2000, a cerca de 8,5 km para NW da Ponta da Serreta, ao largo da ilha Terceira.

As erupções históricas subaéreas revelam estilos eruptivos efusivos ou moderadamente explosivos, do tipo havaiano e estromboliano, de natureza basáltica (*s.l.*), normalmente associados aos sistemas vulcânicos do tipo fissural, bem como erupções explosivas subplinianas e hidromagmáticas envolvendo magmas mais evoluídos, de composição traquítica (*s.l.*) associados aos vulcões centrais (Pacheco *et al.*, 2011).

Para além dos episódios vulcânicos anteriormente referidos, observa-se permanentemente a ocorrência de manifestações secundárias em algumas ilhas, expressas quer como nascentes termais, quer como fumarolas e emanações gasosas difusas em solos, nomeadamente nas ilhas de São Miguel, Terceira, Graciosa, Faial, Pico e Flores (França *et al.*, 2003).

3.4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA

A paisagem do arquipélago dos Açores, apesar da reduzida dimensão do território insular, apresenta um vasto conjunto de formas, rochas e estruturas ímpares, que derivam, entre outros fatores, da natureza dos magmas, do tipo de erupção que as originou, da sua dinâmica e da posterior atuação dos agentes externos da hidrosfera, atmosfera e biosfera (Nunes *et al.*, 2010). Self (1974 *in* Fontes, 1999), afirma que "*as rochas eruptivas mais frequentes nos Açores são as integrantes da série dos basaltos alcalinos oceânicos, traquibasaltos e traquitos - basaltos olivínicos augíticos a hawaiitos, mudearitos, benmoreitos, e traquitos comendíticos e panteletíticos*".

A geomorfologia das várias ilhas resulta essencialmente do somatório dos inúmeros episódios de natureza vulcânica, que ao longo da história geológica de cada uma delas se foram sobrepondo, e de posteriores períodos erosivos. A evidência de outros processos, no domínio da geodinâmica externa, mais ou menos marcantes, não invalida a predominância dos fenómenos vulcânicos sobre os restantes à escala regional (França *et al.*, 2003).

O vulcanismo insular assentou num conjunto de processos que envolveram manifestações de carácter basáltico, traquibasáltico e traquítico, com estilos e formas de atividade muito diversificados (Rodrigues, 2002). Segundo este autor, as manifestações basálticas, com origem em magmas provenientes do manto superior, estão diretamente relacionadas com a faixa de fraturas do Dorso Central e caracterizam-se por emissões estrombolianas, que ocorreram associadas a fraturas localizadas no centro e centro-oeste da ilha Terceira.

A Terceira é, em termos de área, a terceira maior ilha do arquipélago dos Açores, ocupando sensivelmente 402 km². Com um alongamento geral segundo W-E, atingindo o seu ponto mais elevado na Serra de Santa Bárbara, à cota de 1.021 m, a ilha está implantada no designado Rife (ou Crista) da Terceira, uma estrutura tectónica do tipo transformante *leaky*, com cerca de 600 km de extensão segundo uma direção geral WNW-ESSE (Nunes, 2012)

Segundo França *et al.* (2003), a ilha Terceira é dominada por quatro estratovulcões e por numerosos cones vulcânicos monogenéticos implantados em importantes fraturas (figura 3.8). De W para E enumeram-se, sucessivamente, os seguintes aparelhos vulcânicos poligenéticos, truncados por imponentes caldeiras, nomeadamente a Serra de

Santa Bárbara, o Maciço da Serra do Morião e da Caldeira de Guilherme Moniz, o Maciço do Pico Alto e o complexo desmantelado da Serra do Cume, da Serra da Ribeirinha e da Caldeira dos Cinco Picos.

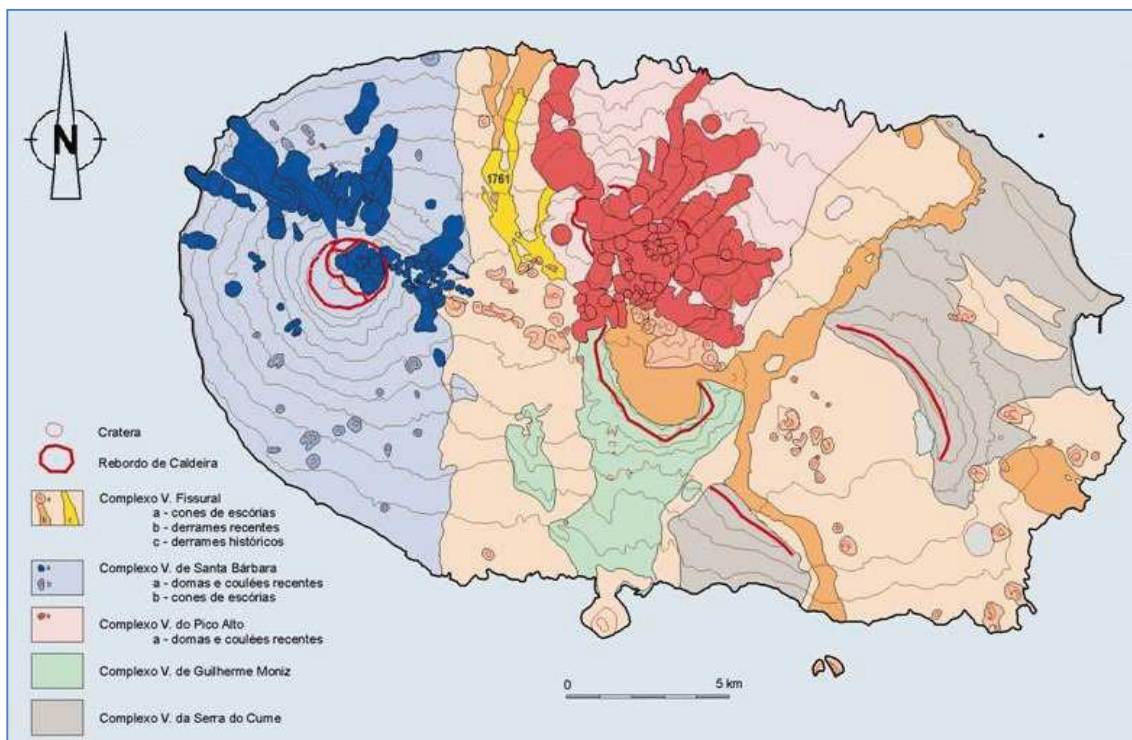


Figura 3.8 - Carta vulcanológica da ilha Terceira (adaptado de CVARG, 2016).

De acordo com Nunes (2000), os dois vulcões centrais com caldeira, que dominam, respetivamente, a área central-norte (vulcão do Pico Alto) e a extremidade W (vulcão de Santa Bárbara) da ilha Terceira, estão separados por uma zona de vulcanismo fissural, com vários cones de escórias, onde ocorreu a erupção histórica de 1761. Os materiais vulcânicos emitidos a partir desta zona fissural cobrem igualmente a área sudoeste da ilha, onde se sobrepõem aos depósitos dos vulcões centrais, com caldeira, de Guilherme Moniz, que domina o setor central-sul, e dos Cinco Picos. Este último vulcão compósito é o mais antigo da ilha Terceira (Calvert *et al.*, 2006).

A Serra de Santa Bárbara abrange toda a zona Oeste da ilha Terceira e, como tal, a totalidade da área de estudo do presente trabalho, que se estende pelas respetivas vertentes de sul a oeste. De acordo com Zbyszewski *et al.* (1971), este aparelho vulcânico compreende um estratovulcão com cerca de 13 km de diâmetro e uma altitude de 1.021 m, sendo que no topo se destaca uma caldeira, com um diâmetro da ordem de

2 km e uma profundidade aproximada de 150 m, no interior da qual se observam alguns domos, espessas escoadas lávicas de natureza traquítica (denominadas por *coulées*) e, mais para oeste, algumas lagoas de pequenas dimensões. Segundo o autor, os flancos deste vulcão mostram-se bastante ravinados, com uma rede de cursos de água do tipo centrífuga, implantada principalmente nos flancos N, S e W, sendo que os cones vulcânicos secundários deste estratovulcão estão dispostos radialmente ou sobre acidentes tectónicos de orientação geral NW-SE (*e.g.* Pico das Faias, Pico do Teles, Pico Negro, o Pico das Dez, Pico da Catarina Vieira, Pico dos Padres, Pico da Serreta).

O vulcão de Santa Bárbara ter-se-á iniciado por um vulcanismo mais básico, predominantemente do tipo mugarítico e havaítico, que terá evoluído para um vulcanismo nitidamente mais explosivo, responsável pela formação de domos traquíticos (*s.l.*) e por espessos depósitos pomíticos de queda (França *et al.*, 2003).

Segundo Ferreira e Azevedo (1995, *in* França *et al.*, 2003) as formações mais antigas deste estratovulcão surgiram há 1 milhão de anos, enquanto Feraud *et al.* (1980) atribuem uma idade inferior a 29.000 anos ao episódio de formação da caldeira.

A primeira carta geológica da ilha Terceira é da autoria de Zbyszewski *et al.* (1971), tendo sido baseada, essencialmente, em critérios de natureza petrográfica, sendo adaptada, posteriormente, por diversos autores (*e.g.* Self, 1973, Rodrigues, 2002).

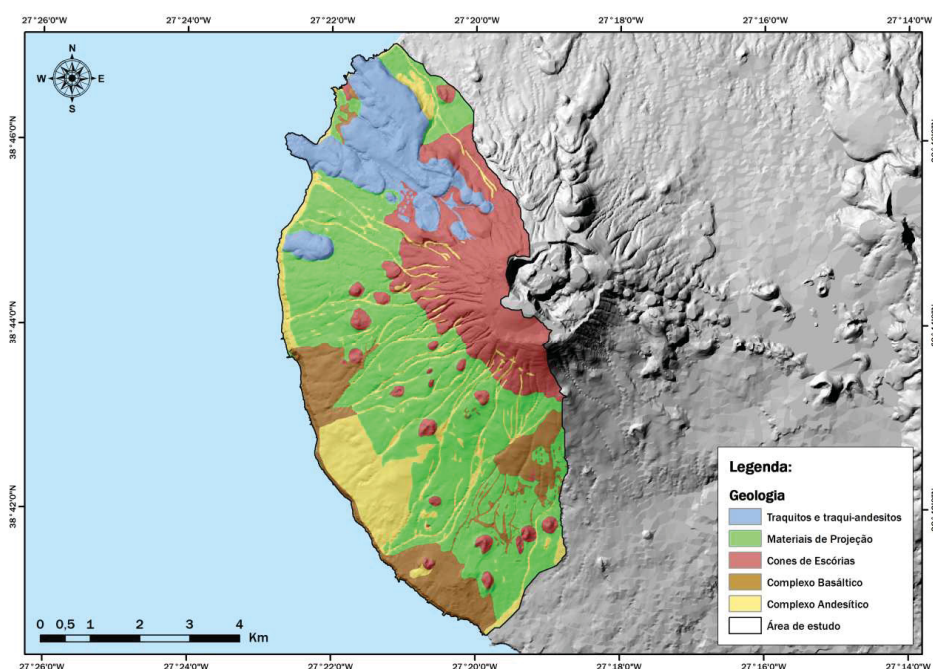


Figura 3.9 - Mapa geológico da área de estudo (adaptado de Zbyszewski *et al.*, 1971), apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Na figura 3.9, é apresentado um extrato da carta geológica da ilha Terceira (ver capítulo 5), adaptada de Zbyszewski *et al.* (1971), referente à área de estudo deste trabalho.

A origem vulcânica das ilhas, associada às características do clima, determina o aparecimento, em grande escala, de uma categoria de solos, denominada de Andossolos (Madruga, 1995). De acordo com este autor, os Andossolos dos Açores foram pela primeira vez designados como tal por Ricardo *et al.* (1977), através da publicação do Esboço Pedológico da Ilha de S. Miguel (Açores).

Os solos da ilha Terceira são originários de materiais vulcânicos, modernos, principalmente de cinzas, pedra-pomes e, em menor proporção, escória basáltica (Pinheiro, 1990).

De acordo com Pinheiro (1990), os solos da ilha Terceira separam-se em três tipos principais, designados de Andossolos Típicos, Andossolos Ferruginosos e Solos Pardos. Segundo o autor, em relação aos Andossolos Típicos distinguem-se três tipos de solos: os de perfil pouco diferenciado, os vítricos, e os de perfil bem diferenciado com horizonte Bw, tanto os insaturados como os de tendência êutrica.

Segundo Pinheiro, na fração argilosa destes solos *"existem materiais de fraca ordenação estrutural, especialmente alofanos, imogolite, sílica, opalina e ferrihidrite"*.

Os Andossolos Típicos distribuem-se desde o nível do mar até aproximadamente 500 – 600 m de altitude, sendo solos profundos, geralmente estratificados como resultado de acumulações periódicas (Pinheiro, 1990).

De acordo com Fontes (1999), como consequência da sua baixa massa volúmica, os Andossolos dos Açores apresentam, em geral, uma elevada capacidade de retenção de água. O autor afirma que apesar de estes solos serem, à partida, bem drenados, apresentam um elevado teor de humidade, por se desenvolverem em condições de humidade permanente.

3.5 CARACTERIZAÇÃO ADMINISTRATIVA, DEMOGRÁFICA E INFRAESTRUTURAL DA ZONA DE ESTUDO

3.5.1 CARACTERIZAÇÃO ADMINISTRATIVA

Do ponto de vista administrativo, a ilha Terceira, com uma população de 56.437 habitantes, de acordo com os Censos de 2011 (INE, 2012), está dividida nos concelhos de Angra do Heroísmo e Praia da Vitória, cujas designações correspondem também às duas cidades existentes na ilha.

O concelho da Praia da Vitória tem uma área de cerca de 162,3 km², englobando 11 freguesias, representadas na figura 3.10: Fonte Bastardo (20), Porto Martins (21), Cabo da Praia (22), Santa Cruz (23), Fontinhas (24), Lajes (25), São Brás (26), Vila Nova (27), Agualva (28), Quatro Ribeiras (29) e Biscoitos (30).

O concelho de Angra do Heroísmo, onde se localiza a área de estudo, apresenta uma área de cerca de 239,7 km², sendo constituído por 19 Freguesias (figura 3.10): Altares (1), Raminho (2), Serreta (3), Doze Ribeiras (4), Santa Bárbara (5), Cinco Ribeiras (6), São Bartolomeu de Regatos (7), São Mateus da Calheta (8), Terra-Chã (9), Posto Santo (10), São Pedro (11), Santa Luzia (12), Sé (13), Nossa Senhora da Conceição (14), São Bento (15), Ribeirinha (16), Feteira (17), Porto Judeu (18) e São Sebastião (19).

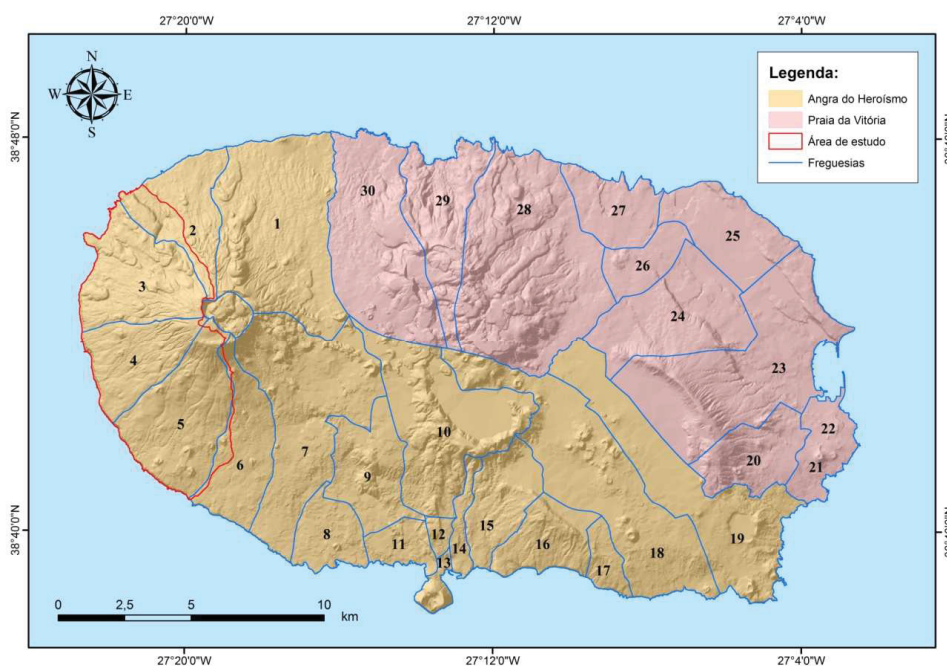


Figura 3.10 - Mapa das divisões administrativas da ilha Terceira, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

A Cidade de Angra do Heroísmo, sede do Município, é a mais antiga dos Açores, tendo sido elevada a essa categoria em 1534, e a sua Câmara Municipal foi a primeira do País a ser eleita, em 1831, após a reforma administrativa do Constitucionalismo (Decreto n.º 26, de 27 de Novembro de 1830).

Angra do Heroísmo foi, por duas vezes, capital do Reino de Portugal em circunstâncias críticas. A primeira, entre 5 de Agosto de 1580 e 5 de Agosto de 1582, quando D. António, Prior do Crato, ali estabeleceu o seu Governo. A segunda vez, por Decreto de 15 de março de 1830, após a instalação da Junta Provisória, em nome de D. Maria II de Portugal, em 1828, onde foi considerada como centro e alma do movimento liberal em Portugal, no contexto da Guerra Civil Portuguesa (1828-1834).

Em reconhecimento de tão destacados serviços, o Decreto de 12 de Janeiro de 1837 conferiu à cidade o título de "*mui nobre, leal e sempre constante cidade de Angra do Heroísmo*" e a Rainha D. Maria II de Portugal condecorou-a com a Grã-Cruz da Ordem Militar da Torre e Espada, do Valor, Lealdade e Mérito.

A cidade é a capital histórica dos Açores, sede da Diocese de Angra, a qual inclui a totalidade do arquipélago, e sede do Regimento de Guarnição n.º 1, uma das mais antigas unidades militares portuguesas.

A riqueza da sua história e património edificado levou a que a zona central da Cidade de Angra do Heroísmo (Centro Histórico) fosse classificada como Património Mundial pela UNESCO, a 7 de Dezembro de 1983.

O concelho de Angra do Heroísmo, segundo dados dos Censos de 2011 (INE, 2012), alberga uma população de 35.402 habitantes, distribuídos pelas suas dezanove freguesias (figura 3.10), apresentando uma densidade populacional de 148,1 habitantes/km².

3.5.2 CARACTERIZAÇÃO DEMOGRÁFICA

Nas figuras 3.11, 3.12 e 3.13, apresentam-se as evoluções demográficas, verificadas entre 1911 e 2011, respetivamente, para o arquipélago dos Açores, para a ilha Terceira e concelho de Angra do Heroísmo e ainda para as 3 freguesias que, genericamente, compõe a área de estudo deste trabalho, nomeadamente Santa Bárbara, Doze Ribeiras e Serreta.

Os gráficos em questão, de seguida apresentados, foram produzidos a partir de uma compilação de dados oficiais, disponíveis nos seguintes instrumentos: Censos de 1911 (DGE, 1913), Censos de 1920 (DGE, 1923), Censos de 1930 (DGE, 1933), Censos de 1940 (DGE, 1945), Censos de 1950 (INE, 1952), Censos de 1960 (INE, 1963), Censos de 1970 (INE, 1975), Censos de 1981 (INE, 1983), Censos de 1991 (INE, 1993), Censos de 2001 (INE, 2002), e Censos de 2011 (INE, 2012).

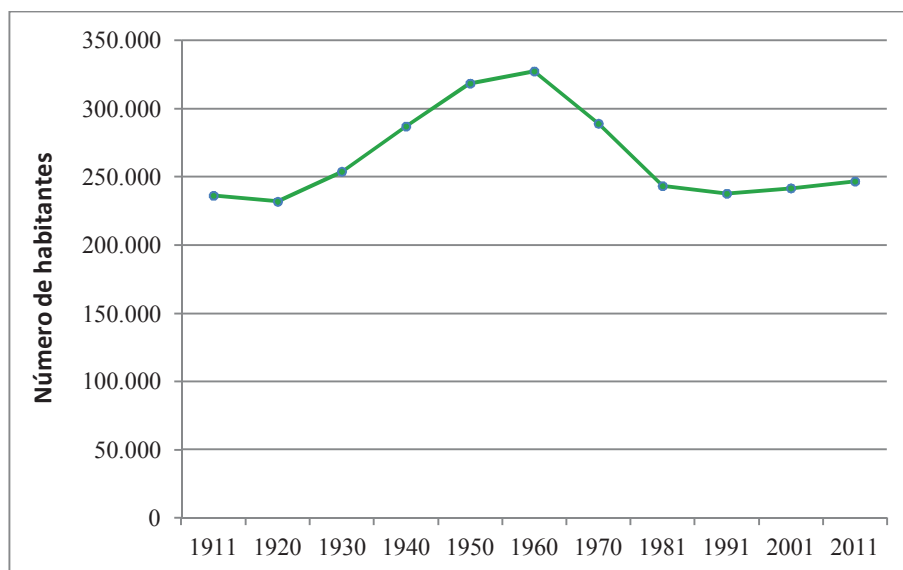


Figura 3.11 - Evolução demográfica para o arquipélago dos Açores, no período compreendido entre 1911 e 2011.

Como se pode observar no gráfico anterior, verificou-se uma franca tendência de crescimento populacional nos Açores até finais dos anos 60, onde a população chegou a atingir os 327.480 habitantes. No entanto, as sucessivas vagas de emigração açoriana, especialmente para os Estados Unidos, Canadá, Brasil, Bermuda e Hawaii, a partir da década de 60, levaram a um decréscimo muito significativo do número de habitantes na Região, até meados dos anos 90, período durante o qual os Açores perderam quase 90.000 habitantes, ficando a população reduzida apenas a 237.795 habitantes, o que corresponde a um número ligeiramente superior ao valor mais baixo do século, apurado nos censos de 1920.

Nas últimas duas décadas, no entanto, verificou-se uma inversão dessa tendência, com um crescimento contínuo, ainda que ténue, especialmente quando comparado com o verificado até à década de 50.

Atualmente, segundo a contabilização dos Censos de 2011 (INE, 2012), a população dos Açores é de 246.772 habitantes, representando 2,3% da população do País. Na sua maioria são mulheres, 125.238, sendo a população masculina de 121.534 indivíduos. Na última década, a população da Região aumentou cerca de 2%, sendo que em 2001 era de 241.763 pessoas.

O crescimento verificado na Região, ficou a dever-se, predominantemente, ao aumento de população observado na ilha de S. Miguel, na qual reside cerca de 55,9% da população do arquipélago. A ilha Terceira, a segunda mais populosa da Região, registou um aumento de cerca de 1% da população, devido ao crescimento verificado no município da Praia da Vitória, uma vez que o município de Angra do Heroísmo registou uma ligeira quebra (INE, 2012).

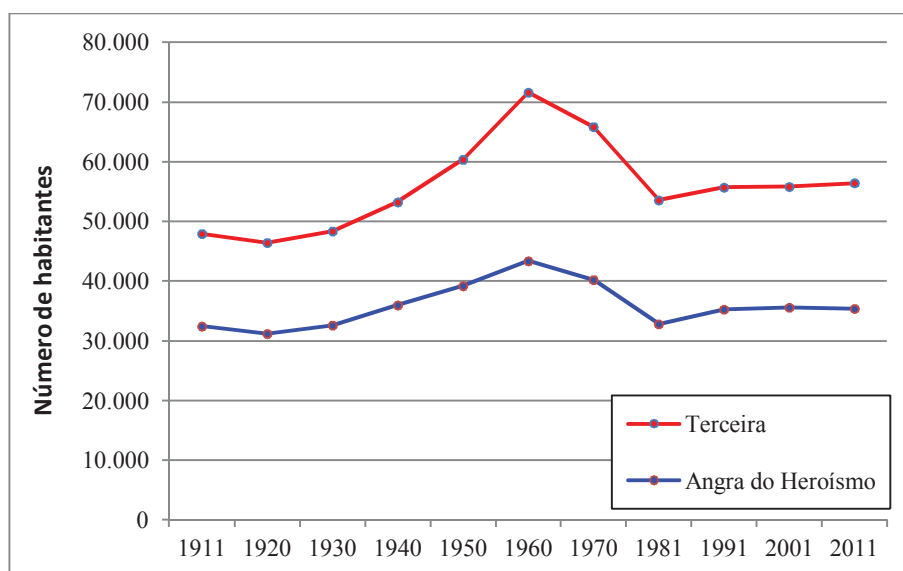


Figura 3.12 - Evolução demográfica para a ilha Terceira e para o concelho de Angra do Heroísmo, no período compreendido entre 1911 e 2011.

Como se pode verificar, comparando as figuras 3.11 e 3.12, o comportamento da evolução demográfica da ilha Terceira e do concelho de Angra do Heroísmo, é muito semelhante ao verificado no contexto regional, indicando que os efeitos das vagas de emigração, anteriormente referidas, se fez sentir de forma proporcional.

Assim, a população da ilha Terceira e do concelho de Angra do Heroísmo chegaram a atingir, na década de 60, respetivamente, 71.610 e 43.374 habitantes, sendo que nos Censos de 2011 (INE, 2012) foram registados apenas 56.437 habitantes na ilha e 35.402

no concelho. Entre as décadas de 60 e de 90, a ilha Terceira e o concelho de Angra do Heroísmo chegaram a perder mais de 18.000 e de 10.500 habitantes, respetivamente.

Na figura 3.13, pode observar-se que a demografia das freguesias de Santa Bárbara, Doze Ribeiras e Serreta, também seguiu a tendência da ilha e do arquipélago, de crescimento populacional até aos anos 50, ainda que relativamente menos acentuada, e de decréscimo acentuado a partir dos anos 60, derivado não apenas da emigração, mas também de um fenómeno de êxodo rural, para zonas mais próximas do centro populacional de Angra do Heroísmo, que tem levado progressivamente à sua desertificação.

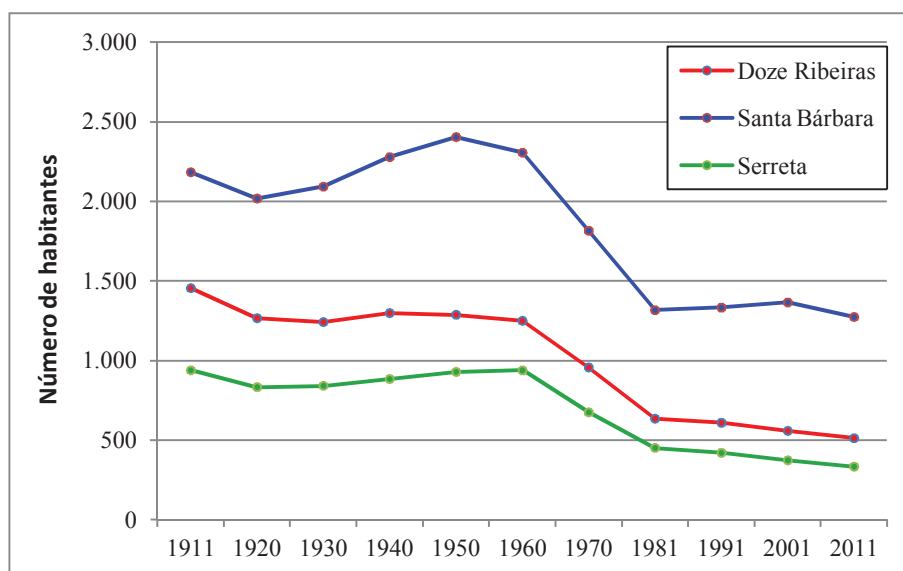


Figura 3.13 - Evolução demográfica para as freguesias de Doze Ribeiras, Santa Bárbara e Serreta, no período compreendido entre 1911 e 2011.

Enquanto a nível regional, de ilha e de concelho se verificou uma inversão da tendência de decréscimo da população, nestas freguesias, de grosso modo, tem-se continuado a verificar uma redução nas respetivas populações. Ainda assim, nas últimas três décadas, a freguesia de Santa Bárbara é a única que conseguiu, em determinado período, atenuar o decréscimo da respetiva população, o que se deve, seguramente, à sua maior proximidade à cidade de Angra do Heroísmo, em comparação com as Doze Ribeiras e, especialmente, com a Serreta.

Entre 1950 e a atualidade, Santa Bárbara perdeu sensivelmente metade da sua população, restando apenas 1.274 habitantes numa freguesia com aproximadamente

16,40 km², o que corresponde a uma densidade populacional de 77,6 habitantes/km². Por seu turno, as Doze Ribeiras e a Serreta perderam mais de 60% das respetivas populações, verificando-se apenas 513 e 335 habitantes, respetivamente. A freguesia das Doze Ribeiras, cuja área administrativa é de 10,37 km², apresenta atualmente uma densidade populacional de 49,47 habitantes/km², enquanto a Serreta, com uma área de 14,42 km², se configura como o caso mais grave, com uma densidade de apenas 23,23 habitantes/km².

Em qualquer uma destas e freguesias, a densidade populacional é muito inferior do que a verificada no contexto da ilha Terceira e do concelho Angra do Heroísmo, que correspondem, respetivamente, a 140,39 e 147,70 habitantes/km².

3.5.3 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFICADO E DAS ACESSIBILIDADES

De acordo com os Censos de 2011 (INE, 2012), no conjunto das três freguesias que constituem, maioritariamente, a área de estudo, existem 1.028 alojamentos familiares, distribuídos da seguinte forma: 235 nas Doze Ribeiras, 580 em Santa Bárbara e 213 na Serreta.

No entanto, os referidos dados não contemplam outras categorias de edificado, também importantes em termos de avaliação de risco, bem como a sua localização. Como tal, tendo em conta os objetivos da presente dissertação, não estando disponíveis levantamentos de pormenor mais atualizados, optou-se pela utilização da cartografia vetorial da ilha Terceira, elaborada pelos Serviços de Cartografia da Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos (SRHE, 2001). Apesar de no referido levantamento não ser feita a distinção por tipologias de edificado (*e.g.* habitação, edifícios públicos, comércio), garante-se, no entanto, a consideração de todo o edificado com importância em termos de avaliação de risco, com a utilização de um conjunto de 1.865 edifícios, representados por polígonos (ver figura 3.14), distribuídos pela área de estudo.

Em termos de acessibilidades, a área de estudo está dotada de uma rede viária constituída maioritariamente por estradas asfaltadas, com duas vias de rodagem e, genericamente, em bom estado de conservação, ilustradas na figura 3.14.

A rede viária principal na área de estudo é composta por cerca de 38,8 km de estrada, dos quais 20,7 km pertencem a Santa Bárbara, 8,3 km à Serreta e 7,1 km às Doze Ribeiras. Os restantes 2,7 km pertencem maioritariamente à freguesia do Raminho (2,4

km) e, residualmente, à freguesia das Cinco Ribeiras (pouco mais de 300 m). A rede viária secundária, é constituída por cerca de 187,77 km de estradas secundárias (caminhos), distribuídas de forma muito equilibrada entre Santa Bárbara, Doze Ribeiras e Serreta.

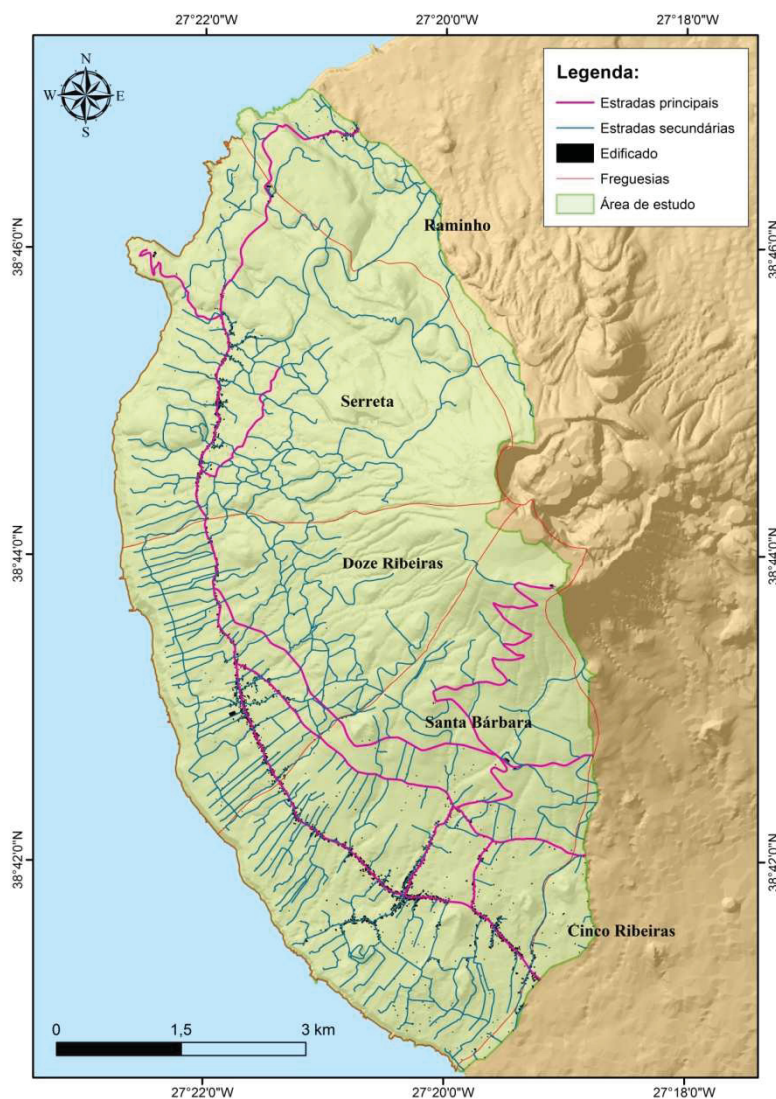


Figura 3.14 - Mapa de distribuição do edificado, estradas principais e estradas secundárias pela área de estudo, apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

4. INVENTARIAÇÃO E ANÁLISE DE

MOVIMENTOS DE VERTENTE

4.1 OBJETIVOS

A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, pretendida neste trabalho, bem como a avaliação da perigosidade e do risco de movimentos de vertente, dependem, inevitavelmente, da inventariação de movimentos de vertente sob forma de base de dados geográfica. A qualidade dos dados e a robustez do inventário são fatores determinantes para a obtenção de bons resultados em estudos desta natureza.

Neste capítulo, é desenvolvido o trabalho para concretizar os objetivos específicos 1, 2 e 3 do presente trabalho, descritos na introdução.

Desta forma, pretende-se descrever pormenorizadamente a metodologia e procedimentos adotados para a elaboração do inventário de movimentos de vertente. Por outro lado, pretende-se proceder à criação de um mapa de densidade de movimentos de vertente, que permita, entre outros aspetos, analisar e quantificar a respetiva abundância espacial.

Outro objetivo deste capítulo prende-se com a caracterização dos movimentos de vertente através de uma análise estatística dos parâmetros e índices morfométricos determinados, analisando, posteriormente, as relações de associação entre os mesmos.

Por fim e não menos importante, pretende-se definir e parametrizar uma função teórica de probabilidade que permita o cálculo da probabilidade de magnitude, servindo de base para determinar a probabilidade de ocorrência de um movimento de vertente com uma determinada dimensão na área de estudo, à semelhança do verificado nos trabalhos de Marques (2013) e de Garcia *et al.* (2014).

4.2 ASPETOS GERAIS SOBRE INVENTARIAÇÃO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

Um inventário de movimentos de vertente rigoroso, que defina o tipo e estado de atividade de todos os movimentos de vertente, bem como a sua distribuição espacial, é essencial para se proceder a qualquer análise de ocorrência destes fenómenos e da sua relação com as condições ambientais subjacentes (Soeters e Van Westen, 1996).

Apesar da facilidade e imediatismo com que podem ser preparados, os inventários de movimentos de vertente não são muito comuns (Guzzetti *et al.*, 2000), sendo que apenas estão disponíveis mapas deste tipo de inventários em poucos países e, mesmo assim, limitados a pequenas áreas (Brabb e Harrod, 1989; Sepúlveda e Petley, 2015).

Qualquer mapa de movimentos de vertente deve registar a localização e, quando possível, a data de ocorrência e tipo de movimentos de vertente que tenham deixado traços identificáveis numa determinada área. As diferentes técnicas para elaboração destes mapas dependem de diversos fatores, como sejam, o objetivo com que são desenvolvidos, a extensão da área de estudo, a escala dos mapas de base e das fotografias aéreas e, ainda, os recursos disponíveis para prosseguir com o trabalho (Guzzetti *et al.*, 1999; Highland e Bobrowsky, 2008).

Segundo Malamud *et al.* (2004a), os mapas de movimentos de vertente registam o local de todos os eventos que deixaram marcas distinguíveis numa determinada área. Esses traços característicos podem não ser reconhecidos no terreno ou através de fotointerpretação, uma vez que, frequentemente, são camuflados pela vegetação, erosão, edificação e pela atividade humana. Assim sendo, geralmente, estes inventários são incompletos e o nível de subdimensionamento é desconhecido, especialmente em inventários históricos.

A representação geográfica dos movimentos de vertente pode ser efetuada utilizando polígonos, delimitando a envolvente exterior do movimento de vertente, ou pontos, representando o seu centroide, dependendo do objetivo do trabalho e do procedimento de recolha da informação (Marques, 2013).

A identificação, classificação, caracterização e cartografia de movimentos de vertente podem ser efetuadas com recurso a diferentes técnicas, sendo as mais utilizadas: 1) cartografia geomorfológica de campo; 2) análise estereoscópica de fotografias aéreas ou monoscópica de ortofotomapas; 3) técnicas de deteção remota (*e.g.* LIDAR - *Light*

Detection and Ranging, imagens de SAR - *Synthetic Aperture Radar*); 4) trabalhos de engenharia de pormenor em vertentes específicas; 5) recolha de dados históricos em arquivos documentais (Guzzetti, 2005; Raspini *et al.*, 2015).

O reconhecimento de características que permitam identificar cicatrizes de movimentos de vertente a partir de fotografias aéreas estereoscópicas é uma técnica complexa, essencialmente empírica, que requer experiência, treino e uma metodologia sistemática e com critérios muito bem definidos (Speight, 1977; Guzzetti, 2005).

Normalmente, os inventários de movimentos de vertente apresentam a área total instabilizada, isto é, tanto a zona de rotura como a área de depósito. Pode-se argumentar que seria preferível utilizar apenas a área da rotura ou então o volume movimentado, porém, muitas vezes essas medidas são difíceis de determinar (Malamud, 2004a).

Os inventários de movimentos de vertente, usualmente, enquadram-se em duas classes: 1) inventários de evento, associados a um determinado evento desencadeante; e 2) inventários históricos, que são a soma de muitos movimentos de vertente que ocorreram na sequência de vários fatores desencadeantes ao longo do tempo, numa determinada região. No primeiro caso, é possível obter inventários bastante completos se o mapeamento for detalhado e efetuado imediatamente após o evento. No caso dos inventários históricos, uma vez que incluem movimentos desencadeados por eventos que ocorreram ao longo de períodos de dezenas, centenas ou até de milhares de anos, torna-se mais complicado obter inventários completos. Nesse caso, as evidências da ocorrência de muitos dos movimentos de vertente de menores dimensões são apagadas devido aos vários graus de modificação resultantes de deslizamentos posteriores, processos erosivos, ação antrópica e crescimento de vegetação. Além disso, com o passar do tempo, os limites das cicatrizes tornam-se cada vez mais difíceis de distinguir (Malamud *et al.*, 2004a).

A qualidade e representatividade dos inventários de movimentos de vertente dependem de uma série de fatores, tais como: 1) a experiência e prática do responsável pelo levantamento; 2) a qualidade e escala das imagens e da cartografia de base, 3) a complexidade geomorfológica da zona de estudo; 4) o tipo e alteração de uso do solo; e 5) o grau de evidência das marcas no terreno que permitem a identificação e cartografia dos movimentos de vertente (Guzzetti *et al.*, 2000; Malamud *et al.*, 2004a; Guzzetti, 2005; van Den Eeckhaut *et al.*, 2007; Guzzetti *et al.*, 2012; Schlögel *et al.*, 2015).

Nos Açores, a elevada reincidência de eventos de instabilidade geomorfológica, a inexistência de fotografias aéreas obtidas com periodicidade considerável e a enorme dispersão geográfica dos movimentos de vertente têm levado à elaboração de inventários históricos. Por conseguinte, o estabelecimento de relações entre os movimentos de vertente e a sua data de ocorrência torna-se extremamente difícil, na grande maioria dos casos. São exemplos disso os inventários elaborados por: 1) Valadão (2002) e Valadão *et al.* (2002), para a ilha de São Miguel, contendo 2.818 movimentos de vertente cartografados sob a forma de pontos; 2) Marques *et al.* (2009b) no vale da Ribeira Quente (concelho da Povoação, ilha de São Miguel), contendo 1.495 movimentos de vertente cartografados sob a forma de polígonos; e 3) Marques (2013), contendo 11.606 movimentos de vertente para o concelho da Povoação, em forma de polígonos.

No caso de inventários de evento, nos Açores apenas existem dois exemplos, da autoria de Marques *et al.* (2005 *in* Marques, 2013) e Marques *et al.* (2007b). O primeiro foi elaborado para o concelho da Povoação (ilha de São Miguel), sendo composto por 32 movimentos de vertente cartografados sob a forma de pontos, desencadeados por um episódio de precipitação intensa, no dia 6 de Março de 2005. O segundo foi produzido no Vulcão do Fogo (ilha de São Miguel), constituído por 271 movimentos de vertente cartografados sob a forma de pontos, desencadeados pelos sismos de 20 e 21 de Setembro de 2005. Tais inventários foram suportados unicamente em trabalho de campo, face à inexistência de fotografia aérea concordante com as datas de ocorrência desses eventos (Marques, 2013).

4.3 INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

A metodologia adotada para a inventariação dos movimentos de vertente na área de estudo, de acordo com o estabelecido na literatura bibliográfica (e.g. Soeters e van Westen, 1996; Zêzere, 1997; Aleotti e Chowdhury, 1999; Bateira, 2001; Garcia, 2002; Malamud *et al.*, 2004a; Guzzetti, 2005; van Westen *et al.*, 2008; Pereira, 2009; Oliveira, 2012; Garcia, 2012; Marques, 2013), compreendeu duas etapas distintas. Numa primeira fase, procedeu-se, em gabinete, à identificação e cartografia, sob a forma de polígonos, à escala de 1:1000, com recurso a Sistemas de Informação Geográfica (ArcGis 10.1), de todos os movimentos de vertente detetáveis e, numa segunda fase, com trabalho de campo, *in situ*, foram feitos os devidos ajustamentos ao trabalho previamente realizado.

Na primeira fase, em gabinete, recorreu-se ao ortofotomapa digital da ilha Terceira de 2006, com escala de 1:5000, que teve por base fotografias aéreas pertencentes à Direção de Serviços de Cartografia e Informação Geográfica, da Secretaria Regional do Turismo e Transportes (DSCIG - SRTT), para a identificação e cartografia dos movimentos de vertente na zona Oeste da ilha Terceira. Para auxílio na interpretação do relevo e da orientação do terreno, foram sobrepostas ao ortofotomapa as curvas de nível disponíveis, à escala de 1:25.000 (isolinhas de 10 m), tal como se ilustra na figura 4.1.

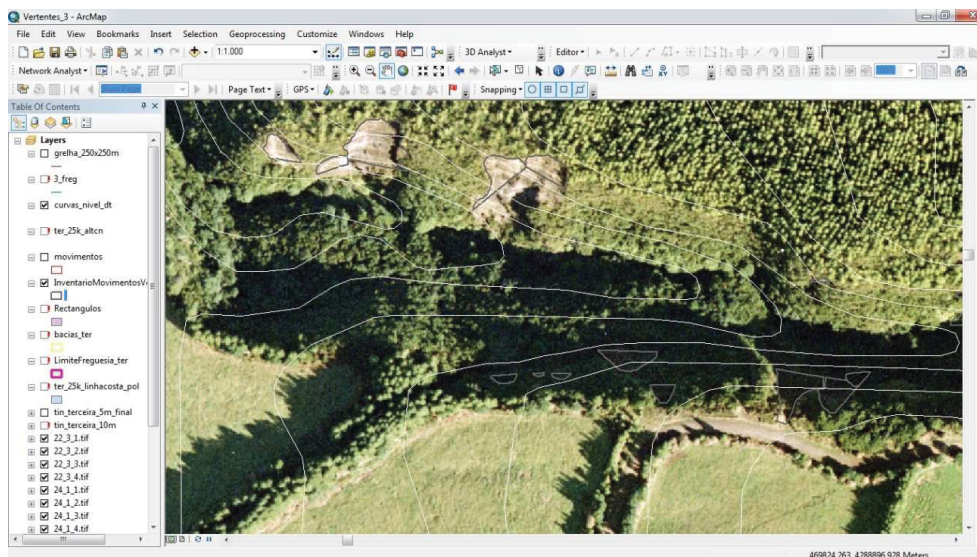


Figura 4.1 - Exemplos de movimentos de vertente identificados e cartografados por análise monocópica de ortofotomapas, através de SIG (ArcGis 10.1), com auxílio de altimetria à escala de 1:25.000.

Por outro lado, de modo a sistematizar e agilizar o trabalho, dada a escala utilizada e, muitas vezes, a complexidade da paisagem, utilizou-se ainda uma quadrícula regular de 250 m x 250 m, sobreposta à restante cartografia (figura 4.2).

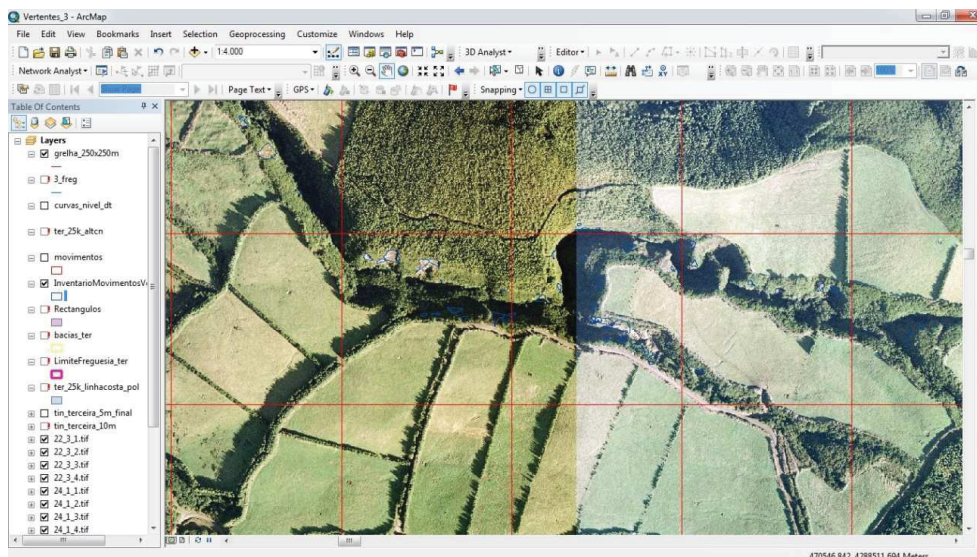


Figura 4.2 - Imagem exemplificativa da grelha utilizada para sistematização do trabalho em SIG (ArcGis 10.1), com dimensões de 250 m x 250 m.

Como resultado do trabalho efetuado em gabinete, foram identificados e cartografados 346 possíveis movimentos de vertente.

A segunda fase do trabalho, no campo, teve os seguintes objetivos: 1) validar os movimentos de vertente registados em gabinete e eliminar os erros de deteção originados pela fotointerpretação; 2) definir de forma rigorosa os limites dos movimentos de vertente (polígonos) validados; 3) registar os movimentos de vertente indetetáveis por fotointerpretação; 4) registar os movimentos de vertente posteriores à criação do ortofotomapa utilizado; 5) confirmar a tipologia dos movimentos de vertente; e 6) estimar a profundidade de rotura dos movimentos de vertente.

A cartografia resultante do trabalho em gabinete (ortofotomapa da área de estudo, curvas de nível, grelha quadrangular de 250m x 250m, limites administrativos e polígonos das cicatrizes assinaladas) foi impressa à escala de 1:2.000, sob a forma de 20 cartas em formato ISO A0. Além disso, foi utilizada uma tabela, criada para o efeito, para preenchimento dos dados relativos a cada um dos movimentos de vertente validados e/ou adicionados. Todos os dados foram, posteriormente, vetorizados na base de dados em SIG. Para auxílio à navegação e localização dos movimentos detetados por

fotointerpretação e para a georreferenciação dos movimentos de vertente detetados em campo, recorreu-se a um GPS *Garmin eTrex Summit*.

Na figura 4.3, ilustram-se alguns exemplos de movimentos de vertente detetados e cartografados em campo.



Figura 4.3 - Exemplos de movimentos de vertente identificados e cartografados em trabalho de campo desenvolvido no âmbito da presente dissertação.

No final do levantamento de campo, efetuado de acordo com a sistematização dos vestígios e características impressos na morfologia e vegetação proposta por Soeters e van Westen (2006), foram muito poucos os potenciais movimentos de vertente em que não foi possível a sua confirmação *in loco*. O levantamento cartográfico feito em gabinete, por fotointerpretação, deve sempre ser validado pelo levantamento de campo, porém, em alguns casos, por se tratarem de zonas absolutamente inacessíveis, em termos de acesso pedonal, não foi possível observar devidamente algumas cicatrizes de movimentos de vertente.

Os resultados do levantamento de campo são bem demonstrativos da sua importância neste tipo de análise, especialmente se comparados com resultados baseados apenas em

deteção remota. Dos 346 potenciais movimentos de vertente assinalados numa primeira fase, em gabinete, apenas 95 (27,46%) foram validados em trabalho de campo.

Com o levantamento de campo foi possível concluir que as restantes 251 cicatrizes (72,54%), se tratavam de erros de deteção, tendo-se devido, essencialmente, a ilusões resultantes da densa vegetação nas zonas mais altas, à planificação do terreno implícita nos ortofotomapas e, também, numa primeira fase, a alguma inexperiência do autor em termos de fotointerpretação, o que, de acordo com Morgan *et al.* (2010), é perfeitamente normal e inconsequente, desde que o inventário seja validado com trabalho de campo.

Como resultado do levantamento de campo, foram ainda identificadas e cartografadas outras 124 cicatrizes de movimentos de vertente. São várias as razões para que estas novas cicatrizes não tenham sido detetadas por fotointerpretação, destacando-se o facto de algumas delas não apresentarem dimensões suficientemente grandes para serem detetáveis à resolução dos ortofotomapas utilizados. Por outro lado, em muitos casos tratam-se de movimentos de vertente recentes, cujas ocorrências são posteriores à criação dos referidos ortofotomapas. Refira-se ainda que, tendo em conta a experiência em campo, a justificação mais relevante reside no facto de muitas cicatrizes ficarem completamente escondidas e camufladas pela vegetação, sendo que muitas vezes, mesmo *in loco*, apenas é possível detetar as cicatrizes dos movimentos de vertente recorrendo à análise da distribuição espacial de algumas espécies de plantas, como a conteira (*Hedychium gardneranum* Sheppard ex Ker-Gawl) que, frequentemente, delimita e permite identificar os bordos das cicatrizes mais recentes.

Do total de movimentos de vertente que constituem o inventário final de movimentos de vertente deste trabalho, 43,38% foram cartografados por fotointerpretação, sendo que os restantes 56,62% derivaram do levantamento de campo. De facto, comprova-se claramente que a elaboração de inventários de movimentos de vertente exclusivamente por fotointerpretação os torna excessivamente falíveis e muito pouco rigorosos e representativos da realidade local.

Apesar de ser sabido que qualquer inventário de movimentos de vertente, por diversas ordens de razão, está sempre subdimensionado a um nível desconhecido (Malamud *et al.*, 2004a), o trabalho de campo permite uma aproximação muito mais precisa e fidedigna ao número real de movimentos de vertente existentes numa determinada área, tal como se comprova no presente trabalho, em que o levantamento de campo efetuado

foi responsável pela detecção e cartografia de mais de metade dos movimentos de vertente do inventário final e pela eliminação de 251 erros de detecção.

A importância do trabalho campo é reforçada com outros dois aspetos de grande relevância, já que permite estimar a profundidade de rotura dos movimentos de vertente, o que não é possível através de fotointerpretação, permitindo ainda, através de análises comparativas, certamente com menor grau de subjetividade, estimar a profundidade de rotura dos movimentos de vertente inacessíveis em campo e ajustar de forma mais rigorosa os limites de todas as cicatrizes detetadas por fotointerpretação, bem como definir a tipologia dos movimentos de vertente.

Em termos de metodologia, periodicamente, ao longo do trabalho de campo, o levantamento ia sendo vetorizado para a base de dados em SIG, até o inventário de movimentos de vertente estar concluído.

É de referir ainda, que o levantamento dos movimentos de vertente em campo foi feito em duas etapas e com recurso a meios distintos. A primeira etapa foi feita em terra, de igual modo para o total da área de estudo. No entanto, nas zonas costeiras, tendo em conta os elevados declives, a instabilidade de muitos segmentos no topo das encostas, bem como a grande concentração de canas (*Arundo donax* L.) que as delimitam, em grande parte dos casos, não foi possível estabelecer linhas de visão que permitissem a observação e uma correta análise das cicatrizes. Assim, com recurso a uma lancha de fibra motorizada *Fisherman 5.6*, efetuaram-se 3 saídas de campo por via marítima, que permitiram uma análise bastante rigorosa de todas as encostas dentro da área de estudo e complementar o trabalho já efetuado a partir de terra, em outras trinta e duas saídas.

O inventário de movimentos de vertente da área de estudo, doravante designado por IMV, representado na figura 4.7, consiste num inventário histórico composto por 219 movimentos de vertente, cartografados em forma de polígonos, representando o contorno exterior das respetivas cicatrizes. Para que a representação das cicatrizes fosse o mais rigorosa possível, aquando da vectorização dos polígonos foram colocados 10.822 vértices no total do inventário. Em média, colocou-se 52 vértices em cada polígono, variando com a dimensão de cada polígono, sendo que o mínimo utilizado num polígono foi de 8 vértices e o máximo de 364. Segundo Malamud *et al.* (2004a), um erro na localização e vectorização do limite de um movimento de vertente de apenas 1-2 milímetros num mapa topográfico (*e.g.* 10-20 metros no solo a uma escala de

1:10.000) poder resultar numa diferença superior a 5% em termos da área da cicatriz para movimentos de vertente pequenos.

Refira-se ainda que, na grande maioria dos casos, não foi possível encontrar os depósitos dos movimentos de vertente inventariados.

Tabela 4.1 - Características do inventário de movimentos de vertente.

Inventário de Movimentos de Vertente				
Área (km ²)	N.º de movimentos de vertente	Área instabilizada (m ²)	Densidade	
			N.º de movimentos de vertente/km ²	Área instabilizada (m ²)/km ²
41,19	219,00	72.120,77	5,32	1.750,93

Como é possível observar na tabela 4.1, a área delimitada para a realização do IMV totaliza 41,19 km², correspondentes ao conjunto das áreas administrativas de três freguesias: Serreta (14,42 km²), Doze Ribeiras (10,37 km²) e Santa Bárbara (16,40 km²). Em média, foram detetados mais de cinco movimentos de vertente por Km², sendo a área instabilizada de aproximadamente 1.750 m²/km².

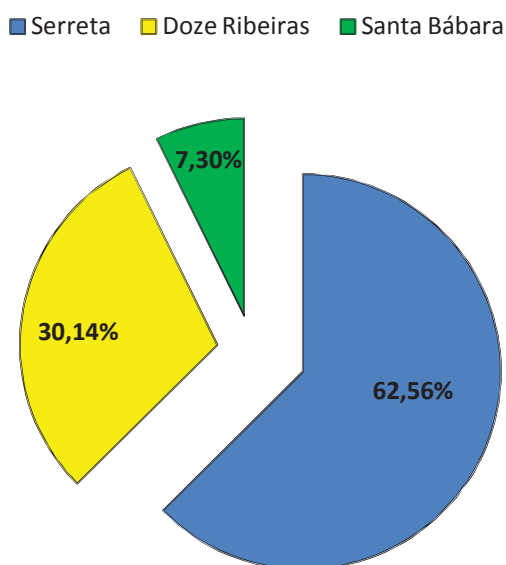


Figura 4.4 - Distribuição dos movimentos de vertente por freguesia.

A Serra de Santa Bárbara é o ponto mais alto da ilha Terceira, elevando-se a uma altitude máxima de 1.021 m. O facto de a freguesia de Santa Bárbara ser o acesso mais

utilizado para aceder à Serra, poderia, *a priori*, induzir a ideia de que seria, de entre as 3 freguesias que constituem a área do IMV, a que apresentaria uma maior densidade de movimentos de vertente. No entanto, as freguesias da Serreta e das Doze Ribeiras compreendem muito mais cursos de água do que Santa Bárbara, nomeadamente ribeiras extremamente fundas e encaixadas, com declives acentuados e, como tal, com maior propensão para a ocorrência de movimentos de vertente, como é o caso da Ribeira do Além, situada na freguesia da Serreta.

De acordo com a figura 4.4, tendo em conta os aspetos supra referidos, a grande maioria dos movimentos de vertente do IMV (62,56%) ocorreram na freguesia da Serreta, onde se contabilizaram 137 cicatrizes. A segunda freguesia com mais movimentos de vertente registados corresponde às Doze Ribeiras, com 66 ocorrências (30,14%), ainda assim com menos de metade dos verificados na Serreta. Santa Bárbara, com apenas 16 movimentos de vertente (7,30%), foi a freguesia com menores sinais de instabilidade.

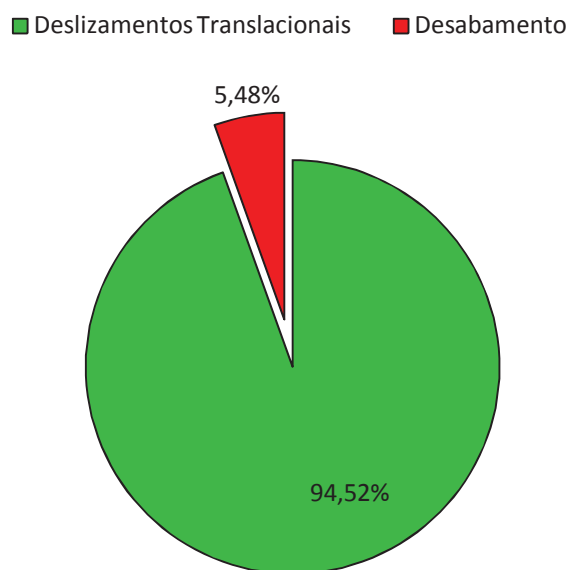


Figura 4.5 - Distribuição dos movimentos de vertente do IMV por tipologia.

De entre as várias tipologias de movimentos de vertente, anteriormente referenciadas, na área de estudo apenas foram detetados deslizamentos translacionais e desabamentos. Como se pode verificar na figura 4.5, a esmagadora maioria dos movimentos de vertente são deslizamentos translacionais (207), representando 94,52% do IMV. Foram

detetados 12 desabamentos, maioritariamente ao longo da zona costeira da área de estudo, representado apenas 5,48% do IMV.

Na figura 4.6, podem observar-se alguns exemplos de deslizamentos translacionais existentes na área de estudo. Refira-se ainda que, em alguns casos, os deslizamentos translacionais evoluíram, posteriormente, para escoada detrítica.



Figura 4.6 - Exemplos de deslizamentos translacionais identificados e cartografados na área de estudo.

Uma vez que, em termos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, as tipologias de movimentos de vertente devem ser tratadas individualmente e tendo em conta que os desabamentos não apresentam representatividade dentro do IMV, para esse efeito (ver capítulo 5), os desabamentos foram desprezados, passando o IMV a ser constituído apenas por 207 deslizamentos translacionais.

Na figura 4.7 é apresentada a distribuição final dos movimentos de vertente (IMV) cartografados na área de estudo, na zona Oeste da ilha Terceira, compreendendo as freguesias de Santa Bárbara, Doze Ribeiras e Serreta.

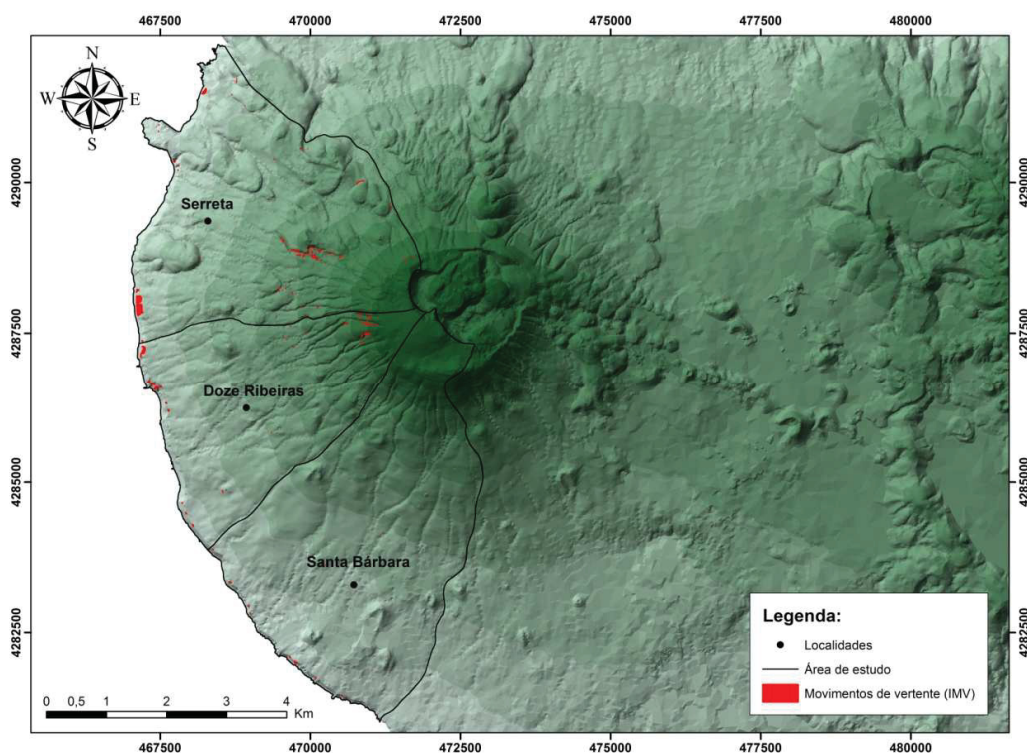


Figura 4.7 - Mapa de localização dos movimentos de vertente inventariados na zona de estudo (IMV), apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

4.4 MAPA DE DENSIDADE DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

Os mapas de densidade de movimentos de vertente estimam a abundância espacial dos movimentos de vertente (Campell, 1973). Segundo Marques (2013), a sua elaboração pode ter vários propósitos, dos quais se destacam: 1) a representação espacial da distribuição dos movimentos de vertente para áreas de trabalho muito grandes (*e.g.* estados, países ou continentes); 2) a obtenção de uma visão geral da abundância espacial dos movimentos de vertente; 3) a demonstração espacial da magnitude dos movimentos de vertente para um evento desencadeante específico; 4) a avaliação da abundância de movimentos de vertente relativamente a uma determinada variável; e 5) a sua utilização como abordagem preliminar da suscetibilidade a movimentos de vertente.

Neste trabalho, a produção de um mapa de densidade de movimentos de vertente teve como objetivos principais a representação e análise da abundância espacial dos movimentos de vertente na área de estudo, bem como uma abordagem preliminar à avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

Para o cálculo referente à produção do referido mapa, foi utilizada a expressão 4.1, onde A_{MV} corresponde à área da unidade de terreno (UT) utilizada para calcular a densidade e em que A_{UT} equivale à área ocupada por movimentos de vertente dentro de cada unidade de terreno. Desta forma, a densidade de movimentos de vertente (D_{MV}) varia entre 0 e 1, sendo que 0 corresponde a uma unidade de terreno com ausência completa de movimentos de vertente e 1 significa uma unidade de terreno completamente ocupada por movimentos de vertente.

Equação 4.1:

$$D_{MV} = \frac{A_{MV}}{A_{UT}}$$

Tendo em conta a expressão anterior, neste trabalho, utilizaram-se unidades matriciais ortogonais de 100 m x 100 m como unidades de terreno. Para cada unidade, calculou-se a densidade da área instabilizada, tendo-se como resultado o mapa apresentado na figura 4.8.

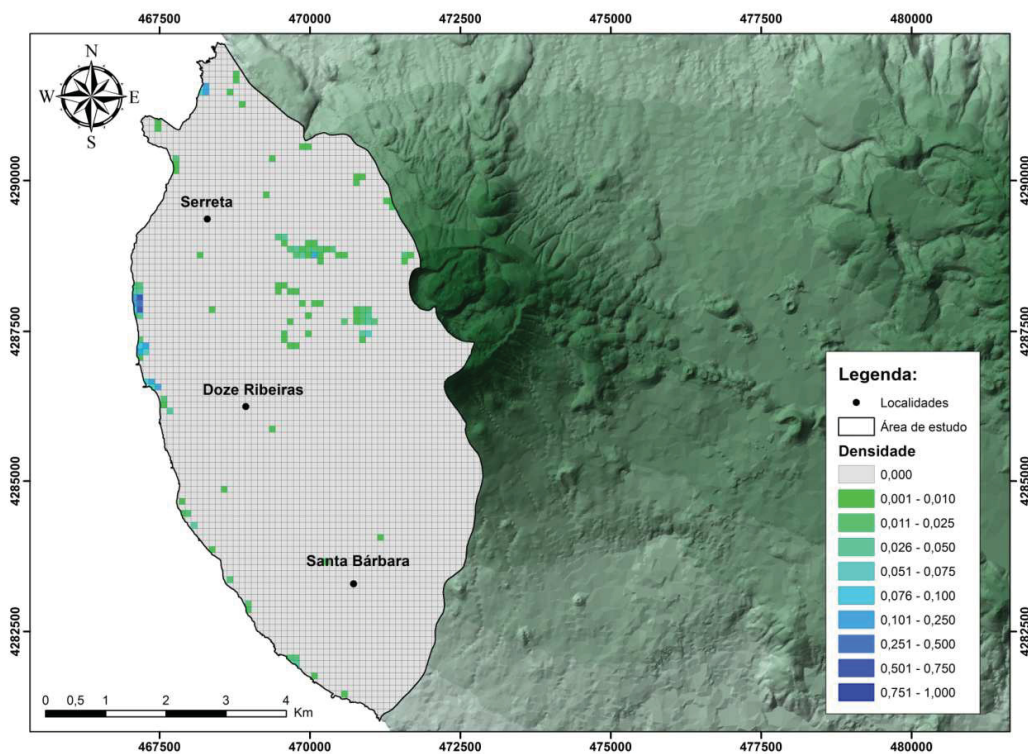


Figura 4.8 - Mapa de densidade de movimentos de vertente da zona de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Como se pode verificar pela análise da figura 4.8, a maior abundância geográfica de movimentos de vertente está associada a estruturas morfológicas bem definidas, caracterizadas por elevados declives, distribuindo-se assim ao longo das arribas litorais de toda a área de estudo, por escarpas de falhas e taludes de cursos de água, especialmente ao longo da Ribeira do Além, localizada na freguesia da Serreta.

4.5 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

À semelhança do que foi efetuado por outros autores (*e.g.* Zêzere, 1997; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013), a análise morfométrica dos movimentos de vertente foi efetuada tendo por base um conjunto de índices e parâmetros morfométricos calculados a partir da informação do inventário de movimentos de vertente. Para tal, tendo em conta os índices e parâmetros calculados, aplicaram-se várias técnicas de análise à totalidade dos movimentos de vertente presentes no inventário criado no âmbito deste trabalho, tais como: 1) cálculos de parâmetros de estatística descritiva simples; 2) avaliação da normalidade das distribuições de valores; 3) análise do grau de correlação entre os diferentes parâmetros e índices estabelecidos.

4.5.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS E ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

Na tabela 4.2, apresentam-se os 8 parâmetros e os 2 índices morfométricos utilizados para a caracterização morfométrica dos movimentos de vertente cartografados na área de estudo.

Tabela 4.2 - Parâmetros e índices morfométricos utilizados para a análise e caracterização dos movimentos de vertente.

Sigla	Designação do parâmetro/índice	Unidade
COMP	Comprimento da cicatriz	m
LARG	Largura da cicatriz	m
ALT	Altura da cicatriz	m
ANG	Ângulo da cicatriz	°
ÁREA	Área da cicatriz	m ²
PER	Perímetro da cicatriz	m
PROF	Profundidade máxima do plano de rotura	m
VOL	Volume do material instabilizado	m ³
I-ALO	Índice de alongamento	-
I-CIR	Índice de circularidade	-

Antes de descrever a forma de cálculo dos vários parâmetros e índices morfométricos selecionados, importa referir que em alguns casos os cálculos foram efetuados tendo por base medições planimétricas (bidimensionais), assumindo, por isso, o sufixo 2D. Nos restantes casos, as medições tiveram em conta a superfície do terreno (tridimensionais), apresentando, desse modo, o sufixo 3D. Por outro lado, o cálculo de alguns dos parâmetros e índices morfométricos resulta de operações matemáticas envolvendo parâmetros simples.

Assim sendo, os parâmetros e índices morfométricos foram calculados da seguinte forma, para cada movimento de vertente do IMV:

- **Comprimento planimétrico da cicatriz (COMP 2D)** - Comprimento máximo da cicatriz do movimento de vertente, medido sobre a projeção planimétrica do respetivo polígono. Este cálculo foi efetuado de forma individual para cada cicatriz, através da criação de um polígono quadrangular contendo o polígono da cicatriz vetorizada, medindo o lado do polígono quadrangular correspondente ao comprimento da cicatriz;
- **Largura da Cicatriz (LARG 2D/3D)** - Largura máxima da cicatriz do movimento de vertente, medida sobre a projeção planimétrica do respetivo polígono. Este cálculo foi efetuado de forma individual para cada cicatriz, através da criação de um polígono quadrangular contendo o polígono da cicatriz vetorizada, medindo o lado do polígono quadrangular correspondente à largura da cicatriz. Considerando a morfologia das cicatrizes dos movimentos de vertente, bem como o seu posicionamento nos taludes, por simplificação, assumiu-se a semelhança entre os valores 2D e 3D relativos à largura, considerando-os iguais;
- **Área planimétrica da cicatriz (AREA 2D)** - Cálculo efetuado de forma automática sobre a projeção planimétrica de cada cicatriz vetorizada, através da *Toolbox Spatial Analyst* do software ArcGis 10.1;
- **Perímetro planimétrico da cicatriz (PER 2D)** - Cálculo efetuado de forma automática sobre a projeção planimétrica de cada cicatriz vetorizada, através da *Toolbox Spatial Analyst* do software ArcGis 10.1;

- **Altura da Cicatriz (ALT 3D)** - Cálculo efetuado pela diferença entre a cota máxima e a cota mínima de cada cicatriz, tendo as mesmas sido extraídas, de forma automática, do Modelo Numérico de Elevação (MNE), baseado em unidades de terreno matriciais ortogonais de 10 m x 10 m, tendo por base a altimetria à escala 1:25.000 (pontos cotados e linhas de altimetria), disponível para a ilha Terceira. Para tal recorreu-se às *toolbox's 3D Analyst* e *Spatial Analyst* do software ArcGis 10.1;
- **Comprimento real aproximado da cicatriz (COMP 3D)** - Comprimento correspondente à hipotenusa de um triângulo retângulo, cujo cateto oposto é definido por ALT 3D e o cateto adjacente por COMP 2D. A expressão utilizada para o cálculo deste parâmetro foi a seguinte:

Equação 4.2:
$$COMP\ 3D = \sqrt{(ALT\ 3D^2 + COMP\ 2D^2)}$$

- **Ângulo da cicatriz (ANG 3D)** - Ângulo formado entre a horizontal e a hipotenusa de um triângulo retângulo, cujo cateto oposto é definido por ALT 3D e o cateto adjacente por COMP 2D. O parâmetro corresponde a uma aproximação do declive médio da vertente onde o respetivo movimento de vertente ocorreu e foi calculado pela seguinte expressão:

Equação 4.3:
$$ANG\ 3D = \arctan\left(\frac{ALT\ 3D}{COMP\ 2D}\right)$$

- **Área superficial da cicatriz (AREA 3D)** - Cálculo efetuado recorrendo à *toolbox 3D Analyst* do software ArcGis 10.1. A operação teve por base a interceção do polígono que define a cicatriz do movimento de vertente com o TIN (*Triangular Irregular Network*) da área de estudo, criado com base na altimetria à escala 1:25.000 (pontos cotados e linhas de altimetria), disponível para a ilha Terceira, calculando-se a área superficial da interceção;
- **Perímetro superficial da cicatriz (PER 3D)** - Cálculo efetuado de forma automática, tendo por base o TIN da área de estudo e o polígono vetorizado de

cada cicatriz. Para tal, converteram-se todos os polígonos em polígonos ZM, através da *toolbox 3D Analyst* do software ArcGis 10.1;

- **Profundidade do plano de rotura (PROF 3D)** - Na grande maioria dos movimentos de vertente foi possível fazer a observação direta da cicatriz, facilitando assim o processo de estimativa da profundidade máxima do plano de rotura, ainda que de forma aproximada. No entanto, em alguns casos, dada a localização inacessível de algumas cicatrizes, a única forma de estimar este parâmetro foi por análise comparativa de outras cicatrizes de movimentos de vertente com características morfológicas idênticas;
- **Volume aproximado de material instabilizado (VOL 2D e VOL 3D)** - Cálculo efetuado por simplificação/adaptação da fórmula normal de cálculo. Tendo em conta que as cicatrizes inventariadas são referentes a deslizamentos translacionais, apesar de algumas terem evoluído para escoadas detriticas, à semelhança do procedimento adotado por Marques (2013), para estimar o volume do material instabilizado, utilizou-se a seguinte expressão, proposta por Surdeanu (1986):

Equação 4.4:
$$VOL = 0,785 . a . b . h$$

em que: a corresponde a 1/2 da largura máxima da área afetada, ou seja, 1/2 de LARG 2D/3D; b ao comprimento do plano de rotura, correspondendo a COMP 2D para o cálculo do VOL 2D e a COMP 3D para o VOL 3D; assumiu-se que h corresponde à profundidade máxima do plano de rotura (PROF 3D), tal como apontado por Zêzere (1997);

- **Índice de alongamento (I-ALO 2D e I-ALO 3D)** - Este índice permite estabelecer uma relação entre a largura e o comprimento de uma cicatriz, possibilitando assim determinar o desenvolvimento preponderante do movimento de vertente, sendo que se for inferior a 1, o desenvolvimento é longitudinal e se for superior a 1, o desenvolvimento é essencialmente transversal. O cálculo foi efetuado pela seguinte equação:

$$\text{Equação 4.5: } I - ALO = \frac{LARG\ 2D/3D}{COMP}$$

Para o cálculo de I-ALO 2D, COMP corresponde ao COMP 2D e para o cálculo de I-ALO 3D, usou-se o COMP 3D;

- **Índice de circularidade (I-CIR 2D e I-CIR 3D)** - Este índice permite relacionar a área de um movimento de vertente (AREA), com a área de um círculo (Ac), considerando que ambos têm perímetro igual ao da respectiva cicatriz (PER), baseando-se no parâmetro homónimo de caracterização de bacias hidrográficas proposto por Müller (1953). Dado que o perímetro da circunferência (Pc) se obtém por $Pc = 2\pi r$, e que $Ac = \pi r^2$, em que r se refere ao raio, então $Ac = \pi \left(\frac{PER}{2\pi}\right)^2$, pelo que o cálculo foi efetuado através da expressão seguinte:

$$\text{Equação 4.6: } I - CIR = \frac{AREA}{AC} = \frac{AREA}{\pi \left(\frac{PER}{2\pi}\right)^2} = \frac{AREA}{\frac{\pi \cdot PER^2}{4\pi^2}} = \frac{4\pi \cdot AREA}{PER^2}$$

Para o cálculo do I-CIR 2D, AREA e PER corresponderam respetivamente a AREA 2D e PER 2D, enquanto que no cálculo de I-CIR 3D utilizaram-se os valores de AREA 3D e PER 3D. O presente índice varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo for o seu valor for de 1, mas próximo estará a cicatriz de uma forma circular.

Ainda relativamente ao cálculo dos parâmetros morfométricos, mais concretamente do comprimento planimétrico da cicatriz (COMP 2D) e da largura da cicatriz (LARG 2D/3D), importa referir que teria sido possível, à imagem do realizado por outros autores (e.g. Marques, 2013), efetuar todos os cálculos de forma automática, através da *Toolbox ET Geo Wizard*, desenvolvida pela empresa *ET Spatial Technics* para o software ArcGis. No entanto, em termos práticos, o que a referida ferramenta efetua é a

determinação do eixo mais longo (*longest axis*) de cada polígono, apresentando-o como sendo o comprimento, determinando automaticamente o eixo perpendicular ao eixo mais longo (suposto comprimento da cicatriz) e considerando-o como a largura. Ora isto apenas seria, teoricamente, correto se o desenvolvimento dos movimentos de vertente fosse sempre longitudinal ao longo dos taludes, o que, normalmente não acontece. Além disso, no inventário elaborado no âmbito deste trabalho, o desenvolvimento dos movimentos de vertente observado não é preferencialmente longitudinal, mas sim transversal.

Assim sendo, concluída a medição individual dos comprimentos e larguras de todas as cicatrizes, procedeu-se adicionalmente ao cálculo automático destas medidas, através da *Toolbox ET Geo Wizard*, por forma a permitir estabelecer uma análise comparativa entre os resultados obtidos através das duas metodologias. Após esta análise foi possível retirar três conclusões de grande relevância, caso se tivesse utilizado os resultados obtidos através do cálculo automático: 1) em 73,91% dos casos, os valores do comprimento e da largura de cada cicatriz estariam trocados, ou seja, o valor atribuído ao comprimento de cada cicatriz seria, na realidade, correspondente à sua largura e vice-versa, uma vez que, a largura é que constituía o eixo mais longo (e não o comprimento) e, segundo a regra de cálculo daquela ferramenta, a sua perpendicular representaria (incorretamente) o comprimento; 2) em 13,53% dos movimentos de vertente do inventário, o valor apresentado para a largura e para o comprimento estaria incorreto, uma vez que, por apresentarem formas algo irregulares, isto é, não assumirem a típica forma de ferradura, geralmente observada na projeção planimétrica, o eixo mais longo não corresponde ao comprimento, mas sim a uma qualquer diagonal, pelo que, também o eixo perpendicular a esta não corresponderia à largura da respetiva cicatriz; 3) conjugando o referido para os pontos 1 e 2, concluiu-se que, utilizando o cálculo automático, em 87,44% dos casos (181 movimentos de vertente) os valores apresentados para a largura e comprimento das cicatrizes, estariam incorretos e, logo, apenas em 12,56% da amostragem estariam corretos, ou melhor dizendo, com sentido morfométrico.

Estas conclusões são deveras importantes, não apenas por se referirem a parâmetros incluídos na análise morfométrica dos movimentos de vertente, mas também porque tanto a largura como o comprimento estão na base do cálculo de outros parâmetros e índices morfométricos, cujos valores ficariam, desde logo, também enviesados.

Diversos autores têm optado pela utilização de parâmetros e índices morfométricos determinados com base na projeção planimétrica (2D), para a análise morfométrica dos movimentos de vertente (*e.g.* Zêzere, 1997; Garcia, 2012; Oliveira, 2012), alegando que, dado o declive pouco acentuado das respetivas áreas de estudo, o erro associado a essa simplificação não é estatisticamente relevante. No entanto, tendo em conta os elevados declives que caracterizam grande parte da área de estudo deste trabalho, bem como da paisagem da maioria das ilhas do arquipélago açoriano, de modo a reduzir a margem de erro na análise morfométrica dos movimentos de vertente do IMV e no cálculo da probabilidade de excedência das respetivas magnitudes, optou-se pela utilização dos parâmetros obtidos com base na morfologia da superfície do terreno (3D), tal como defendido por Marques (2013). Quanto a isto, Guzzetti (2005) afirma ser sempre preferível a obtenção de valores tridimensionais, por serem mais realísticos.

4.5.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E DISTRIBUIÇÃO DE VALORES

Na tabela 4.3, apresentam-se algumas medidas estatísticas calculadas a partir dos valores obtidos para os parâmetros e índices morfométricos selecionados para caracterizar o inventário de movimentos de vertente, possibilitando uma análise mais pormenorizada do mesmo.

Tabela 4.3 - Medidas estatísticas referentes aos parâmetros e índices morfométricos utilizados para a caracterização dos movimentos de vertente.

Parâmetro /Índice	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	Curtose	Assimetria
COMP 3D (m)	1,45	165,28	13,21	7,19	21,73	26,41	4,73
LARG 2D/3D (m)	1,37	158,54	13,02	8,40	18,19	29,65	4,91
PROF 3D (m)	0,50	3,50	1,18	1,00	0,60	1,36	1,03
ALT 3D (m)	1,20	137,55	10,28	5,14	18,03	27,06	4,79
PER 3D (m)	4,99	578,17	45,44	26,96	68,46	27,70	4,76
AREA 3D (m²)	1,12	19.493,55	348,41	38,76	1740,53	89,05	9,03
VOL 3D (m³)	0,68	34.690,70	470,06	27,25	2.825,15	112,87	10,10
I - ALO 3D	0,17	3,30	1,28	1,11	0,63	0,77	0,96
I - CIR 3D	0,28	0,91	0,66	0,68	0,13	-0,17	-0,62
ANG 3D (°)	21,11	80,07	51,20	52,37	12,56	-0,43	-0,05

Nas figuras 4.9 a 4.18, são apresentados os histogramas de frequências relativas para os parâmetros e índices considerados, por forma a representar as respetivas distribuições de frequências. Em simultâneo, sobrepõe-se a cada histograma a correspondente função de densidade de probabilidade (FDP) da distribuição normal (DN), também conhecida com distribuição de Gauss, definida pela seguinte expressão:

Equação 4.7:
$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

onde x corresponde a um valor medido da amostra e μ e σ correspondem à média e ao desvio padrão da distribuição da população de valores, respetivamente. O posicionamento do centro da distribuição é condicionado pelo μ , enquanto σ determina o achatamento da curva de distribuição, sendo que quanto maior for o valor de σ , maior será a dispersão de valores em torno de μ , pelo que mais achatada será curva. Para a obtenção destes resultados utilizou-se o software *IBM SPSS 2.0 Statistics*.

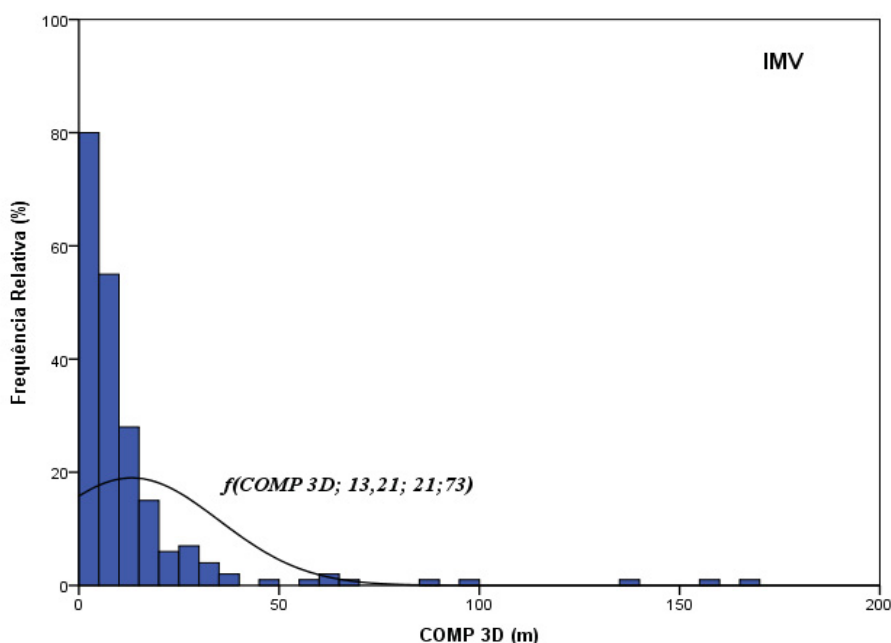


Figura 4.9 - Histograma de frequências do comprimento da cicatriz (COMP 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

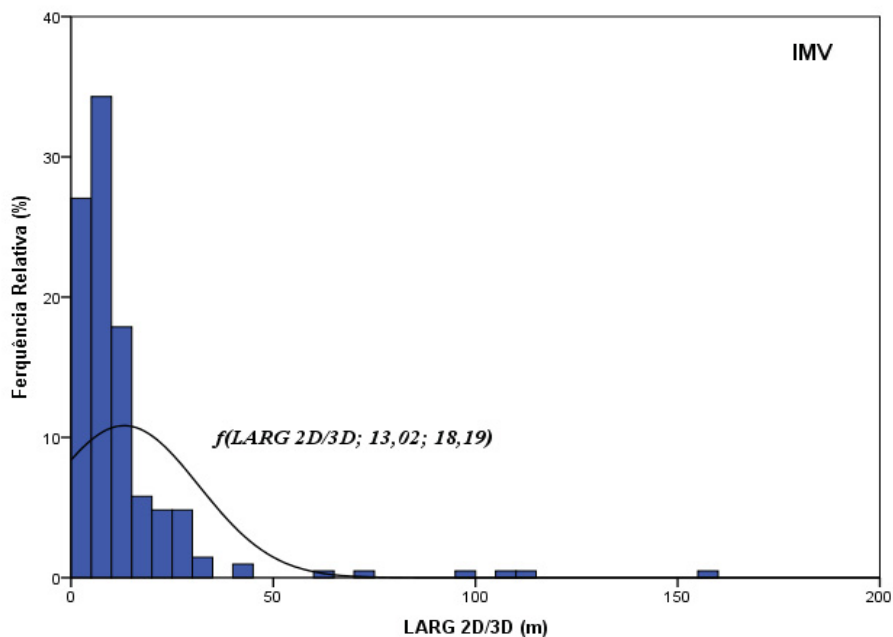


Figura 4.10 - Histograma de frequências da largura da cicatriz (LARG 2D/3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

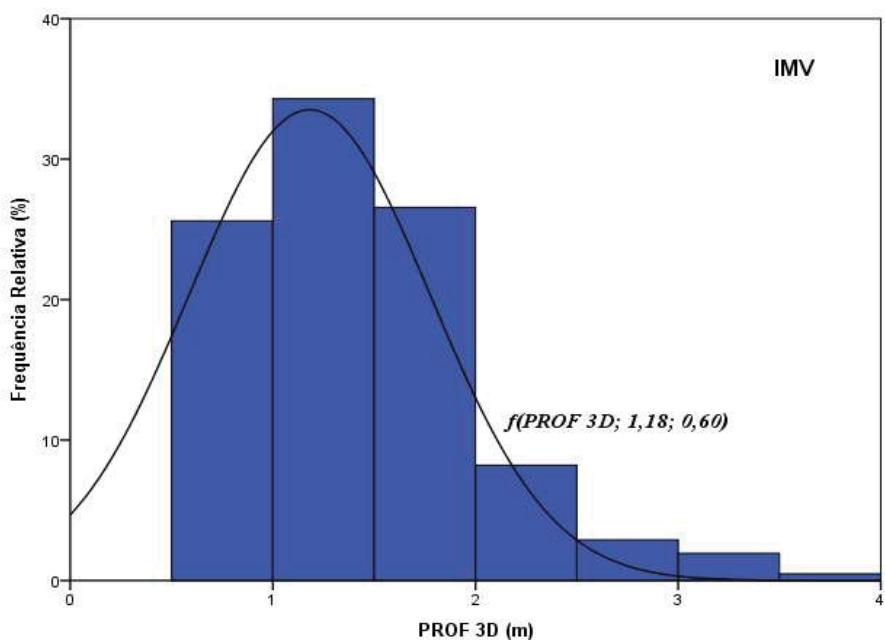


Figura 4.11 - Histograma de frequências da profundidade máxima de rotura (PROF 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

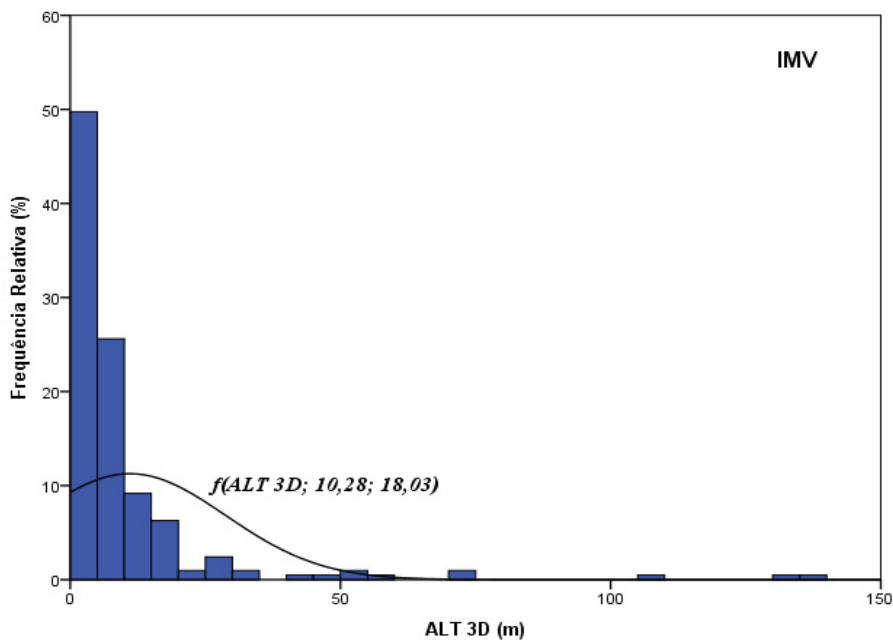


Figura 4.12 - Histograma de frequências da altura da cicatriz (ALT 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

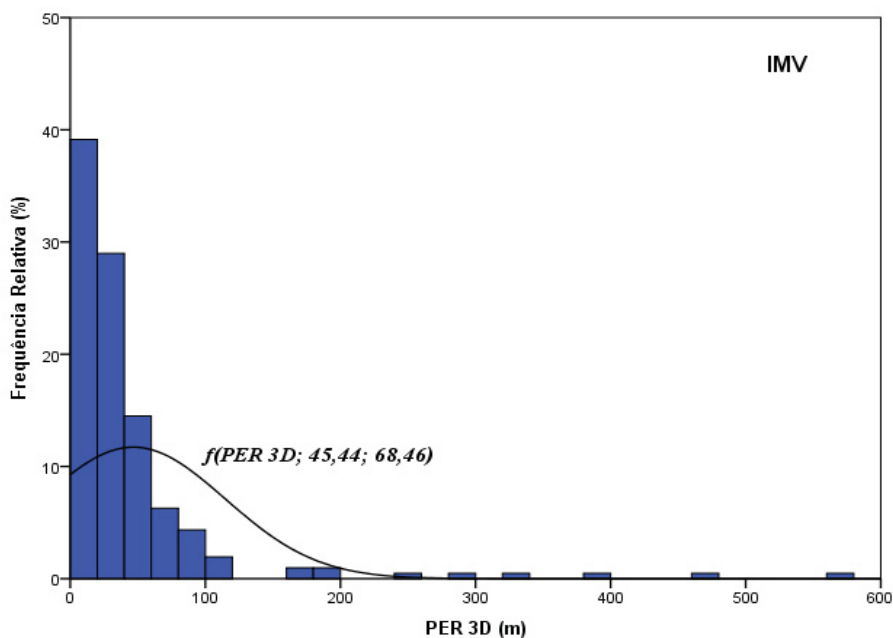


Figura 4.13 - Histograma de frequências do perímetro da cicatriz (PER 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

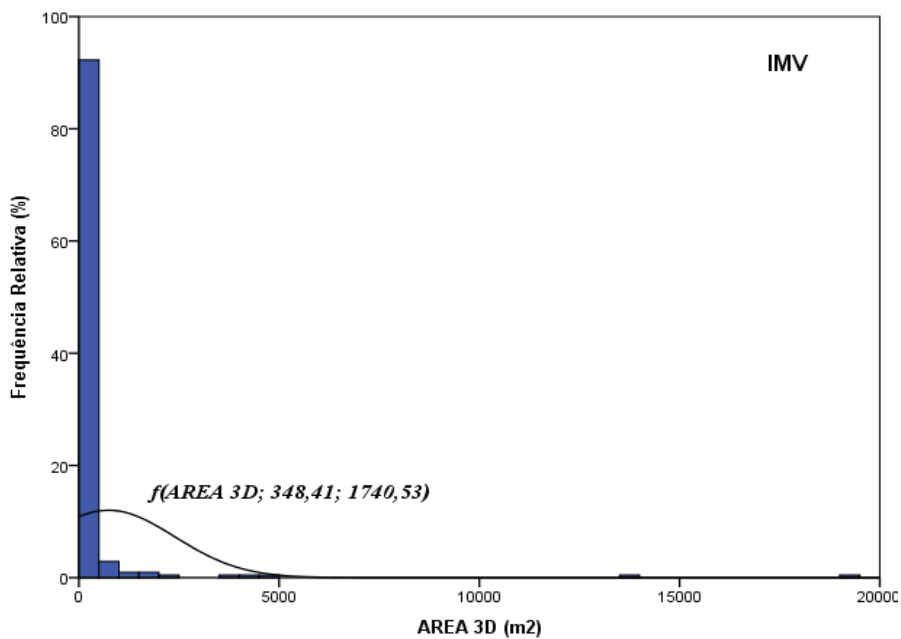


Figura 4.14 - Histograma de frequências da área da cicatriz (AREA 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

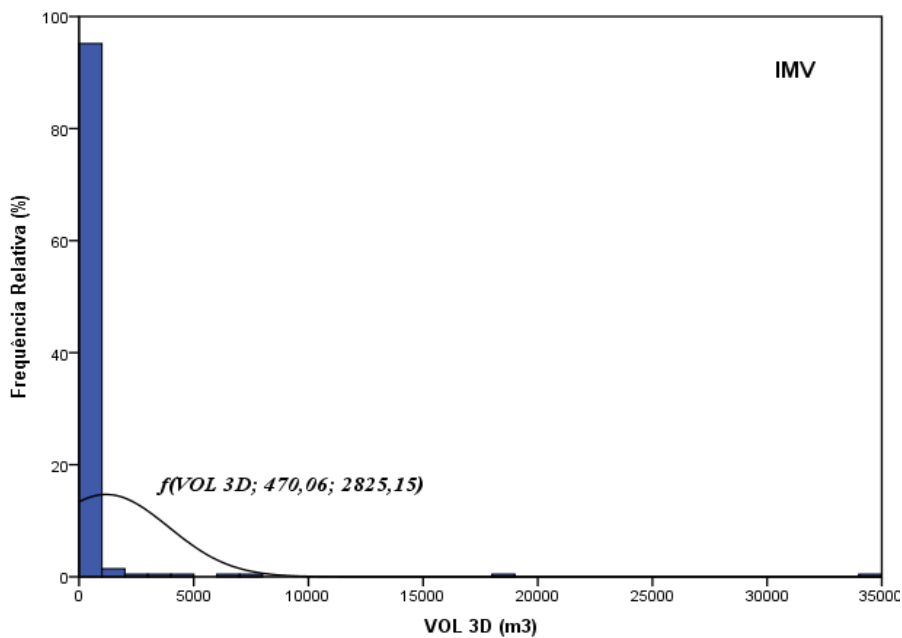


Figura 4.15 - Histograma de frequências do volume de material instabilizado (VOL 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

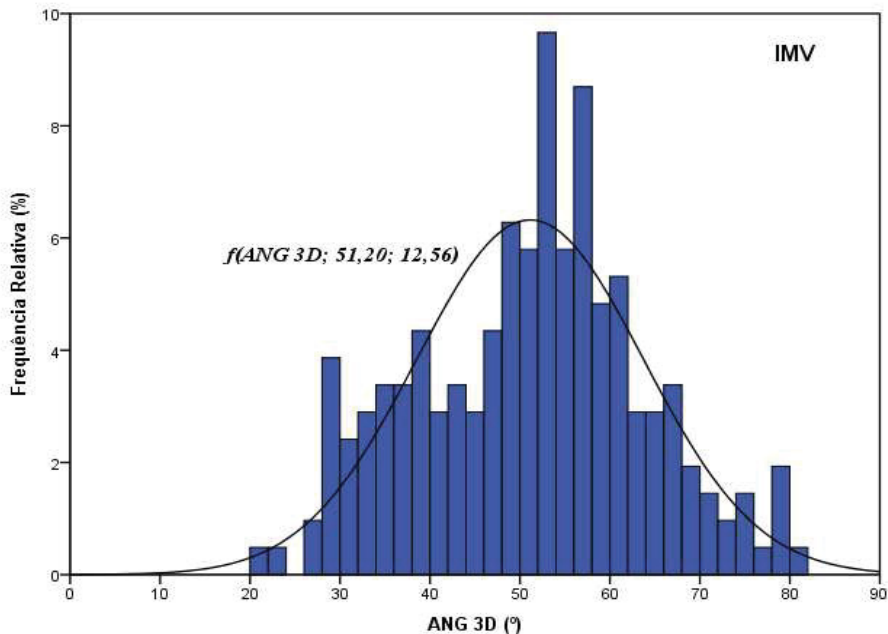


Figura 4.16 - Histograma de frequências do ângulo da cicatriz (ANG 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

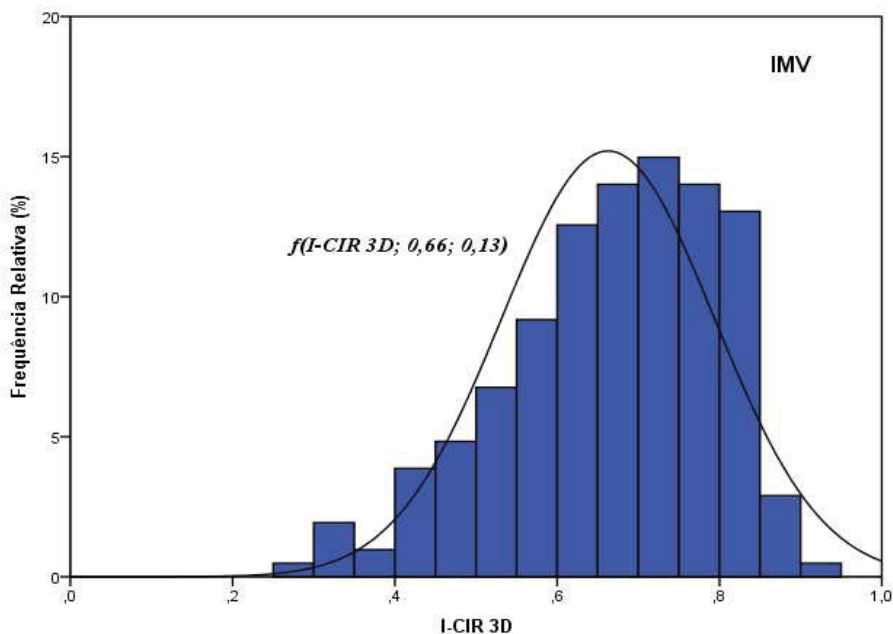


Figura 4.17 - Histograma de frequências do índice de circularidade (I-CIR 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

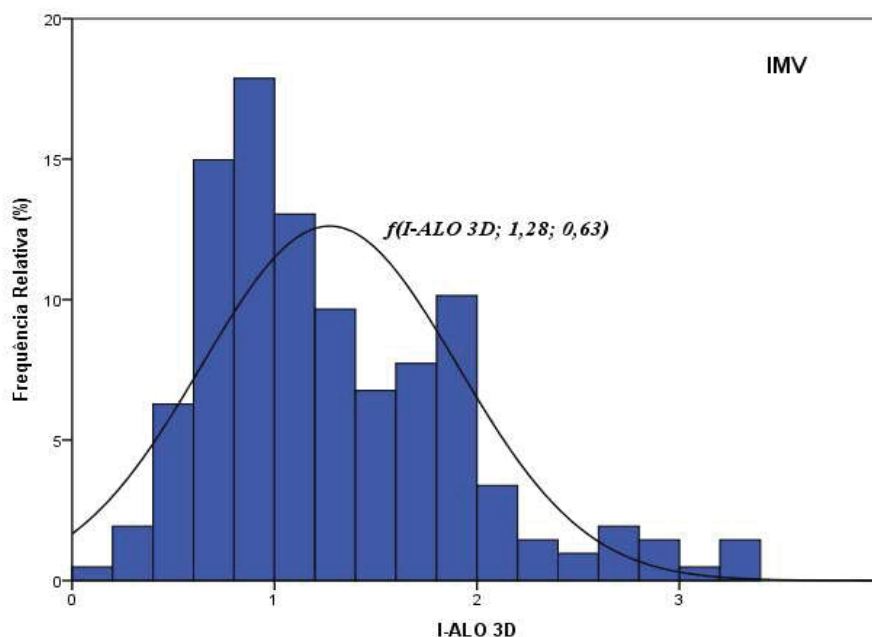


Figura 4.18 - Histograma de frequências do índice de alongamento (I-ALO 3D) para o inventário de movimentos de vertente (IMV) e representação da correspondente distribuição normal.

4.5.3 AVALIAÇÃO DA NORMALIDADE DAS DISTRIBUIÇÕES DE VALORES

Em estatística inferencial, a aplicação de testes paramétricos deve basear-se em alguns pressupostos, nomeadamente de que as distribuições de valores dos dados apresentem distribuição normal (Cox, 2006). No entanto, as variáveis ligadas às ciências da terra, normalmente, apresentam uma distribuição não-normal, com assimetria positiva (Média > Mediana > Moda) (Davis, 1986; Marques, 2013). De facto, todas as variáveis selecionadas para análise neste capítulo apresentam, à partida, uma distribuição não-normal e, na generalidade, uma assimetria positiva, com exceção do ANG 3D e do I-CIR 3D, tal como se pode constatar nos histogramas presentes nas figuras 4.9 a 4.18.

Desta forma, para testar a normalidade das distribuições de valores dos índices e parâmetros morfométricos em análise, ou seja, testar com precisão o ajuste das respetivas distribuições de valores à distribuição normal, tendo em conta as anteriores considerações, recorreu-se à utilização de metodologias não-paramétricas. Assim, sendo, foi utilizado o Teste Kolmogorov - Smirnov (K-S), através do software *IBM SPSS 2.0 Statistics*.

O teste K-S destina-se a averiguar se uma amostra pode ser considerada como proveniente de uma população com uma determinada distribuição, sendo particularmente indicado para distribuições contínuas (normal, uniforme e exponencial), apesar de estar também disponível para a distribuição discreta de Poisson.

O teste K-S observa a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso a distribuição normal, e a função de distribuição empírica dos dados, ou seja, observa o ajustamento entre a função de distribuição empírica ou da amostra, $F(x)$, e a função teórica continua parametrizada (distribuição normal), $F_n(x)$. Como critério, esta diferença é comparada com um valor crítico, para um dado nível de significância.

Na aplicação do teste K-S, foram colocadas 2 hipóteses:

- i) $H_0: F(x) = F_n(x)$, para qualquer x (os dados seguem uma distribuição normal);
- ii) $H_1: F(x) \neq F_n(x)$, para algum x (os dados não seguem uma distribuição normal).

A estatística do teste K-S (D_{obs}) corresponde ao máximo ou supremo da diferença entre o valor absoluto de $F(x)$ e $F_n(x)$, considerando todos os valores possíveis de x , sendo definida pela seguinte equação:

Equação 4.8:
$$D_{obs} = \max_x |F(x) - F_n(x)|$$

Importa referir que o valor de D_{obs} poderá não ser o maior valor assumido por $|F(x) - F_n(x)|$ quando se consideram apenas os valores observados de x , uma vez que $F_n(x)$ é uma função contínua, enquanto $F(x)$ é uma função em escada. Assim sendo, o valor máximo da diferença absoluta deve ser procurado na vizinhança de cada valor observado de x , pelo que D_{obs} corresponderá ao maior valor $D_{obs}^- = \max_x |F(x_{i-1}) - F_n(x)|$ e $D_{obs}^+ = \max_x |F(x_i) - F_n(x_i)|$, $1 \leq i \leq n$, em que n representa o número de observações.

Caso a hipótese H_0 seja verdadeira, isto é, os dados sigam uma distribuição normal, é expectável que a distância máxima vertical entre os gráficos das duas funções não seja grande e, assim sendo, que $D_{n, obs}$ assumam um valor pequeno. Se o valor absoluto da maior das diferenças puder ser considerado suficientemente pequeno, de acordo com o

nível de significância, é aceite a hipótese nula (H_0). A hipótese H_0 , para um nível de significância α , com valor crítico $D_\alpha[n]$, será rejeitada se $D_{n, \text{obs}} > D_\alpha[n]$.

Na tabela 4.4, apresentam-se os resultados do teste de ajustamento das distribuições dos vários parâmetros e índices morfométricos em análise à distribuição normal. Os valores da estatística K-S, considerando os níveis de significância normalmente adotados (0,01 e 0,05) mostram que as distribuições dos valores da maioria dos parâmetros e índices morfométricos não seguem uma distribuição normal, rejeitando-se a hipótese H_0 , uma vez que os respetivos *p-values* são inferiores a 0,01.

Com a aplicação do teste K-S, verifica-se que apenas em 3 casos se pode admitir que as distribuições dos dados se ajustem à distribuição normal. Para um nível de significância de 0,05, aceita-se a hipótese H_0 para ANG 3D e I-CIR 3D, (*p-values* > 0.05). Já para um nível de significância de 0,01, além de ANG 3D e I-CIR 3D, aceita-se a hipótese H_0 também para I-ALO 3D (*p-value* > 0.01).

No intuito de melhorar o ajuste dos dados à distribuição normal, aplicou-se o logaritmo natural aos parâmetros e índices morfométricos (e.g. Marôco, 2003; Marques, 2013), o que permitiu, além de normalizar as respetivas distribuições, homogeneizar as variâncias das distribuições dos seus valores, reduzindo o peso dos extremos (Marchand, 1972 *in* Marques, 2013) e, logo, aumentando a confiança dos resultados.

Os resultados da aplicação do teste K-S para as variáveis transformadas são apresentados também na tabela 4.4, por forma a permitir comparar a evolução dos resultados entre as distribuições das variáveis originais e transformadas.

Como se pode verificar, a aplicação do logaritmo natural às series de dados originais, provoca melhorias expressivas no ajuste à distribuição normal em todos os parâmetros e índices morfométricos, com exceção do ANG 3D e I-CIR 3D cujo valor da estatística K-S aumenta ligeiramente, o que representa um afastamento das distribuições dos dados relativamente à distribuição normal. Na verdade, ao contrário do sucedido para os dados originais, esta transformação leva mesmo à rejeição da hipótese H_0 para ambas as variáveis, sendo que no caso do ANG 3D isso apenas se verifica para um grau de significância de 0,05, uma vez que para $\alpha = 0,01$, a hipótese H_0 continua a ser aceite.

Tabela 4.4 - Resultados da aplicação do teste de Kolmogorov - Smirnov para os parâmetros e índices morfométricos dos movimentos de vertente.

Parâmetro / Índice morfométrico	Variáveis Originais		Variáveis logaritmizadas	
	Estatística K-S (D_{obs})	Significância (p -value)	Estatística K-S (D_{obs})	Significância (p -value)
COMP 3D	0,294	0,000	0,097	0,039
LARG 2D/3D	0,261	0,000	0,046	0,758
ALT 3D	0,309	0,000	0,085	0,092
PER 3D	0,278	0,000	0,050	0,660
AREA 3D	0,421	0,000	0,054	0,569
VOL 3D	0,435	0,000	0,049	0,681
I-ALO 3D	0,109	0,013	0,046	0,747
I-CIR 3D	0,092	0,058	0,125	0,003
ANG 3D	0,059	0,453	0,108	0,014
PROF 3D	0,219	0,000	0,212	0,000

Excetuando a variável PROF 3D, em que não se aceita a hipótese nula nos dois casos, a melhoria do ajustamento à distribuição normal após transformação logarítmica é tal que se aceita a hipótese H_0 para todos os outros casos, a um nível de significância de 0,01. Para um grau de significância de 0,05 apenas se rejeita a hipótese H_0 para o COMP 3D.

A título de exemplo têm-se, na figura 4.19, os gráficos quantil-quantil para as variáveis LARG 2D/3D e AREA 3D, onde se demonstra claramente, após a aplicação do logaritmo natural, a tendência para uma aproximação das respetivas distribuições à distribuição normal, corroborando os resultados do teste de ajuste à normalidade, ao permitirem a aceitação da hipótese H_0 naqueles casos.

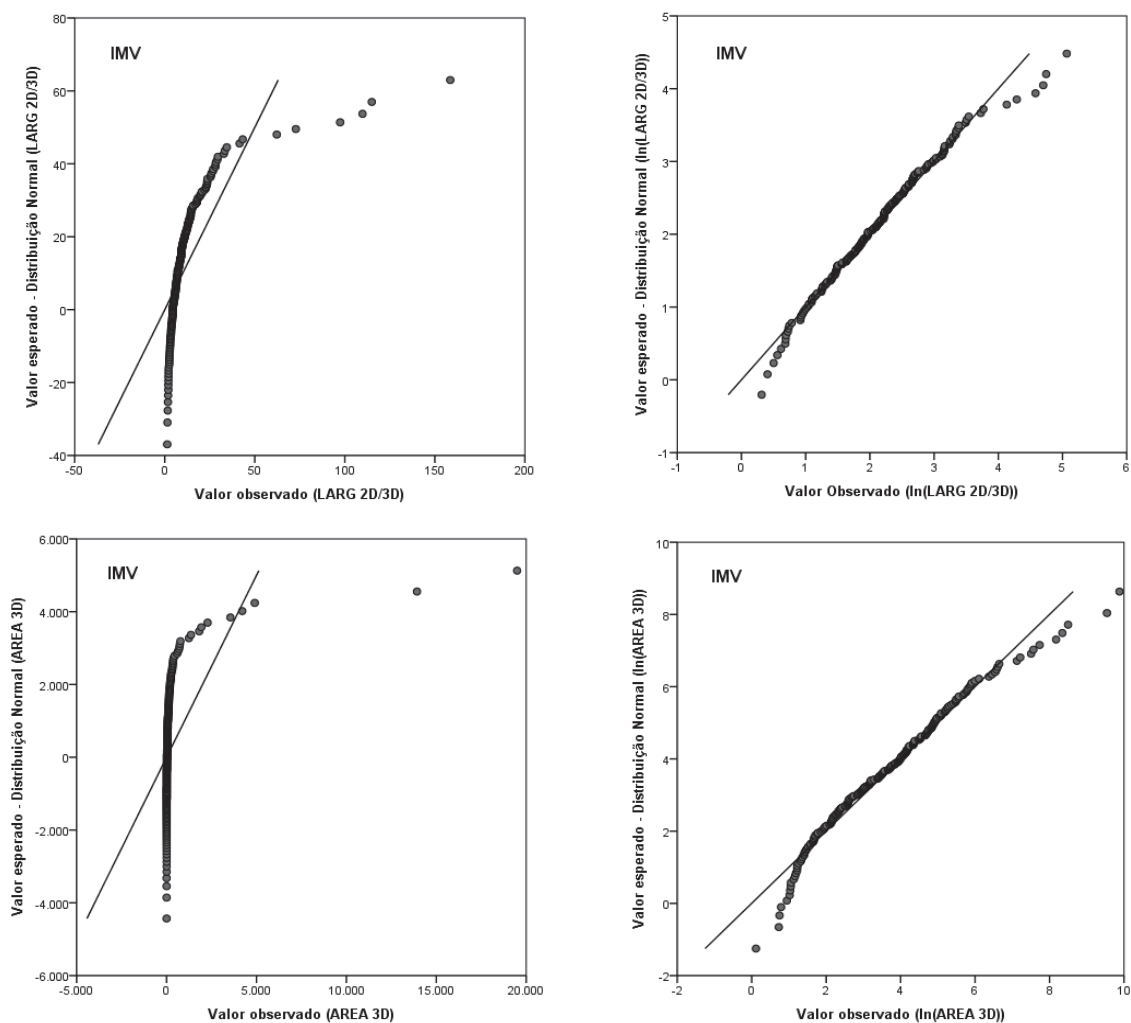


Figura 4.19 - Gráficos Quantil-Quantil (*Q-Q plots*) para a largura (LARG 2D/3D) e área (AREA 3D) das cicatrizes antes e depois da correspondente transformação logarítmica.

4.5.4 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE ASSOCIAÇÃO ENTRE TODOS OS PARÂMETROS E ÍNDICES MORFOMÉTRICOS.

O grau de associação entre os diferentes índices e parâmetros morfométricos foi determinado através de uma análise de correlação bivariada. Para tal, apesar de existirem vários métodos, normalmente são aplicados os seguintes: 1) Coeficiente de correlação de Pearson (r), também denominado coeficiente de correlação produto - momento, que é uma medida de correlação paramétrica, que mede a relação linear entre duas variáveis métricas, com distribuição normal; 2) Coeficiente de correlação de Spearman, que é uma medida de correlação não-paramétrica que implica o agrupamento de valores em séries métricas contínuas, podendo, no entanto, ser também aplicado a séries de dados ordinais.

O coeficiente de correlação de Pearson é, provavelmente, o método mais utilizado de todos para descrever relações entre duas variáveis, sendo que se estima que seja escolhido em 95% dos casos para esta finalidade (Chen e Popovic, 2002).

Dada a aproximação dos valores transformados dos parâmetros e índices morfométricos à distribuição normal, tal como demonstrado anteriormente (secção 4.5.3), optou-se por utilizar o coeficiente de correlação de Pearson para verificar a dependência de variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson é definido pela seguinte expressão:

$$\text{Equação 4.9: } r = \frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})^2) \sum_{i=1}^n ((Y_i - \bar{Y})^2)}} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sqrt{\text{var}(X)\text{var}(Y)}}$$

Na anterior expressão, X e Y correspondem às duas variáveis em comparação; \bar{X} e \bar{Y} equivalem às médias aritméticas de X e Y , respetivamente, i é o indentificador da observação e n corresponde ao total de observações.

O valor de r varia entre -1 e 1, sendo que, quanto maior a sua magnitude (em valor absoluto), maior a interdependência entre as duas variáveis em análise e que se $r = 0$, então X e Y não são interdependentes (Chen e Popovic, 2002). Assim, quando $r = -1$ significa uma correlação negativa perfeita (X e Y variam na razão inversa) e se $r = 1$, estamos na presença de uma correlação positiva perfeita (X e Y variam na razão direta). Quer isto dizer que a correlação negativa indica que o crescimento de uma das variáveis implica, em geral, o decréscimo da outra. A correlação positiva indica, em geral, o crescimento ou decréscimo concomitante das duas variáveis consideradas.

Na interpretação do coeficiente de correlação de Pearson há que ter em atenção que o valor de r não apresenta proporcionalidade, ou seja, por exemplo, $r = 0,6$ não representa o dobro de $r = 0,3$. Além disso, a determinação da existência de uma correlação entre duas variáveis, seja ela positiva ou negativa, não implica causalidade, isto é, uma relação de causa-efeito entre elas, pelo que, em grande parte, a análise crítica de cada

valor deve ser feita empiricamente, com base no conhecimento adquirido em trabalho de campo (Garcia, 2012).

Na tabela 4.5 é apresentada a matriz de correlações entre todos os parâmetros e índices morfométricos do IMV, calculadas através da aplicação do coeficiente de correlação de Pearson, sendo que, para uma melhor análise, na figura 4.20 é apresentada uma matriz de dispersão entre os mesmos.

Tabela 4.5 - Matriz de correlação entre os parâmetros e índices morfométricos do IMV logaritimizados, com base no coeficiente de correlação de Pearson.

ln	COMP 3D	LARG 2D/3D	ALT 3D	PER 3D	AREA 3D	VOL 3D	I-ALO 3D	I-CIR 3D	ANG 3D	PROF 3D
COMP 3D	1,000	0,844**	0,979**	0,966**	0,963**	0,946**	-0,459**	-0,024	-0,041	0,676**
LARG 2D/3D	0,844**	1,000	0,826**	0,945**	0,934**	0,949**	0,090	-0,092	-0,040	0,719**
ALT 3D	0,979**	0,826**	1,000	0,937**	0,929**	0,924**	-0,448**	-0,068	0,164*	0,655**
PER 3D	0,966**	0,945**	0,937**	1,000	0,992**	0,982**	-0,228**	-0,063	-0,085	0,723**
AREA 3D	0,963**	0,934**	0,929**	0,992**	1,000	0,977**	-0,241**	0,061	-0,116	0,725**
VOL 3D	0,946**	0,949**	0,924**	0,982**	0,977**	1,000	-0,185**	-0,044	-0,053	0,829**
I-ALO 3D	-0,459**	0,090	-0,448**	-0,228**	-0,241**	-0,185**	1,000	-0,108	0,010	-0,065
I-CIR 3D	-0,024	-0,092	-0,068	-0,063	0,061	-0,044	-0,108	1,000	-0,253**	0,015
ANG 3D	-0,041	-0,040	0,164*	-0,085	-0,116	-0,053	0,010	-0,253**	1,000	-0,077
PROF 3D	0,676**	0,719**	0,655**	0,723**	0,725**	0,829**	-0,065	0,015	-0,077	1,000

** Correlação significativa para um nível de significância de 0,01; * Correlação significativa para um nível de significância de 0,05.

Como se pode observar analisando a tabela anterior, na generalidade, as correlações entre os vários parâmetros e índices morfométricos logaritimizados apresentam elevados níveis de significância, o que confere robustez aos resultados.

Na maioria dos casos, observa-se uma correlação forte entre os vários parâmetros ($|r| \geq 0,70$), sendo que muitas das correlações são mesmo muito fortes ($|r| \geq 0,90$). As exceções prendem-se com os graus de correlação revelados pelo ângulo médio da cicatriz (ln (ANG 3D)), o índice de circularidade (ln (I-CIR 3D)) e índice de alongamento (ln (I-ALO 3D)), relativamente às outras variáveis logaritimizadas,

apresentando valores mais próximos de 0 e tendencialmente negativos, atestando assim que estas 3 variáveis apresentam baixo grau de associação (interdependência) em relação às restantes e entre si.

Ainda assim, destaca-se o facto de o I-ALO 3D logaritmizado apresentar uma correlação estatisticamente significativa, para um grau de significância de 0,01, com os parâmetros logaritmizados COMP 3D, ALT 3D, PER 3D, AREA 3D e VOL 3D, ainda que com valores de coeficiente de correlação pequenos e maioritariamente negativos.

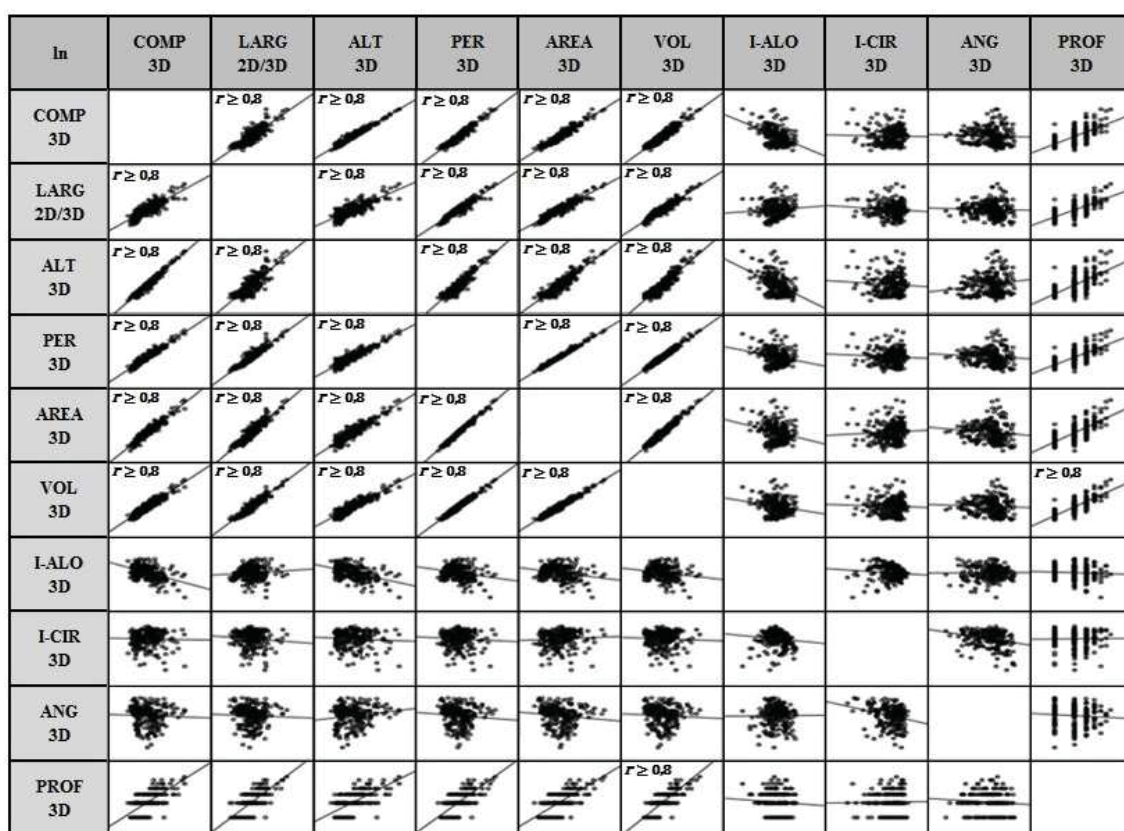


Figura 4.20 - Matriz de dispersão entre os parâmetros e índices morfométricos dos movimentos de vertente do IMV.

Analisando os resultados obtidos pela aplicação do coeficiente de correlação de Pearson (tabela 4.5) e tendo em conta os graus de associação entre os diversos parâmetros morfométricos logaritmizados, podemos retirar as seguintes conclusões:

- 1) Todos os parâmetros morfométricos logaritmizados apresentam correlações significativas entre si, para um grau de significância de 0,01, excetuando o ângulo da

cicatriz (ln (ANG 3D)) e os dois índices morfométricos (ln (I-ALO 3D) e ln (I-CIR 3D)). Ainda assim, o índice de alongamento logaritmizado, apesar dos baixos valores de r , apenas não apresenta correlação significativa com a largura da cicatriz (ln (LARG 2D/3D));

2) Todos os parâmetros morfométricos logaritmizados apresentam fortes correlações positivas ($r \geq 0.70$) entre si, excetuando o ângulo da cicatriz (ln (ANG 3D)) e os dois índices morfométricos (ln (I-ALO 3D) e ln (I-CIR 3D));

3) O perímetro da cicatriz (ln (PER 3D)) é o parâmetro morfométrico analisado que apresenta melhores correlações com os restantes parâmetros, manifestando a melhor correlação de todos os resultados obtidos ($r = 0,992$), no caso, com a área da cicatriz (ln (AREA 3D)), constituindo-se como uma correlação positiva quase perfeita;

4) Conjuntamente com o perímetro da cicatriz (ln (PER 3D)), a área da cicatriz (ln (AREA 3D)) e o volume de material instabilizado (ln (VOL 3D)), apresentam correlações positivas extremamente fortes ($r \geq 0.90$) entre si e com os restantes parâmetros morfométricos, excetuando os índices morfométricos (ln (I-ALO 3D) e ln (I-CIR 3D)), o ângulo da cicatriz (ln (ANG 3D)) e a profundidade máxima do plano de rotura (ln (PROF 3D)). Ainda assim, apresentam boas correlações positivas com este último parâmetro;

5) A altura da cicatriz (ln (ALT3D)) apresenta também correlações positivas extremamente fortes ($r \geq 0.90$), com as mesmas exceções apontadas no ponto anterior, bem como com a largura da cicatriz (ln (LARG 2D/3D)), onde ainda assim a correlação é também muito forte ($r = 0,826$);

6) Os parâmetros morfométricos "simples", largura (ln (LARG 2D/3D)) e comprimento da cicatriz (ln (COMP 3D)), apresentam também forte correlação entre si ($r = 0,844$), mas ambos correlacionam-se melhor ainda com a altura (ln (ALT 3D)), comprimento (ln (COMP 3D)) e área da cicatriz (ln (AREA 3D)) e ainda com o volume de material instabilizado (ln (VOL 3D)), sendo que nesses casos $r > 0.90$, o que reflete a dependência geométrica entres todos esses parâmetros morfológicos;

7) Os dois índices morfométricos analisados ($\ln (I\text{-ALO } 3D)$ e $\ln (I\text{-CIR } 3D)$) apresentam uma correlação entre si negativa e muito fraca e, de modo geral, o mesmo acontece com ambos relativamente aos outros parâmetros morfométricos logaritmizados, indicando uma clara ausência de interdependência;

8) A tendência para a ausência de interdependência é também notória em todas as correlações estabelecidas entre o ângulo da cicatriz ($\ln (ANG \ 3D)$) e os restantes parâmetros e índices morfométricos logaritmizados, uma vez que todas as correlações verificadas apresentam valores próximos de zero.

4.6 DETERMINAÇÃO DA MAGNITUDE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

Apesar de a análise das características morfométricas de um determinado conjunto de movimentos de vertente, bem como as relações de interdependência entre os vários parâmetros morfométricos tidos em conta, serem etapas necessárias para a avaliação da perigosidade e do risco a movimentos de vertente, de acordo com Guzzetti (2005), para uma verdadeira análise ser alcançada, torna-se indispensável determinar a magnitude dos movimentos de vertente, tal como acontece relativamente a outros fenómenos naturais, como sismos, erupções vulcânicas, tornados e furacões.

Segundo Malamud *et al.* (2004a), foram criadas mais de uma dúzia de escalas de magnitude para outros perigos naturais, onde se incluem as escalas de Saffir-Simpson (furacões), de Fujita (tornados) e o Índice de Explosividade Vulcânica.

A magnitude deve traduzir o potencial de destruição dos movimentos de vertente (Garcia *et al.*, 2014) através de características mensuráveis (*e.g.* área, volume) que lhe sejam proporcionais (Marques, 2013). Uma análise meramente frequencista dos movimentos de vertente, não tendo em conta respetiva magnitude, pode ocultar ou exacerbar a existência real de perigo (Garcia, 2012). Quanto a isto, Marques (2013) afirma que um número elevado de movimentos de vertente numa determinada área não implica que respetiva probabilidade de ocorrência de um evento com grande magnitude seja maior do que para uma área com menor densidade de movimentos de vertente.

Assim sendo, a avaliação da magnitude dos movimentos de vertente deve basear-se na análise da distribuição dimensão-frequência dos movimentos de vertente, pelo que, para isso, devem ser utilizados métodos exatos e credíveis, no intuito de uma correta avaliação da perigosidade deste tipo de fenómenos (Guzzetti, 2005). Ademais, a análise estatística da distribuição dimensão-frequência dos movimentos de vertente é uma das abordagens mais utilizadas para avaliar a magnitude (*e.g.* Pelletier *et al.*, 1997; Hovius *et al.*, 1997; Malamud e Turcotte, 1999; Dai e Lee, 2001; Guzzetti *et al.*, 2002, 2005 e 2008; Malamud *et al.*, 2004a; Guzzetti, 2005; van Den Eeckhaut *et al.*, 2007; Brunetti *et al.*, 2009; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013; Garcia *et al.*, 2014).

4.6.1 UTILIZAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DIMENSÃO-FREQUÊNCIA

Embora exista um quantidade significativa de estudos que utilizem a distribuição dimensão-frequência para avaliar a magnitude dos movimentos de vertente, na verdade, a comparação desses estudos torna-se bastante complexa, segundo Hungr *et al.* (2008), por três razões distintas: 1) por vezes a tipologia dos movimentos de vertente em análise não é identificada; 2) utilização de diferentes características para quantificar a magnitude (*e.g.* apenas a área da cicatriz; área da cicatriz + área de depósito; volume); e 3) utilização de métodos distintos na análise e apresentação (distribuição cumulativa ou não-cumulativa; classes lineares ou logarítmicas; dimensão da amplitude das classes).

A distribuição frequência-área (ou volume) de movimentos de vertente quantifica o número de movimentos de vertente que ocorrem em diferentes dimensões (Malamud *et al.*, 2004a).

4.6.1.1 VARIÁVEL QUE QUANTIFICA A DIMENSÃO

Em termos da seleção da variável para quantificar a magnitude dos movimentos de vertente, na maioria dos trabalhos disponíveis na literatura verifica-se a utilização da área (*e.g.* Pelletier *et al.*, 1997; Hovius *et al.*, 1997; Malamud e Turcotte, 1999; Guzzetti *et al.*, 2002, 2005 e 2008; Malamud *et al.*, 2004a; Guzzetti, 2005; van Den Eeckhaut *et al.*, 2007; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013; Garcia *et al.*, 2014), sendo que, ainda assim, vários autores utilizam o volume (*e.g.* Dai e Lee, 2001; Malamud *et al.*, 2004a; Guzzetti *et al.*, 2008; Brunetti *et al.*, 2009).

Segundo Garcia (2012), a escolha da área para esta finalidade justifica-se pelo facto de a determinação do volume dos movimentos de vertente ser efetuada de forma relativamente mais subjetiva. Marques (2013) acrescenta que muitos autores optam pela utilização da área, uma vez que, em termos gerais, o cálculo do volume é efetuado de forma indireta, apontando, porém, que essa opção não é isenta de erros que podem enviesar os resultados, mais concretamente, por muitas vezes a inventariação em trabalho de campo se basear em indícios indiretos de natureza geológica, geomorfológica e hidrológica, em detrimento da observação direta dos limites dos movimentos de vertente. Este último autor sugere ainda que a utilização de polígonos para representar vários movimentos de vertente em que não é possível diferenciar os

respetivos limites pode, igualmente, induzir erros no cálculo das frequências, pelo que devem ser excluídos da análise. Esta posição é reforçada por Oliveira (2012).

Ainda assim, Hungr *et al.* (2008) defendem que independentemente da variável utilizada para representar a magnitude dos movimentos de vertente, as curvas da distribuição magnitude-frequência tendem a ter comportamentos semelhantes, sendo que Pelletier *et al.* (1997) afirmam que, surpreendentemente, o mesmo acontece independentemente do fator desencadeante associado aos movimentos de vertente.

Neste trabalho, optou-se pela utilização da área como variável para a quantificação da magnitude, excluindo a área de depósito e considerando apenas a zona de depleção dos movimentos de vertente, tal como sugerido por Malamud *et al.* (2004a).

Segundo Guzzetti (2005), as áreas obtidas a partir de SIG representam medidas planares (projetadas), sendo sempre preferível a obtenção de valores mais realísticos (tridimensionais), utilizando, para tal, modelos de elevação digital. No entanto, afirma que raramente esta operação é efetuada. Assim sendo, uma vez que, no âmbito deste estudo, além de se terem obtido as áreas planimétricas (AREA 2D) para os diversos movimentos de vertente, foram calculadas as respetivas áreas superficiais (AREA 3D), a opção recaiu pela utilização deste último formato, evitando assim a sobrestimação da variável e correspondentes reflexos nas frequências dos movimentos de vertente.

Apesar de se utilizar a área (AREA 3D) para quantificar a magnitude neste trabalho, à semelhança do que foi efetuado por Garcia (2012), Oliveira (2012) e Marques (2013) e tendo em conta a elevada correlação existente, normalmente, entre volume e área (Garcia *et al.*, 2014), no final deste capítulo, é feita a avaliação da correspondência entre estas duas variáveis em termos da representatividade da magnitude dos movimentos de vertente.

4.6.1.2 TIPO DE DISTRIBUIÇÃO

De acordo com Guzzetti (2005), outro aspeto a ter em conta, para o cálculo das distribuições de frequência-magnitude, considerando o estudo das variáveis que quantificam a magnitude sob forma discreta, é a opção de utilização de um processo cumulativo ou não-cumulativo, sendo que, em inventários completos, ambos são

aplicáveis. O grau de completude de um inventário de movimentos de vertente é definido pela sua capacidade em registrar todos os movimentos de vertente que tenham ocorrido numa área e que tenham deixado marcas identificáveis (Guzzetti, 2005). No entanto, estas marcas poderão não ser reconhecidas no campo ou através da análise de fotografias aéreas, já que, muitas vezes, são ofuscadas pela erosão, vegetação, urbanização e ação humana, pelo que estimar o grau de completude de um inventário de movimentos de vertente é uma árdua tarefa (Malamud *et al.*, 2004a).

Contudo, também não existe unanimidade, na literatura disponível, quanto à opção de utilizar um processo estatístico cumulativo ou não-cumulativo para a representação das frequências da área (ou volume) dos movimentos de vertente, sendo que, segundo Brardinoni e Church (2004), essa escolha poder influenciar os resultados finais.

Stark e Hovius (2001) enunciam os dois problemas principais associados à utilização de dados acumulados: 1) a acumulação de dados provoca uma suavização das curvas que pode atenuar a passagem de uma tendência de não potencial a potencial e, assim, dificultar a identificação dessa transição; e 2) os resíduos estimados em probabilidades cumulativas são distribuídos assimetricamente e apenas num sentido, enviesando os resultados do ajuste por regressão, que normalmente assumem uma distribuição normal.

Para além disso, Guzzetti (2005) considera que a utilização de distribuições acumuladas se prende, possivelmente, com a facilidade de obter resultados satisfatórios mesmo com inventários de movimentos de vertente pequenos, enquanto que Pelletier *et al.* (1997) afirmam que a utilização do método cumulativo é demasiado restritiva induzido em erros.

4.6.1.3 CLASSIFICAÇÃO E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS DISTRIBUIÇÕES

Apesar de, como já referido, a grande maioria dos autores não especificarem a metodologia utilizada para classificação de dados e a respetiva representação gráfica, estes são também aspetos essenciais e que podem influenciar a frequência dos movimentos de vertente em cada classe, sendo que, segundo Brardinoni e Church (2004), a definição do próprio intervalo de classe poderá ter impactos nos resultados, em termos da regularidade da distribuição.

A representação gráfica pode ser efetuada com recurso a amplitudes de classes e utilização de eixos quer lineares quer logarítmicos, sendo que, de acordo com Guzzetti *et al.* (2002), se obtêm melhores resultados com amplitudes de classe logarítmicas e com eixos logarítmicos, o que faz sentido, dada a amplitude dos valores de variáveis como a área e o volume, que apresenta várias ordens de grandeza. Seguindo esta lógica, neste trabalho recorreu-se a uma classificação logarítmica de dados, com representação em eixos logarítmicos.

4.6.1.4 CARACTERÍSTICAS DAS DISTRIBUIÇÕES DIMENSÃO-FREQUÊNCIA

Segundo Guzzetti (2005), poucos autores se dedicaram a investigar as distribuições área-frequência ou volume-frequência, sendo que Fuyii (1969) terá sido, provavelmente, o primeiro a investigar esta matéria. Num estudo em que analisou um inventário de 800 movimentos de vertente, causados por precipitação intensa, obteve uma distribuição cumulativa área-frequência que se correlacionava bem com uma relação potencial (*power-law*) do tipo $N_{CMV} \propto A_{MV}^{-\alpha}$, em que N_{CMV} é o número acumulado de movimentos de vertente, A_{MV} é a área dos movimentos de vertente e α corresponde ao valor do decaimento potencial da relação. O autor concluiu ainda que a mesma relação se estabelecia ao utilizar-se o volume, em detrimento da área.

À semelhança do que acontece para outros perigos naturais (*e.g.* sismos), das referidas relações depreende-se a existência de uma diminuição potencial da frequência de movimentos de vertente com o aumento da magnitude (Marques, 2013).

Enquanto Guzzetti (2005) elencou trabalhos de vários autores que detetaram a existência de uma distribuição potencial negativa, em estudos que incidiram em diversos países, como Bolívia, Estados Unidos da América, Nova Zelândia, Canadá, Itália, Guatemala, Taiwan, Marrocos e França, van Den Eeckhaut *et al.* (2007), confirmam que essa relação se verifica, independentemente de vários fatores: 1) tipo de inventário utilizado (histórico/evento) e respetivo grau de completude; 2) fator desencadeante (previamente atestado por Pelletier *et al.*, 1997); 3) variável considerada para a magnitude (área/volume); e 4) tipo de distribuição utilizada (cumulativa/não cumulativa).

Guzzetti *et al.* (2002) atribuem a explicação, para que haja uma diminuição potencial da frequência dos movimentos de vertente com o aumento da dimensão da variável que quantifica a magnitude, a condicionalismos morfológicos das vertentes, que tornam menos provável a ocorrência de movimentos de vertente de grande dimensão. Esta é uma justificação que, aparentemente, faria sentido, se a diminuição da frequência fosse constante com o aumento da magnitude dos movimentos de vertente. No entanto, os autores admitem que existem casos em que os valores da área, obtidos através de inventários razoavelmente completos, se desviam da relação potencial para movimentos de vertente pequenos, sendo as razões para esse comportamento indeterminadas, apontando que a explicação pode estar relacionada com aspetos geomorfológicos.

De facto, por vezes, detetam-se desvios na relação potencial negativa, onde para algumas classes de dimensões superiores surgem frequências maiores de movimentos de vertente do que as que se verificam para classes inferiores, gerando uma inflexão na distribuição dimensão-frequência. Esta inflexão da tendência potencial negativa, verificada em alguns trabalhos (*e.g.* Hovius *et al.*, 1997; Malamud *et al.*, 2004a; Guzzetti *et al.*, 2002, Guzzetti, 2005), é denominada de *rollover*.

As causas do *rollover* têm sido amplamente discutidas. Guzzetti *et al.* (2002) apresentam dois tipos de justificação de natureza distinta. A primeira justificação prende-se com fatores artificiais que, mais concretamente, derivam da utilização de inventários incompletos, em que as limitações na sua conceção levam à não deteção de movimentos de vertente de menores dimensões, sendo que, a este respeito, posteriormente, Malamud *et al.* (2004a) e Guzzetti (2005) demonstraram que alguns *rollovers* detetados nos seus trabalhos eram reais e não se deviam a quaisquer artifícios.

A outra justificação apresentada por Guzzetti *et al.* (2002), reforçada por Guzzetti (2005), baseia-se em fatores naturais e, de forma mais precisa, na dinâmica e características das redes de drenagem, onde em cursos de água muito embutidos, com taludes compridos e muito inclinados, se verifica uma maior propensão para ocorrência de movimentos de vertente maiores, ao mesmo tempo que efeitos da erosão provocada pelos cursos de água na base dos taludes têm como consequência a eliminação das evidências deixadas pelos movimentos de vertente de menor dimensão que aí tiverem ocorrido. Pelletier *et al.* (1997) sugerem ainda, como justificação para o *rollover*,

aspectos geotécnicos, uma vez que a resistência dos materiais inibe o aparecimento de movimentos de vertente mais pequenos.

Tendo em conta a utilização, neste trabalho, da área como variável que quantifica a magnitude, a relação potencial associada à distribuição frequência-magnitude pode ser definida por:

Equação 4.10:
$$N_{MV} = cA_{MV}^{\beta}$$

Onde N_{MV} e A_{MV} correspondem, respetivamente, ao número de movimentos de vertente e à área dos movimentos de vertente e c e β são constantes obtidas pelo ajuste de uma função potencial à função de distribuição frequência-magnitude. Em caso de aplicação a distribuições não cumulativas, o expoente é dado por $\beta = \alpha + 1$, enquanto que para distribuições cumulativas $\beta = \alpha$, correspondendo α ao valor do decaimento potencial da relação.

4.6.2 ANÁLISE DA MAGNITUDE-FREQUÊNCIA

Uma das abordagens frequentemente utilizada (*e.g.* Malamud *et al.* 2004a; Guzzetti, 2005; Guzzetti *et al.*, 2005 e 2008; Brunetti *et al.*, 2009; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013; Garcia *et al.*, 2014) para quantificar a potencial negativa é a representação da distribuição das frequências das áreas dos movimentos de vertente através do cálculo da densidade de probabilidade $f(x)$, dada pela seguinte expressão:

Equação 4.11:
$$f(A_{MV}) = \frac{1}{N_{MVT}} \cdot \frac{\delta N_{MV}}{\delta A_{MV}}$$

onde A_{MV} corresponde à área do movimento de vertente, N_{MVT} é o número total de movimentos de vertente e δN_{MV} é o número de movimentos de vertente em função de uma determinada amplitude de classe δA_{MV} pré-definida.

Malamud *et al.* (2004a), no intuito de uniformizar a adoção de metodologias e representações, estudaram o ajuste de cerca de 300 distribuições de probabilidade teóricas à distribuição de valores da área de três inventários de evento de movimentos de vertente. Na sequência dos resultados obtidos, os autores propuseram a adoção da distribuição de probabilidade gamma-inversa de três parâmetros, para utilização como distribuição geral, sempre que se estiver na presença de inventários de movimentos de vertente completos, uma vez que aquela distribuição de probabilidade teórica se ajustou na perfeição relativamente aos dados dos três inventários utilizados no respetivo estudo.

Para a distribuição gamma-inversa de três parâmetros, a função de densidade de probabilidade (FDP, $f(x)$) é dada pela seguinte expressão:

$$\text{Equação 4.12: } f(A_{MV}; \alpha, a, s) = \frac{1}{a\Gamma(\alpha)} \left[\frac{a}{A_{MV} - s} \right]^{\alpha+1} \cdot \exp \left[-\frac{a}{A_{MV} - s} \right]$$

onde A_{MV} é a área do movimento de vertente; $\Gamma(\alpha)$ é a função gamma de α ; α é o parâmetro de forma que controla o decaimento potencial da cauda da distribuição para os movimentos de vertente de maior dimensão ($\alpha > 0$); a é o parâmetro que controla a localização da probabilidade máxima da distribuição, denominado de parâmetro de escala ($a > 0$); s é o parâmetro de localização, que controla o decaimento exponencial para movimentos de pequena dimensão. Esta função apresenta um domínio definido em $s < A_{MV} < +\infty$.

Refira-se, no entanto, que os próprios autores admitiram, ainda assim, que nem todos os inventários se ajustarão tão bem a esta distribuição quanto aqueles que por eles foram utilizados, mas que uma aproximação a esta abordagem seria uma-valia para avaliação da perigosidade a movimentos de vertente

Além de proporem a adoção da distribuição de probabilidade gamma-inversa de três parâmetros como norma, Malamud *et al.* (2004a) sugerem ainda a parametrização de acordo com o melhor ajuste verificado naquele trabalho, em que $\alpha = 1,4$; $a = 1.280 \text{ m}^2$ e $s = -132 \text{ m}^2$.

A este respeito, Garcia (2012) e Marques (2013) consideram a proposta apresentada por Malamud *et al.* (2004a), logo à partida, muito ambiciosa, sendo que este último autor justifica a adjectivação pelo facto de esta proposta implicar uma grande homogeneidade em algumas características dos inventários, independentemente dos contextos geomorfológicos, geológicos e hidrológicos das áreas de estudo. Neste sentido, segundo Marques (2013), destacam-se dois pressupostos relevantes que derivam daquela proposta: 1) a obrigatoriedade de todos os inventários apresentarem a mesma classe modal para a área dos movimentos de vertente; 2) a implicação de o decaimento potencial negativo dos movimentos de vertente com área superior à moda da distribuição ter de ser semelhante, pressupondo que a relação entre as frequências dos movimentos de vertente com áreas muito grandes seja semelhante às frequências dos que apresentem áreas próximas da moda da distribuição.

Garcia (2012), Oliveira (2012) e Marques (2013), no intuito de estabelecer comparações entre trabalhos, seguiram a metodologia adotada por Malamud *et al.* (2004a), tendo concluído que a distribuição geral (gamma-inversa de três parâmetros), apresentada por aqueles autores com o objetivo de ser "universal", com a respetiva parametrização proposta, não se ajustava aos seus inventários de movimentos de vertente.

Apesar de não ser um objetivo desta dissertação estabelecer comparações com o trabalho de Malamud *et al.* (2004a), nem com os trabalhos de Garcia (2012), Oliveira (2012) e Marques (2013), para a determinação da função de densidade de probabilidade, no sentido de possibilitar as referidas comparações em futuros trabalhos de investigação nesta área, utilizou-se, como referido anteriormente, uma classificação logarítmica da variável área e a sua representação sobre eixos logarítmicos, tal como proposto pelos referidos autores. O mesmo foi feito relativamente à definição da amplitude das classes, considerando um aumento potencial, em que o limite superior da classe n (LS_n) é definido pela seguinte expressão:

Equação 4.13:
$$LS_n = LS_{n-1} \cdot b$$

onde n corresponde ao número de ordem da classe e b a uma constante que determina o incremento da amplitude das classes. Definiu-se que o limite superior da primeira classe (LS_1) seria de $1,5 \text{ m}^2$ e que o incremento potencial da amplitude das classes assumiria um valor de $1,5$, à semelhança dos valores apresentados por Malamud *et al.* (2004a).

Segundo Marques (2013), a utilização da densidade de probabilidade de forma discreta, com base em classes com amplitudes pré-definidas, não permite o cálculo de forma contínua para valores específicos, no caso, da área, forçando a uma generalização dos mesmos para as classes em que se inserem, pelo que importa definir uma distribuição de probabilidade teórica de características o mais aproximadas possível às da distribuição de valores estudada, devendo o grau de ajuste da distribuição escolhida ser determinado, através de testes de ajuste.

No âmbito deste trabalho, para ajustar a distribuição de probabilidade teórica que melhor pudesse descrever os valores da AREA 3D do IMV, recorreu-se ao software *EasyFit 5.6 Professional*, tendo-se analisado e testado o ajuste de 61 distribuições de probabilidade teóricas (descritas em www.mathwave.com). Desta análise, concluiu-se que, de entre todas as distribuições testadas, a distribuição de probabilidade teórica que apresentou melhores resultados foi a distribuição log-normal de três parâmetros (DLN-3P), também conhecida por distribuição de Galton, tal como verificado no trabalho de Marques (2013), em que o autor refere que esta distribuição é aplicada a populações cujo logaritmo da variável em estudo apresenta distribuição normal, tendo, de facto, essa premissa sido comprovada no ponto 4.5.3. A FDP para DLN-3P é dada pela seguinte expressão:

$$\text{Equação 4.14: } f(A_{MV}; \mu, \sigma, \gamma) = \frac{1}{(A_{MV} - \gamma) \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(A_{MV} - \gamma) - \mu}{\sigma}\right)^2\right)$$

onde A_{MV} é a área do movimento de vertente; μ é o parâmetro de localização e corresponde à média do logaritmo de A_{MV} ; σ (>0) é o parâmetro de forma e corresponde ao desvio padrão do logaritmo de A_{MV} ; e γ representa o parâmetro de deslocamento, em

que, se $\gamma = 0$, obtemos uma distribuição log-normal de dois parâmetros (ou distribuição de Hazen). A FDP da DLN-3P tem o seu domínio definido em $\gamma < A_{MV} < +\infty$.

Recorreu-se novamente ao software *EasyFit 5.6 Professional* para determinar os valores dos parâmetros da DLN-3P, através do método da máxima verosimilhança, tendo-se obtido os seguintes resultados para a distribuição deste estudo: $\mu = 3,5895$; $\sigma = 1,9249$; $\gamma = 1,0415$.

Para determinar o grau de ajuste da DLN-3P à distribuição dos valores da AREA 3D, mais uma vez, aplicou-se o teste de ajuste K-S.

Tabela 4.6 - Resultados do teste de ajuste Kolmogorov-Smirnov referentes ao ajuste da DLN-3P, parametrizada através do método da máxima verosimilhança.

IMV	Nível de significância testados					Resultado
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	
Estatística K-S	0,03671					Aceitação da hipótese H_0 para todos os níveis de significância
<i>p-value</i>	0,9333					
Valor Crítico	0,11322	0,10551	0,09439	0,085	0,07458	

Como se pode verificar na tabela 4.6, os resultados da aplicação do teste K-S, tendo em conta o *p-value* e os respetivos valores críticos, indicam que se deve aceitar, para todos os níveis de significância avaliados, a hipótese colocada (H_0), de que a DLN-3P, parametrizada pelo método da máxima verosimilhança, é representativa da distribuição de valores de AREA 3D do IMV.

Na figura 4.21, é apresentada a representação gráfica da FDP da DLN-3P, parametrizada pelo método da máxima verosimilhança, para os valores da área (AREA 3D) do inventário de movimentos de vertente em estudo (IMV).

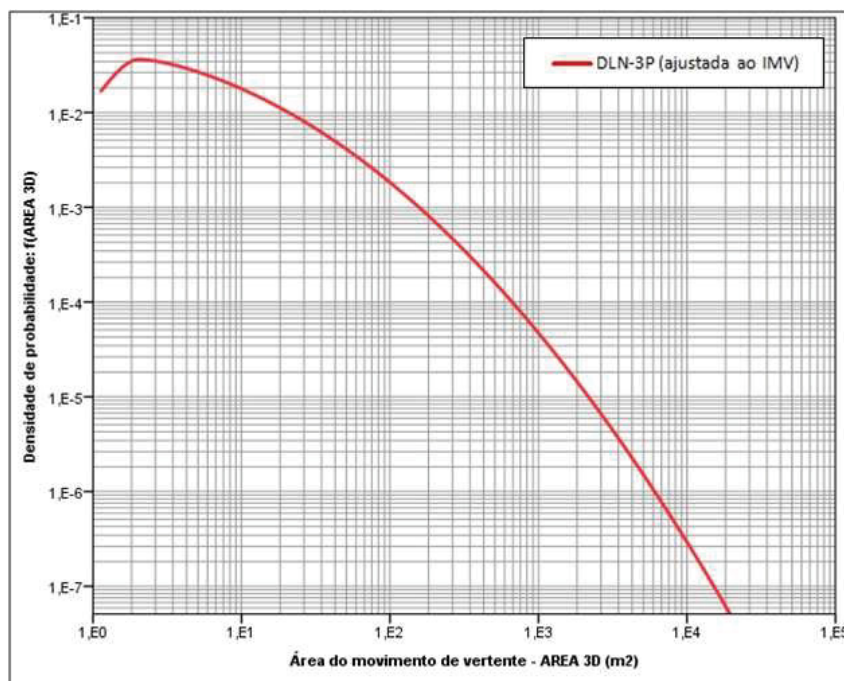


Figura 4.21 - Representação gráfica da FDP da DLN-3P, parametrizada pelo método da máxima verosimilhança para o inventário de movimentos de vertente (IMV).

Pelo anteriormente exposto, é seguro dizer que a FDP da DLN-3P garante o melhor ajuste possível à distribuição de valores da AREA 3D, fazendo uma descrição correta e rigorosa da mesma.

Foi possível verificar que, à imagem do que acontece para a maioria dos trabalhos realizados nesta temática, se confirma a existência de uma tendência potencial negativa para grande parte da distribuição dos valores da AREA 3D, bem como um ponto de inflexão (*rollover*) em que essa tendência é invertida, o que implica que os movimentos de vertentes de menor dimensão não são os mais frequentes da distribuição.

4.6.3 DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA

Após ter sido determinada a distribuição teórica que melhor se ajusta à distribuição de valores da variável em estudo (AREA 3D), foi possível efetuar o cálculo da probabilidade de excedência de um determinado valor dessa variável.

Tal como demonstrado por Marques (2013), tendo em conta que o integral da função de densidade de probabilidade (FDP, $f(x)$) de uma distribuição teórica é igual a 1 e sabendo que a função de distribuição cumulativa (FDC, $F(x)$) se obtém pelo cálculo do

integral de $f(x)$, torna-se possível determinar a probabilidade de, aleatoriamente, a variável X assumir um valor menor ou igual do que x , de acordo com a seguinte expressão:

Equação 4.15:
$$F(x) = P\{X \leq x\} = \int_0^x f(x) dx$$

Assim sendo, é também possível determinar a probabilidade de $X > x$, ou seja, a probabilidade de excedência que especificamente se pretende obter, dada a sua relevância em estudos desta natureza, através da equação seguinte:

Equação 4.16:
$$P\{X > x\} = 1 - F = 1 - \int_0^x f(x) dx$$

Tendo em conta a expressão utilizada para determinar a densidade de probabilidade, de forma discreta e com classes de amplitude previamente definidas (expressão 4.11), a distribuição cumulativa de probabilidade para a área dos movimentos de vertente de forma discreta é calculada pela seguinte expressão, considerando i classes de amplitude pré-definidas:

Equação 4.17:
$$F(A_{MV}) = P\{X \leq x\} = \sum_{X \leq x} f(A_{MV_i}) \delta A_{MV}$$

De igual forma, com base na expressão 4.14, a função de distribuição acumulada para a DLN-3P ($F(A_{MV}; \sigma, \mu, \gamma)$) é determinada pelo integral da função de densidade de probabilidade da distribuição, através da seguinte expressão:

Equação 4.18:
$$F(A_{MV}; \sigma, \mu, \gamma) = \mathcal{L} \left(\frac{\ln(A_{MV} - \gamma) - \mu}{\sigma} \right)$$

onde \mathcal{L} corresponde ao integral de Laplace.

Na figura 4.22, é apresentada a função de densidade acumulada (FDC) da DLN-3P, calculada com base na equação 4.17 e tendo por base os parâmetros determinados, através do software *EasyFit 5.6 Professional*, para o cálculo da FDP da DLN-3P ($\mu = 3,5895$; $\sigma = 1,9249$; $\gamma = 1,0415$).

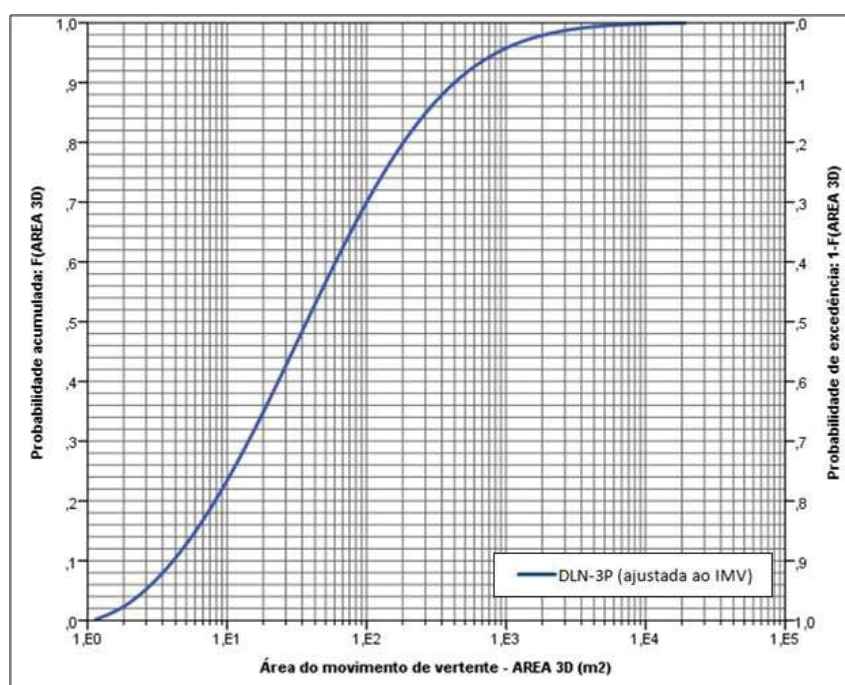


Figura 4.22 - Representação gráfica da FDC da DLN-3P, parametrizada pelo método da máxima verosimilhança para o inventário de movimentos de vertente (IMV).

O carácter cumulativo da FDC pode induzir erros graves na determinação da probabilidade acumulada e na probabilidade de excedência para os valores de maior dimensão da distribuição, já que as diferenças de ajuste vão também, concomitantemente, sendo acumuladas, o que vem reforçar a importância de seleccionar a distribuição teórica contínua que melhor se ajuste à variável em análise, reduzindo o

risco de se obterem erros graves no cálculo da probabilidade de excedência (Marques, 2013).

Na tabela 4.7, são apresentados as probabilidades de excedência correspondentes a diversos cenários de magnitude do valor da área do movimento de vertente (A_{MV}), derivados da FDP da DLN-3P.

Tabela 4.7 - Probabilidade de excedência para diferentes cenários de magnitude de área de um dado movimento de vertente na área de estudo, tendo em conta a DLN-3P.

AREA 3D	Probabilidade de Excedência ($1-F(A_{MV})$)				
Área (m ²)	10	100	1.000	10.000	100.000
Probabilidade de excedência	0,76599	0,30076	0,04242	0,00175	0,00001925

Como seria expetável, pela análise da figura 4.22, a probabilidade de excedência varia na razão inversa do valor da área do movimento de vertente correspondente, registando um declínio drástico à medida que se vai aumentando a ordem de grandeza.

Não sendo exequível apresentar as probabilidades de excedência para todos os valores de AREA 3D do IMV, importa, no entanto, referir que a probabilidade de excedência para área do maior de movimento de vertente registado no IMV (~ 19.494 m²) é de 0,00054381. Assim sendo, este valor representa a probabilidade de que, ocorrendo um movimento de vertente na zona de estudo, o mesmo ostente uma área de cicatriz superior a qualquer outra presente no IMV.

Na tabela 4.8, apresentam-se ainda as probabilidades de ocorrência de movimentos de vertente com área compreendida em diversos intervalos.

Tabela 4.8 - Probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente em diversos intervalos de magnitude de área, tendo em conta a DLN-3P.

AREA 3D	Probabilidade de $X_1 < X < X_2$				
Área (m ²)	< 10	[10 - 100[	[100 - 1.000[	[1.000 - 10.000[	[10.000 - 100.000[
Probabilidade	0,23218	0,46523	0,25835	0,04242	0,00173

A título de exemplo, ocorrendo um movimento de vertente na área de estudo, a probabilidade de a sua magnitude (AREA 3D) estar compreendida entre os valores da área dos dois maiores movimentos de vertente de IMV, 13.925,38 m² e 19.493,55 m² respetivamente, é de $4,5 \times 10^{-4}$.

De acordo com Guzzetti *et al.* (2009), seria ainda possível reproduzir todos estes resultados utilizando o volume de material instabilizado (V_{MV}) para traduzir a magnitude dos movimentos de vertente, relacionando-o de forma empírica com a área dos movimentos de vertente (A_{MV}), independentemente dos fatores condicionantes e desencadeantes e das ordens de magnitude das duas variáveis, através da seguinte função potencial:

Equação 4.19:
$$V_{MV} = b \cdot A_{MV}^a$$

Tendo em conta a metodologia adotada por Guzzetti *et al.* (2009) para determinar a função empírica de correlação entre V_{MV} e A_{MV} , na figura 4.23 ilustra-se a relação entre as duas variáveis. Como se pode observar, confirma-se uma forte relação entre a AREA 3D e VOL 3D, tendo em conta o elevado coeficiente de determinação ($R^2 \sim 0.95$), demonstrando que a relação é essencialmente geométrica e independente das características fisiográfica locais, tal como aludido por Guzzetti *et al.* (2009).

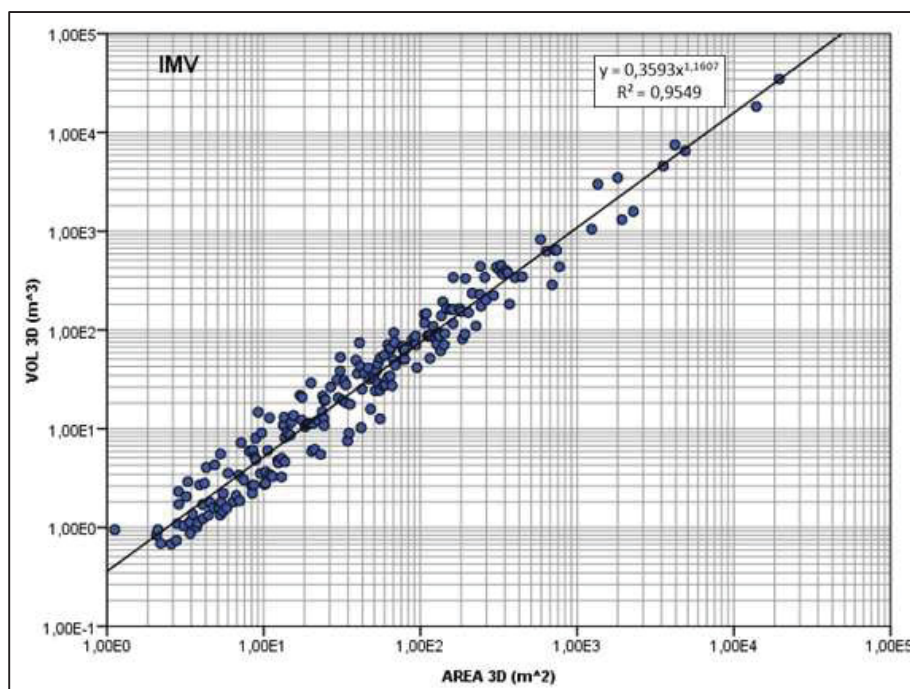


Figura 4.23- Relação entre a área da cicatriz (AREA 3D) e o volume instabilizado (VOL 3D) dos movimentos de vertentes de IMV.

A relação empírica entre os dois parâmetros morfométricos do IMV é dada pela expressão:

Equação 4.20:
$$V_{MV} = 0,3593 \cdot A_{MV}^{1,1607}$$

Assim sendo, apesar de esse não ser um objetivo deste trabalho, estando determinada a relação empírica entre V_{MV} e A_{MV} , seria possível determinar a probabilidade de excedência de V_{MV} . Para tal, bastaria reproduzir a metodologia utilizada para A_{MV} , mantendo a parametrização da DLN-3P e substituindo na equação 4.18 a variável A_{MV} pela relação empírica definida, tal como se apresenta na expressão seguinte:

Equação 4.21:
$$F(V_{MV}; \sigma, \mu, \gamma) = \mathcal{L} \left(\frac{\left(\ln \left(\left(\frac{V_{MV}}{0,3593} \right)^{1/1,1607} \right) - \gamma \right) - \mu}{\sigma} \right)$$

A este respeito, Marques (2013) refere que os condicionalismos territoriais existentes para a geração de movimentos de vertente de maiores dimensões em termos de volume de material instabilizado, são superiores em relação ao que acontece com o aumento da área da cicatriz dos movimentos de vertente.

5. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A

MOVIMENTOS DE VERTENTE

5.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Ao longo das últimas décadas, organizações governamentais, ambientais e de investigação em todo o mundo investiram recursos no sentido de avaliar a suscetibilidade (ou perigosidade) a movimentos de vertente e de produzir mapas ilustrativos da sua distribuição espacial, isto é, o seu zonamento (Guzzetti, 2005).

Vários métodos e técnicas para avaliar a suscetibilidade a movimentos de vertente foram já propostos e testados (Guzzetti, 2005). No entanto, após a revisão da bibliografia, facilmente se conclui que não existe um consenso generalizado acerca de quais os métodos e técnicas mais adequados para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente ou para a criação de mapas referentes ao seu zonamento (*e.g.* Brabb, 1984; Varnes, 1984; IAEG-CLOMMS, 1984; Carrara *et al.*, 1991; Soeters e van Westen, 1996; van Westen *et al.*, 1997; Crozier e Glade, 2005, Guzzetti, 2005).

A revisão da bibliografia permite ainda concluir que o modelo concetual da avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente implica: 1) avaliar as relações estatísticas entre o conjunto de fatores de predisposição considerados e a localização dos movimentos de vertente cartografados para uma determinada área de estudo; 2) classificar a área em estudo de acordo com o respetivo grau de suscetibilidade a movimentos de vertente aferido pelos modelos desenvolvidos; e 3) validação dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolvidos relativamente ao ajuste dos dados de entrada, bem como em termos da sua capacidade preditiva. Assim sendo, o cumprimento destas etapas será o objetivo genérico deste capítulo.

Além do objetivo anteriormente apresentado, neste capítulo, pretende-se ainda, concretamente, determinar: 1) a capacidade de cada um dos fatores de predisposição considerados para discriminar áreas de maior ou menor propensão à ocorrência de

movimentos de vertente; 2) a capacidade de ajuste do modelo de suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolvido, aos dados de entrada, bem como a evolução da sua capacidade de predição com a introdução sequencial dos fatores de predisposição; 3) a variabilidade espacial do modelo com a introdução dos diversos fatores de predisposição; 4) o conjunto de fatores de predisposição que melhores resultados apresenta para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo; e 5) os elementos em risco na zona Oeste da ilha Terceira, tendo em conta os respetivos graus de suscetibilidade.

5.2 ASPETOS GERAIS SOBRE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

A suscetibilidade a movimentos de vertente é a probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente numa determinada área, tendo em conta as condições locais do terreno (Brabb, 1984), o que, segundo Guzzetti *et al.* (1999), em termos matemáticos, representa a probabilidade espacial de ocorrência de movimentos de vertente, dado um conjunto de condições geo-ambientais.

Segundo Guzzetti (2005), a literatura existente demonstra que existe uma notória confusão entre os conceitos de "suscetibilidade a movimentos de vertente" e de "perigosidade a movimentos de vertente", reforçada pelo facto de aspetos importantes, como a seleção do tipo de unidade de terreno, as metodologias de modelação e de validação, serem idênticos em ambos os casos.

Desta forma e como anteriormente referido (ver capítulo 2), importa esclarecer que a suscetibilidade a movimentos de vertente é parte integrante e uma etapa (componente espacial) fundamental do processo de determinação da perigosidade e do risco de movimentos de vertente. Assim, a suscetibilidade não considera a probabilidade temporal de ocorrência de movimentos de vertente, isto é, a probabilidade de quando ou com que frequência os movimentos de vertente irão ocorrer, nem tão pouco com que magnitude (a sua dimensão e poder destrutivo). Os mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente constituem a base para a realização de mapas de perigosidade (Soeters e van Westen, 1996).

De acordo com Aleotti e Chowdhury (1999), para avaliar a suscetibilidade a movimentos de vertente, é necessário responder às questões de que tipos de roturas

poderão ocorrer, como e onde podem acontecer, enquanto que para uma avaliação da perigosidade terão ainda de ser abordadas as questões sobre quando e com que frequência temporal ocorrerão os movimentos de vertente.

Os mapas que apresentam uma divisão do território em classes, baseadas no grau de propensão para a ocorrência de movimentos de vertente, devem ser considerados mapas de suscetibilidade e não, como por vezes acontece, como mapas de perigosidade (Brabb 1984).

Zêzere (2010, *in* Oliveira 2012), define que a suscetibilidade a movimentos de vertente "*representa a propensão de uma área para ser afetada por um determinado perigo, em tempo indeterminado, sendo avaliada através dos fatores de predisposição para a ocorrência dos processos ou ações, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência*", pelo que deve ser entendida como a incidência espacial do perigo.

5.3 DIFERENÇAS CONCRETAS E OPERACIONAIS NA AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE

Segundo Guzzetti (2005), as principais diferenças operacionais e concretas em termos da avaliação e produção de mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente incluem: 1) as suposições gerais subjacentes ao modelo de suscetibilidade; 2) o tipo de unidade cartográfica selecionada para a investigação; e 3) as técnicas e ferramentas utilizadas para a avaliação e análise da suscetibilidade.

Outro fator determinante, uma vez que condiciona a escolha do tipo de unidade de terreno, bem como a metodologia a utilizar (Soeters e van Westen, 1996; Aleotti e Chowdhury, 1999), é a seleção da escala de trabalho.

5.3.1 SUPOSIÇÕES GERAIS DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE

O modelo conceitual de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente é suportado por um conjunto de suposições universalmente aceites (Varnes *et al.*, 1984; Carrara *et al.*, 1991; Hutchinson, 1995; Dikau *et al.*, 1996; Guzzetti *et al.*, 1999), com os seguintes pressupostos:

- 1) Os movimentos de vertente deixam vestígios morfológicos no terreno que, geralmente, podem ser reconhecidos, classificados e cartografados;
- 2) Os movimentos de vertente são controlados por leis mecânicas e físicas que podem ser determinadas de forma empírica, estatística ou determinística;
- 3) As condições reunidas para a ocorrência de movimentos de vertente no passado (*e.g.* geológicas, geomorfológicas), podem ser identificadas, direta ou indiretamente e utilizadas no desenvolvimento de modelos preditivos;
- 4) Pela aplicação prospectiva do Princípio do Uniformitarismo podemos inferir espacialmente a ocorrência de movimentos de vertente, possibilitando a classificação hierárquica do terreno de acordo com o grau de suscetibilidade.

A aplicação do Princípio do Uniformitarismo ao estudo dos movimentos de vertente, numa abordagem prospectiva, implica que "*o passado e o presente são a chave do futuro*" (*e.g.* Varnes *et al.*, 1984; Carrara *et al.*, 1991; Hutchinson, 1995; Aleotti e

Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999). Segundo Guzzetti (2005), este princípio implica que os movimentos de vertente no futuro, provavelmente, ocorrerão segundo as mesmas condições que levaram à instabilidade no passado, pelo que os inventários de movimentos de vertente apresentam informação fundamental para a previsão de futuras ocorrências.

Remondo *et al.* (2003a) argumentam que se todas estas assunções estivessem completamente corretas, os modelos de predição deveriam ser perfeitos. Guzzetti (2005) corrobora esta posição, afirmando que, idealmente, a identificação e mapeamento de movimentos de vertente deveria derivar destas assunções, uma vez que o não cumprimento das mesmas limita a aplicabilidade tanto dos inventários de movimentos de vertente, como dos produtos deles derivados (*e.g.* avaliações de suscetibilidade, perigosidade e risco). No entanto, este último autor reconhece que uma aplicação satisfatória destes princípios torna-se difícil, tanto operacionalmente como conceitualmente.

Relativamente ao Princípio do Uniformitarismo, Guzzetti (2005) refere ainda que, apesar de ser adotado em grande parte dos trabalhos que abordam a suscetibilidade a movimentos de vertente, o mesmo poderá não se verificar em todos os cenários, essencialmente devido a três razões: 1) os parâmetros de resistência ao corte (coesão e fricção) característicos de materiais que sofrem uma primeira rotura, diferem dos verificados nos mesmos materiais sujeitos a novas roturas; 2) os fatores de predisposição podem alterar-se ao longo do tempo devido a causas naturais e/ou antrópicas (*e.g.* alteração do uso do solo ou do coberto vegetal); e 3) com o passar do tempo, os movimentos de vertente podem alterar as suas características (*e.g.* tipologia).

Além disso, referindo-se a este tópico, van Westen *et al.* (2008) afirmam que os resultados do passado não são garantia para o futuro. No entanto, o princípio é admissível (Guzzetti, 2005) e a sua adoção é generalizada, dado que aquelas informações são fundamentais para a previsão da localização de futuras ocorrências de movimentos de vertente (Soeters e van Westen, 1996).

5.3.2 ESCALA DE TRABALHO

A Associação Internacional de Engenharia Geológica (1976 *in* Soeters e van Westen, 1996) propõe, para o zonamento da suscetibilidade a movimentos de vertente, a seguinte

classificação de escalas: 1) escala regional (1:250.000); escala média (1:25.000 a 1:50.000); e 3) escala grande (1:5.000 a 1:15.000).

Segundo Aleotti e Chowdhury (1999), a escala de trabalho adotada para o mapeamento, investigação e avaliação da instabilidade de vertentes, deverá depender essencialmente de três fatores: 1) o objetivo da avaliação; 2) a extensão da área de estudo; e 3) a disponibilidade de dados.

Em estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, a seleção da escala de trabalho influencia diretamente a escolha dos fatores de predisposição, tendo em conta o grau de pormenor exigido. Isto é, em escalas pequenas (*e.g.* regionais) os fatores de predisposição devem ser mais abrangentes (*e.g.* fatores climáticos), enquanto que para escalas grandes devem ter maior detalhe (*e.g.* declive). Por outro lado, a escala de trabalho selecionada condiciona a metodologia de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, sendo que, por exemplo, as metodologias estatísticas não se adequam ao estudo de vertentes individuais, do mesmo modo que as abordagens geotécnicas, com base no cálculo do Fator de Segurança e da probabilidade de rotura, serão desadequadas para escalas regionais (Aleotti e Chowdhury, 1999).

De acordo com Soeters e van Westen (1996), a escala regional, de reduzido pormenor, destina-se a projetos regionais, onde as áreas de estudo são extensas, podendo ultrapassar os 1.000 km², sendo que, nestes casos, o mapeamento dos movimentos de vertente é, normalmente, efetuado com recurso à análise de fotografias aéreas, imagens de satélite e mapas de síntese geomorfológica e estrutural.

Relativamente às escalas médias, os autores referem que se adequam a áreas até algumas centenas de km², sendo que o nível de pormenor requerido é já considerável, abrangendo informações relativas à litologia, morfologia, declive, uso de solo, entre outros. Os mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente de grande escala devem destinar-se a avaliações de pormenor, ao nível da investigação local, em áreas com apenas algumas dezenas de km² (Soeters e van Westen, 1996).

Na tabela 5.1, é apresentada a adequabilidade de cada metodologia de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (abordadas na secção 5.3.4) às várias classes de escala de trabalho, de acordo com a proposta apresentada por Soeters e van Westen (1996), tendo em consideração que a escolha da metodologia deve ser feita em função da escala de trabalho e visando a otimização da relação custo/benefício.

Tabela 5.1 - Adequabilidade das metodologias de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente às escalas de trabalho (adaptado de Soeters e van Westen, 1996).

Metodologia de análise	Técnica a utilizar	Regional	Média	Grande
Geomorfológica	Avaliação dependente do investigador	Sim	Sim	Sim
Heurística	Combinação qualitativa de mapas temáticos	Sim	Sim	Não
Determinística	Avaliação do Fator de Segurança	Não	Não	Sim
Inventário	Análise da distribuição dos movimentos de vertente	Sim	Sim	Sim
	Análise da densidade dos movimentos de vertente	Sim	Não	Não
	Análise do estado de atividade dos movimentos de vertente	Não	Sim	Sim
Estatística	Métodos bivariados	Não	Sim	Sim
	Métodos multivariados	Não	Sim	Sim

Analisando a tabela anterior, verifica-se que para a escala regional, os métodos mais adequados para avaliação da suscetibilidade são os inventários de análise da distribuição e da densidade de movimentos de vertentes e as avaliações geomorfológicas e heurísticas. A uma escala de trabalho média, com exceção dos métodos determinísticos e dos inventários de análise da densidade de movimentos de vertente, todos os métodos são aplicáveis, ainda que, segundo Thiery *et al.* (2007), os métodos estatísticos sejam mais aconselháveis, tendo em conta a sua capacidade de minimizar a subjetividade na avaliação por parte do perito. Em grandes escalas de trabalho, podem também ser utilizadas grande parte das metodologias, excetuando as análises heurísticas e a avaliação de inventários em que a técnica aplicada é a de análise da densidade de movimentos de vertente.

Analisando a bibliografia disponível, verifica-se que alguns autores realizaram estudos de modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente integrando diferentes escalas de trabalho, recorrendo, para tal, a diferentes metodologias de análise (*e.g.* Guzzetti *et al.*, 1999; Ardizzone *et al.*, 2006; Cascini, 2008; Pereira, 2009).

Apesar de na literatura estarem disponíveis diversos trabalhos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente nas mais variadas escalas, na verdade, predominam os que utilizam a escala grande de 1:10.000 (*e.g.* Guzzetti *et al.*, 1999; Van Westen *et al.*, 2003; Corominas *et al.*, 2003; Zêzere *et al.*, 2004; Chung e Fabbri, 2005;

Oliveira, 2012; Marques, 2013) e a escala média de 1:25.000 (e.g. Guzzetti *et al.*, 1999; Fernández *et al.*, 2003; Guzzetti, 2005).

Assim, conclui-se que a opção relativa à escala de trabalho é uma etapa determinante para a elaboração de estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, já que, além de condicionar a seleção dos dados de entrada e cartografia temática (fatores de predisposição) e da unidade cartográfica a utilizar, condiciona também a escolha da metodologia de avaliação utilizada nesse âmbito.

Neste trabalho, para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na zona de estudo, no intuito de respeitar as condicionantes anteriormente expostas, utilizou-se a cartografia de base à escala de 1:25.000, disponível para a ilha Terceira.

5.3.3 UNIDADES CARTOGRÁFICAS

As unidades cartográficas (*Terrain Mapping Unit*), também denominadas de unidades de terreno (UT), são unidades espaciais de trabalho, podendo ser definidas como porções de terreno com características específicas delimitadas por fronteiras bem definidas (Hansen, 1984 *in* Guzzetti *et al.*, 1999; van Westen *et al.*, 1997; Luckman *et al.*, 1999), tendo como objetivo maximizar a homogeneidade dentro de cada unidade e a heterogeneidade entre unidades diferentes (Carrara *et al.*, 1995; Soeters e van Westen, 1996; Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti, 2005).

A análise da suscetibilidade a movimentos de vertente, à escala de trabalho adotada, requer, previamente, a seleção de um tipo de unidade de terreno adequada (Guzzetti, 2005), até porque esta seleção deverá ter em atenção o requisitos computacionais e operacionais das metodologias a utilizar (Carrara *et al.*, 1995).

De acordo com Guzzetti (2005), os tipos de unidades cartográficas recaem essencialmente em sete categorias que, de seguida, se enunciam e descrevem sucintamente:

1) Unidades matriciais, que dividem o território em áreas regulares (células), de dimensão predefinida, que constituem a unidade de referência do mapeamento (e.g. Carrara, 1983 *in* Guzzetti *et al.*, 1999; van Westen, 1993; Chung e Fabbri, 1999; Lee *et al.*, 2002 e 2004; Lee, 2004; Lan *et al.*, 2005, Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques,

2013). As unidades matriciais (*grid cells*), sendo a unidade espacial fundamental dos formatos *raster* em ambiente SIG (Hengl, 2006);

2) Unidades de terreno, que são balizadas tendo em conta os limites resultantes da inter-relação de materiais, formas e processos observados em ambiente natural, refletindo as diferenças geológicas e geomorfológicas entre as unidades (*e.g.* Hansen *et al.*, 1995; van Westen *et al.*, 1997; Ng *et al.*, 2003);

3) Unidades de condição única, que são obtidas a partir da interceção dos fatores que controlam ou condicionam a instabilidade de vertentes, previamente reduzidos a apenas algumas classes significantes, resultando num mapa com domínios homogéneos, ou seja, com condições únicas, cujo número, dimensão e natureza dependem dos critérios utilizados na classificação dos fatores utilizados (*e.g.* Bonham-Carter, 1994; Carrara *et al.*, 1995; van Westen *et al.*, 1997; Chung e Fabbri, 1999);

4) Unidades de vertente ou morfo-hidrológicas, que dividem o território em unidades hidrológicas, limitadas pelas redes de drenagem e/ou linhas de fecho, podendo ser obtidas através de mapas topográficos de precisão ou de Modelos Digitais do Terreno (MDT) de alta definição, sendo que as unidades cartográficas podem corresponder a unidades de vertente principais ou a sub-bacias (*e.g.* Carrara, 1988 *in* Guzzetti, 2005; Carrara *et al.*, 1991; Carrara *et al.*, 1995);

5) Unidades geo-hidrológicas, que são subdivisões das unidades de vertente, obtidas com base nos principais tipos de litologia existentes numa determinada área, considerados importantes para separar condições de suscetibilidade distintas dentro de uma mesma vertente (*e.g.* Cardinali *et al.*, 2002);

6) Unidades topográficas, que são subdivisões das unidades de vertente, de forma e tamanho irregulares, obtidas pela sua partição através da interceção entre as curvas de nível adjacentes e os limites laterais das linhas de água (*e.g.* O'Loughlin, 1986; Moore *et al.*, 1988; Moore e Grayson, 1991);

7) Unidades político-administrativas, que são unidades geográficas que consistem na divisão do território de acordo com os limites políticos ou administrativos definidos dentro de áreas de estudo normalmente muito extensas, como por exemplo grandes regiões ou países (*e.g.* Ardizzone *et al.*, 2006).

A opção pelo tipo de unidade cartográfica deve basear-se no objetivo da investigação a realizar, tendo em conta a escala de trabalho, o tipo de movimento de vertente considerado, a metodologia a utilizar e a qualidade da informação temática (Guzzetti *et al.*, 1999), uma vez que todos os tipos de unidade cartográfica apresentam limitações (Carrara *et al.*, 1995; Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti, 2005; Baeza *et al.*, 2010). De acordo com alguns autores (*e.g.* Carrara *et al.*, 2008; Baeza *et al.*, 2010), a escolha do tipo de unidade cartográfica produz diferenças consideráveis nos resultados finais de avaliação de suscetibilidade, sendo que Carrara *et al.* (2008) acrescentam que os resultados são mesmo mais sensíveis em relação ao tipo de unidade de terreno utilizada, do que ao próprio método utilizado para a modelação.

As vantagens e desvantagens associadas à utilização dos vários tipos de unidade cartográfica podem ser respetivamente ampliadas ou atenuadas, com base na escolha do método de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente. Segundo Carrara *et al.* (1995), em trabalhos de avaliação de suscetibilidade com recurso a métodos estatísticos, os dois tipos de unidade cartográfica mais adequados são as unidades de vertente e as unidades matriciais.

Na tabela 5.2, são apresentadas as principais limitações associadas a todos os tipos de unidade cartográfica anteriormente elencados, de acordo com por Guzzetti (2005).

Tabela 5.2 - Principais limitações associadas a cada tipo de unidade cartográfica para avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente, de acordo com Guzzetti (2005).

Tipo de unidade cartográfica	Principais limitações concetuais
Unidades Matriciais (<i>Grid Cells</i>)	Rigor deficitário na representação de estruturas e informações geológicas e morfológicas de forma discreta (<i>raster</i>), bem como na representação da delimitação das suas propriedades (<i>e.g.</i> limites geológicos, depósitos dos movimentos de vertente, unidades litológicas), utilizando células de forma e tamanho pré-definido.
Unidades de Terreno (<i>Terrain Units</i>)	Elevada subjetividade na definição dos critérios utilizados para estabelecer os limites entre as diferentes unidades de terreno. Dificuldade de aplicação desses critérios de forma isenta.
Unidades de Condição Única (<i>Unique Condition Units</i>)	O facto de a informação temática (<i>e.g.</i> declive) ser contínua e, como tal, ter de ser classificada utilizando um pequeno número de classes, com base no conhecimento local dos processos físicos que controlam os movimentos de vertente, não significativas para os dados. Geralmente os resultados obtidos são de difícil interpretação.
Unidades de Vertente (<i>Slope Units</i>)	Dificuldade na preparação dos dados, que exige <i>software</i> especializado. Dificuldade na definição da dimensão das unidades; Alguma falta de representatividade para pequenos movimentos de vertente superficiais.
Unidades Geo-hidrológicas (<i>Geo-hydrological Units</i>)	Dificuldade na preparação dos dados, que exige <i>software</i> especializado. Dificuldade na definição da dimensão das unidades. Alguma falta de representatividade para pequenos movimentos de vertente superficiais.
Unidades Topográficas (<i>Topographic Units</i>)	Dificuldade na preparação dos dados, que exige <i>software</i> especializado. Dificuldade na definição da dimensão das unidades. Alguma falta de representatividade para pequenos movimentos de vertente superficiais.
Unidades Político-administrativas (<i>Political or Administrative Units</i>)	Estas unidades geográficas, geralmente, não refletem limites morfológicos, hidrológicos ou litológicos, limitando assim os trabalhos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

As principais desvantagens inerentes à utilização das unidades matriciais, que se prendem com alguma falta de rigor na representação de estruturas e informações geológicas e morfológicas de forma discreta (*raster*) e na representação da delimitação das suas propriedades (*e.g.* limites geológicos, depósitos dos movimentos de vertente, unidades litológicas), utilizando células de forma e tamanho pré-definido, podem ser

ultrapassadas, fruto do avanço das tecnologias computacionais, pela redução da dimensão das células, que permite uma reprodução mais fiel das características do terreno (Guzzetti, 2005).

Tendo em conta que o método de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente selecionado para este trabalho é estatístico (ver secções 5.3.4.5 e 5.3.5) e considerando a suficiente capacidade computacional disponível, optou-se pela utilização de unidades matriciais.

Segundo Hengl (2006), a determinação do tamanho da unidade matricial, isto é, do *pixel*, depende essencialmente de alguns fatores, entre os quais se destacam: 1) a escala de trabalho; 2) a capacidade computacional; 3) a complexidade do terreno; e 4) a extensão da área de estudo.

A resolução da unidade matricial assume um papel importante para a eficiência do mapeamento, sendo que a definição da sua dimensão deve ser otimizada apenas até um certo nível, por forma a satisfazer simultaneamente a capacidade de processamento e a representação da variabilidade espacial (Hengl, 2006).

Dietrich e Montgomery (1998 *in* Claessens *et al.*, 2005) afirmam que a utilização de uma resolução mais fina resulta numa melhor representação das zonas de instabilidade, permitindo delinea-las de forma mais rigorosa.

Havendo capacidade computacional suficiente para utilizar pixéis de dimensão reduzida, foram testados dois tamanhos de célula (5 m x 5 m e 10 m x 10 m), nomeadamente no processo de conversão do inventário de movimentos de vertente de formato vetorial para formato *raster*, tal como efetuado por Florinsky e Kuryakova (2000 *in* Hengl, 2006), tendo-se optado pela utilização de pixéis de 5 m, dados os melhores resultados obtidos face aos resultados gerados pelos pixéis de 10 m, no que diz respeito à discriminação das características do terreno e à perda de informação referente às áreas instabilizadas.

Por outro lado, segundo Hengl (2006), para uma escala de 1:25.000, a dimensão da célula (resolução) deve estar compreendida entre 62,5 m (resolução grosseira) e 2,5 m (resolução fina), sendo que para uma resolução fina, o ideal é estar compreendida entre 6,5 m e 2,5 m.

5.3.4 METODOLOGIAS DE ANÁLISE

Como referido anteriormente (ponto 5.1), ao longo das últimas décadas, foram propostos e testados vários métodos e técnicas para avaliar a suscetibilidade a movimentos de vertente, sem que, no entanto, haja um consenso generalizado acerca da maior ou menor adequabilidade para esta finalidade (Brabb, 1984; Varnes, 1984; IAEG-CLOMMS, 1984; Carrara *et al.*, 1991; Soeters e van Westen, 1996; van Westen *et al.*, 1997; Crozier e Glade, 2005; Guzzetti, 2005).

As metodologias de análise da suscetibilidade a movimentos de vertente podem ser qualitativas ou quantitativas e diretas ou indiretas (tabela 5.3), sendo que enquanto os métodos qualitativos permitem inferir a suscetibilidade de forma subjetiva e recorrendo a termos descritivos, os métodos quantitativos produzem estimativas numéricas em termos da ocorrência de movimentos de vertente (Guzzetti *et al.*, 1999).

De acordo com Guzzetti (2005), um método direto consiste na cartografia geomorfológica direta, através de fotografias aéreas ou de imagens de satélite, para representar a suscetibilidade, estando geralmente associado à construção de mapas de inventários de movimentos de vertente. Segundo o mesmo autor, os métodos indiretos processam-se de acordo com uma série de etapas, que requerem: 1) a inventariação e cartografia de movimentos de vertente na área de estudo, obtida com a criação dos inventários de movimentos de vertente; 2) a identificação dos fatores de predisposição (variáveis independentes) direta ou indiretamente correlacionados com a instabilidade de vertentes e preparação da respetiva cartografia; 3) a estimativa da contribuição de cada fator de predisposição para a ocorrência de movimentos de vertente; 4) a classificação da área de estudo segundo diferentes graus de suscetibilidade; e 5) a validação e avaliação da capacidade preditiva do modelo.

A revisão da bibliografia (Carrara *et al.*, 1995; van Westen, 1993; Hutchinson, 1995; Soeters e van Westen, 1996; van Westen *et al.*, 1997; Aleotti e Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti, 2005) demonstra que os principais métodos utilizados para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente podem ser agrupados em cinco categorias, apresentadas na tabela 5.3, bem como na figura 5.1.

Tabela 5.3 - Classificação das metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (adaptado de Soeters e van Westen, 1996).

Método	Classificação do método			
	Direto	Indireto	Qualitativo	Quantitativo
Cartografia direta/ Método geomorfológico	X		X	
Método heurístico/ Indexação		X	X*	
Análise de inventários		X		X
Modelos determinísticos		X		X
Modelos estatísticos		X		X

* semi-quantitativo

A figura 5.1 apresenta um esquema de classificação e agrupamento dos vários métodos utilizados em avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, de acordo com as propostas apresentadas por Soeters e van Westen (1996) e por Aleotti e Chowdhury (1999).

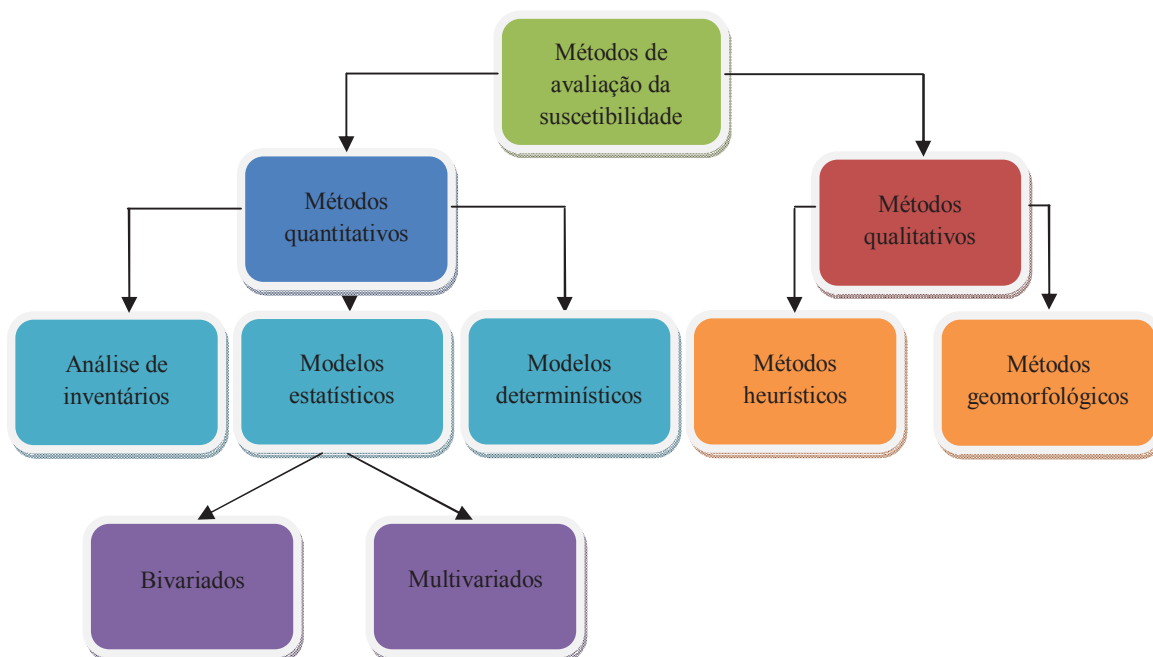


Figura 5.1 - Classificação das metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (adaptado de Soeters e van Westen, 1996 e de Aleotti e Chowdhury, 1999).

5.3.4.1 MÉTODOS GEOMORFOLÓGICOS

O método geomorfológico (cartografia direta), definido por Leroi (1996 *in* Aleotti e Chowdhury, 1999) como a "*abordagem de avaliação dos especialistas*", é um método de avaliação de suscetibilidade direto, cujos resultados são qualitativos, que depende essencialmente da competência e experiência do investigador para o reconhecimento e avaliação da instabilidade das vertentes atuais e potenciais áreas de instabilidade futura, incluindo a sua evolução e consequências (*e.g.* Kienholz, 1977 *in* Soeters e van Westen 1996; Hansen *et al.*, 1995; Zêzere, 1997; Aleotti e Chowdhury, 1999; Nossin, 1999; Bateira, 2001; Ng *et al.*, 2003).

Segundo Guzzetti (2005), este método, quando utilizado por investigadores muito experientes, com grande conhecimento dos fenómenos de instabilidade de vertentes na área de estudo, pode gerar resultados muito fiáveis. Porém, é um método subjetivo, difícil de executar e pouco adequado a avaliações quantitativas de suscetibilidade a movimentos de vertente.

Este tipo de método permite uma avaliação rápida e direta, após o trabalho de campo, derivando muitas vezes diretamente de mapas geomorfológicos detalhados (Soeters e van Westen, 1996) podendo ser utilizado em qualquer escala, com recurso a uma simples ferramenta de trabalho, não sendo necessária a utilização de SIG (Aleotti e Chowdhury, 1999).

Todavia, o método geomorfológico apresenta algumas desvantagens para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, enunciadas por Leroi (1996 *in* Aleotti e Chowdhury, 1999): 1) a subjetividade na seleção tanto dos dados como das regras que regem a estabilidade de vertentes ou a suscetibilidade, tornando difícil a comparação de mapas de suscetibilidade produzidos por diferentes investigadores; 2) a utilização de regras implícitas e não esclarecedoras, que perturbam a análise crítica dos resultados e dificultam a atualização das avaliações de suscetibilidade à medida que surgem novos dados e informação; e 3) exigência de levantamentos de campo morosos.

Segundo Zêzere (2010 *in* Oliveira, 2012), dada a subjetividade inerente a estes métodos, os resultados obtidos são de difícil reprodutibilidade e apenas podem ser validados após a ocorrência de novas manifestações de instabilidade.

5.3.4.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Os métodos heurísticos ou de indexação, são métodos indiretos que produzem resultados semi-quantitativos, que se baseiam na assunção de que todas as causas e fatores de instabilidade na área de estudo são conhecidos e cuja fiabilidade, à imagem do que acontece com os métodos geomorfológicos, está dependente do grau de conhecimento e compreensão dos processos geomorfológicos existentes no terreno, por parte do investigador. Os fatores de instabilidade são classificados, hierarquizados e ponderados, tendo em conta a importância expectável para a ocorrência de movimentos de vertente e a possibilidade de causarem movimentos de vertente e, com base nesta informação, estabelecem-se critérios subjetivos para definir possíveis áreas de instabilidade e proceder ao zonamento da suscetibilidade (e.g. Soeters e van Westen, 1996; Aleotti e Chowdhury, 1999; Nagarajan *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2002; He *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2004; Guzzetti, 2005; Moreiras, 2005; Zêzere, 2010 *in* Oliveira, 2012).

Segundo Soeters e van Westen (1996), para a aplicação do método heurístico devem cumprir-se as seguintes etapas: 1) divisão dos parâmetros em classes relevantes; 2) atribuição de valores ponderados a cada classe; 3) atribuição de valores ponderados aos parâmetros; 4) sobreposição dos mapas ponderados; 5) desenvolvimento do mapa final ilustrando as classes de suscetibilidade.

De acordo com Guzzetti (2005), as regras adotadas para a ponderar, hierarquizar e combinar os fatores de predisposição deveriam basear-se no conhecimento detalhado dos processos físicos que controlam os movimentos de vertente. No entanto, o autor adverte para o facto de isso raramente se verificar, sendo que os referidos procedimentos, na maioria dos casos, baseiam-se única e exclusivamente na experiência do investigador, o que introduz subjetividade, que acrescenta incerteza ao modelo. Ainda assim, van Westen *et al.* (1997) argumentam que a subjetividade não é necessariamente um aspeto negativo, especialmente se derivar da opinião de um especialista.

Apesar de este método ser vantajoso no sentido de possibilitar uma total automatização de operações em SIG (Aleotti e Chowdhury, 1999) e de poder ser aplicado a qualquer escala (Soeters e van Westen, 1996), além de não contemplar as interações complexas entre os fatores que controlam os movimentos de vertente (Guzzetti, 2005), envolve

operações morosas e torna difícil a extrapolação dos modelos desenvolvidos para outras áreas de estudo (Aleotti e Chowdhury, 1999).

5.3.4.3 ANÁLISE DE INVENTÁRIOS

A análise de inventários de movimentos de vertente visa a predição da ocorrência de instabilidade diretamente através da distribuição de movimentos de vertente passados, preparando-se mapas de densidade de movimentos de vertente, contendo a respetiva percentagem de área ocupada ou o número de movimentos de vertente numa determinada zona de estudo (*e.g.* Campbell, 1973; Guzzetti *et al.*, 1994; Bulut *et al.*, 2000; Moreiras, 2004; Guzzetti, 2005; Pereira, 2009).

Este método de avaliação de suscetibilidade é indireto e produz resultados quantitativos (Soeters e van Westen, 1996). Segundo Guzzetti (2005), se devidamente normalizados, os mapas de densidade de movimentos de vertente podem fornecer estimativas adequadas para o zonamento da suscetibilidade.

A este respeito, Galli *et al.* (2008) afirmam que as incertezas e erros associados aos inventários de movimentos de vertente, aliados à complexidade inerente a este tipo de fenómeno, levam a que a avaliação de suscetibilidade, com base apenas na densidade de movimentos de vertente, desprezando a ação dos fatores de predisposição, possa levar a resultados enganadores ou erróneos.

Os mapas de densidade de movimentos de vertente, além de implicarem a utilização de unidades cartográficas político-administrativas (*e.g.* concelhos, freguesias), funcionam bem apenas como base para aplicação de outras metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, sendo, no entanto, limitativos enquanto método, por assumirem que a densidade de movimentos de vertente é contínua no espaço e por não fornecerem uma estimativa sobre os futuros movimentos de vertente (Pereira, 2009).

5.3.4.4 MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Os métodos de base física, ou determinísticos (geotécnicos), assentam na compreensão de algumas leis físicas que controlam a estabilidade de vertentes, como por exemplo a

conservação de massa, energia e equilíbrio de forças (Montgomery e Dietrich, 1994; Aleotti e Chowdhury, 1999; Guzzetti, 2005).

Estes são métodos indiretos que produzem resultados quantitativos (Soeters e van Westen, 1996; Guzzetti, 2005), sendo aplicados, em grandes escalas, em pequenas áreas muito homogêneas, ou vertentes específicas, para um determinado tipo de movimentos de vertente. Assim sendo, são frequentemente utilizados por engenheiros civis e geólogos para a avaliação e cartografia da suscetibilidade a movimentos de vertente (Aleotti e Chowdhury, 1999).

As propriedades físicas são quantificadas e aplicadas a modelos matemáticos específicos, permitindo calcular o Fator de Segurança. O Fator de Segurança, ou Índice de Estabilidade, baseia-se num modelo geotécnico, cuja fiabilidade é melhorada com recurso a informação detalhada sobre a geometria da vertente, sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno) e sobre a pressão de água nos poros (Aleotti e Chowdhury, 1999) e ainda, segundo Soeters e van Westen (1996), obtendo informação sobre a espessura do solo e sobre a profundidade e geometria do plano de rotura potencial.

Aleotti e Chowdhury (1999) apresentam uma sumarização das abordagens determinísticas e asseguram que a utilização de SIG possibilita a simulação de múltiplos cenários e a produção de modelos e mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente credíveis.

5.3.4.5 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Os modelos estatísticos são utilizados para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente com o objetivo de descrever a relação funcional entre os fatores de predisposição e a distribuição dos movimentos de vertente passados e presentes (Carrara, 1983).

Esta abordagem é indireta e produz resultados quantitativos (Soeters e van Westen, 1996), adequados à avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (Guzzetti, 2005).

Normalmente, os métodos estatísticos implicam o cumprimento dos seguintes requisitos e/ ou etapas (Aleotti e Chowdhury, 1999; Soeters e van Westen, 1996; Guzzetti, 2005):

1) disponibilidade de um inventário de movimentos de vertentes estatisticamente representativo da área de estudo; 2) seleção e cartografia de fatores de predisposição que condicionem, direta ou indiretamente, a ocorrência de movimentos de vertente; 3) avaliação das relações estatísticas entre os fatores de predisposição utilizados e os movimentos de vertentes; 4) classificação da área de estudo de acordo com o respetivo grau de suscetibilidade a movimentos de vertente; 5) validação dos modelos de suscetibilidade desenvolvidos relativamente à respetiva capacidade preditiva; e 6) avaliação da incerteza inerente aos modelos estatísticos desenvolvidos.

Guzzetti (2005) afirma que estes métodos se podem dividir em 2 categorias:

1) Métodos estatísticos simples, que se baseiam na determinação da abundância relativa (proporção, percentagem, frequência, incidência) de movimentos de vertente nas classes definidas para os respetivos fatores de predisposição, representados em mapas temáticos (e.g. índice geral de instabilidade; índice de suscetibilidade a movimentos de vertente; índice de frequência; índice de percentagem de superfície);

2) Métodos estatísticos avançados, baseados num vasto leque métodos e técnicas, classificados por Michie *et al.* (1994 *in* Guzzetti, 2005), da seguinte forma:

i) Métodos estatísticos clássicos ou frequencistas, onde se incluem a análise bivariada, a análise discriminante, a regressão múltipla e a regressão logística;

ii) Métodos estatísticos modernos, subjetivistas ou Bayesianos;

iii) Sistemas de lógica difusa;

iv) Redes neurais;

v) Sistemas periciais.

Os métodos estatísticos podem ainda ser divididos, tendo em conta a forma de relacionamento entre os fatores de predisposição (variáveis independentes) e a distribuição de movimentos de vertente (variável dependente), segundo Aleotti e Chowdhury (1999), em:

1) Métodos estatísticos bivariados (e.g. Método do Valor Informativo, método de *Weights of Evidence*, sistemas de lógica difusa), onde a relação é estabelecida individualmente entre cada fator de predisposição e a distribuição de movimentos de

vertente, ou seja, o valor da ponderação de cada classe é determinado diretamente com base na correspondente densidade de movimentos de vertente;

2) Métodos estatísticos multivariados (*e.g.* análise discriminante, regressão múltipla, regressão logística), em que a ponderação da importância relativa dos vários fatores de predisposição, em relação à ocorrência de movimentos de vertente, é efetuada de forma conjunta, combinando as variáveis independentes em condições únicas, tendo em conta as interações entre as mesmas.

De acordo com Guzzetti (2005), no seguimento do aparecimento dos SIG e da disponibilidade de pacotes estatísticos intuitivos, os modelos estatísticos tornaram-se, para muitos investigadores, no método mais utilizado para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

As principais vantagens apontadas à utilização de métodos estatísticos, na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, prendem-se com o elevado grau de objetividade, com a sua reprodutibilidade, com a possibilidade de validação da capacidade preditiva dos modelos desenvolvidos e a possibilidade de avaliar a importância do contributo de cada fator de predisposição para o mapa de suscetibilidade final, permitindo decidir posteriormente sobre a pertinência da respetiva inclusão no modelo (Aleotti e Chowdhury, 1999).

As principais limitações associadas à aplicação de métodos estatísticos, para avaliação da suscetibilidade, resultam da dificuldade no estabelecimento de relações causa - efeito entre as variáveis, de problemas derivados da auto-correlação entre variáveis e da ausência de normalização na distribuição estatística das variáveis predictoras (Zêzere, 2010 *in* Oliveira, 2012). Marques (2013), acrescenta ainda outras limitações, relacionadas com a simplificação dos fatores condicionantes e a utilização indiscriminada daqueles que estão disponíveis mais facilmente, apresentando, por vezes, cartografia de reduzida qualidade.

5.3.5 SELEÇÃO DO MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS

Tendo em conta as vantagens associadas à utilização de métodos estatísticos para avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, apresentadas no ponto 5.3.4.5, e considerando os bons resultados produzidos por este tipo de modelos

em estudos desenvolvidos por muitos investigadores a nível internacional (*e.g.* Guzzetti, 2005; Lee, 2007; Conforti *et al.*, 2012; Shahabi *et al.*, 2013; Meinhardt *et al.*, 2015), tal como, especificamente, em Portugal (*e.g.* Zêzere, 1997; Garcia, 2002; Marques *et al.*, 2009b; Pereira, 2009; Piedade, 2009; Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012; Pereira *et al.*, 2012; Marques, 2013; Marques *et al.*, 2015), neste trabalho optou-se, de igual modo, pela utilização de um método estatístico, mais concretamente um método estatístico bivariado.

Apesar de a análise estatística bivariada não ter em consideração as interações, por vezes complexas, existentes entre os vários fatores de predisposição (Aleotti e Chowdhury, 1999), além da simplicidade na sua aplicação, permite a determinação dos fatores, ou combinações de fatores, que melhor explicam a distribuição dos movimentos de vertente e, assim sendo, produz bons resultados na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (van Westen *et al.*, 2003). A este respeito, Shahabi *et al.* (2013) afirmam que, apesar da sua simplicidade, os métodos estatísticos bivariados apresentam maior precisão do que os métodos multivariados e que, como tal, são mais compatíveis e adequados para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

Por outro lado, segundo Sützen e Doyuran (2004), podem ser utilizados diversos métodos estatísticos para o cálculo dos valores ponderados (*e.g.* Método do Valor Informativo, método do *Weighs of Evidence*, regras da combinação Bayesiana, fatores de certeza, método de Dempster-Shafer, sistema de lógica difusa), sendo que todos podem ser aplicados em *software* SIG, através de pacotes de análise estatística.

Outro aspeto que pesou na opção pela utilização de um método estatístico bivariado neste trabalho prende-se com o facto de Marques (2013) ter avaliado a suscetibilidade a movimentos de vertente no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores), utilizando vários métodos bivariados (*e.g.* Método do Valor Informativo, *Weighs of Evidence* e Lógica Difusa) e multivariados (*e.g.* Análise Discriminante e Regressão Logística), tendo concluído que, apesar de os métodos multivariados terem um desempenho ligeiramente superior, em bom rigor as diferenças são mínimas, tal que, segundo a classificação qualitativa proposta por Guzzetti *et al.* (2006b) para a capacidade de predição do modelos de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente, todos os métodos, quer bivariados quer multivariados, utilizados pelo autor se enquadraram na classificação de "Bom", com exceção de dois dos nove operadores utilizados na Lógica Difusa, que ficaram classificados como "Aceitáveis ou razoáveis".

Também Oliveira (2012) afirma que os resultados de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente não diferem significativamente com a utilização de diferentes métodos estatísticos.

O método estatístico bivariado selecionado para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente neste trabalho foi o Método do Valor Informativo, tendo a opção sido tomada com base nos seguintes aspetos:

- 1) Os excelentes resultados obtidos por diversos autores (*e.g.* Zêzere, 1997; Marques *et al.*, 2009b e 2015; Pereira, 2009; Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012; Pereira *et al.*, 2012; Marques, 2013) com a utilização deste método em trabalhos de avaliação de suscetibilidade realizados em Portugal Continental e no Arquipélago dos Açores;
- 2) Os resultados obtidos por Marques (2013) na aplicação de vários métodos de avaliação da suscetibilidade, onde comprova não haver ganhos significativos com a aplicação de métodos estatísticos mais complexos (*e.g.* multivariados) em relação aos resultados obtidos com o Método do Valor Informativo;
- 3) A simplicidade de aplicação do Método do Valor Informativo, quer em termos metodológicos, quer em termos computacionais, que representa, no contexto deste trabalho, um ganho significativo de tempo, sendo esse um dos principais fatores limitantes no âmbito da elaboração de dissertações de doutoramento, aliada à robustez dos resultados que promove (Tsai e Chen, 2010; Marques, 2013; Meinhardt *et al.*, 2015);
- 4) O facto de não se pretender estabelecer comparações entre metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, mas sim proceder a uma avaliação fidedigna da suscetibilidade na área de estudo, que permita, posteriormente, analisar a sua variação em diversos cenários de alterações climáticas.

5.3.6 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO

O método do Valor Informativo (*Information Value*) foi proposto por Yan (1988) e Yin e Yan (1988), baseando-se numa simplificação da teoria de probabilidade Bayesiana (Pestana e Velosa, 2008).

Em Portugal, este método foi introduzido por Zêzere (1997), para avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na região a Norte de Lisboa,

tendo sido, posteriormente, utilizado para o efeito por diversos autores (e.g. Garcia, 2002; Marques *et al.*, 2009b; Pereira, 2009; Piedade, 2009; Garcia, 2012, Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013; Marques *et al.*, 2015).

Este método determina quantitativamente, de forma bivariada, as relações entre as classes de cada variável independente (fatores de predisposição) e a variável dependente (conjunto de movimentos de vertente utilizado), sustentando-se na transformação logarítmica da razão entre a probabilidade condicionada de encontrar um movimento numa determinada classe de uma variável e a probabilidade *a priori* de encontrar um movimento na totalidade da área de estudo (Zêzere, 2010 *in* Oliveira, 2012).

A aplicação deste método é feita em duas fases distintas, determinando-se, em primeiro lugar, o valor informativo para cada classe de cada variável independente e, posteriormente, o valor informativo final de cada unidade de terreno.

O cálculo do valor informativo de cada variável independente (I_i) é efetuado com base na seguinte expressão (Yan, 1988):

Equação 5.1:
$$I_i = \log \left(\frac{S_i/N_i}{S/N} \right)$$

onde: I_i é o valor informativo da variável i ; S_i traduz o número de unidades cartográficas com movimentos de vertente com presença da variável i ; N_i é o número de unidades cartográficas com presença da variável i ; S refere-se ao número total de unidades cartográficas com movimentos de vertente; e N é o número total de unidades cartográficas na área de estudo.

Numa segunda etapa, o valor informativo final de cada unidade cartográfica (I_j), que determina a respetiva suscetibilidade a movimentos de vertente, é dado pela seguinte expressão, proposta por Yan (1988):

Equação 5.2:
$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} \cdot I_i$$

onde: I_j traduz o valor informativo final de uma determinada unidade cartográfica; n representa o número de variáveis; e X_{ji} assume o valor de 0 se a variável estiver ausente da unidade cartográfica e de 1 se estiver presente.

Os valores de I_i e I_j não refletem uma probabilidade mas sim uma ponderação referente ao posicionamento da variável ou da unidade cartográfica em questão, relativamente à média.

De acordo com Yan (1988), quando os valores de I_i são negativos ($(S_i/N_i) < (S/N)$), significa que as respectivas variáveis independentes não são determinantes para a ocorrência de movimentos de vertente. Quando os valores são positivos, significa que existe uma relação entre a presença das variáveis independentes e a ocorrência dos movimentos, sendo tanto mais significativa, quanto maior for o valor de I_i . Quando os valores de I_i estão muito próximos de zero, estamos na presença de uma variável independente cuja influência para a ocorrência de movimentos de vertente é nula ou inconclusiva.

A leitura dos valores de I_j segue a mesma lógica apresentada para os valores de I_i . Assim sendo, valores de I_j positivos indicam que uma determinada unidade cartográfica, tendo em conta as variáveis independentes nela contidas, apresenta maior suscetibilidade a movimentos de vertente, enquanto valores negativos significam menor suscetibilidade. A suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente inerente a cada unidade de terreno será tanto maior quanto maior for o valor de I_j , isto é, irá variar na razão direta do respetivo valor informativo final.

À imagem da opção tomada em trabalhos recentes de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, em que o método do Valor Informativo foi utilizado (e.g. Pereira, 2009; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013; Marques *et al.*, 2015), nos casos em que o número de unidades cartográficas com movimentos de vertente na presença de uma determinada classe de um fator de predisposição for nulo ($S_i = 0$), implicando uma impossibilidade matemática na resolução da respetiva equação (equação 5.1), decidiu-se atribuir o valor correspondente ao valor informativo (I_i) mais baixo calculado para as restantes classes do mesmo fator de predisposição.

5.4 DADOS DE ENTRADA PARA MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NA ÁREA DE ESTUDO

Atualmente, a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite a aplicação de técnicas sofisticadas de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

A modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente foi realizada com recurso a SIG, mais concretamente pela utilização do software ArcGis 10.1, tendo sido considerados como dados de entrada um conjunto de movimentos de vertente (variável dependente) e um conjunto de fatores de predisposição à ocorrência de movimentos de vertente (variáveis independentes), tendo como objetivos descrever a relação funcional entre os fatores de predisposição e a distribuição dos movimentos de vertente passados e presentes, tal como refere Carrara (1983) e, posteriormente, proceder ao zonamento da suscetibilidade.

Tendo em conta o Método do Valor Informativo (ver ponto 5.3.6), selecionado para este trabalho, na figura 5.2 é apresentado um esquema concetual da utilização da análise estatística bivariada para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente em ambiente SIG.

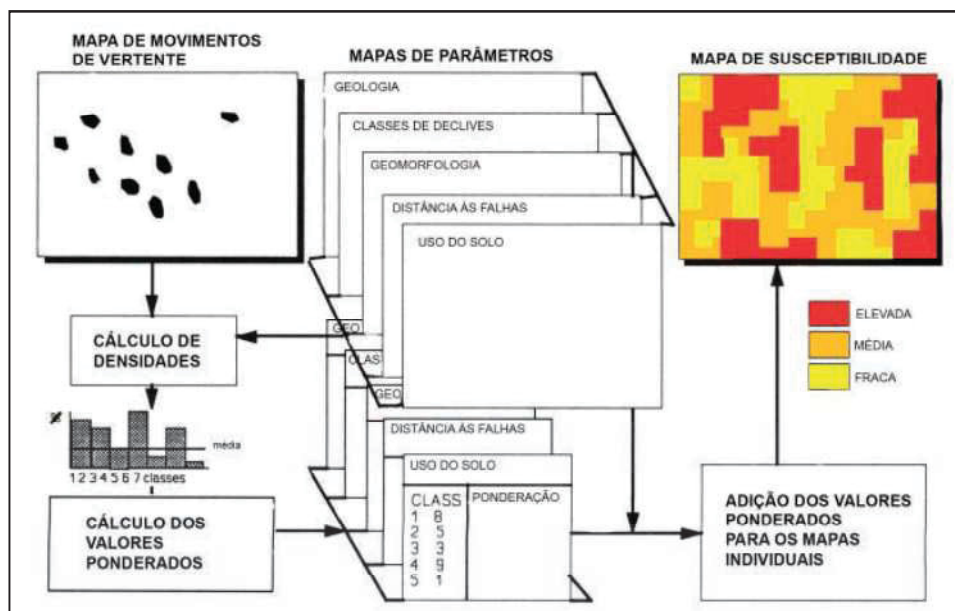


Figura 5.2 - Esquema concetual de análise estatística bivariada para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente em SIG (adaptado de Soeters e van Westen, 1996 in Pereira, 2009).

5.4.1 MOVIMENTOS DE VERTENTE

Tal como referido anteriormente (ver secção 4.3), o conjunto de movimentos de vertente utilizado para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente consiste num inventário de movimentos de vertente histórico, elaborado especificamente para o efeito, constituído por 207 deslizamentos translacionais (IMV). Dando cumprimento às diretrizes existentes na literatura científica (e.g. Yan, 1988; Soeters e van Westen, 1996; Zêzere, 1997; Pereira, 2009; Garcia 2012, Oliveira; Marques; 2013), de que diferentes tipologias de movimentos de vertente devem ser tratadas de forma individualizada, por lhes estarem associados diferentes mecanismos e/ ou condições desencadeantes, para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente não foram considerados os 12 desabamentos cartografados e inventariados na zona de estudo, por não serem estatisticamente representativos.

Segundo Malamud *et al.* (2004a), os inventários de movimentos de vertente estão geralmente incompletos, sendo que um inventário de movimentos de vertente histórico completo implicaria que fossem incluídos todos os movimentos de vertente resultantes de múltiplos eventos ao longo do tempo e, uma vez que, por razões práticas, isso não é possível, um grau de completude funcional requer que o inventário contenha uma fração substancial de todos os movimentos de vertente. Para van Westen *et al.* (2006), a ausência e/ou a incompletude dos inventários de movimentos de vertente são os principais percalços para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.

A robustez dos inventários de movimentos de vertente é essencial para a avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente (Lang *et al.*, 1999; Guzzetti, 2005, van Westen *et al.*, 2008), sendo inclusivamente mais determinante de que a própria metodologia de avaliação utilizada.

Outro aspeto que influencia substancialmente os resultados da modelação da avaliação da suscetibilidade a estes fenómenos, prende-se com a representação cartográfica dos movimentos de vertente, que pode ser feita sob a forma de pontos ou de polígonos.

Esta opção não é tomada de forma arbitrária, estando dependente, direta ou indiretamente, de um conjunto de pressupostos, entre os quais estão se destaca, de acordo com Oliveira (2012): 1) a forma de obtenção dos inventários; 2) a escala de análise adotada; 3) os objetivos finais do mapa de suscetibilidade; 4) as ferramentas informáticas utilizadas; e 5) a capacidade de processamento da informação.

De acordo com Thiery *et al.* (2007), os dois tipos de representação apresentam vantagens. Por um lado, a utilização de pontos evita um acréscimo de incerteza associado à definição dos limites dos movimentos de vertentes, especialmente quando os vestígios deixados são já pouco evidentes, bem como a atribuição de importância excessiva a movimentos de vertente de grandes dimensões.

Por outro lado, a utilização de polígonos permite considerar a dimensão dos movimentos de vertente, trazendo benefícios no que diz respeito à predição de movimentos de vertente de maiores dimensões, além de, segundo van Den Eeckhaut *et al.* (2006), permitir uma melhor representação das condições que determinam a ocorrência dos movimentos de vertente, comparativamente com a utilização de pontos, cujo posicionamento é subjetivo e que leva a uma simplificação de processos de um fenómeno natural complexo, condicionados por um conjunto de relações estabelecidas com diversos fatores de predisposição (Marques, 2013).

Outra questão relevante refere-se ao significado dos pontos ou polígonos, isto é, se estes representam o total da área instabilizada (área de depleção + área de propagação/depósito) ou apenas a área de rotura. Segundo Chung e Fabbri (2003), normalmente, a modelação deve ser efetuada em separado, sendo a área de rotura modelada através de métodos estatísticos, especialmente para movimentos de vertente planares, rotacionais e escoadas.

Diversos autores (*e.g.* Thiery *et al.*, 2007; Blahut *et al.*, 2010, Oliveira, 2012) em trabalhos comparativos de utilização dos dois tipos de representação, consideram que os melhores resultados preditivos são obtidos utilizando polígonos em vez de pontos (*e.g.* centroide).

Assumindo a representação dos movimentos de vertente por polígonos, diversos autores (*e.g.* Chung e Fabbri, 2003; Remondo *et al.*, 2003a; Ayalew e Yamaguishi, 2005; van Den Eeckhaut *et al.*, 2006; Thiery *et al.*, 2007; Nefeslioglu *et al.*, 2008; Blahut *et al.*, 2010, Clerici *et al.*, 2010) optam pela utilização, para efeitos de modelação, apenas da área de depleção dos movimentos de vertente.

A este respeito, Clerici *et al.* (2010) advogam que se a avaliação da suscetibilidade visa identificar as condições em que os movimentos de vertente ocorrem (ou ocorrerão), a análise tem de cingir-se à área em que o movimento foi originado. Nesses casos, deve haver cuidado na análise dos resultados, tendo em atenção que se está a avaliar a

predisposição para que numa determinada unidade cartográfica ocorra um movimento de vertente, não contemplando a predisposição para que a mesma unidade cartográfica seja afetada pela propagação e/ou depósito de movimentos de vertente (Marques, 2013).

No âmbito deste trabalho, à semelhança da opção tomada em outros estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolvidos no Arquipélago dos Açores (*e.g.* Marques *et al.*, 2009b; Marques, 2013; Marques *et al.*, 2015), para efeitos de modelação, foram consideradas apenas as áreas de depleção dos 207 movimentos de vertente translacionais que compõe o inventário histórico (IMV) elaborado para o efeito.

Na figura 5.3, é ilustrada a distribuição geográfica dos movimentos de vertente do IMV através de pontos, de forma a permitir a identificação dos movimentos de vertente de menor dimensão que, à escala a que se encontra o mapa, não teriam representação.

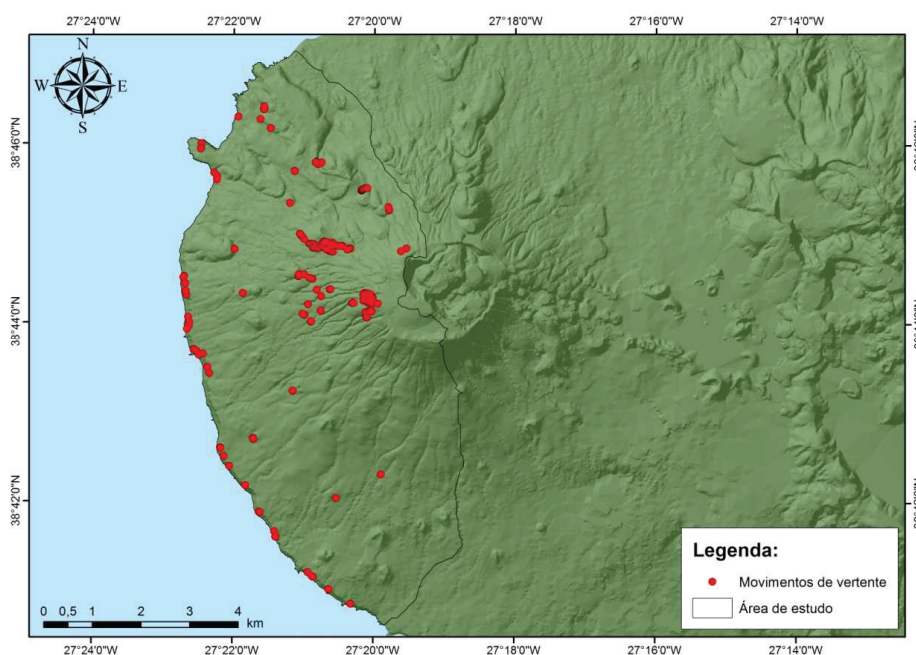


Figura 5.3 - Mapa de distribuição dos 207 movimentos de vertente inventariados na área de estudo (IMV), apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

A utilização de unidades de terreno matriciais (5m x 5 m), implicou a transformação dos dados do inventário de movimentos de vertente, originalmente em formato vetorial, (polígonos) para formato matricial, como ilustrado na figura 5.4.

No referido processo de transformação, como era expetável, verificou-se a perda de alguma informação, mais concretamente ao nível dos movimentos de vertente com áreas

de depleção mais pequenas ou com uma forma mais estreita. Dos 207 movimentos de vertente em formato vetorial original, 65 (31,4%) foram completamente suprimidos no decorrer do processo de transformação a formato matricial em SIG.

A unidade de terreno/pixel é indivisível e funciona numa matriz de presença ou ausência de um determinado atributo. Assim, cada pixel apenas assume a presença de área instabilizada quando esta preenche, no mínimo, 50% da sua área. Ou seja, quando a transformação de um polígono (formato vetorial) para formato *raster* resulta num preenchimento de menos de metade da área de um determinada unidade de terreno, a mesma não apresenta representação nesse novo formato.

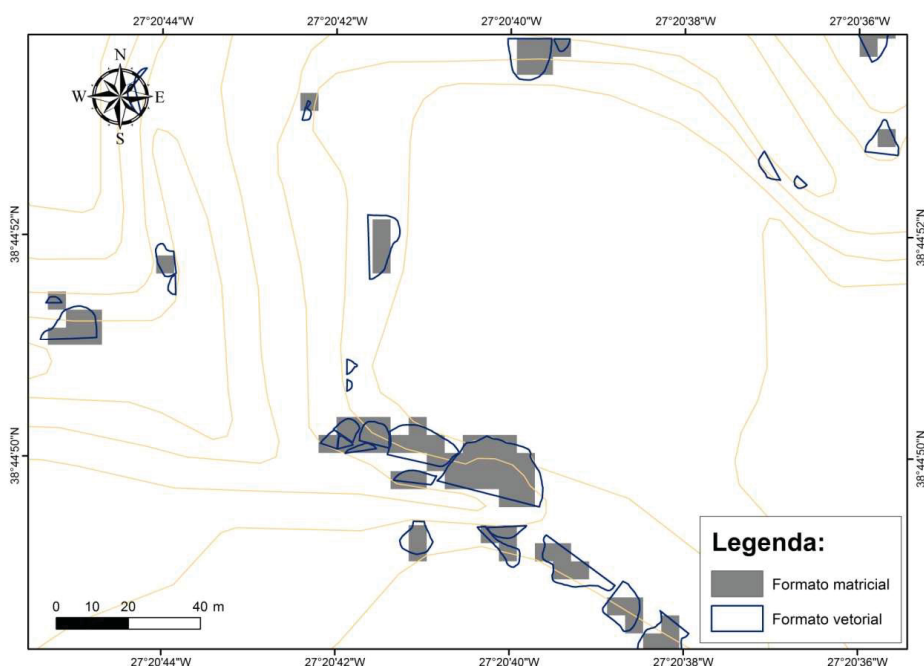


Figura 5.4 - Exemplificação do resultado da conversão dos movimentos de vertente cartografados de formato vetorial para formato matricial. Mapa apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

A título de exemplo, se um movimento de vertente representado por um polígono quadrado com 4 metros de lado estiver centrado numa célula (5 m x5 m), a mesma terá representação no formato matricial, já que este irá ocupar mais de 50% da sua área. No entanto, se o mesmo polígono estiver centrado em 4 células, não haverá correspondência no formato matricial, já que nenhuma das 4 células terá mais de 50% da sua área preenchida pelo movimento de vertente. Assim sendo, decorrente do

processo de transformação de formato vetorial para *raster*, toda a informação relativa à área daquele movimento de vertente seria perdida.

Refira-se, no entanto, que o processo inverso também se verifica, isto é, ainda que um pixel de 5 m x 5 m (25 m²) apenas tenha 60% da sua área (15 m²) preenchida por área instabilizada, a correspondência no formato *raster* será de 100% da área do pixel, o que significa um acréscimo de 10 m² à área total instabilizada que resulta no formato *raster*.

Apesar das questões anteriormente referidas se constituírem como uma limitação relevante no âmbito do tratamento espacial de dados, na verdade, tendo em conta a reduzida dimensão da unidade de terreno utilizada, os seus impactos foram minimizados, como se pode verificar na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Variação da informação referente ao inventário de movimentos de vertente (IMV), decorrente do processo de transformação entre os formatos vetorial e matricial.

Movimentos de vertente	Formato		Diferencial	
	Vetorial	Matricial	Unitário	(%)
Número de movimentos de vertente	207	142	-65	-31,40
Área planimétrica instabilizada (m ²)	43.771,71	43.875	103,29	0,24

Apesar da perda de 65 movimentos de vertente decorrente da conversão de formato, na realidade, devido à sua pequena dimensão, a área que foi suprimida não foi significativa, sendo que, do balanço entre perdas e ganhos de área, anteriormente mencionado, resultou uma área instabilizada planimétrica em formato matricial muito semelhante à verificada originalmente em formato vetorial, com uma variação mínima representada por um acréscimo residual de 0,24 m². Ou seja, a percentagem de área instabilizada que se perdeu devido ao processo de conversão foi semelhante à que se ganhou durante o mesmo processo.

5.4.2 FATORES DE PREDISPOSIÇÃO

Os movimentos de vertente são controlados por leis mecânicas que podem ser determinadas de forma empírica, estatística ou determinística. As condições que

controlam, direta ou indiretamente, a ocorrência dos movimentos de vertente, podem ser determinadas e utilizadas para a construção de modelos preditivos destes fenómenos (Guzzetti *et al.*, 1999).

De acordo com Glade e Crozier (2005), os fatores de instabilidade, condicionantes ou causais, envolvidos no fenómeno de ocorrência dos movimentos de vertente, podem ser classificados da seguinte forma: 1) fatores de predisposição, que, sendo estáticos e inerentes às características dos terrenos, para além de influenciarem o nível de estabilidade numa vertente, funcionam como catalisadores para que outros fatores de instabilidade atuem de forma mais eficaz (*e.g.* perda de coesão entre materiais na presença de água); 2) fatores preparatórios, que, sendo dinâmicos, reduzem a margem de estabilidade das vertentes, sem, ainda assim, provocarem o início dos movimentos de vertente. Catalisados pelos fatores de predisposição, alteram o equilíbrio das vertentes, podendo ocorrer em escalas temporais longas (*e.g.* alteração de rochas), ou curtas (*e.g.* desflorestação); e 3) fatores desencadeantes, que são responsáveis pelo desencadeamento dos movimentos de vertente, provocando a passagem de vertentes marginalmente estáveis a ativamente instáveis.

Normalmente, nos trabalhos de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente, são utilizados fatores de predisposição (Guzzetti, 2005), especialmente devido ao seu carácter estático, podendo ser utilizados como fatores causais e sendo, por isso, fundamentais para a predição de movimentos de vertente futuros (van Westen *et al.*, 2008).

A escolha dos fatores de predisposição não é uma tarefa simples, variando de acordo com as características da região, com a escala de trabalho, com o tipo de movimentos de vertente em análise e com os mecanismos de rotura.

Na bibliografia da especialidade (*e.g.* Cruden e Varnes, 1996; Carrara *et al.*, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999; Carrara *et al.*, 2003; Ayalew e Yamagishi, 2005; Guzzetti, 2005; Glade e Crozier, 2005; van Westen *et al.*, 2008; Blahut *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2015), fica claro que não existe um consenso sobre quais os fatores de predisposição que devem ser utilizados, de tal forma que van Westen *et al.* (2008) afirmam mesmo que não é possível prescrever uma lista uniforme de fatores de predisposição, os quais denomina de fatores ambientais.

Ayalew e Yamagishi (2005) afirmam que a seleção das variáveis independentes (fatores de predisposição) é uma tarefa complexa, não havendo critérios universais ou linhas orientadoras, pelo que os fatores de predisposição a utilizar para avaliação de suscetibilidade devem ser: 1) operacionais, tendo algum grau de correlação com a variável dependente (movimentos de vertente); 2) completos, estando representados significativamente em toda a área de estudo; 3) não-uniformes, variando espacialmente; 4) mensuráveis, podendo ser expressos por uma qualquer unidade de medida; e 5) não-redundantes, de forma a que a sua influência não seja quantificada de forma duplicada nos resultados finais.

De acordo com Guzzetti *et al.* (1999), a identificação e mapeamento de um conjunto de fatores de predisposição adequado, comportando relações com os movimentos de vertente, requer um conhecimento *a priori* das principais causas na sua origem.

Segundo van Westen *et al.* (2008), antes de se dar início a qualquer estudo de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, torna-se indispensável averiguar se a informação temática relativa aos principais fatores de predisposição que controlam os movimentos de vertente numa determinada área está disponível ou se é possível produzi-la.

Blahut *et al.* (2010), afirmam que os fatores de predisposição podem ser divididos em 2 grupos: 1) fatores derivados do Modelo Numérico de Elevação (MNE); e 2) outros fatores geo-ambientais (geo-fatores). Segundo Hengl (2009), a utilização exclusivamente de fatores de predisposição derivados do MNE gera resultados pouco conseguidos.

A este respeito, Guzzetti *et al.* (1999) advertem que a disponibilidade de informação temática varia largamente em função do tipo de informação, da escala de trabalho e da técnica de aquisição, e que virtualmente todos os fatores de predisposição recolhidos no campo ou derivados através dos SIG, apresentam erros e imprecisões, cuja magnitude é desconhecida. Esta posição é reforçada por Carrara *et al.* (1999), que afirmam que em muitos países ou regiões, a informação necessária para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente é, geralmente, inadequada em termos de precisão, consistência e atualização.

Apesar da falta de consenso e do grau de incerteza e imprecisão associado à informação e cartografia referente aos fatores de predisposição, van Westen *et al.* (2008)

propuseram um esquema com informação pertinente para avaliação da suscetibilidade, perigosidade e risco de movimentos de vertente, onde apresentam, entre outros dados, um listagem de fatores de predisposição a considerar nesses estudos, atribuindo-lhes um nível de importância que tem em conta a escala de trabalho e/ou a metodologia de avaliação selecionada para análise, cuja adaptação é apresentada na tabela 5.5.

Na tabela 5.5, a negrito, está assinalada a importância dos fatores de predisposição correspondente à escala de trabalho e ao método de análise para o presente estudo.

Tabela 5.5 - Listagem de fatores de predisposição a utilizar em estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, tendo em conta a escala de trabalho e/ou o método de análise selecionados (adaptado de van Westen *et al.*, 2008).

Fator de predisposição	Escala de trabalho			Método utilizado		
	Pequena	Média	Grande	Heurístico	Estatístico	Determinístico
Elevação/altitude (MNE)	Elevada	Crítica	Crítica	Elevado	Crítica	Crítica
Fatores Derivados do MNE (e.g. declive)	Reduzida	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
Área de acumulação	Reduzida	Moderada	Elevada	Reduzida	Moderada	Elevada
Litologia	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
Estrutura	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
Falhas	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Irrelevante
Tipo de Solo	Moderada	Elevada	Crítica	Elevada	Elevada	Crítica
Profundidade do solo	Irrelevante	Reduzida	Crítica	Irrelevante	Irrelevante	Crítica
Hidrologia de vertente	Irrelevante	Irrelevante	Crítica	Irrelevante	Irrelevante	Crítica
Unidades geomorfológicas principais	Crítica	Elevada	Moderada	Crítica	Moderada	Reduzida
Unidades geomorfológicas detalhadas	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Moderada
Tipo de uso do solo	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
Modificação do uso do solo	Moderada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada

Como é possível verificar na tabela anterior, para uma escala média (1:25.000) e recorrendo a métodos estatísticos para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, van Westen *et al.* (2008), atribuem importância elevada ou crítica a todos os fatores presentes na listagem, com exceção da área de acumulação, da profundidade do solo e da hidrologia da vertente, bem como, das unidades geomorfológicas principais, especificamente no que ao método de análise diz respeito.

Percorrendo a bibliografia, constata-se que neste tipo de estudos é utilizada uma grande variedade de fatores de predisposição, encontrando-se trabalhos realizados em Portugal que utilizam desde dois ou três fatores (*e.g.* Dimuccio *et al.*, 2006; Pereira, 2009;) até mais de uma dezena (*e.g.* Marques, 2013). No entanto, a utilização de um maior número de fatores de predisposição não é garante de uma melhor capacidade preditiva dos modelos, podendo este incremento de fatores, a partir de um determinado número, não melhorar a capacidade do algoritmo (*e.g.* Marques, 2013) ou, em alguns casos, até piorá-la (*e.g.* Pereira, 2009).

Segundo Marques (2013), dada a dificuldade de definir *a priori* quais os fatores com maior capacidade de discriminação para uma dada área, ou tipo de movimentos de vertente, deve-se proceder ao estudo da relação entre os movimentos de vertente e o maior número possível de fatores de predisposição. Apesar disso, Clerici *et al.* (2006) defendem que, na prática, a aquisição de dados relativos aos fatores de predisposição é uma tarefa difícil e consumidora de tempo, pelo que as análises são normalmente limitadas aos fatores que se sabe, através de trabalhos anteriores, ou pelo menos que se suspeita, que estejam direta ou indiretamente relacionadas com a ocorrência de movimentos de vertente.

Em última instância, não sendo essa uma solução ideal, quando os investigadores estão de alguma forma limitados à informação disponível para uma determinada área ou à criação de nova informação em tempo útil, prevalece uma lógica de custo-benefício, o que, segundo Oliveira (2012), leva a que os fatores de predisposição possam apresentar algumas limitações, sobretudo relacionadas com a diversidade de escalas com que foi obtida e representada a informação geográfica.

Julião *et al.* (2009) apresentam uma proposta de utilização de fatores de predisposição, no "*Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal*", definindo os

seguintes fatores condicionantes a considerar: litologia, formações superficiais, declive, exposição das vertentes, curvatura das vertentes e o uso do solo. No entanto, em trabalhos posteriores realizados em Portugal, são vários os autores que, por diversas razões (*e.g.* indisponibilidade, morosidade na obtenção de dados) não utilizam todos os fatores propostos e que, por outro lado, utilizam outros fatores de predisposição não indicados no referido guia (*e.g.* Pereira, 2009; Garcia; 2012; Oliveira; 2012, Marques, 2013; Marques *et al.*, 2015).

De facto, até ao momento não foi efetuado qualquer trabalho de análise referente à importância dos diversos fatores de predisposição para discriminação de áreas instáveis na ilha Terceira. Todavia, o trabalho de Marques (2013), no concelho da Povoação, na ilha de São Miguel, constitui um termo comparativo adequado para o efeito, pelo que se seguiram algumas das opções tomadas pelo autor, no que diz respeito à seleção dos fatores de predisposição, com as devidas adaptações e diversas alterações, tendo em conta tanto os resultados obtidos naquele trabalho, como os objetivos específicos da presente dissertação.

Neste trabalho foram utilizados onze fatores de predisposição, subdivididos em dois grupos (Blahut *et al.*, 2010): Fatores derivados do MNE e fatores geo-ambientais. As seis variáveis derivadas do MNE foram as seguintes: Declive (DEC), exposição (EXP), perfil longitudinal das vertentes (PLV), perfil transversal das vertentes (PTV), área de contribuição (ACT) e inverso do *wetness index* (IWI). As cinco variáveis geo-ambientais utilizadas foram: precipitação média anual (PMA), geologia (GEO), uso do solo (USO), densidade de drenagem (DDR) e distância aos cursos de água (DCA).

Após efetuada a seleção, os fatores de predisposição foram classificados, transformando as variáveis contínuas em variáveis categóricas, por forma a agrupar a informação, permitindo o seu tratamento em termos computacionais e a sua compatibilização com variáveis originalmente categóricas, como a geologia e o uso do solo.

Consultando a bibliografia, constata-se que não existem regras definidas para o processo de classificação das variáveis, sendo que os autores estabelecem critérios próprios, não referindo, no entanto e na maioria dos casos, a fundamentação para as opções tomadas. Neste trabalho, procurou-se uma classificação de dados que, por um lado, não induzisse uma simplificação excessiva das variáveis contínuas, retirando-lhe capacidade de discriminação da instabilidade do terreno e que, por outro lado, não implicasse um

número excessivo classes, o que resultaria numa sobrecarga em termos de capacidade computacional, sem ganhos aparentes no modelo final de suscetibilidade.

Durante o processo de classificação dos fatores de predisposição, foi ainda determinada a favorabilidade de em cada classe se encontrar um movimento de vertente. A favorabilidade ou função de favorabilidade (F_j) equivale a uma probabilidade condicionada (abordagem *bayesiana*), revelando de forma direta o grau de predisposição que cada classe de cada fator de predisposição apresenta para que nela ocorra um movimento de vertente (Zêzere, 2016), calculando-se através da seguinte expressão, de acordo com Chung e Fabbri (2003):

Equação 5.3:
$$F_j = 1 - \left(\frac{1}{A_j}\right)^{A_{MV_j}}$$

Onde A_j corresponde à área ocupada pela classe j e A_{MV_j} representa a área da classe j ocupada por movimentos de vertente.

Segundo Marques *et al.* (2009b), a importância relativa de cada classe, de cada fator de predisposição, na distribuição dos movimentos de vertente pode ser traduzida, de uma forma simples, pelo valor de favorabilidade, que em termos práticos resulta da razão entre o número de pixéis com movimentos de vertente na classe em estudo e o número total de pixéis ocupados pela variável em estudo.

5.4.2.1 FATORES DE PREDISPOSIÇÃO DERIVADOS DO MNE

Um Modelo Digital de Elevação (MDE), consiste num conjunto ordenado de números que representam a distribuição espacial da elevação do terreno, sendo considerado um subconjunto dos Modelos Digitais do Terreno (MDT), que se definem como conjuntos ordenados de números que representam a distribuição espacial de atributos do terreno (Moore *et al.* 1991).

Os MDE são obtidos a partir de diversas técnicas, entre as quais se destacam a digitalização de curvas de nível a partir de cartas topográficas em suporte analógico,

levantamentos topográficos, medições com GPS diferencial, fotogrametria digital, InSAR e LiDAR (van Westen *et al.*, 2008).

O Modelo Numérico de Elevação (MNE), consiste numa estrutura matricial de dados, que armazena a informação da elevação topográfica de cada pixel, diferindo por isso de outras representações de Modelos Digitais de Elevação. Os MNE são simples de utilizar e podem ser obtidos de forma automática, pelo que têm sido amplamente utilizados em vários campos de investigação.

Segundo Claessens *et al.* (2005), os valores de elevação obtidos a partir dos MNE são frequentemente utilizados em algoritmos para derivar variáveis tais como: declive, exposição, área de contribuição, fluxos e zonas de acumulação de água, densidade de drenagem, entre outros. Esses resultados são aplicados em modelação territorial, especialmente em modelos hidrológicos, modelos de estabilidade de vertentes e de suscetibilidade/perigosidade a movimentos de vertente e, ainda em modelos de alteração do uso do solo.

A capacidade das ferramentas SIG em armazenar, gerir, analisar e representar grandes quantidades de informação espacial aumenta a capacidade dos investigadores para analisar grandes regiões. Estas provaram ser ferramentas essenciais para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente já que possibilitam a derivação de forma automática de parâmetros relevantes, tais como os referidos no parágrafo anterior, pelo que a qualidade dos mapas de suscetibilidade dependerá ainda mais dos dados de entrada, especialmente da qualidade do inventário de movimentos de vertente. Baeza *et al.* (2010) referem ainda que os parâmetros de instabilidade derivados dos MNE, a par da unidade de terreno e da técnica de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertentes selecionadas, exercem uma influência considerável na fiabilidade dos resultados finais.

Tendo em conta que a topografia se assume com um dos principais fatores no que diz respeito às análises de suscetibilidade (van Westen *et al.*, 2008), perigosidade e risco a movimentos de vertente, bem como para a análise de outros fenómenos naturais (*e.g.* cheias, fogos florestais, erupções vulcânicas), a criação de um MNE desempenha um papel de máxima relevância. Segundo diversos autores (*e.g.* Sørensen *et al.*, 2006; Grabs *et al.*, 2009) a topografia exerce um controlo importante na variação espacial das

condições hidrológicas, influenciando a distribuição espacial da humidade do solo e condicionando os fluxos de água subterrâneos.

De acordo com Claessens *et al.* (2005), a extração de informação topográfica do MNE não está isenta de erros, sejam eles inerentes ao próprio MNE ou derivados dos algoritmos utilizados na análise da informação, sendo que pequenos erros na interpolação dos valores de elevação das curvas de nível podem resultar em grandes erros nas variáveis derivadas do MNE. No entanto, desde que os dados altimétricos de entrada sejam abundantes, métodos de interpolação simples geram resultados satisfatórios. A este respeito, Mahalingam e Olsen (2015) concluíram que os mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente são fortemente influenciados pela resolução espacial dos MNE e que sua capacidade preditiva está dependente da qualidade e comportamento dos MNE.

Neste trabalho, o MNE foi criado através de uma rede irregular triangulada (TIN - *Triangulated Irregular Network*), que confere maior facilidade na representação de superfícies complexas e na representação tridimensional do relevo, permitindo ainda gerar modelos numéricos numa estrutura matricial, especialmente adequados para análise e modelação do terreno (Reis, 2006). Para tal, recorreu-se à cartografia digital de base, disponível para a ilha Terceira, à escala de 1:25.000, com curvas de nível (equidistância de 10 metros) e pontos cotados.

Segundo van Westen *et al.* (2008), a precisão dos MNE irá depender da escala do mapa de base, do intervalo das curvas de nível, da disponibilidade de informação altimétrica adicional (*e.g.* pontos cotados), do rigor da digitalização e da precisão do método de interpolação utilizado.

O TIN foi criado através da extensão *3D Analyst Tools* ("*Create TIN*"), do software ArcGis 10.1, através da qual também se efetuou a conversão para a estrutura matricial ("*TIN to Raster*"), com pixéis de 5m x 5 m. Desta conversão, resultou o mapa hipsométrico (figura 5.5) da zona de estudo, que expressa, em metros, a altitude, isto é, a cota da superfície topográfica em relação ao nível médio da água do mar.

De acordo com Clerici *et al.* (2010), a altitude é amplamente utilizada como fator de predisposição em estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (*e.g.* Mahalingam e Olsen, 2015; Conoscenti *et al.* 2016), sendo que, apesar disso, o seu papel não é claro, dada a variabilidade de resultados obtidos por diversos autores,

incluindo trabalhos em que não é determinada qualquer relação entre a altitude e a distribuição de movimentos de vertente.

Nos trabalhos realizados em Portugal, normalmente, a altitude não é utilizada como fator de predisposição. No entanto, alguns autores (*e.g.* Marques *et al.*, 2009b; Marques, 2013), obtiveram excelentes resultados com a utilização da altitude, sendo que no trabalho de Marques (2013), em termos de hierarquização dos fatores de predisposição, a altitude constitui-se como o 4.º fator mais importante.

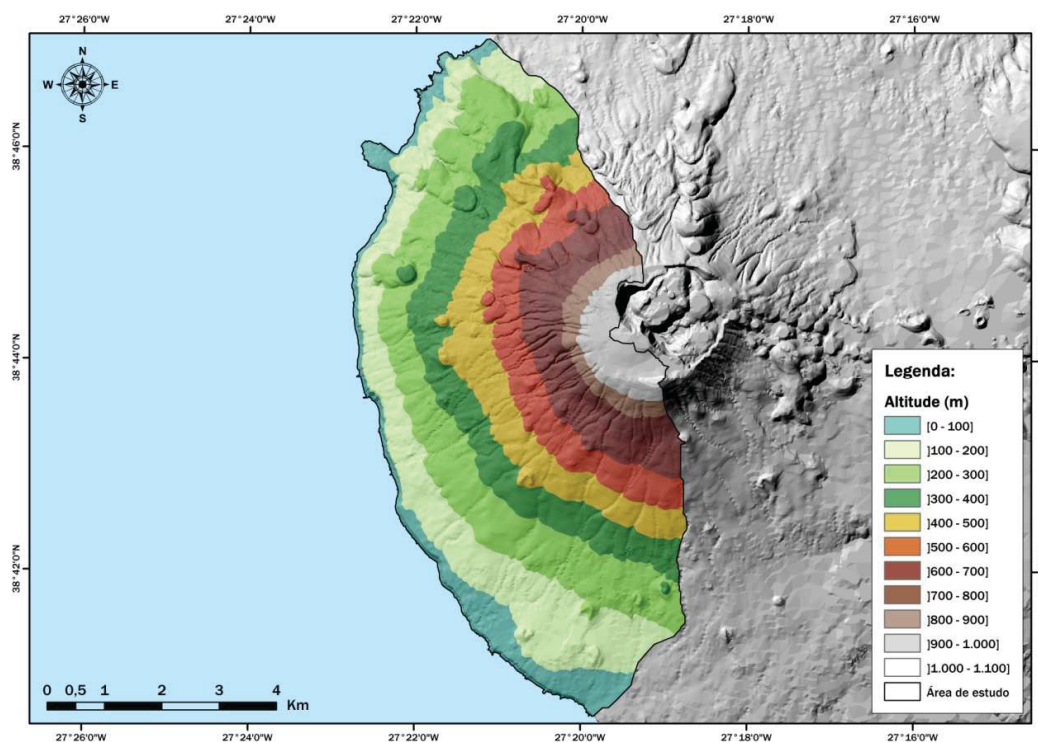


Figura 5.5 - Mapa hipsométrico da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

De acordo com Conoscenti *et al.* (2016), a altitude é frequentemente utilizada para o zonamento da suscetibilidade a movimentos de vertente devido à sua correlação, por exemplo, com a precipitação. Assim sendo, neste trabalho, a altitude não foi utilizada como fator de predisposição, exatamente por pretender-se utilizar a precipitação anual acumulada como tal e uma vez que, como referido, estes dois fatores estão diretamente relacionados, variando numa razão direta.

Ainda assim, na tabela 5.6, dada a frequente utilização da altitude como fator de predisposição a movimentos de vertente, a título de curiosidade, são apresentadas as

frequências absolutas e relativas da área e da área instabilizada na zona de estudo, tendo em conta onze classes de altitude (ALT), de 100 em 100 metros.

Tabela 5.6 - Frequências absolutas e relativas de área e área instabilizada por classe de altitude (ALT)

Sigla	Classe (m)	N.º Pixéis	Área (m ²)	Área (%)	Área Instabilizada (m ²)	Área Instabilizada (%)
ALT 1	0 - 100	137.932	3.448.300	7,55	21.250	48,43
ALT 2	101 - 200	343.022	8.575.550	18,78	14.625	33,33
ALT 3	201 - 300	381.746	9.543.650	20,90	0	0,00
ALT 4	301 - 400	260.316	6.507.900	14,25	50	0,11
ALT 5	401 - 500	215.778	5.394.450	11,81	600	1,37
ALT 6	501 - 600	169.878	4.246.950	9,30	2.625	5,98
ALT 7	601 - 700	121.329	3.033.225	6,64	1.300	2,96
ALT 8	701 - 800	75.787	1.894.675	4,15	150	0,34
ALT 9	801 - 900	49.198	1.229.950	2,69	2.175	4,96
ALT 10	901 - 1.000	68.805	1.720.125	3,77	1.100	2,51
ALT 11	1.001 - 1.100	2.610	65.250	0,14	0	0,00
Total		1.826.401	45.660.025 m ²	100	43.875 m ²	100

Tendo em conta a tabela anterior, é de destacar a percentagem de área instabilizada contida nas duas primeiras classes (81,76%), que representam apenas cerca de um quarto da área de estudo (26.33%), o que se deve essencialmente ao facto de estas classes conterem todas as arribas da encosta da ilha na zona de estudo, onde a densidade de movimentos de vertente é alta, devido, seguramente, aos elevados declives aí verificados.

De seguida descrevem-se os fatores de predisposição derivados do MNE considerados no âmbito deste trabalho.

DECLIVE

O declive (DEC) é apontado por diversos autores (*e.g.* Guzzetti *et al.*, 1999; Süzen e Doyuran, 2004; Ayalew e Yamagishi, 2005; Guzzetti, 2005; Baeza *et al.*, 2010) como o fator de predisposição mais relevante para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente. A este respeito, Guzzetti (2005) afirma que existe uma relação inequívoca

entre a distribuição dos movimentos de vertente e o declive, sendo que à medida que aumenta a inclinação da vertente, verifica-se uma tendência para o aumento do número de movimentos de vertente, pelo menos até um determinado ângulo.

O declive identifica a variação máxima na elevação entre cada célula e as oito células em seu redor (Baeza *et al.*, 2010), sendo que o respetivo mapa (figura 5.6) expressa a inclinação da superfície topográfica, em graus (0° - 90°).

Neste trabalho, o declive foi obtido a partir do MNE de forma automática, recorrendo à ferramenta *Spatial Analyst Tools* ("*Slope*"), do software ArcGIS 10.1, resultando numa estrutura matricial de 5 m x 5 m.

Tendo em conta que o declive corresponde a uma variável originalmente contínua, tornou-se necessária a sua conversão numa variável categórica, tendo-se utilizado os limites (tabela 5.7) propostos por Marques *et al.* (2009b) e Marques (2013).

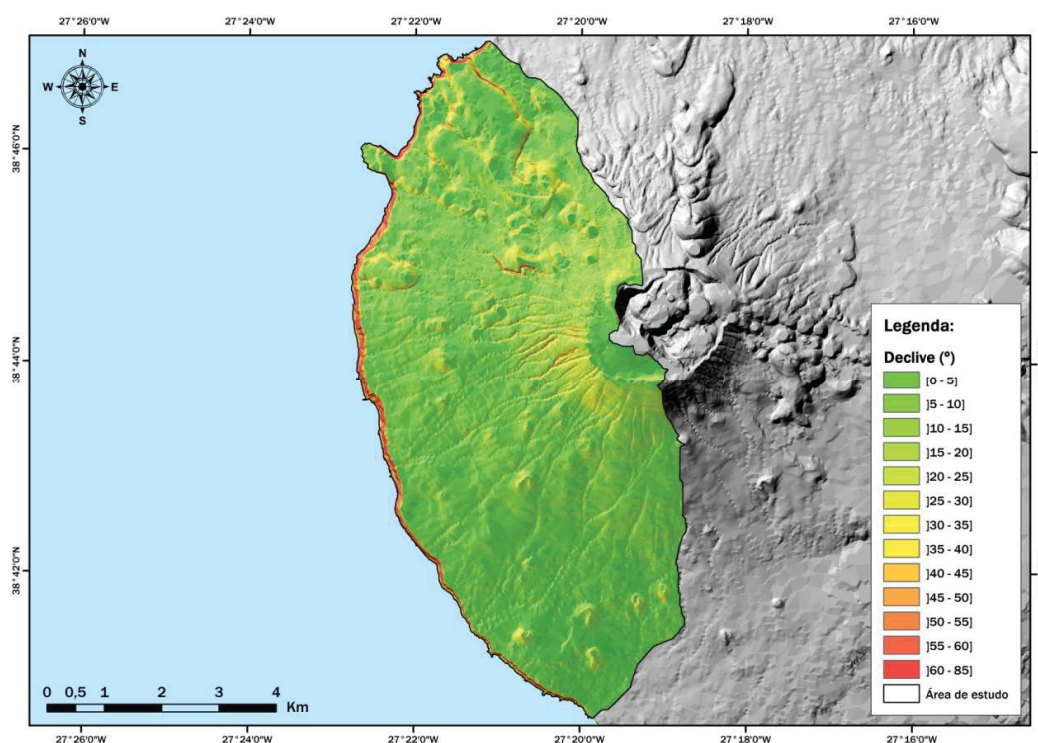


Figura 5.6 - Mapa de declive (DEC) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

À semelhança do que se acontece na maioria dos trabalhos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (*e.g.* Guzzetti, 2005; Pereira, 2009; Marques

et al., 2009b e 2015; Garcia, 2012; Oliveira, 2012, Guillard e Zêzere, 2012; Marques, 2013), neste trabalho verificou-se uma relação inequívoca entre o declive e a distribuição espacial dos movimentos de vertente, tendo em conta que à medida que aumenta o valor do declive, verifica-se uma tendência notória para o aumento da área instabilizada.

Tabela 5.7 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de declive (DEC). A negrito estão assinaladas as classes com valores de F_i mais elevados.

Sigla	Classe (°)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
DEC 1	[0-5]	186.570	10,22	0,06	0,00001
DEC 2	]5-10]	595.935	32,63	0,74	0,00002
DEC 3	]10-15]	531.102	29,08	0,23	0,00001
DEC 4	]15-20]	240.307	13,16	1,48	0,00011
DEC 5	]20-25]	116.009	6,35	1,37	0,00021
DEC 6	]25-30]	59.530	3,26	2,62	0,00077
DEC 7	]30-35]	31.291	1,71	3,48	0,00195
DEC 8	]35-40]	17.945	0,98	6,44	0,00628
DEC 9	]40-45]	11.919	0,65	10,14	0,01482
DEC 10	]45-50]	11.122	0,61	19,60	0,03046
DEC 11	]50-55]	10.874	0,60	23,65	0,03745
DEC 12	]55-60]	7.873	0,43	18,35	0,04007
DEC 13	]60-85]	5.924	0,32	11,85	0,03450
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

À semelhança do que se acontece na maioria dos trabalhos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (*e.g.* Guzzetti, 2005; Pereira, 2009; Marques *et al.*, 2009b e 2015; Garcia, 2012; Oliveira, 2012, Guillard e Zêzere, 2012; Marques, 2013), neste trabalho verificou-se uma relação inequívoca entre o declive e a distribuição espacial dos movimentos de vertente, tendo em conta que à medida que aumenta o valor do declive, verifica-se uma tendência notória do aumento da área instabilizada.

Como se pode verificar na tabela 5.7, as classes correspondentes a declives até 40° representam a esmagadora maioria da área de estudo (97,39%), comportando, no entanto, apenas 16,41% da área instabilizada. Por seu turno, as classes com declive superior a 40°, representando ocupando apenas 2,61% da área de estudo, contêm a

grande maioria da área instabilizada da área de estudo (83,59%), justificando assim uma maior favorabilidade para a ocorrência de movimentos de vertente.

Os valores de favorabilidade determinados para as quatro classes de maior declive (DEC 10 a DEC 13) são extremamente elevados em comparação com os observados nas restantes classes de declive, bem como comparativamente aos valores mais elevados verificados nas classes dos outros dez fatores de predisposição, como se pode constatar analisando as tabelas 5.8 a 5.17

EXPOSIÇÃO

De acordo com Baeza *et al.* (2010), a exposição reflete, em graus, a orientação da projeção horizontal do vetor normal à superfície no ponto de maior declive de uma unidade matricial, tendo em conta as oito unidades em seu redor.

A exposição das vertentes (EXP) é utilizada como fator de predisposição em grande parte dos trabalhos de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente, mas sobre o qual ainda se debate a sua importância, dada a variabilidade de resultados obtidos e conclusões retiradas por diversos autores (Clerici *et al.*, 2010).

De acordo com Guillard e Zêzere (2012), a exposição está relacionada com aspetos climáticos e meteorológicos, sendo que, por exemplo, as vertentes expostas a sul recebem mais insolação do que as que se encontram expostas a norte.

Na realidade, o facto de, neste trabalho, se pretender utilizar a exposição das vertentes como fator de predisposição, aliado à existência de uma correlação significativa entre a exposição das vertentes e a insolação a que estas estão sujeitas, foram aspetos determinantes para a decisão de não utilizar a insolação (radiação direta potencial anual) como fator de predisposição, contrariamente à opção tomada por Marques (2013).

O mapa de exposição (figura 5.7) foi obtido de forma automática a partir do MNE, com recurso à extensão *Spatial Analyst Tools* ("*Aspect*"), do software ArcGis 10.1, resultando numa estrutura matricial de 5 m x 5 m, onde os valores obtidos variam entre 0 e 360°.

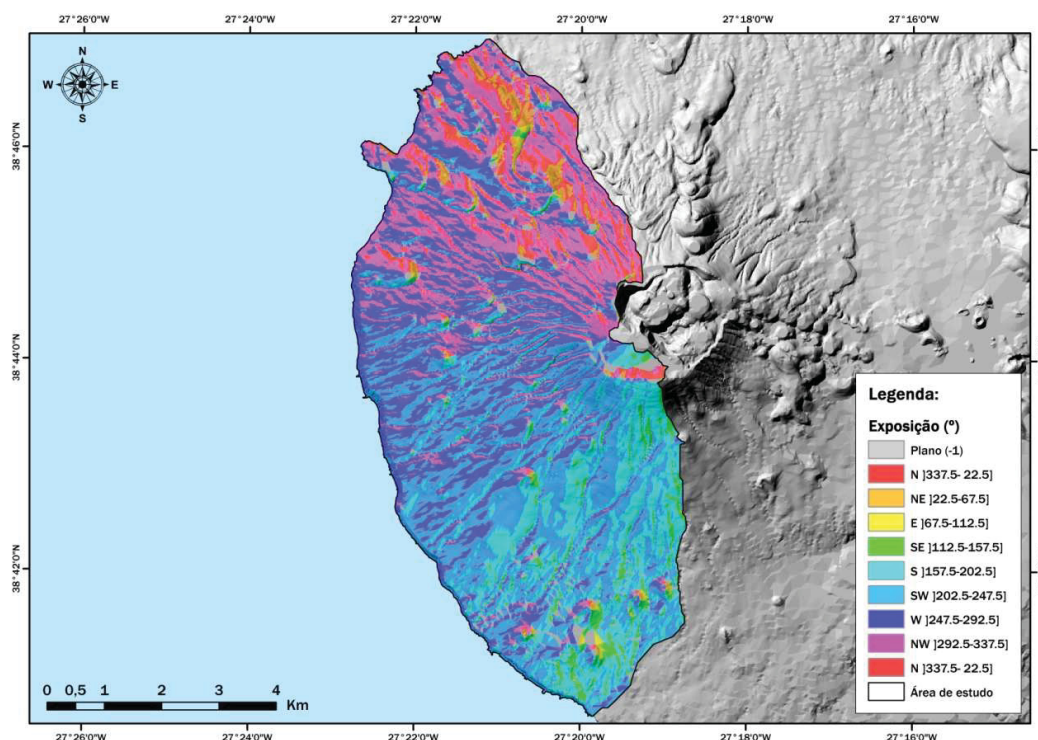


Figura 5.7 - Mapa de exposição das vertentes (EXP) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Para a divisão dos valores obtidos em classes, neste trabalho adotou-se a classificação mais frequentemente utilizada (e.g. Clerici *et al.*, 2010), na qual são definidas nove classes de exposição (tabela 5.8). Assim, oito classes representam oito setores de 45° de abertura angular, correspondendo aos pontos cardeais principais e secundários, enquanto a outra classe, que assume o valor de -1, representa as áreas planas, sem direção de inclinação definida.

De acordo com a informação presente na tabela 5.8, é possível verificar que as vertentes que apresentam maior favorabilidade para a ocorrência de movimentos de vertente estão expostas a oeste (EXP 8 - W), destacando-se claramente das restantes. A referida classe, representando menos de um quarto da área de estudo (23,34%), contém praticamente dois terços (65,01%) da área instabilizada.

Tal como seria expeável, embora não sendo uma condição *sine qua non*, a classe EXP 1 (zonas planas) não contém fenómenos de instabilidade e, como tal, a respetiva favorabilidade é nula.

Tabela 5.8 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de exposição (EXP). A negrito está assinalada a classe com valor de F_i mais elevado.

Sigla	Classe (°)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
EXP 1	Zonas Planas	69.364	3,80	0,00	0,00000
EXP 2	N]337,5-22,5]	128.843	7,05	3,93	0,00054
EXP 3	NE]22,5-67,5]	38.462	2,11	1,65	0,00075
EXP 4	E]67,5-112,5]	10.842	0,59	0,11	0,00018
EXP 5	SE]112,5-157,5]	48.127	2,64	0,17	0,00006
EXP 6	S]157,5-202,5]	291.104	15,94	5,87	0,00035
EXP 7	SW]202,5-247,5]	532.644	29,16	15,04	0,00050
EXP 8	W]247,5-292,5]	426.369	23,34	65,01	0,00267
EXP 9	NW]292,5-337,5]	280.646	15,37	8,21	0,00051
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

PERFIL LONGITUDINAL E TRANSVERSAL DAS VERTENTES

A curvatura das vertentes representa o inverso do raio de um círculo tangente à superfície do solo para um determinado ponto (Clerici *et al.*, 2010). De acordo com estes autores, para a definição da morfologia das vertentes, são utilizados frequentemente o perfil longitudinal, o perfil transversal e a curvatura tangencial.

Neste trabalho, foram analisados e utilizados como fatores de predisposição o perfil longitudinal das vertentes (PLV) e o perfil transversal das vertentes (PTV).

O perfil longitudinal representa a variação do declive ao longo da vertente, enquanto o perfil transversal corresponde à interceção entre um plano horizontal e a superfície do solo. Na prática o PLV reflete as variações no declive das vertentes e condiciona a velocidade da escorrência superficial das mesmas, enquanto que o PTV reflete alterações na exposição das vertentes e controla os fluxos de massa, pela divergência ou concentração nas vertentes.

A morfologia das vertentes, tendo em conta a observação da sua forma em perfil e em plano, pode manifestar-se em nove formas básicas, resultantes da combinação de formas convexas, côncavas e retilíneas, tal como ilustrado na figura 5.8.










		Perfil Longitudinal		
		Convexo	Retilíneo	Côncavo
Perfil Transversal	Convexo			
	Retilíneo			
	Côncavo			

Figura 5.8 - Esquema representativo da morfologia das vertentes resultante das conjugações entre o perfil longitudinal e o perfil transversal das vertentes (Dikau, 1990).

No presente trabalho, para cada um dos dois fatores de predisposição foram definidas três classes (tabelas 5.9 e 5.10): côncavo, convexo e retilíneo. Em ambos os casos, o perfil retilíneo compreende um intervalo de valores negativos e positivos muito próximos de zero, uma vez que em ambientes naturais não existem superfícies topográficas perfeitamente planas. Teoricamente, perfis planos não influenciam a escorrência superficial (Guillard e Zêzere, 2012). No caso do PLV, os perfis côncavos assumem valores positivos e os convexos são caracterizados por valores negativos, enquanto que para o PTV se verifica uma inversão dos sinais, ou seja, os perfis côncavos são caracterizados por valores negativos e os perfis convexos por valores positivos.

Os mapas de PLT e PTV (figuras 5.9 e 5.10) foram obtidos de forma automática a partir do MNE, com recurso à extensão *Spatial Analyst Tools* ("Curvature"), do software ArcGis 10.1, resultando em estruturas matriciais de 5 m x 5 m.

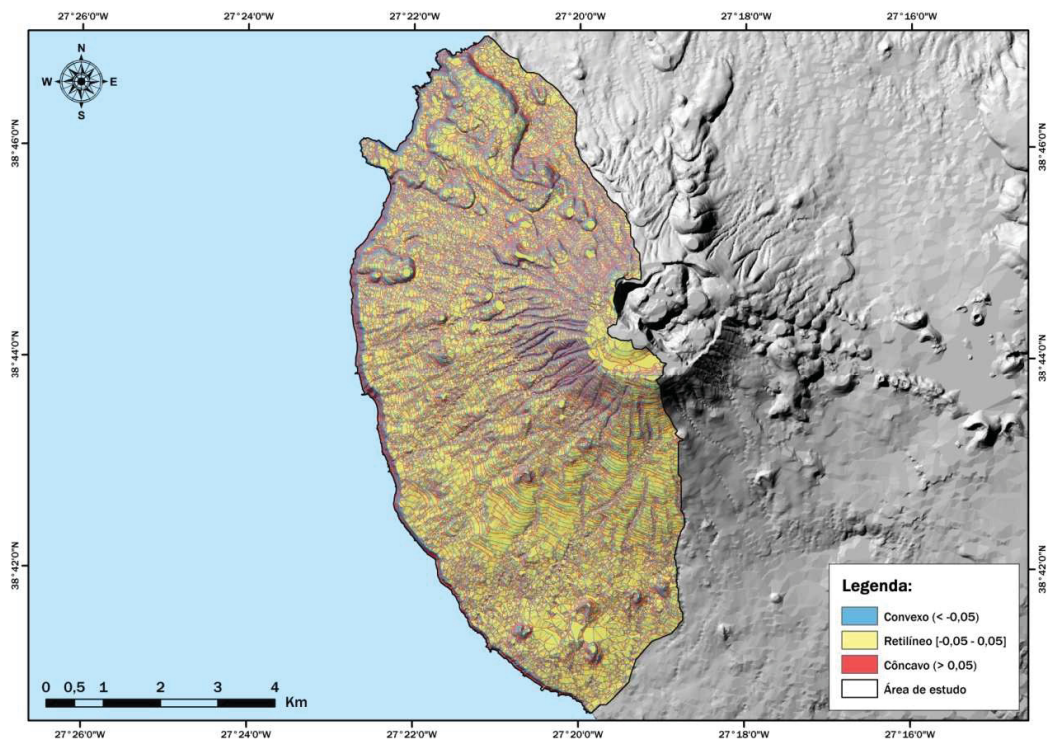


Figura 5.9 - Mapa do perfil longitudinal das vertentes (PLV) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

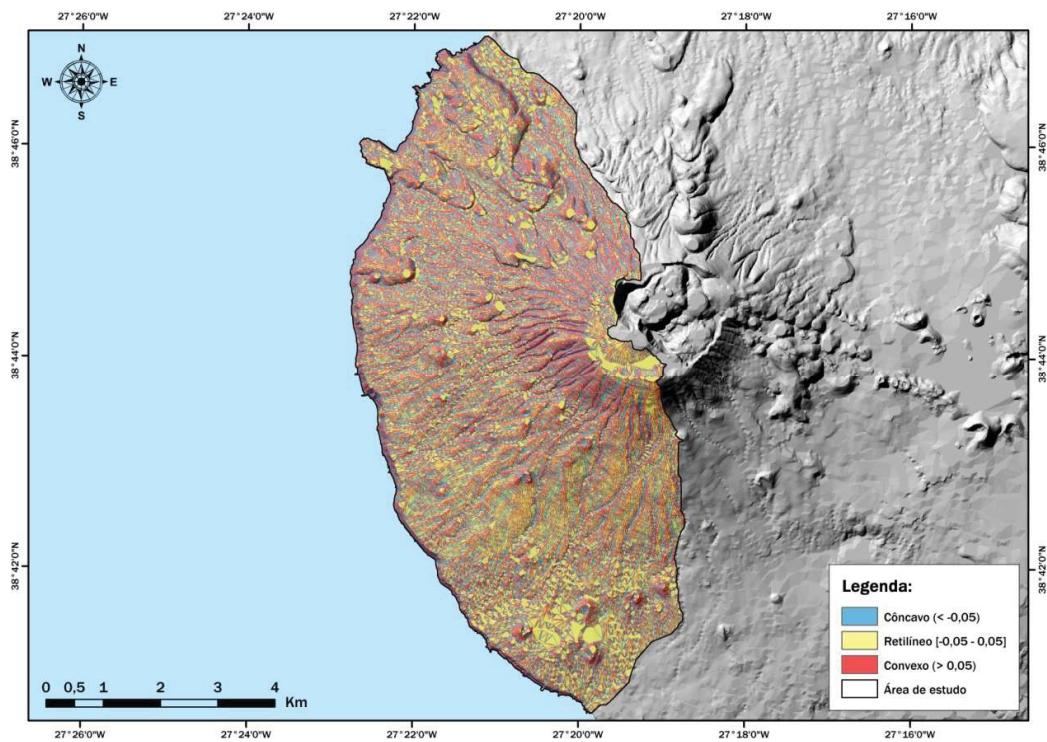


Figura 5.10 - Mapa do perfil transversal das vertentes (PTV) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Tabela 5.9- Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de perfil longitudinal de vertente (PLV). A negrito está assinalada a classe com valor de F_i mais elevado.

Sigla	Classe (°)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
PLV 1	Convexo (< -0,05)	526.662	28,84	53,85	0,00179
PLV 2	Retilíneo ([-0,05;0,05])	786.362	43,06	2,11	0,00005
PLV 3	Côncavo (> 0,05)	513.377	28,11	44,05	0,00150
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

Como se pode observar na tabela 5.9, a classe PLV 2 (retilíneo) é predominante, englobando 43,06% da área de estudo. No entanto, apesar de representar quase metade da área de estudo, comporta apenas 2,11% da área instabilizada, o que lhe confere um valor de favorabilidade para ocorrência de movimentos de vertente extremamente baixo.

Por seu turno, as classes PLV 1 (convexo) e PLV 3 (côncavo), apesar de representarem frações da área de estudo mais reduzidas, sensivelmente iguais, englobam grande parte da área de estudo, mais concretamente 53,85% e 44,05%, respetivamente, pelo que apresentam valores de favorabilidade muito mais elevados, com especial destaque para a classe convexo (PLV 1), facto que se deve a variações de declive acentuadas, como acontece, por exemplo, nas cristas de taludes.

Tabela 5.10 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de perfil transversal de vertente (PTV). A negrito está assinalada a classe com valor de F_i mais elevado.

Sigla	Classe (°)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
PTV 1	Côncavo (< -0,05)	549.126	30,07	45,93	0,00147
PTV 2	Retilíneo ([-0,05;0,05])	618.617	33,87	11,17	0,00032
PTV 3	Convexo (> 0,05)	658.658	36,06	42,91	0,00114
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

Relativamente ao PTV, como se pode verificar na tabela 5.10, as classes que apresentam maior favorabilidade à ocorrência de movimentos de vertente, como seria de esperar, são as classes côncavas e convexas, com especial destaque para as vertentes côncavas (PTV 1), as quais, em 30,07% da área de estudo, comportam 45,93% da área instabilizada, o que se justifica por estarem associadas a zonas de elevada concentração

de escoamento superficial e sub-superficial. A também elevada favorabilidade da classe de PTV convexo (PTV 3), fica a dever-se ao facto de estes perfis serem contíguos aos côncavos, sendo também afetados durante o processo de alargamento dos movimentos de vertente, aquando da sua ocorrência, ou ainda, segundo Bateira *et al.* (2011), devido à atividade retrogressiva dos movimentos de vertente.

ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO

Em Portugal, diversos autores (*e.g.* Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012) têm procedido ao cálculo das áreas de contribuição (ACT), apenas como meio de calcular um indicador da quantidade de água potencial no solo (inverso do *wetness index* - IWI). No entanto, alguns autores (Marques *et al.*, 2009b e Marques 2013) optaram por utilizar a própria área de contribuição como fator de predisposição, tendo obtido resultados muito satisfatórios, resultantes, de acordo com Marques (2013), da sua boa capacidade individual de discriminação entre áreas estáveis e instáveis e ao aparecimento de ferramentas para o seu cálculo automático, baseadas em algoritmos cada vez mais robustos.

No essencial, com a utilização da ACT como fator de predisposição pretende-se avaliar de forma indireta o modo como a disponibilidade de água num determinado ponto do terreno influencia a ocorrência de movimentos de vertente. Neste caso, uma maior área de contribuição reflete uma maior disponibilidade de água proveniente de escorrência superficial e sub-superficial.

O cálculo da área de contribuição para os fluxos de água num dado ponto do terreno é um bom indicador para a determinação do grau saturação relativa do solo e da escorrência superficial (Tarboton, 1997), sendo que a sua distribuição tem um significado importante a nível hidrológico, geomorfológico e geológico (Costa-Cabral e Bruges 1994 *in* Tarboton, 1997)

O primeiro e mais simples algoritmo desenvolvido para determinação das direções de fluxo, designado de D8, foi proposto por o'Callaghan e Mark (1984 *in* Tarboton, 1997). Tendo em conta uma unidade matricial centrada numa matriz de 3 x 3 unidades, o D8 consiste na transferência da totalidade do fluxo para apenas um dos oito pixéis vizinhos, na direção daquele que apresentar maior declive, o que, desde logo se constitui como uma grave limitação (Tarboton, 1997).

No intuito de ultrapassar as limitações do algoritmo D8, como a simplificação e concentração excessivas do fluxo de água, vários modelos alternativos foram propostos (e.g. método de Lea; modelo DEMON - *Digital Elevation Model Networks*; algoritmo D_{∞}) (Tarboton, 1997). De acordo com Sørensen *et al.* (2006), a escolha do método irá depender do objetivo do trabalho e das características do terreno da área de estudo.

Uma das alternativas mais bem conseguidas (Sørensen *et al.*, 2006), é o algoritmo D_{inf} (ou D_{∞}), proposto por Tarboton (1997), que permite que o fluxo de água seja escoado em múltiplas direções. Este algoritmo, considera também uma unidade matricial centrada numa matriz de 3 x 3 unidades, mas na determinação da direção de maior declive na vertente, com base em facetas triangulares, permite uma distribuição proporcional do fluxo para cada uma das duas células vizinhas, tendo em conta a proximidade à direção de maior declive e as respetivas relações angulares (Sørensen *et al.*, 2006).

No entanto o algoritmo D_{inf} também não é perfeito, já que provoca a dispersão da área de acumulação de forma inconsistente com o que se verifica fisicamente, adulterando a área da bacia que drena para uma determinada célula (Tarboton, 1997).

Na figura 5.11 é apresentado um esquema concetual do modo de funcionamento dos algoritmos D8 (e.g. Oliveira, 2012) e D_{inf} (e.g. Garcia, 2012), onde se ilustram as diferenças operacionais entre os dois algoritmos, em termos da determinação da migração do fluxo entre uma célula e as células vizinhas.

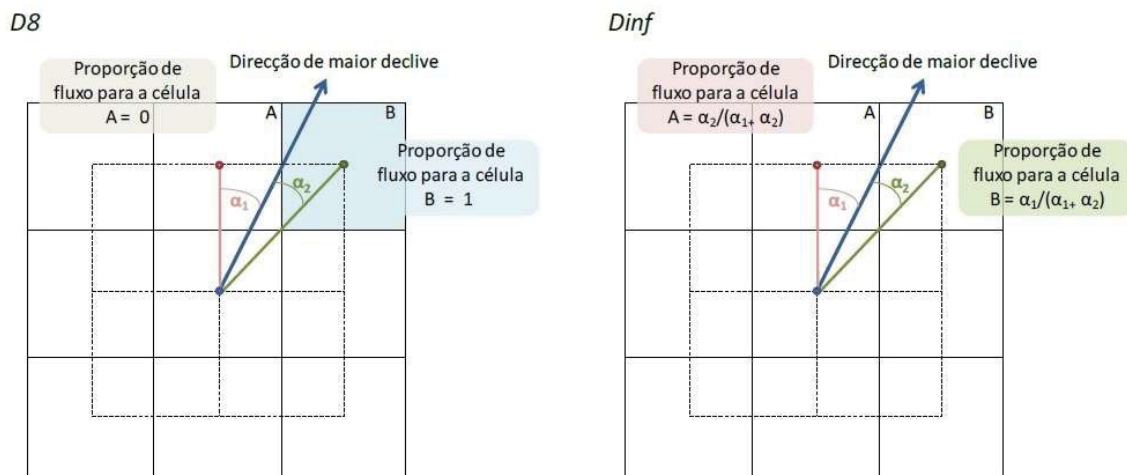


Figura 5.11 - Esquema conceitual dos algoritmos D8 e D_{inf} na determinação das direções de fluxo, para o cálculo da área de contribuição (adaptado de Tarboton, 1997 e de Tarboton e Mohammed, 2010).

Neste trabalho, para a obtenção da ACT, mais concretamente para a determinação das direções dos fluxos, optou-se pela utilização do algoritmo D_{inf}, por forma a evitar as desvantagens associadas aos algoritmos de base unidirecional (e.g. D8), acompanhando a opção tomada, relativamente a este aspeto, na maioria dos trabalhos produzidos em Portugal (e.g. Marques *et al.*, 2009b; Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Marques, 2013). Para o seu cálculo, utilizou-se a extensão *TauDEM 5.1 (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)* (Tarboton e Mohammed, 2013), desenvolvida para o software ArcGis 10.1, tendo por base um MNE corrigido, de forma a eliminar as depressões artificiais da topografia (*sinks*), evitando a interferência com a determinação das direções de fluxos e, posteriormente com o cálculo das áreas de contribuição. Como resultado, obteve-se uma estrutura matricial de 5 m x 5 m.

No que se refere à categorização da ACT (figura 5.12), tendo em conta que se trata de uma variável originalmente contínua, adotou-se a opção de classificação de Marques (2013), definindo-se nove classes, apresentadas na tabela 5.11, em que a amplitude de cada classe corresponde ao dobro da amplitude da classe antecedente, uma vez que a distribuição das frequências, em relação a este fator, é muito assimétrica, sendo muito elevada para as áreas de contribuição pequenas e muito reduzida para as maiores.

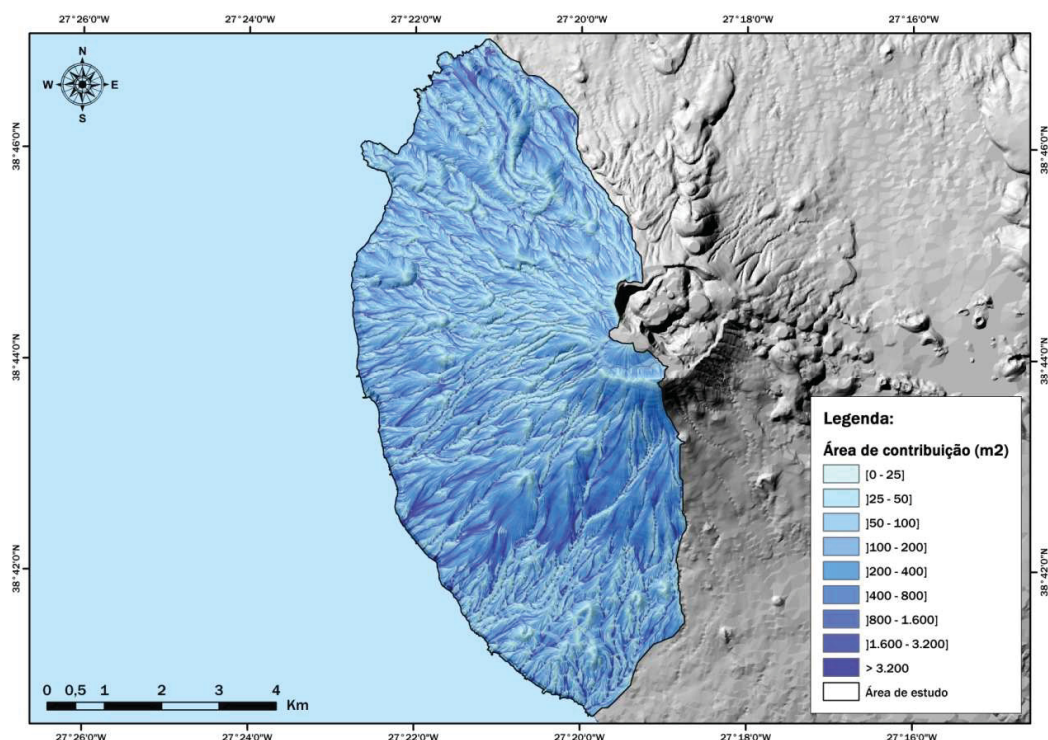


Figura 5.12 - Mapa da área de contribuição (ACT) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Tabela 5.11 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de área de contribuição (ACT). A negrito estão assinaladas as classes com valores de F_i mais elevados.

Sigla	Classe (m ²)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
ACT 1	[1-25]	275.540	15,09	11,62	0,00074
ACT 2	]25-50]	295.126	16,16	16,30	0,00097
ACT 3	]50-100]	391.594	21,44	19,60	0,00088
ACT 4	]100-200]	345.596	18,92	20,80	0,00106
ACT 5	]200-400]	229.165	12,55	14,93	0,00114
ACT 6	]400-800]	121.254	6,64	4,44	0,00064
ACT 7	]800-1600]	61.365	3,36	4,27	0,00122
ACT 8	]1600-3200]	32.839	1,80	3,36	0,00180
ACT 9	> 3200	73.922	4,05	4,67	0,00111
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

Como se pode observar na tabela 5.11, a esmagadora maioria da área de estudo (84,16%) é composta por unidades de terreno com área de contribuição até 400 m², sendo que as classes mais representativas são a ACT 3 (21,44%) e ACT 4 (18,92%). As

restantes classes (ACT 6 a ACT 9) têm uma expressão mais reduzida, representando frações do terreno com áreas semelhantes.

Em termos de favorabilidade para a ocorrência de movimentos de vertentes, as classes que representam unidades de terreno com maior área de contribuição (ACT 7, ACT 8 e ACT 9), são as que apresentam maiores valores, o que era expetável, já que este é um indicador de saturação de água no solo, sendo que quanto maior a saturação, maior a propensão para a instabilidade.

O facto de não haver uma variação linear do valor de favorabilidade (apesar de isso se verificar em algumas classes) e tendo em conta o facto de algumas classes intermédias (ACT 4 e ACT 5) apresentarem também valores relativamente elevados, indicia uma maior influência de outros fatores de predisposição (*e.g.* declive) para a ocorrência de movimentos de vertente, do que aquela que é exercida pela área de contribuição.

INVERSO DO WETNESS INDEX

O conteúdo de água no solo, ou o respetivo grau de saturação, são parâmetros com influência na propensão para a ocorrência de movimentos de vertente (Amaral, 2010 *in* Marques, 2013, Garcia, 2012).

Dada a inconsistência temporal, o conhecimento limitado dos padrões espaciais de áreas saturadas (Güntner *et al.*, 2004) e a escassez de dados rigorosos em áreas extensas relativos aos valores do conteúdo de água dos solos (Manfreda *et al.*, 2014), uma vez que a topografia influencia a distribuição da humidade no solo e condiciona os fluxos de água subterrânea (Sørensen *et al.*, 2006), é frequente recorrer-se à utilização de índices topográficos para descrever os padrões de humidade do solo (Moore, 1991) e para prever fluxos de água (Ali *et al.*, 2013).

O *wetness index* (WI) é um índice topográfico, desenvolvido por Beven e Kirkby (1979), normalmente utilizado para quantificar o controlo exercido pela topografia nos processos hidrológicos (Sørensen *et al.*, 2006) e que, com base nas condições topográficas, permite inferir o potencial de humificação do solo (Grabs *et al.*, 2009; Conoscenti *et al.*, 2016).

O WI relaciona a área de contribuição e o declive de um determinado ponto do terreno, através da seguinte expressão (Beven e Kirkby, 1979):

Equação 5.4:
$$WI = \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) = \ln\left(\frac{ACT}{\tan DEC}\right)$$

Onde a corresponde à área de contribuição de uma determinada célula (ACT) e β corresponde ao respetivo declive (DEC).

No entanto, à semelhança do que foi efetuado por diversos autores (*e.g.* Marques *et al.*, 2009b; Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012; Pereira *et al.*, 2012; Marques 2013), em estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, no presente trabalho, optou-se pela utilização do inverso do *wetness index* (IWI), uma vez que o WI gera impossibilidades matemáticas nos casos em que as áreas são planas, isto é, quando o declive de uma célula é igual a zero ($DEC = 0$; $\tan 0 = 0$).

Desta forma, o IWI , é calculado através da seguinte expressão:

Equação 5.5:
$$IWI = \frac{DEC}{ACT}$$

Estando calculados os valores de DEC e ACT , cujos métodos foram descritos anteriormente, recorreu-se à extensão *TauDEM 5.1*, desenvolvida para o software ArcGis 10.1, para o cálculo do IWI (figura 5.13), resultando numa estrutura matricial de 5 m x 5 m.

Os valores do IWI iguais ou próximos de zero, refletem uma maior concentração potencial de água, enquanto que valores mais elevados correspondem tendencial e progressivamente a uma maior escassez de água. Para unidades de terreno com ACT reduzida (*e.g.* $< 50 \text{ m}^2$) qualquer pequena variação no DEC faz aumentar o valor do IWI , enquanto que unidades de terreno com ACT elevadas (*e.g.* $> 1.600 \text{ m}^2$), podem manter valores de IWI baixos e, como tal, grande potencial de humidificação do solo, independentemente do seu declive.

Tendo em conta a natureza contínua da variável, procedeu-se à sua categorização, estabelecendo-se dez classes (tabela 5.12), cujos intervalos se basearam numa progressão logarítmica de base 10, considerando os quartis para os incrementos

logarítmicos, uma vez que a distribuição de frequências, em relação a este fator, é muito assimétrica, sendo muito elevada para valores de IWI próximos de zero e muito reduzida para os maiores valores.

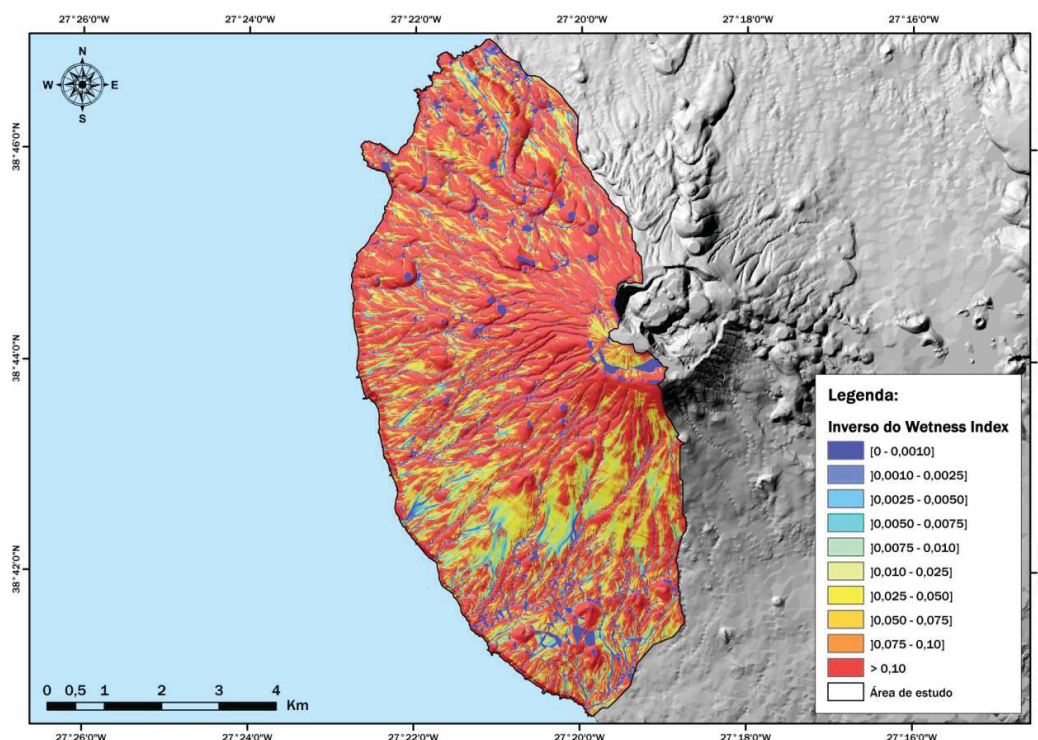


Figura 5.13 - Mapa do inverso do *wetness index* (IWI) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Tendo em conta os resultados apresentados na tabela 5.12, contata-se que a classe IWI 1, onde se incluem as unidades de terreno com maior potencial de humificação/saturação do solo, é aquela que apresenta o valor mais baixo de favorabilidade à ocorrência de movimentos de vertente, devendo-se ao facto de a maioria das unidades de terreno contidas naquela classe apresentarem valores de declive baixo, onde a densidade de movimentos de vertente é reduzida.

Tabela 5.12 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i) por classe de inverso do *wetness index* (IWI). A negrito está assinalada a classe com valor de F_i mais elevado.

Sigla	Classe	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
IWI 1	[0,0000-0,0010]	110.103	6,03	0,74	0,00012
IWI 2	]0,0010-0,0025]	26.754	1,46	1,20	0,00078
IWI 3	]0,0025-0,0050]	32.069	1,76	1,03	0,00056
IWI 4	]0,0050-0,0075]	28.169	1,54	0,46	0,00028
IWI 5	]0,0075-0,0100]	26.333	1,44	0,74	0,00049
IWI 6	]0,0100-0,0250]	142.889	7,82	2,74	0,00034
IWI 7	]0,0250-0,0500]	201.226	11,02	4,73	0,00041
IWI 8	]0,0500-0,0750]	157.431	8,62	2,34	0,00026
IWI 9	]0,0750-0,1000]	123.081	6,74	1,94	0,00028
IWI 10	> 0,1000	978.346	53,57	84,10	0,00151
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

Apesar de os valores da favorabilidade não variarem linearmente com o aumento dos valores do IWI, na verdade, a classe IWI 10 (classe com valores mais elevados) é aquela que apresenta maior favorabilidade, destacando-se claramente das restantes, sendo que em pouco mais de metade da área de estudo (53,57%), acolhe 84,10% da área instabilizada. As unidades de terreno pertencentes a esta classe, são caracterizadas por maior escassez potencial de água no solo, o que lhes deveria conferir maior estabilidade. Assim, a elevada favorabilidade para ocorrência de movimentos de vertente deverá estar associada a uma pequena área de contribuição que faz com que os respetivos valores de favorabilidade, como anteriormente referido, sejam sensíveis mesmo a pequenas variações do declive da vertente.

5.4.2.2 FATORES DE PREDISPOSIÇÃO GEO-AMBIENTAIS - NÃO DERIVADOS DO MNE

PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA

A precipitação é normalmente considerada como um fator desencadeante de movimentos de vertente (*e.g.* Fuyii, 1969; Carrara *et al.*, 1991, Alleoti e Chowdhury, 1999; Carrara, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999; Dai e Lee, 2001; Schuster e Wieczorek, 2002; Crosta e Frattini, 2003; Guzzetti, 2005; Lan *et al.*, 2005; Zêzere *et al.*, 2005a; Fell *et al.*, 2008; van Westen *et al.*, 2008; Tsai e Chen, 2010; Sterlacchini *et al.*, 2011; Djuric *et al.*, 2015; Shahabi e Hashim, 2015). Isto é, tal como referido anteriormente, a precipitação, especialmente a precipitação intensa, bem como os sismos, a fusão rápida das neves, as erupções vulcânicas, a erosão costeira ou de cursos de água e a rotura de barragens naturais, são tidos como estímulos externos que causam uma resposta imediata ou quase imediata sob a forma de movimentos de vertente, pelo rápido aumento das tensão tangencial e/ou pela redução da resistência ao corte dos terrenos.

Geralmente, a precipitação não é utilizada como fator de predisposição em trabalhos de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente, devido à sua relação com outros fatores de predisposição frequentemente utilizados, como é o caso da altitude, tendo em conta em conta a obrigatoriedade de independência condicional entre os fatores de predisposição (ver ponto 5.4.3), inerente às análises estatísticas desenvolvidas em trabalhos desta natureza (Shahabi e Hashim, 2015).

No entanto, nos últimos anos, diversos autores (*e.g.* Feizizadeh e Blaschke, 2013; Shahabi *et al.*, 2013; Mahalingam e Olsen, 2015; Shahabi e Hashim, 2015; Wang *et al.*, 2015) têm optado pela utilização da precipitação como fator de predisposição, em detrimento de outros parâmetros relacionados (*e.g.* altitude), obtendo excelentes resultados em termos de capacidade de discriminação da instabilidade do terreno.

A título de exemplo, Shahabi e Hashim (2015), num trabalho de avaliação comparativa de três métodos estatísticos de análise da suscetibilidade a movimentos de vertente, utilizaram a média da precipitação anual acumulada como fator de predisposição, tendo concluído que, de entre as dez variáveis contempladas, a precipitação se destacava como o fator de predisposição mais importante, em termos de influência para a ocorrência de movimentos de vertente.

Neste trabalho, utilizou-se como variável representativa da precipitação, enquanto fator de predisposição, a média da precipitação anual acumulada (PAA) dos últimos 30 anos para a área de estudo. O mapa de precipitação (figura 5.14) foi preparado utilizando dados cedidos pelo Projeto CLIMAAT (2016), originalmente em formato matricial de 100 m x 100 m (10.000 m²).

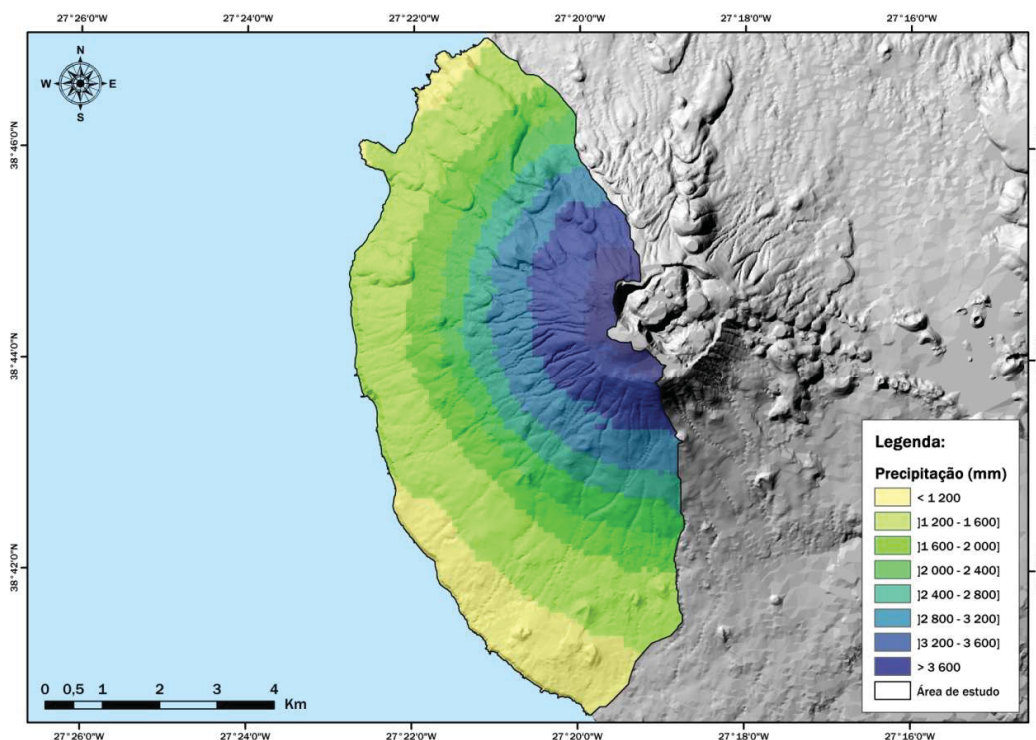


Figura 5.14 - Mapa de precipitação anual acumulada (PAA) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

O mapa de PAA inicialmente preparado, correspondente a uma variável contínua, foi reclassificado em oito classes, listadas na tabela 5.13, considerando uma unidade matricial de 5 m x 5 m, de forma a manter a coerência espacial com a dimensão e limites espaciais dos restantes fatores de predisposição utilizados.

Tabela 5.13 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de precipitação anual acumulada (PAA). A negrito estão assinaladas as classes com valores de F_i mais elevados.

Sigla	Classe (mm)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
PAA 1	< 1200	236.716	12,96	9,46	0,000701
PAA 2	]1200-1600]	553.945	30,33	72,31	0,002288
PAA 3	]1600-2000]	253.220	13,86	0,06	0,000004
PAA 4	]2000-2400]	180.997	9,91	0,06	0,000006
PAA 5	]2400-2800]	159.216	8,72	1,65	0,000182
PAA 6	]2800-3200]	195.694	10,71	7,75	0,000695
PAA 7	]3200-3600]	193.221	10,58	7,86	0,000714
PAA 8	> 3600	53.392	2,92	0,85	0,000281
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

Como se pode verificar na tabela anterior, as classes predominantes em termos de área ocupada, correspondentes também às classes com valores de favorabilidade mais elevados, são as PAA 1, PAA 2, PAA 6, PAA 7 e PAA 8.

Genericamente, a propensão para a ocorrência a movimentos varia na razão direta dos valores de precipitação (e outras variáveis correlacionadas, como a altitude), o que justifica valores elevados de favorabilidade para ocorrência de movimentos de vertente nas classes de maior precipitação (PAA 6 PAA 7 e PAA 8). A justificação para valores elevados de favorabilidade nas primeiras duas classes, onde os valores de precipitação são mais reduzidos, reside numa maior influência de outros fatores de predisposição em termos da distribuição espacial dos fenómenos de instabilidade.

Tal como referido para a distribuição dos valores de área instabilizada por classes de altitude (tabela 5.6), as classes PAA 1 e PAA 2 englobam toda a área costeira da zona de estudo (figura 5.14), marcada por declives elevados e por zonas descobertas (USO - uso do solo), sendo que esses fatores de predisposição à ocorrência de movimentos de vertente apresentam uma influência superior à que exerce a precipitação. Dada a considerável altura das arribas costeiras, grande parte da zona costeira pertencente à área de estudo apresenta níveis de precipitação enquadrados na classe PAA 2 (1200-1600 mm) e, como resultado, esta classe, representando apenas 30,33% da área de estudo, comporta 72,31% da área instabilizada, apresentando um valor de favorabilidade que se destaca nitidamente das restantes classes.

DISTÂNCIA AOS CURSOS DE ÁGUA

A distância aos cursos de água (DCA), determina, em metros, o afastamento das unidades matriciais aos cursos de água. Normalmente, a DCA não é utilizada em trabalhos de suscetibilidade realizados em Portugal. No entanto, segundo Marques (2013), a variável é utilizada como fator de predisposição em alguns trabalhos (*e.g.* Pachauri *et al.*, 1998; Dai *et al.*, 2001; Saha *et al.*, 2002), uma vez que a erosão fluvial na base dos taludes dos cursos de água e/ou a saturação promovida por esta proximidade pode promover o agravamento da estabilidade das vertentes.

Assim, com a utilização da DCA, pretende-se quantificar a influência da proximidade aos cursos de água na distribuição espacial dos movimentos de vertente, à semelhança do realizado em outros trabalhos no Arquipélago dos Açores, por Marques *et al.* (2009b) e Marques (2013). Por outro lado, essa análise permitirá, posteriormente, comparar o comportamento desta variável em diferentes territórios insulares, determinando a adequabilidade da sua utilização em futuras investigações desta natureza nos Açores.

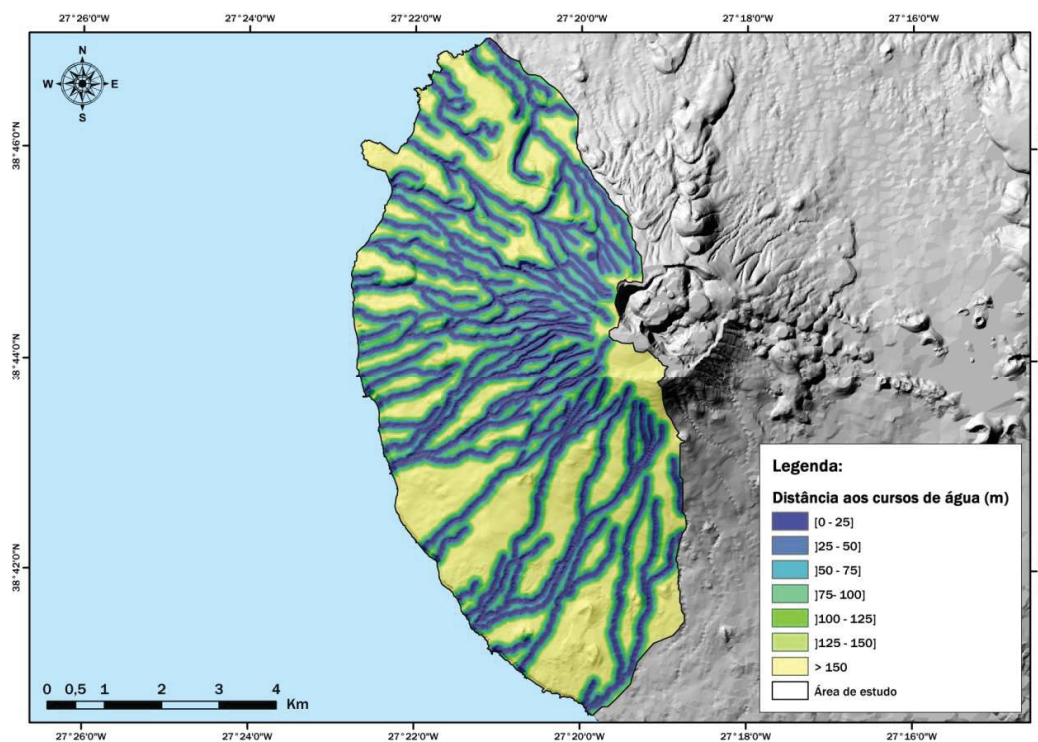


Figura 5.15 - Mapa da distância aos cursos de água (DCA) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

O mapa da DCA (figura 5.15) foi obtido de forma automática, através da extensão *Spatial Analyst Tools* ("euclidean distance"), do software ArcGis 10.1., delimitando áreas com distância pré-definida aos cursos de água (tabela 5.14). Tendo em conta o procedimento efetuado, o resultado foi obtido em formato vetorial, tendo-se convertido posteriormente numa estrutura matricial de 5 m x 5 m, de modo a manter a coerência espacial com os limites ortogonais dos restantes fatores de predisposição.

Tabela 5.14 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de distância aos cursos de água (DCA). A negrito estão assinaladas as classes com valores de F_i mais elevados.

Sigla	Classe (m)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
DCA 1	[0-25]	328.204	17,97	29,52	0,00158
DCA 2	]25-50]	275.925	15,11	10,71	0,00068
DCA 3	]50-75]	243.157	13,31	7,07	0,00051
DCA 4	]75-100]	201.587	11,04	5,81	0,00051
DCA 5	]100-125]	159.420	8,73	11,79	0,00130
DCA 6	]125-150]	123.157	6,74	12,08	0,00172
DCA 7	> 150	494.951	27,10	23,02	0,00082
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

Tal como se pode verificar na tabela 5.14, as classes com maiores valores de favorabilidade são as DCA 1, DCA 5 e DCA 6.

De facto, era expetável que a classe DCA 1, dada a maior proximidade aos cursos de água e a maior saturação dos solos daí resultante, apresentasse uma favorabilidade para ocorrência de movimentos de vertente mais elevada, comportando a maioria da área instabilizada, tal como se verifica neste estudo, onde a respetiva área instabilizada é superior à das restantes classes.

Relativamente as classes DCA 5 e DCA 6, caracterizadas por um maior afastamento dos cursos de água, os elevados valores de favorabilidade ficarão a dever-se, certamente, à influência de outros fatores de predisposição mais influentes em termos do condicionamento da ocorrência de movimentos de vertente (*e.g.* declive, uso do solo, geologia).

DENSIDADE DE DRENAGEM

A densidade de drenagem (DDR) equivale à razão entre o comprimento dos cursos de água e uma determinada área, expressa normalmente em km/km^2 ou em m/m^2 .

A sua utilização como fator de predisposição pressupõe que quanto maior for a densidade de drenagem, menor será a infiltração e, logo, maior será o escoamento superficial (Nagajaran *et al.*, 2000).

À imagem do que acontece com a DCA, a DDR não costuma ser utilizada como fator de predisposição em trabalhos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente realizados em Portugal. No entanto, optou-se pela sua utilização, seguindo novamente a opção tomada por Marques *et al.* (2009) e Marques (2013), nos trabalhos realizados na ilha de São Miguel, no Arquipélago dos Açores, tendo em conta o respetivo poder de discriminação entre unidades de terreno estáveis e instáveis, avançado pelos autores.

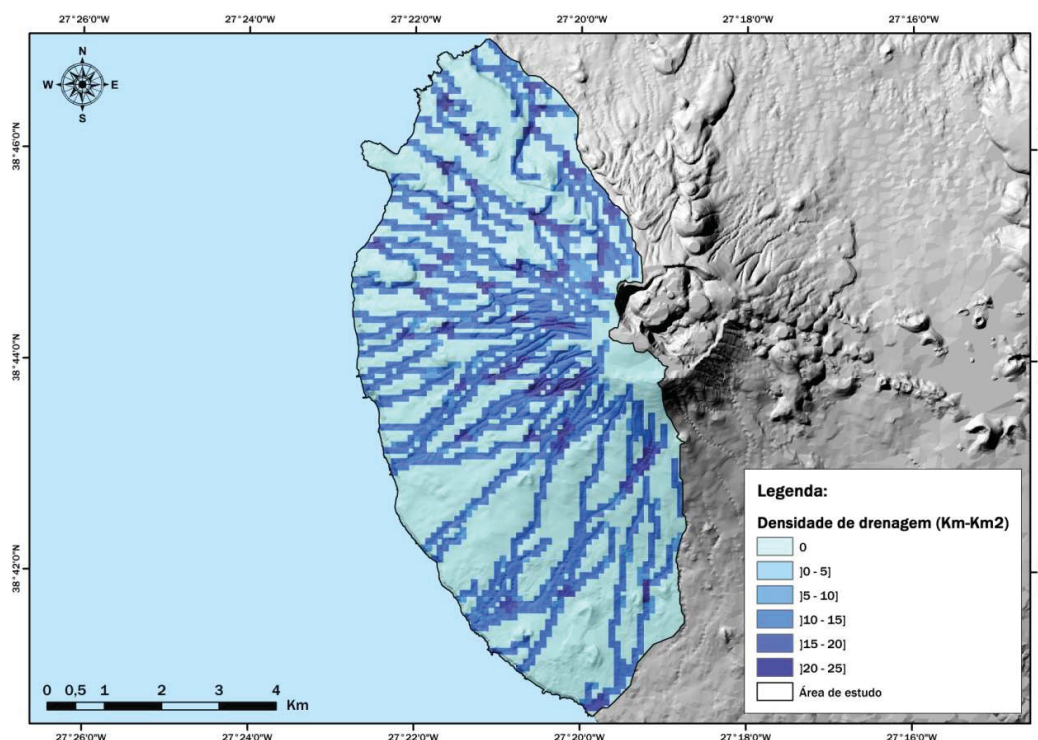


Figura 5.16 - Mapa da densidade de drenagem (DDR) da área de estudo, apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

O mapa de DDR (figura 5.16) foi obtido de forma automática, através da extensão *Conversion Tools*, do software ArcGis 10.1, tendo como área de referência uma unidade

matricial de 100 m x 100 m. O resultado obtido correspondeu a uma variável contínua, pelo que se procedeu à sua reclassificação (tabela 5.15), obtendo uma estrutura matricial de 5 m x 5 m, mantendo a coerência espacial com os limites ortogonais dos restantes fatores de predisposição.

Tabela 5.15 - Freqüências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i), por classe de densidade de drenagem (DDR). A negrito estão assinaladas as classes com valores de F_i mais elevados.

Sigla	Classe (km/km ²)	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
DDR 1	0	1.010.893	55,35	58,97	0,00102
DDR 2	]0-5]	4.027	0,22	0,00	0,00000
DDR 3	]5-10]	74.639	4,09	5,24	0,00123
DDR 4	]10-15]	630.154	34,50	33,33	0,00093
DDR 5	]15-20]	74.554	4,08	0,91	0,00021
DDR 6	]20-25]	32.134	1,76	1,54	0,00084
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

De acordo com os valores constantes na tabela anterior, é possível verificar que prevalecem as classes com densidade de drenagem nula (DDR 1) e com densidade de drenagem compreendida entre 5 e 10 km/km² (DDR 3), sem que, aparentemente, haja uma relação causal entre a maior ou menor densidade de drenagem. Além disso, em termos da favorabilidade à ocorrência de movimentos, verifica-se uma grande homogeneidade de valores entre as classes, sem destaques significativos, o que parece indicar que este fator de predisposição, por si só, poderá apresentar uma fraca capacidade de discriminação do território em termos de instabilidade.

GEOLOGIA

A geologia permite identificar as formações geológicas mais propícias ao desenvolvimento de instabilidade (Pereira, 2009), sendo que o seu papel, enquanto fator de predisposição, assume grande relevância em estudos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (Carrara *et al.*, 1988 *in* Carrara, 1991; Dai e Lee, 2002; Conoscenti *et al.*, 2016).

Segundo Guillard e Zêzere (2012), a geologia caracteriza direta ou indiretamente as propriedades mecânicas do substrato rochoso, constituindo-se assim como uma boa forma de representação da resistência ao cisalhamento, que controla diretamente a estabilidade das vertentes.

As características dos materiais do substrato rochoso (*e.g.* coesão; ângulo de atrito interno; plasticidade) influenciam a possibilidade de ocorrência de movimentos de vertente, aquando de um evento desencadeante (Garcia, 2012).

Neste trabalho, para a definição da geologia (GEO) como fator de predisposição, foi utilizada a carta geológica da ilha Terceira, da autoria de Zbyszewski *et al.* (1971), elaborada à escala de 1:50.000, decorrente de um levantamento dos depósitos superficiais e que teve por base, fundamentalmente, critérios de natureza petrográfica, isto é, uma descrição das rochas e a análise das suas características estruturais, mineralógicas e químicas. Segundo França *et al.* (2003), o primeiro levantamento geológico da ilha Terceira que estabeleceu a relação estratigráfica entre os diferentes depósitos aí existentes deve-se a Self (1973).

Após a digitalização e georreferenciação da referida carta, procedeu-se à vectorização dos 166 polígonos representativos da geologia da área de estudo, distribuídos em cinco classes (tabela 5.16), diretamente correspondentes às classes da carta geológica, obtendo-se dessa forma o mapa geológico da área de estudo, apresentado na figura 5.17.

Por forma a manter a coerência espacial com os limites ortogonais dos restantes fatores de predisposição, do processo de conversão de formato vetorial para formato matricial, resultou uma estrutura matricial de 5 m x 5 m.

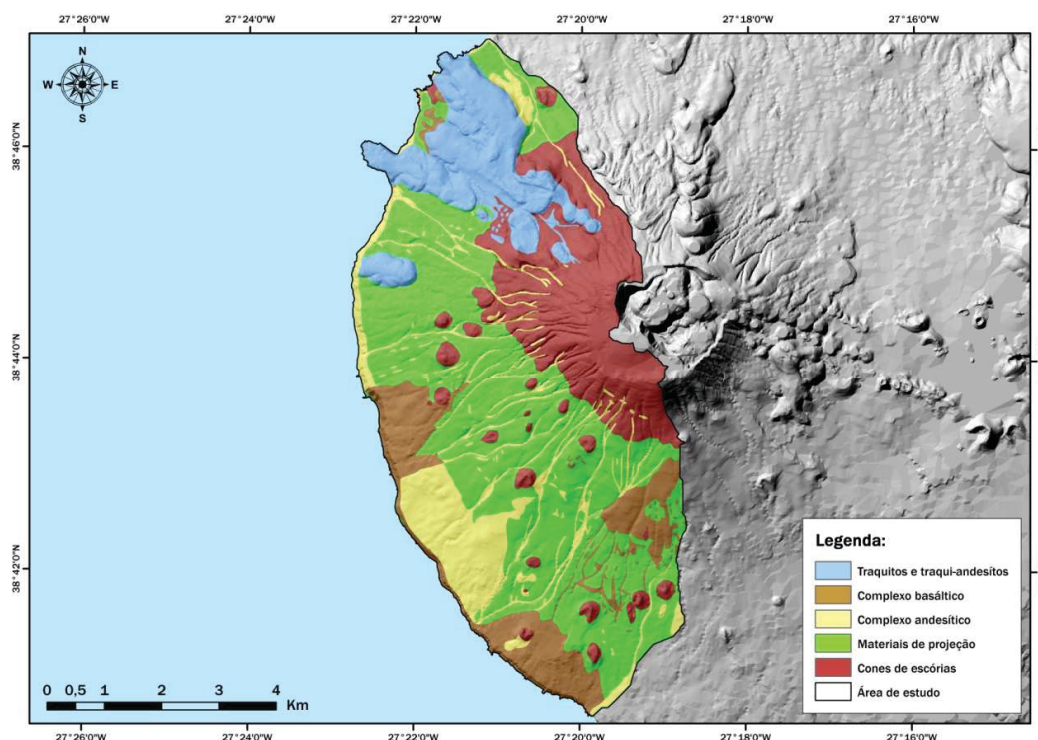


Figura 5.17 - Mapa geológico (GEO) da área de estudo (adaptado de Zbyszewski *et al.*, 1971), apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

De acordo com a informação presente na tabela 5.16, é possível constatar que a zona de estudo é dominada por materiais de projeção (40,54%) e cones de escórias (21,04%). No entanto, apesar de, em conjunto, as classes GEO 4 e GEO 5 representarem quase dois terços da área de estudo (61,58%), comportam menos de um quinto da área instabilizada (19,71%), apresentando, por isso, valores de favorabilidade à ocorrência de movimentos de vertentes diminutos.

Tabela 5.16 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i) por classe de geologia (GEO). A negrito estão assinaladas as classes com valores de F_i mais elevados.

Sigla	Classe	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
GEO 1	Traquitos e traqui-andesitos	235.485	12,89	0,80	0,00006
GEO 2	Complexo basáltico	212.853	11,65	13,39	0,00110
GEO 3	Complexo andesítico	253.289	13,87	66,10	0,00457
GEO 4	Materiais de projeção	740.492	40,54	8,09	0,00019
GEO 5	Cones de escórias	384.282	21,04	11,62	0,00053
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

As classes que apresentam valores de favorabilidade mais elevados são as classes GEO 2 e GEO 3, correspondentes a complexos basálticos e complexos andesíticos, respetivamente. O maior destaque, neste caso, vai para a classe GEO 3, tendo em conta que, representando apenas 13,87% da área de estudo, inclui sensivelmente dois terços da área instabilizada (66,10%), o que se deverá, certamente, ao facto de a distribuição das unidades de terreno contidas nesta classe se verificar ao longo de grande parte da zona costeira da área de estudo, onde os declives são muito acentuados, e ao longo de linhas de água muito encaixadas, com taludes constituídos por materiais pouco consistentes (*e.g.* depósitos de pedra-pomes), com maior propensão para a ocorrência de movimentos de vertentes

USO DO SOLO

Segundo Hervás *et al.* (2003), o aumento do número de desastres naturais está relacionado com um incorreto planeamento do uso do solo, sendo que este representa uma das variáveis, à escala humana, mais suscetível de sofrer alterações significativas. Assim, tendo em conta que os mapas de perigosidade e de risco são gerados para o futuro, é importante que sejam equacionadas as futuras alterações do uso do solo, através da modelação de diferentes cenários (van Westen *et al.*, 2008).

O uso do solo (USO) é uma das variáveis mais utilizadas em trabalhos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, nomeadamente em Portugal (*e.g.* Marques *et al.*, 2009b e 2015; Pereira, 2009; Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012; Pereira *et al.*, 2012; Marques 2013), devido à influência que pode exercer sobre as condições hidrológicas do terreno e na resistência dos solos e rochas. De acordo com Dai e Lee (2002) e Garcia (2012), esta variável é utilizada como um indicador indireto de algumas características que podem condicionar a ocorrência de movimentos de vertente, quer ao nível de processos mecânicos (*e.g.* reforço do substrato por raízes), quer ao nível de processos hidrológicos (*e.g.* diminuição da humidade no solo por evapotranspiração; influência na condutividade hidráulica).

Segundo Dai e Lee (2002), diversas investigações comprovam que o coberto vegetal tem um efeito importante na estabilidade das vertentes. Esta posição é reforçada por Guillard e Zêzere (2012), que afirmam que as vertentes com vegetação mais densa e com raízes mais profundas tendem a ser mais estáveis do que aquelas onde a vegetação

é escassa ou ausente. Algumas práticas agrícolas, como por exemplo os terraços, podem também auxiliar na estabilização das vertentes (Pereira, 2009).

Neste trabalho, o mapa de uso do solo (figura 5.18) foi adaptado da Carta de Ocupação do Solos da Região Autónoma dos Açores (SRAM, 2007), elaborada à escala 1:30.000, com recurso a unidades matriciais de 30 m x 30 m. A Carta de Ocupação do Solo dos Açores (COSAçores) foi elaborada pela Direção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, através do Projeto “*Sinergia e Cooperação na Gestão do Solo da Região Macaronésia*” (SUEMAC), no âmbito do programa comunitário INTERREG III-B Açores-Madeira-Canárias.

Foram consideradas as seis classes (tabela 5.17) existentes na área de estudo, das oito originalmente definidas na carta para a totalidade da ilha Terceira. Por forma a manter a coerência espacial com os limites ortogonais dos restantes fatores de predisposição, anteriormente descritos, procedeu-se à respetiva conversão para unidades matriciais de 5 m x 5 m.

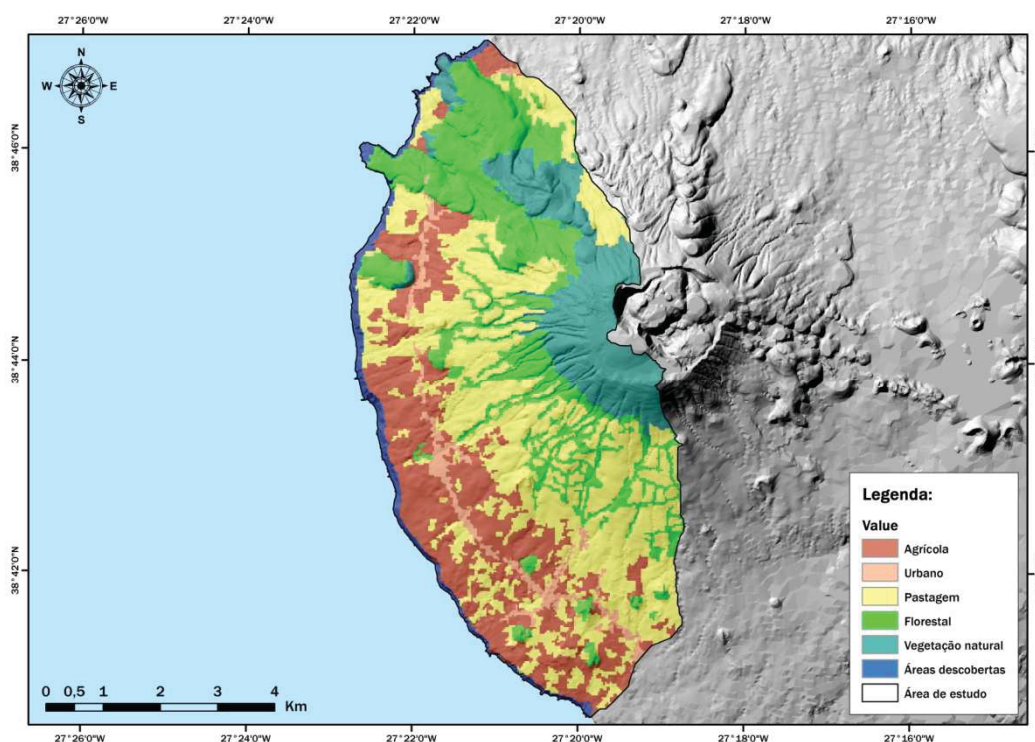


Figura 5.18 - Mapa de uso do solo (USO) da área de estudo (adaptado de SRAM, 2007), apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Como se pode observar na tabela 5.17, os usos do solo predominantes na área de estudo são pastagem (USO 3; 36,29%), florestal (USO 4; 22,18%) e agrícola (USO 1; 21,55%). Apesar da maior expressão dos referidos usos, que no seu conjunto englobam 80,02% da área de estudo, essas classes apenas compreendem, no total, 14,76% da área instabilizada.

A classe USO 1 (agrícola), é dominada por culturas arvenses (*e.g.* milho, ervilhas), hortícolas (*e.g.* alface, tomate), florícolas (*e.g.* próteas) e ainda por pomares (*e.g.* laranjeiras, castanheiros, bananeiras) e vinhas (Mendonça, 2012).

O classe de uso urbano (USO 2), é pouco expressiva, representando apenas 3,43% da zona de estudo, cingindo-se essencialmente à zonas habitacionais/centro populacionais das freguesias de Santa Bárbara, Doze Ribeiras e Serreta. Nesta classe não se verifica qualquer ocorrência de fenómenos de instabilidade.

As pastagens (USO 3), que ocupam a maioria da área de estudo, em baixa altitude (<250 m) são constituídas por espécies forrageiras perenes como o *Lolium perenne* L. (azevém) e espécies anuais como o *Lolium multiflorum* Lam. (erva castelhana) destinadas ao pastoreio de gado bovino ou corte para ensilagem ou feno no verão. Em média altitude (250 m a 450 m), além do *Lolium perenne* L., a pastagem é dominada também por *Trifolium repens* L. (trevo branco). Em grandes altitudes (> 450 m) encontram-se maioritariamente "gramíneas secundárias" (introduzidas) e leguminosas (*e.g.* *Holcus lanatus* L., *Poa trivialis* L., *Agrostis castellana* L., *Anthoxanthum odoratum* L., *Poa annua* L., *Trifolium repens* L. e *Lotus uliginosus* Schkuhr) (Gomes, 2010), onde se integram os sistemas de produção mais extensivos, como é o caso de bovinos de carne e o gado bravo.

A classe USO 4 (Florestal), ocupa maioritariamente unidades de terreno situadas em taludes de cursos de água declivosos e outras áreas pouco propícias para usos de pastagem ou cultivo, sendo aproveitadas para introdução de espécies de árvores de crescimento rápido, para abastecimento à indústria madeireira, como criptomérias (*Cryptomeria japonica* D. Don).

A classe USO 5 (vegetação natural), que ocupa 13,45% da área de estudo, é composta essencialmente por matos de *Calluna* e *Juniperus*, onde as espécies dominantes são a rapa (*Calluna vulgaris* L. (Hull)) e o cedro-do-mato (*Juniperus brevifolia* (Seub.)

Antoine), e espécies de vegetação arbustiva, como o azevinho (*Ilex perado* Aiton ssp. *azorica* (Loes.) Tutin), o louro-da-terra (*Laurus azorica* (Seub.) Franco), a uva-da-serra (*Vaccinium cylindraceum* Sm.), a urze (*Erica azorica* Hochst.) e o folhado (*Viburnum treleasei* Gand.) entre outras (Dias, 1996; Dias e Melo, 2010).

Tabela 5.17 - Frequências relativas de área e área instabilizada e valores de favorabilidade (F_i) por classe de uso do solo (USO). A negrito está assinalada a classe com valor de F_i mais elevado.

Sigla	Classe	N.º Pixéis	Área (%)	Área Instabilizada (%)	F_i
USO 1	Agrícola	393.646	21,55	2,28	0,00010
USO 2	Urbano	62.621	3,43	0,00	0,00000
USO 3	Pastagem	662.864	36,29	5,41	0,00014
USO 4	Florestal	405.089	22,18	7,07	0,00031
USO 5	Vegetação Natural	247.289	13,54	8,32	0,00059
USO 6	Áreas Descobertas	54.892	3,01	76,92	0,02429
Total		1.826.401	100% (45.660.025 m ²)	100% (43.875 m ²)	

Em termos da favorabilidade para ocorrência de movimentos de vertente, como se pode verificar na tabela anterior, o maior destaque vai para a classe USO 6, que representa as zonas descobertas, que ocupam apenas 3,01% da área de estudo, mas que contêm 76,92% da área instabilizada, apresentando por isso uma favorabilidade muito superior à das restantes classes. É de referir que grande parte das unidades de terreno pertencente a esta classe se referem a zonas de arribas costeiras e a taludes de linhas de água encaixados, onde os declives são acentuados e, logo, a densidade de movimentos de vertente é elevada.

Destaca-se ainda o USO 2, que engloba as zonas urbanas, onde, como referido anteriormente, não se verifica qualquer área instabilizada, apresentando, por isso, uma favorabilidade para ocorrência de movimentos de vertente nula.

As restantes classes apresentam valores de favorabilidade para ocorrência de movimentos de vertente relativamente baixos, comportando áreas de instabilidade reduzidas, indicando uma boa capacidade de estabilização do solo.

5.4.3 AVALIAÇÃO DA INDEPENDÊNCIA CONDICIONAL DOS FATORES DE PREDISPOSIÇÃO

A generalidade dos métodos estatísticos utilizados na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, onde se incluem os métodos bivariados, implicam o cumprimento de regras específicas, nomeadamente a salvaguarda da regra de independência condicional entre os fatores de predisposição utilizados na modelação (Bonham-Carter, 1994; Van Westen, 1993; Bonham-Carter e Agterberg 1999; Agterberg e Cheng, 2002; Thiery *et al.*, 2007; Blahut *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2012; Shahabi e Hashim, 2015).

A avaliação de independência condicional pode ser testada por pares de variáveis (*pairwise test*), ou mediante uma comparação geral, considerando todos os mapas preditores.

Em condições normais, muitas variáveis utilizadas como fatores de predisposição possuem algum grau de dependência condicional entre si (Blahut *et al.*, 2010) (*e.g.* declive e uso do solo; geologia e sistema de falhas; altitude e precipitação), sendo que a possibilidade de verificação de dependência condicional aumenta com o número de variáveis utilizada na modelação (Agterberg e Cheng, 2002; Sterlacchini *et al.*, 2011).

Segundo Agterberg e Cheng (2002), a maioria dos métodos estatísticos são sensíveis à violação da regra de independência condicional, tendo como consequência severa a redundância do modelo estatístico e sobrestimação (Agterberg e Cheng, 2002) ou subestimação dos resultados preditivos, mais concretamente ao nível das probabilidades espaciais (Thiery *et al.*, 2007; Blahut *et al.*, 2010), pelo que a consideração de dois ou mais fatores de predisposição no modelo preditivo só deve ser equacionada se estes forem “aproximadamente” condicionalmente independentes (Agterberg e Cheng, 2002).

Contudo, na grande maioria dos trabalhos a regra de independência condicional não é satisfeita, sendo, na prática, difícil de evitar a sua violação, pelo que importa assim avaliar cuidadosamente o significado dessa violação nos resultados finais (Bonham-Carter e Agterberg 1999).

Diversos métodos estatísticos simples têm sido utilizados como testes de avaliação da independência condicional (*e.g.* rácio de independência condicional; teste de independência condicional de Agterberg-Cheng; teste do chi-quadrado; tabelas de contingência; teste de Kolmogorov-Smirnov), estando devidamente descritos na

bibliografia disponível (*e.g.* Bonham-Carter, 1994; Bonham-Carter e Agterberg 1999; Agterberg e Cheng, 2002; Thiery *et al.*, 2007; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Pereira *et al.*, 2012), e que têm em conta a relação entre as frequências obtidas no modelo de suscetibilidade e as frequências observadas na realidade.

Neste trabalho, numa lógica de economia de tempo, optou-se pela não aplicação de qualquer teste de independência condicional, tal como outros autores (*e.g.* Pereira, 2009), tendo em conta, além do anteriormente exposto, os seguintes aspetos:

1) O facto de o Método do Valor Informativo ser pouco sensível à violação da independência condicional, já que não considera a auto-correlação entre as variáveis dependentes, ao contrário do que se verifica com utilização de outros métodos estatísticos, nomeadamente, multivariados, e uma vez que o produto da aplicação deste método não constitui uma probabilidade, pelo que a covariância dos fatores de predisposição não traz impactos significativos, tal como referido por Zêzere (2016).

2) O elevado número de fatores de predisposição utilizados, já que, de acordo com Oliveira (2012), a possibilidade de existência de dependência condicional se acentua com o aumento do número de fatores de predisposição utilizados, sendo que no "espaço físico real", os mesmos se condicionam uns aos outros, como referido por Marques (2013);

3) Os resultados obtidos por diversos autores (*e.g.* Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013; Pereira *et al.*, 2012), que apontam claramente para a inevitável existência de elevados níveis de dependência condicional entre os fatores de predisposição utilizados, nomeadamente os resultados de Pereira *et al.* (2012), que permitem concluir que a utilização de conjuntos de três ou mais fatores, leva a uma violação severa da regra da independência condicional;

4) O facto de na maioria dos trabalhos em que se verificam violações da regra da independência condicional (*e.g.* Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Pereira *et al.*, 2012; Marques, 2013) ser, mesmo assim, utilizada a totalidade dos fatores de predisposição, incluindo os que apresentam problemas de forte dependência condicional, para a modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente, com base no argumento avançado por alguns autores (*e.g.* Blahut *et al.*, 2010), que defendem que o comprometimento da referida regra é negligenciável, quando se pretende estabelecer a hierarquização da suscetibilidade para uma determinada área, como é o caso.

5.5 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO

Em geral, não é possível avaliar ou testar imediatamente a capacidade preditiva dos modelos de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente através dos meios científicos tradicionais (Guzzetti *et al.*, 1999), sendo que, teoricamente, a única forma de efetivamente validar os mapas de predição seria ao longo do tempo (Hutchinson, 1995), esperando para que o futuro aconteça (Guzzetti, 2005), num processo normalmente denominado de "esperar para ver" ("*wait and see*") (Soeters e van Westen, 1996).

No entanto, para a maioria das aplicações práticas, incluindo a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, os investigadores não se podem "dar ao luxo" de esperar que o futuro se materialize e que as predições se auto-validem, numa lógica muito semelhante à que subjaz à problemática das alterações climáticas globais.

Assim, torna-se necessária a criação de mecanismos e/ ou estratégias para avaliar a capacidade de predição dos modelos, antes de utilizá-los (Guzzetti, 2005). A questão da validação de modelos vai muito além da avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, abrangendo todo o campo de análise espacial de dados (Chung e Fabbri, 2003).

O processo de validação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente é essencial para avaliar a respetiva capacidade preditiva (Guzzetti *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2002; Fabbri *et al.*, 2003; Chung e Fabbri, 2003, 2005; Remondo *et al.*, 2003b; Zêzere *et al.*, 2004; Guzzetti, 2005; Begueria, 2006; Guzzetti *et al.*, 2006b; Carrara *et al.*, 2008; Frattini *et al.*, 2010; Sterlacchini *et al.*, 2011).

Segundo Begueria (2006), a validação refere-se à comparação entre as predições geradas pelos modelos desenvolvidos e as ocorrências verificadas no terreno, de forma a avaliar a precisão e capacidade de predição, permitindo a comparação de modelos e providenciando informação vital para o melhoramento dos próprios modelos.

Sem a realização de algum tipo de validação, os modelos preditivos e os respetivos mapas de suscetibilidade são totalmente inúteis e dificilmente terão alguma relevância científica (Chung e Fabbri, 2003). Segundo os autores anteriormente citados, a validação dos modelos permite uma interpretação significativa dos resultados preditivos relativamente à ocorrência de futuros movimentos de vertente, enquanto que Guzzetti *et al.* (2006b), argumentam que, tal como em qualquer outro tipo de previsões, a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente necessita de validação e que sem a devida

verificação dos resultados ou com a sua falsificação, se compromete a utilidade dos mapas de suscetibilidade.

A este respeito, Remondo *et al.* (2003b) referem que na ausência de uma validação independente, qualquer mapa de suscetibilidade deveria ser considerado apenas como uma hipótese não testada, por mais razoável que possa ser.

Chung e Fabbri (2003) acrescentam que, sem validação dos modelos, não é possível qualquer tipo de interpretação dos resultados, bem como avaliar o método utilizado ou os dados de entrada utilizados no modelo.

Apesar da importância fulcral e da pertinência do processo de validação dos modelos e mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente, o assunto não tem merecido a atenção necessária (Guzzetti *et al.*, 1999; Begueria, 2006; Frattini *et al.*, 2010), especialmente em comparação com o que acontece em relação à aplicação e desenvolvimento de metodologias para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente (Frattini *et al.*, 2010), sendo que, segundo Guzzetti *et al.* (2006b), a bibliografia referente à avaliação da capacidade preditiva dos modelos é escassa (*e.g.* Guzzetti, 1999; Ardrizzone *et al.*, 2002; Fabbri *et al.*, 2003; Chung e Fabbri, 2003; Remondo *et al.*, 2003b, 2005; Zêzere *et al.*, 2004; Brenning, 2005; Guzzetti, 2005; Begueria, 2006; Guzzetti *et al.*, 2006b; Carrara *et al.*, 2008; Frattini *et al.*, 2010; Sterlacchini *et al.*, 2011; Petschko *et al.*, 2014) e a validação do modelo raramente é executada.

No entanto, a avaliação da capacidade de predição dos modelos é sempre uma tarefa complexa (Carrara *et al.*, 2008), sendo que todas as abordagens conhecidas sofrem de problemas conceituais ou operacionais (Sterlacchini *et al.*, 2011)

Os mapas de avaliação da suscetibilidade são utilizados nos processos de tomada de decisão, em termos de ordenamento do território e de planeamento de emergência, pelo que a sua análise terá reflexos sociais e económicos (Frattini *et al.*, 2010). Segundo Hervás *et al.* (2003), as populações, as instâncias governamentais e as autoridades não estão devidamente consciencializadas em termos da suscetibilidade e consequências dos movimentos de vertente, pelo que, os mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente devem ser cuidadosamente analisados e criticados antes de serem entregues aos decisores e utilizadores finais (Sterlacchini *et al.*, 2011).

Desta forma, a validação do modelo permite estabelecer respetivo grau de confiança, tendo grande importância para a comunicação de resultados aos utilizadores finais,

normalmente não-especialistas, implicando uma adequabilidade às necessidades ou à finalidade (Begueria, 2006; Sterlacchini *et al.*, 2011).

Neste sentido, Guzzetti *et al.* (2006b) apontam que se os geomorfologistas não conseguirem definir a fidedignidade, robustez, grau de precisão e a capacidade preditiva dos modelos de avaliação da suscetibilidade, não haverá razão para os responsáveis pelo planejamento, decisores políticos ou outros gestores utilizarem essas previsões. A validação permitirá proceder à comunicação do significado dos resultados da previsão aos não-especialistas, servindo de base para as tomadas de decisão em termos de ordenamento do território e de uso do solo (Chung e Fabbri, 2003), enquanto a não validação terá, certamente, como consequência direta, a não consideração da informação produzida (van Den Eeckhaut *et al.*, 2010).

Segundo Guzzetti *et al.* (2006b), para estimar a qualidade da avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente, qualquer modelo deverá ser testado de modo a determinar os seguintes aspetos: 1) o grau de concordância entre as previsões do modelo e a distribuição de movimentos de vertente na área de estudo; 2) avaliar o papel dos fatores de predisposição utilizados no modelo e a capacidade do mesmo para lidar com alterações aos dados de entrada; 3) determinar o erro associado à estimativa da suscetibilidade obtida; e 4) testar a capacidade preditiva do modelo em relação à ocorrência de movimentos de vertente futuros.

A este respeito, Carrara *et al.* (2008) afirmam que a qualidade de um modelo de previsão pode ser expressa por três indicadores: capacidade de previsão, eficiência e fiabilidade.

De acordo com Frattini *et al.* (2010), a aceitação de qualquer modelo deve respeitar, pelo menos, três critérios: 1) a adequabilidade (conceitual e matemática) para descrever o comportamento dos fenómenos em causa; 2) a robustez relativamente a pequenas variações nos dados de entrada; e 3) a precisão na previsão dos dados observados.

De entre as estratégias desenvolvidas e utilizadas para a validação de modelos suscetibilidade a movimentos de vertente, destacam-se as seguintes:

1) Testes estatísticos (*e.g.* *Effectiveness Ratio* - Chung e Fabbri, 2003; Guzzetti, 2005; índice de densidade relativa - Baeza e Corominas, 2001; matrizes de confusão e contingência - Begueria, 2006; Frattini *et al.*, 2010; erro relativo - Thiery *et al.*, 2007;

2) Curvas ROC (*Receiver Operating Curve*) (e.g. Bergueria, 2006; Gorsevski *et al.*, 2006);

3) Curvas de Sucesso e Curvas de Predição (e.g. Chung e Fabbri, 1999, 2003 e 2005).

De acordo com Chung e Fabbri (2003), a melhor abordagem para assegurar o processo de validação é a divisão dos inventários de movimentos de vertente em duas populações distintas, utilizando uma para modelação e a outra para validação, já que a utilização dos movimentos de vertente de modelação para validar o modelo poderá conduzir a uma sobrestimação dos resultados de predição. Assim, a manutenção de uma população de movimentos de vertente independente daquela que foi utilizada para a construção do modelo, permite a validação e legitimação dos resultados, evitando o enviesamento positivo do modelo. Segundo os autores, sem a partição do inventário não é possível validar os resultados, pelo que os mesmos seriam inúteis em termos de interpretação.

A partição dos inventários de movimentos de vertente pode ser realizada de acordo com três critérios (Chung e Fabbri, 2003):

1) Partição espacial, dividindo a área de estudo em duas sub-áreas, garantindo uma representatividade homogénea das duas populações de movimentos de vertente em relação aos fatores de predisposição utilizados;

2) Partição temporal, dividindo os movimentos de vertente anteriores e posteriores a uma determinada data de referência. Esta é considerada a melhor técnica de partição, sendo a que mais se aproxima do método "esperar para ver";

3) Partição aleatória, gerando automaticamente duas populações a partir do inventário de movimentos de vertente. Esta corresponde à técnica de partição mais utilizada, provavelmente por ser a menos exigente ao nível da informação disponível.

Guzzetti *et al.* (2006b) propuseram um esquema para avaliar a qualidade dos modelos de avaliação da suscetibilidade e respetivos mapas de suscetibilidade, no qual, a partir do somatório de um conjunto de valores correspondentes a diversos critérios (tabela 5.18), é atribuída uma classificação qualitativa.

Tabela 5.18 - Critérios e níveis de qualidade de modelos e respetivos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente (adaptado de Guzzetti *et al.*, 2006b).

Critério	Nível de qualidade
Sem informação disponível, ou sem a realização de qualquer teste para determinação da qualidade e capacidade de predição do modelo de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente.	0
Estimativa do grau de ajuste do modelo (teste realizado utilizando o mesmo conjunto de movimentos de vertente utilizados para a criação do modelo).	1
Estimativa do erro associado ao valor de suscetibilidade em cada unidade de terreno (teste realizado utilizando o mesmo conjunto de movimentos de vertente utilizados para a criação do modelo).	2
Estimativa da capacidade preditiva do modelo (teste realizado utilizando um conjunto de movimentos de vertente independente do utilizado para a criação do modelo).	4

Como se pode verificar na tabela anterior, segundo a proposta apresentada por Guzzetti *et al.* (2006b), a qualidade dos modelos e subsequentes mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente pode variar entre 0, quando não cumpre qualquer critério de validação, e 7, quando se cumprem todos os critérios, acumulando desta forma os respetivos valores.

Neste trabalho, para a validação do modelo de suscetibilidade, optou-se pela utilização das Curvas de Sucesso (SRC's - *Sucess Rate Curves*) e Curvas de Predição (PRC's - *Prediction Rate Cuves*), seguindo a opção tomada por diversos autores em trabalhos desta natureza realizados em Portugal (*e.g.* Zêzere *et al.*, 2004; Marques *et al.*, 2009b e 2015; Pereira, 2009; Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013).

A metodologia de validação dos modelos preditivos através das SRC's e PRC's (figura 5.19), também conhecida como validação cruzada (*cross-validation*), foi proposta por Chung e Fabbri (1999), tendo como objetivo relacionar, de forma cumulativa, a área de estudo, por ordem decrescente de suscetibilidade, com a área instabilizada. Ou seja, pretende-se relacionar porções da área de estudo, por ordem decrescente de suscetibilidade e de forma cumulativa, com as porções de área instabilizada correspondentes, também de forma cumulativa.

Esta metodologia reduz significativamente a tendência de sobrestimação da performance dos modelos, já que o teste de validação evita a redundância inerente à utilização do mesmo conjunto de movimentos de vertente utilizado na construção do

modelo (autocorrelação), sendo a sua utilização recomendável para o campo da análise de dados espaciais (Brenning, 2005).

A curva de sucesso baseia-se na comparação entre a imagem de predição e a distribuição espacial dos movimentos de vertente utilizados na modelação. Assim, esta curva mede o melhor ajustamento entre o modelo e os movimentos de vertente registados, assumindo-se que o modelo está correto. Por seu turno, a curva de predição compara o mapa de suscetibilidade com a distribuição espacial dos movimentos de vertente do grupo de validação, permitindo avaliar a capacidade do modelo para prever futuras manifestações de instabilidade (Chung e Fabbri, 2003).

As curvas de sucesso e de predição são obtidas da mesma forma, sendo que a diferença reside no conjunto de movimentos de vertente utilizados para o cálculo, em que as curvas de predição são obtidas com um conjunto independente de movimentos de vertente, que, teoricamente, ainda não ocorreram (Brenning, 2005; Guzetti, 2005)

Segundo (Chung e Fabbri, 2003), a curva de predição é a única medida de validação do modelo de predição correspondente, sendo que, de acordo com Brenning (2005), a estimação da capacidade de predição com base em movimentos de vertente utilizados para a criação do próprio modelo de predição é sempre muito otimista. Assim, tendo em conta os respetivos graus de independência, espera-se que as taxas de sucesso sejam melhores do que as taxas de predição para uma determinada área de estudo (Chung e Fabbri, 2003).

A curva de predição, apesar de construída com base apenas em parte dos movimentos de vertente (grupo de modelação), permitirá validar o modelo e interpretar e classificar o mapa de suscetibilidades construído com base na totalidade dos movimentos de vertente (Chung e Fabbri, 2003).

A análise das SRC's e PRC's, que variam numa escala entre 0 e 1 (ou 0 e 100%), permite determinar graficamente a percentagem da área de maior suscetibilidade necessária para justificar uma determinada percentagem de área instabilizada.

Observando o exemplo ilustrado na figura 5.19, é possível constatar que para justificar 50% dos movimentos de vertente, seria apenas necessário isolar 10% da área de estudo classificada como mais suscetível (Ponto A), enquanto que para justificar 80% dos movimentos de vertente bastaria isolar 20% da área classificada como mais suscetível (Ponto B).

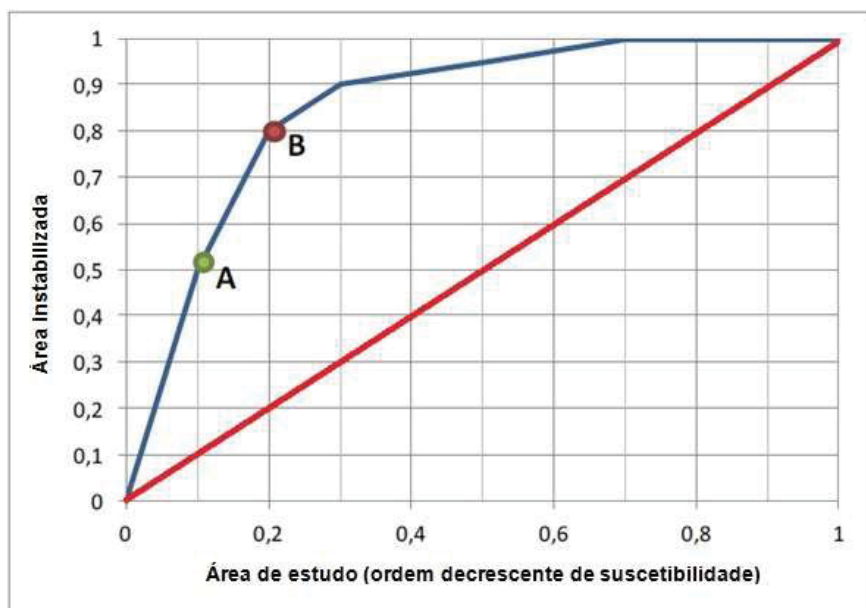


Figura 5.19 - Representação esquemática de uma curva de sucesso ou de predição.

Segundo Chung e Fabbri (2003), idealmente, as SRC's e PRC's referentes a bons modelos apresentam inclinações (declives) que crescem exponencialmente da área mais suscetível para a menos suscetível, isto é, apresentam um crescimento muito acentuado na fase inicial, diminuído o seu declive na fase final. No entanto, especialmente nas PRC's, isso não se verifica, pelo que, segundo Frattini *et al.* (2010) e Sterlacchini *et al.* (2011), quanto maior for a distância entre a curva obtida e a diagonal estabelecida entre os pontos (0,0) e (1,1), melhor o ajuste (SRC's) ou a capacidade preditiva do modelo (PRC's).

Se o resultado obtido estivesse próximo ou fosse coincidente com a diagonal (reta de calibração, a vermelho na figura 5.19), significaria, certamente, um acerto casuístico, ou seja, o grau de sucesso do ajuste ou da predição seria, certamente, ditado pelo acaso. Por outro lado, um desvio das SRC's ou PRC's abaixo da referida diagonal implicaria a rejeição imediata dos respetivos modelos, de acordo com Guzzetti (2005).

No presente trabalho, dada a inexistência de dados e informações necessários para a realização de partições temporais ou espaciais, optou-se pela partição aleatória do inventário de movimentos de vertente, tendo-se seguido os seguintes passos, tal como sugerido por Chung e Fabbri (2003):

- 1) Construção de um modelo de predição com todos os movimentos de vertente do IMV (IMV-TOT);

- 2) Divisão aleatória dos movimentos de vertente do IMV-TOT em 2 grupos: Grupo de modelação (IMV-MOD) e grupo de validação (IMV-VAL), cada qual com 50% dos movimentos de vertente do IMV-TOT;
- 3) Reprodução do modelo de predição construído no passo 1, apenas com os movimentos de vertente do IMV-MOD;
- 4) Validação do modelo por comparação com a distribuição dos movimentos de vertente do IMV-VAL, calculando a respetiva taxa de predição.

A utilização da referida metodologia assenta no pressuposto de que os movimentos de vertente do grupo de validação ainda não ocorreram, pelo que, quando aplicada, deve garantir-se uma distribuição espacial homogénea de movimentos de vertente nos dois grupos (Chung e Fabbri, 2003).

As SRC's foram desenvolvidas com base no cruzamento dos mapas de suscetibilidade com o mesmo grupo de movimentos de vertente utilizado no modelo que os originou, refletindo o grau de ajuste aos dados de entrada. Por seu turno, contrariamente às SRC's, as PRC's foram obtidas cruzando os mapas de suscetibilidade com o grupo de movimentos de vertente de validação, independente do utilizado para a construção do modelo, permitindo assim a sua validação e expressando o seu grau de predição.

Para a quantificação da qualidade do modelo e comparação das SRC's e PRC's, procedeu-se ao cálculo da Área Abaixo da Curva (AAC, *Area Under the Curve*), através da seguinte expressão (e.g. Gorservski *et al.*, 2000 e 2006; Brenning, 2005; Begueria, 2006; Carrara *et al.*, 2008; Zêzere *et al.*, 2008; Marques *et al.*, 2009b; Pereira, 2009; Blahut *et al.*, 2010; Frattini *et al.*, 2010; Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013; Petschko *et al.*, 2014):

Equação 5.6:
$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(x_{i+1} - x_i) \frac{y_{i+1} + y_i}{2} \right]$$

onde $(x_{i+1} - x_i)$ corresponde à amplitude do intervalo definido pelas ordenadas x_{i+1} e x_i e $\frac{y_{i+1} + y_i}{2}$ equivale a metade da amplitude do intervalo definido pelas abcissas y_{i+1} e y_i correspondentes, respetivamente, às ordenadas x_{i+1} e x_i .

O valor da AAC varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo for de 1, maior o crescimento da curva na sua fase inicial, indicando, como já referido, um melhor grau de ajuste, no caso das SRC's, e uma maior capacidade preditiva do modelo, no caso das PRC's. Um valor da AAC = 0,5, corresponde à diagonal estabelecida entre os pontos (0,0) e (1,1) e, portanto, a um acerto casuístico.

Percorrendo a bibliografia, é possível verificar a existência de diferentes propostas de classificação qualitativa dos valores da AAC (e.g. Swets, 1988; Guzzetti *et al.*, 2006b; Thuiler *et al.*, 2009).

A proposta de classificação apresentada por Guzzetti *et al.* (2006b), sugere que valores de AAC superiores a 0,90 sejam considerados como "*excelentes ou extremamente satisfatórios*". Os valores entre 0,8 e 0,9 são considerados como "*bons*", enquanto que os compreendidos entre 0,75 e 0,80 são considerados como "*aceitáveis ou razoáveis*". Ao contrário das restantes propostas de classificação consultadas, na classificação de Guzzetti *et al.* (2006b) não é atribuída qualquer classificação para valores abaixo de 0,75. Assim, por esta ser a proposta mais exigente, foi a que se adotou para a classificação dos valores das AAC no presente trabalho.

5.6 QUANTIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA E HIERARQUIZAÇÃO DOS FATORES DE PREDISPOSIÇÃO

A par de outros métodos, resumidos por Frattini *et al.* (2010), a AAC das SRC's, quando determinadas individualmente para cada fator de predisposição, permite quantificar a importância dos mesmos e proceder à respetiva hierarquização, processo essencial para uma análise sensitiva dos modelos de avaliação de suscetibilidade a movimentos de vertente.

Outros dois métodos que têm vindo a ser utilizados (*e.g.* Castellanos, 2008; Blahut *et al.*, 2010; Garcia, 2012, Oliveira, 2012; Marques, 2013) para medir a performance dos fatores de predisposição, são os índices *Accountability* (IA) e *Reliability* (IR), propostos por Greenbaum *et al.* (1995a, 1995b), como indicadores da importância de classes de fatores de predisposição (Blahut *et al.*, 2010).

O IA avalia a existência de instabilidade nas classes de fatores mais relevantes em termos de predisposição para ocorrência de movimentos de vertente (Blahut *et al.*, 2010), calculando-se através do total de área instabilizada (número de unidades de terreno com movimentos de vertente) contida nas n classes de um determinado fator de predisposição (j), que apresentem densidade média de área instabilizada superior à densidade média verificada na área de estudo (A_{MVi}), dividido pela área instabilizada total da área de estudo (A_{MV}) e multiplicado por 100, como dado pela seguinte expressão:

Equação 5.7:
$$IA_j = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{MVi})}{A_{MV}} \cdot 100$$

Desta forma, o valor de IA varia entre 0 e 100%, sendo que quanto maior for o seu valor, maior será a aproximação do número de unidades de terreno com movimentos de vertente das n classes de j ao total das unidades de terreno com movimentos de vertente da área de estudo.

O IR avalia a densidade de área deslizada nas classes dos fatores de predisposição que são relevantes para a ocorrência de instabilidade de vertentes (Blahut *et al.*, 2010), calculando-se através do total de área instabilizada (número de unidades de terreno com

movimentos de vertente) contida nas n classes de um determinado fator de predisposição (j), que apresentem densidade média de área instabilizada superior à densidade média verificada na área de estudo (A_{MVi}), dividido pela área total das mesmas n classes (A_i) e multiplicado por 100:

Equação 5.8:
$$IR_j = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{MVi})}{\sum_{i=1}^n (A_i)} \cdot 100$$

À imagem do que acontece com o IA , o valor de IR varia entre 0 e 100%, sendo que quanto maior for o seu valor, maior será a aproximação do número de unidades de terreno com movimentos de vertente das n classes de j ao total das unidades de terreno das n classes de j .

Caso os valores de IA ou IR sejam iguais a zero, significa que todas as classes desse fator de predisposição têm uma densidade média de movimentos de vertente inferior à densidade média de movimentos de vertente verificada na área de estudo.

Na realidade, a diferença entre os dois índices reside apenas no respetivo denominador, isto é, enquanto IA quantifica a importância de um fator de predisposição com base na área ocupada com movimentos de vertente nas suas n classes com densidade de área instabilizada superior à densidade média da área de estudo, relativamente à área total instabilizada na área de estudo, o IR fá-lo em relação à área total das suas n classes.

Segundo Greenbaum *et al.* (1995a), o índice *Accountability* e o índice *Reliability* fornecem resultados diferentes mas importantes para a predição de movimentos de vertente. Apesar disso, os autores consideram que o índice *Reliability* é mais relevante.

No entanto, a principal limitação apresentada pelos índices *Accountability* e *Reliability* prende-se com o facto de não permitirem fazer a distinção de quais as classes mais importantes dentro de cada fator de predisposição (Blahut *et al.*, 2010).

Tendo em conta os bons resultados obtidos por diversos autores (*e.g.* Garcia, 2012; Oliveira, 2012, Pereira *et al.*, 2012) em trabalhos desta natureza realizados em Portugal, optou-se pela utilização da AAC das SRC's para quantificar a importância de cada fator de predisposição e para proceder à sua hierarquização.

5.7 CLASSIFICAÇÃO DOS MAPAS DE SUSCETIBILIDADE

Normalmente, a gama de valores obtidos nas unidades de terreno que compõem os mapas de suscetibilidade é elevada, independentemente do método utilizado para a sua obtenção (Garcia, 2012).

Quando o mapa é obtido com aplicação de métodos estatísticos, como se verifica neste trabalho, o modelo apresenta um valor de suscetibilidade para cada pixel, numa escala contínua de valores, pelo que se torna necessário classificar os resultados finais, de modo a facilitar a sua visualização e interpretação.

De acordo com Sterlacchini *et al.* (2011), os mapas de suscetibilidade são normalmente classificados num limitado número de classes (tipicamente entre três e cinco), adequado à interpretação de especialistas.

Vários métodos são utilizados para o procedimento de classificação dos mapas finais de suscetibilidade, entre os quais, segundo Garcia (2012) e Marques (2013), se destacam: 1) métodos estatísticos, recorrendo, por exemplo, à média e ao desvio padrão (*e.g.* Süzen e Doyuran, 2004); 2) métodos baseados na porção de movimentos de vertente preditos, tendo em conta as curvas de sucesso e predição (*e.g.* van Westen *et al.*, 2003; Zêzere *et al.*, 2004); 3) métodos de roturas naturais nos padrões de distribuição, fazendo a distinção de classes com valores superiores ou inferiores a um determinado valor de referência (*e.g.* Poli e Sterlacchini, 2007); e 4) métodos baseados na divisão equitativa do território, em termos de área (*e.g.* decis, quartis), de forma a obter classes de igual dimensão territorial (Garcia *et al.*, 2007 *in* Garcia, 2012).

Segundo Garcia (2002), desde que as técnicas sejam bem aplicadas, todos os métodos são corretos, recaindo a opção sobre o objetivo do trabalho, sendo certo que o aspeto do mapa final de suscetibilidade poderá variar substancialmente de acordo com o método e técnica utilizados para a sua classificação. No entanto, segundo Garcia *et al.* (2007 *in* Pereira, 2009), as metodologias que têm em conta a existência de movimentos de vertente serão, à partida, as que representarão de forma mais realística o terreno, já que se baseiam em dados reais e não apenas em análise de frequência ou amplitude.

De acordo com Chung e Fabbri (2003), em termos de gestão de risco, os modelos de suscetibilidade serão tanto melhores, quanto maior for a qualidade preditiva das classes de suscetibilidade mais elevada. A este respeito, Garcia (2012) argumenta que a melhor estratégia passa por tentar aumentar a eficiência das classes de suscetibilidade mais

elevada e diminuir a eficiência das classes de suscetibilidade reduzida, por exemplo, constringendo a dimensão das classes de suscetibilidade elevada, mantendo porém um nível de predição elevado, por forma a assegurar o mínimo possível de movimentos de vertente nas classes de menor suscetibilidade, acrescentando que este procedimento permite reduzir o número de "*falsos positivos*" e "*falsos negativos*".

Desta forma, Chung e Fabbri (2003), afirmam ser essencial analisar e avaliar a capacidade preditiva de cada classe de suscetibilidade, no intuito de suportar a escolha de uma classificação adequada, reduzindo a subjetividade associada ao processo. Para tal, os referidos autores propuseram o "Rácio de Eficiência" (*ratio of effectiveness* - rE), que pretende relacionar a probabilidade de uma dada unidade de terreno inserida numa determinada classe de suscetibilidade i ser afetada por um movimento de vertente ($P(UTi_{MV})$) com a probabilidade de qualquer unidade de terreno da área de estudo ser afetada por um movimento de vertente ($P(UT_{MV})$), dado pela seguinte expressão:

Equação 5.9:
$$rE_i = \frac{P(UTi_{MV})}{P(UT_{MV})} = \frac{q/r}{\alpha/t} = \frac{q \cdot t}{r \cdot \alpha}$$

onde: α corresponde ao número de unidades de terreno com movimentos de vertente; t representa o número total de unidades de terreno da área de estudo; q corresponde ao número de unidades de terreno com movimentos de vertente ocupadas pela classe i ; e r representa o número total de unidades de terreno da classe i .

Quando os valores de rE se aproximam de 1, significa que a respetiva classe não apresenta capacidade preditiva e/ou discriminatória, indicando uma distribuição aleatória das unidades de terreno com movimentos de vertente, dentro da classe em questão. Assim, quanto mais afastado de 1 for o valor de rE , maior a eficiência das classes, sendo que para classes de suscetibilidade elevada, quanto maior e mais afastado de 1 for o valor, mais eficiente será a classe. Por outro lado, para classes de suscetibilidade baixa, idealmente o valor deverá aproximar-se de 0.

Chung e Fabbri (2003), propuseram também limiares de classificação da qualidade preditiva das classes através de uma escala qualitativa, com base nos valores de rE . Assim, para classes de suscetibilidade elevada, os valores de rE superiores a 6, refletem

uma capacidade preditiva "*muito significativa*", enquanto que os valores compreendidos entre 3 e 6, indicam uma capacidade preditiva "*significativa*". No caso de classes de suscetibilidade reduzida, valores de rE compreendidos entre 0,1 e 0,2, indicam uma capacidade preditiva "*significativa*", enquanto que valores inferiores a 0,1, refletem uma capacidade preditiva "*muito significativa*". Por fim, os valores de rE compreendidos entre 0,2 e 3 apontam para uma capacidade preditiva "*não significativa*".

No entanto, os limites apresentados por Chung e Fabbri (2003), são bastante exigentes, sendo que, de acordo com Guzzetti *et al.* (2006b), uma boa classificação é difícil de alcançar, especialmente em áreas com grande variabilidade geomorfológica e com grande quantidade de movimentos de vertente. Por exemplo, para uma classe de suscetibilidade elevada obter uma classificação "*significativa*" (rE entre 3 e 6) teria de apresentar uma densidade média de movimentos de vertente, no mínimo, três vezes superior à densidade média registada na área de estudo.

Assim sendo, Guzzetti *et al.* (2006b) propuseram uma nova e simplificada escala de avaliação da capacidade preditiva das classes, em que as mesmas são consideradas como significativas quando os valores de rE são superiores ao expetável (1) em 50%, ou seja, valores superiores a 1,5 são "*significativos*" para classes de suscetibilidade elevada e valores inferiores a 0,5 são "*significativos*" para classes de suscetibilidade reduzida. Os valores intermédios, que indicam, como referido, uma distribuição aleatória das unidades de terreno com movimentos de vertente dentro da classe, indicam que a mesma tem uma capacidade preditiva "*não significativa*". Pelo exposto, no presente trabalho optou-se por adotar a escala qualitativa apresentada por Guzzetti *et al.* (2006b).

Relativamente à classificação dos mapas de suscetibilidade, tendo em conta os bons resultados obtidos por Garcia (2012), optou-se pela aplicação do método de interpretação das curvas de sucesso, tendo em conta a percentagem prevista de área instável. Por fim, quanto ao número de classes a utilizar, optou-se por quatro classes qualitativas, de acordo com a sugestão apresentada por Julião (2009).

5.8 AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NA ZONA OESTE DA ILHA TERCEIRA

5.8.1 HIERARQUIZAÇÃO DOS FATORES DE PREDISPOSIÇÃO

A análise prévia da importância dos fatores de predisposição em relação à sua capacidade de discriminação da instabilidade do terreno, permite a sua hierarquização e a avaliação da respetiva influência na qualidade preditiva dos modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente.

Como anteriormente referido, neste trabalho, para a hierarquização dos fatores de predisposição recorreu-se ao cálculo da Área Abaixo da Curva (AAC) das curvas de sucesso (SRC's), determinadas individualmente para cada fator de predisposição, considerando o inventário de movimentos de vertente completo (IMV-TOT).

A densidade de movimentos de vertente em cada classe dos onze fatores de predisposição considerados, essencial para o cálculo dos valores informativos (ver ponto 5.3.4.7), foi estimada através do cruzamento dos respetivos mapas com o IMV-TOT, ambos em formato matricial, com recurso à ferramenta *Spatial Analyst Tools* ("*Zonal Histogram*"), do software ArcGIS 10.1. Os valores informativos determinados para todas as classes dos fatores de predisposição estudados, com base no IMV-TOT, são apresentados no Anexo I do presente trabalho.

Para a determinação das SRC's, os mapas dos fatores de predisposição foram novamente cruzados com o IMV-TOT, através da ferramenta *Spatial Analyst Tools* ("*tabulate area*"), do software ArcGIS 10.1, por forma a determinar a percentagem de área instabilizada e a área ocupada por cada classe de cada fator. A curva de sucesso de cada fator foi gerada, relacionando a respetiva área instabilizada acumulada com a área de estudo, também acumulada e distribuída por ordem decrescente de suscetibilidade, sendo o cálculo das AAC efetuado com base na expressão 5.6, apresentada anteriormente no ponto 5.5.

Na figura 5.20, apresentam-se as curvas de sucesso determinadas para cada fator de predisposição, com base no valor informativo obtido para as diferentes classes dos fatores de predisposição.

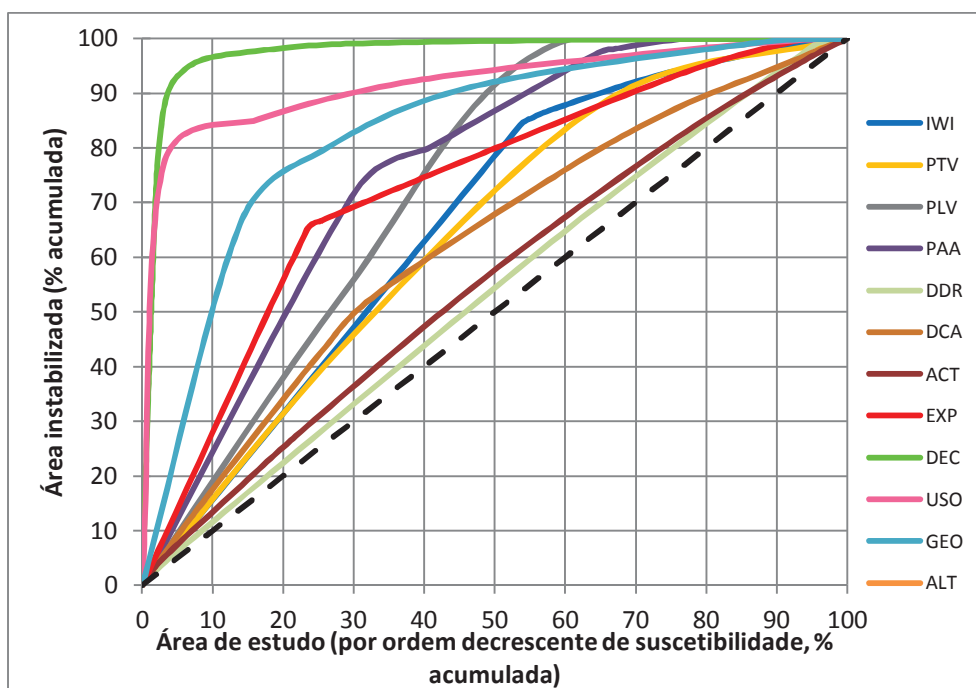


Figura 5.20 - Curvas de sucesso (SRC) determinadas para cada fator de predisposição. A tracejada é apresentada a reta de calibração.

Analisando a figura 5.20, facilmente se constata que os melhores resultados são obtidos com as SRC's referentes aos fatores de predisposição declive (DEC), uso do solo (USO) e geologia (GEO).

A análise visual do comportamento das SRC's permite também verificar que os fatores de predisposição área de contribuição (ACT) e densidade de drenagem (DDR) apresentam os piores resultados em termos de discriminação de área instabilizada, aproximando-se da reta de calibração, que une os pontos (0;0) e (100;100), que, como referido, significa um acerto casuístico. Em nenhum dos casos se verifica um desvio das SRC's abaixo da referida diagonal, o que implicaria a respetiva rejeição de forma imediata.

Na tabela 5.19, são apresentados os valores das AAC's referentes às SRC's, determinadas com base no IMV-TOT, que permitem, de forma quantitativa, definir a importância relativa de cada um dos fatores de predisposição estudados e, como tal, proceder à sua hierarquização.

Tabela 5.19 - Valores da área abaixo das curvas de sucesso (AAC das SRC's) e hierarquização dos fatores de predisposição.

Fator de predisposição	Sigla	AAC da SRC	Hierarquização
Declive	DEC	0,975	1
Uso do solo	USO	0,910	2
Geologia	GEO	0,824	3
Precipitação anual acumulada	PAA	0,753	4
Exposição	EXP	0,729	5
Perfil longitudinal das vertentes	PLV	0,717	6
Inverso do <i>wetness index</i>	IWI	0,661	7
Perfil transversal das vertentes	PTV	0,632	8
Distância aos cursos de água	DCA	0,621	9
Área de contribuição	ACT	0,552	10
Densidade de drenagem	DDR	0,532	11

Como referido anteriormente, constata-se que o DEC é o fator de predisposição com maior capacidade de discriminação entre áreas com maior e menor propensão para a ocorrência de movimentos de vertente, destacando-se consideravelmente dos restantes fatores, apresentando uma SRC com uma AAC de 0,975. Este resultado está de acordo com os resultados obtidos por diversos autores (*e.g.* Piedade *et al.*, 2011; Garcia, 2012, Oliveira, 2012; Marques, 2013) que apontam o declive como o fator de predisposição mais influente nas respetivas áreas de estudo.

Os fatores de predisposição USO e GEO, segundo e terceiro na hierarquia, respetivamente, também apresentam valores de AAC muito elevados, ultrapassando 0,90, no primeiro caso, e 0,80 no segundo. É de salientar que os primeiros seis fatores de predisposição da hierarquia apresentam valores de AAC bastante elevados e todos superiores a 0,70.

Como se pode verificar na tabela 5.20, os resultados obtidos para as primeiras duas posições e para a última posição da hierarquia, estão de acordo com os resultados obtidos por Marques (2013), num trabalho realizado no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores). Todavia, enquanto para o fator de predisposição que ocupa a última posição em ambos os trabalhos (11.^a no presente trabalho e 12.^a no trabalho efetuado para a Povoação) o valor da AAC é semelhante, para os fatores de predisposição que o ocupam as duas primeiras posições os valores das AAC's das SRC's verificados no presente trabalho são significativamente mais elevados.

Tabela 5.20 - Comparação entre os resultados obtidos para a AAC das SRC's dos fatores de predisposição que ocupam as primeiras duas posições e a última posição da hierarquia, no presente trabalho e no trabalho de Marques (2013), desenvolvido para a Povoação, na ilha de São Miguel (Açores).

Fator de predisposição	Sigla	Hierarquização	AAC da SRC - área de estudo	AAC da SRC - Povoação
Declive	DEC	1	0,975	0,789
Uso do solo	USO	2	0,910	0,720
Densidade de drenagem	DDR	11/12	0,532	0,523

O facto de os valores das AAC's das SRC's verificados no presente trabalho serem substancialmente superiores aos verificados por Marques (2013) pode estar relacionado com o facto de grande parte da zona de estudo do presente trabalho ser caracterizada por um relevo menos acentuado do que o verificado na Povoação, implicando, dada a influência agora demonstrada do declive na ocorrência de movimentos de vertente e a sua relação com o uso do solo nos Açores, a circunscrição dos movimentos de vertente a uma área mais pequena, em termos relativos.

No entanto, é importante referir que, apesar de nos dois trabalhos em questão serem utilizados dez fatores de predisposição em comum, apenas nos três casos anteriormente referidos a posição hierárquica é a mesma. Assim, conclui-se que a extrapolação de classificações hierárquicas de fatores de predisposição, mesmo em áreas de estudo semelhantes, não é aconselhável, reforçando-se a importância de este processo ser efetuado especificamente para cada contexto.

5.8.2 AJUSTE DO MODELO DE SUSCETIBILIDADE AOS DADOS DE ENTRADA

Tendo em conta os onze fatores de predisposição considerados, existem 2.047 combinações possíveis entre os mesmos, determinadas pela seguinte expressão:

Equação 5.10:
$$\sum_{i=1}^{11} {}^{11}C_i$$

No entanto, após a hierarquização dos fatores de predisposição, assumindo a inclusão de um novo fator de predisposição de cada vez ao modelo de suscetibilidade, por ordem decrescente de importância hierárquica, apenas foi necessário definir onze algoritmos de suscetibilidade.

Na figura 5.21, são apresentadas as curvas de sucesso referentes aos algoritmos gerados com base nas onze combinações de fatores de predisposição, tendo em conta a totalidade dos movimentos de vertente da área de estudo (IMV-TOT).

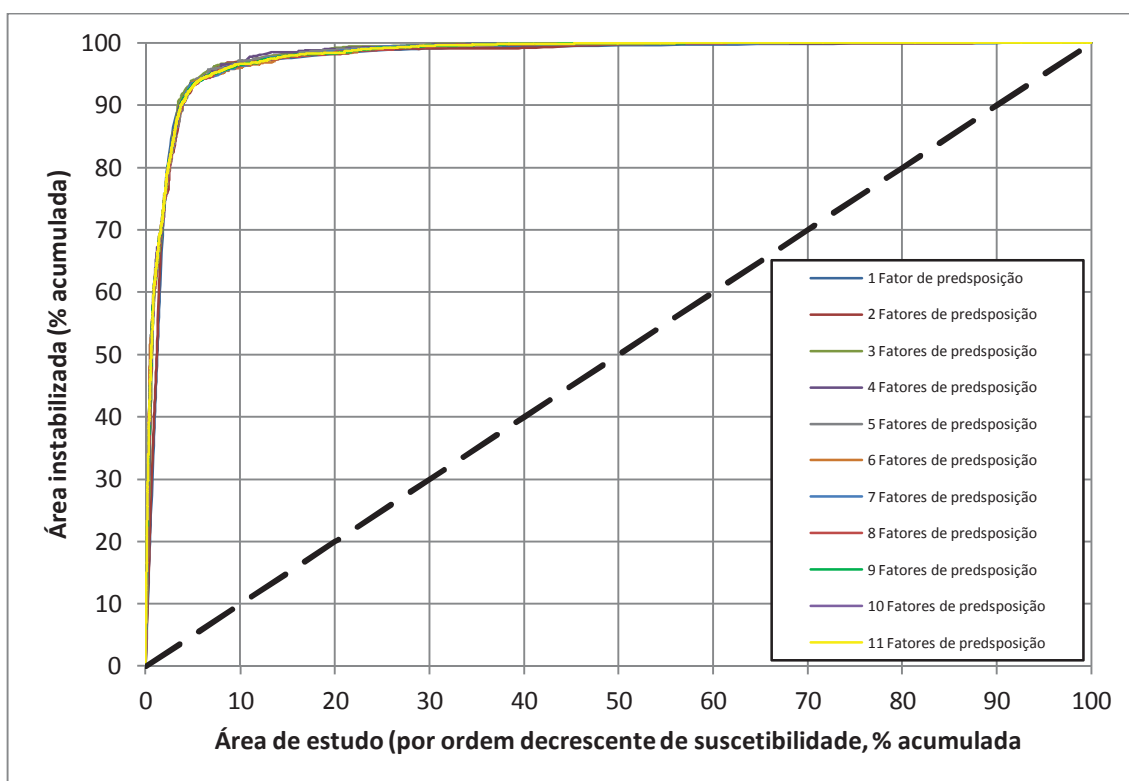


Figura 5.21 - Curvas de sucesso para os algoritmos definidos com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta as diferentes combinações de fatores de predisposição. A tracejada é apresentada a reta de calibração.

Analisando a figura anterior, é possível verificar que o comportamento das SRC's obtidas para as diversas combinações de fatores de predisposição é muito semelhante, sendo que as maiores variações no ajuste do modelo ocorrem essencialmente nos 20% da área classificada como mais suscetível à ocorrência de movimentos de vertente, o que significa, na prática, que com a utilização apenas do declive (1.º na hierarquização), as áreas que apresentam maior estabilidade ficam, desde logo, identificadas e que com a

inclusão progressiva de novos fatores de predisposição ao modelo, a qualidade do algoritmo apenas é melhorada em relação às áreas de maior instabilidade e propensão à ocorrência de movimentos de vertente.

Na tabela 5.21, é apresentado um resumo dos resultados obtidos para as AAC's das SRC's para os algoritmos desenvolvidos, tendo em conta as diferentes combinações de fatores de predisposição, de acordo com a ordem ditada pelo processo de hierarquização, onde se reflete o ajuste do modelo aos dados de entrada.

Tabela 5.21 - Ajuste do modelo aos dados de entrada. Resumo das áreas abaixo das curvas de sucesso (AAC's das SRC's), com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta o inventário de movimentos de vertente completo (IMV-TOT), considerando as diferentes combinações de fatores de predisposição.

N.º de fatores de predisposição	Combinação de fatores de predisposição	AAC's das SRC's
1 fator de predisposição	DEC	0,975
2 fatores de predisposição	DEC + USO	0,977
3 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO	0,982
4 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA	0,981
5 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA + EXP	0,981
6 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA + EXP + PLV	0,980
7 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA + EXP + PLV + IWI	0,981
8 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA + EXP + PLV + IWI + PTV	0,980
9 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA + EXP + PLV + IWI + PTV + DCA	0,981
10 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA + EXP + PLV + IWI + PTV + DCA + ACT	0,981
11 fatores de predisposição	DEC + USO + GEO + PAA + EXP + PLV + IWI + PTV + DCA + ACT + DDR	0,981

Através da tabela 5.21, é possível verificar que a adição de novos fatores ao modelo melhora o valor da AAC das SRC's até à inclusão do 3.º fator, onde se atinge o máximo, com uma variação de 0,07 no valor da AAC, em relação ao modelo com apenas um fator. Posteriormente, os valores estabilizam, apesar de se verificarem algumas inflexões, nomeadamente com a inclusão do 4.º fator (PAA), do 6.º fator (PLV) e do 8.º

fator (PTV). A ligeira deterioração verificada no modelo com a inclusão dos referidos fatores de predisposição (nunca superior a um milésimo), verificada igualmente em outros trabalhos desta natureza realizados em Portugal (e.g. Oliveira, 2012; Marques, 2013), pode ser atribuída à entropia gerada pelo excesso de informação adicional, em alguns casos redundante, resultando numa ténue diminuição do poder de discriminação do conjunto.

Apesar de o valor máximo das AAC's das SRC's se ter verificado no modelo com três variáveis (AAC = 0,982), na realidade, o valor obtido para o modelo com os onze fatores de predisposição (AAC = 0,981) é inferior a esse máximo em apenas 1 milésimo. Isso significa que a utilização dos onze fatores de predisposição parece não gerar entropia suficiente no modelo para que haja uma exclusão obrigatória de fatores.

Caso a diferença entre os valores das AAC's fosse significativa, seria aconselhável utilizar o modelo com apenas três fatores de predisposição, o que reforça a importância, mais uma vez, da realização de uma análise sensitiva ao ajuste dos modelos aos dados de entrada. Recentemente, Pereira *et al.* (2012), num trabalho realizado para o concelho de Santa Marta de Panaguião, onde foram estudados sete fatores de predisposição, determinaram que o melhor modelo a utilizar, naquele caso, seria o desenvolvido apenas com três variáveis. Também Piedade *et al.* (2011), num estudo realizado para uma região a Norte de Lisboa, determinaram que a utilização de apenas três variáveis, de um conjunto de sete, produzia resultados muito satisfatórios na predição de ocorrência de movimentos de vertente, podendo constituir-se como uma boa solução em termos de custo (esforço de recolha/tratamento/computação de dados) – benefício (qualidade dos resultados).

Na prática, a utilização, neste trabalho, dos onze fatores de predisposição não acrescenta capacidade preditiva ao modelo, mas também não a retira de forma significativa. Ademais, não se verifica uma deterioração significativa do ajuste do algoritmo aos dados de entrada, nem uma variação importante na organização espacial da suscetibilidade.

Desta forma, tendo em conta os argumentos anteriormente aduzidos e seguindo a opção tomada por outros autores (e.g. Piedade *et al.*, 2011; Oliveira, 2012; Marques, 2013), optou-se pela utilização de todos os fatores de predisposição no modelo de

suscetibilidade a movimentos de vertente final, até porque tal decisão permite comparar resultados obtidos em outros estudos desta natureza.

Os mapas de suscetibilidade resultantes da definição dos onze algoritmos, elaborados com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta a totalidade dos movimentos de vertente (IMV-TOT) e as diferentes combinações de fatores de predisposição, podem ser consultados no Anexo II do presente trabalho.

Refira-se ainda que os valores das AAC's das SRC's obtidos para todos os algoritmos definidos são extremamente elevados, sendo sempre superiores a 0,97.

Assim sendo, de acordo com a proposta de classificação apresentada por Guzzetti *et al.* (2006b), o modelo de suscetibilidade a movimentos de vertente selecionado pode ser classificado como "excelente ou extremamente satisfatório", já que a respetiva AAC da SRC é superior a 0,90.

5.8.3 VALIDAÇÃO DO MODELO DE SUSCETIBILIDADE E DETERMINAÇÃO DA RESPETIVA CAPACIDADE PREDITIVA

O processo de validação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente é absolutamente essencial para avaliar a respetiva capacidade preditiva, sem a qual não é possível qualquer tipo de interpretação dos resultados, bem como de avaliação do método utilizado ou os dados de entrada considerados no modelo.

Para tal, a validação deve ser efetuada com base num grupo de movimentos de vertente independente (inventário de movimentos de vertente de validação - IMV-VAL) daquele que foi utilizado na modelação (inventário de movimentos de vertente de modelação - IMV-MOD). O princípio subjacente a esta estratégia é de que os movimentos de vertente do IMV-VAL, ainda não ocorreram, permitindo aferir a capacidade preditiva do modelo sem implicar que a validação fique dependente da ocorrência de novos movimentos de vertente, que, em alguns casos, pode demorar vários anos.

A definição do IMV- MOD e do IMV-VAL foi efetuada, através de uma partição aleatória (50%) do inventário de movimentos de vertente completo (IMV-TOT), recorrendo à ferramenta *R Sample*, do software *Geospatial Modelling Environment*, versão 0.7.2.1 (disponível em www.spatial ecology.com).

Na tabela 5.22, são apresentadas as principais diferenças entre o IMV-MOD e o IMV-VAL, tendo em conta que a divisão foi feita em termos de número de movimentos de vertente e que, por isso, a área instabilizada (número de unidade de terreno) não é exatamente igual nos grupos de modelação e de validação.

Tabela 5.22 - Resumo das principais diferenças entre o grupo de movimentos de vertente de modelação (IMV-MOD) e de validação (IMV-VAL), em formato matricial.

Movimentos de vertente	IMV-MOD	IMV-VAL	IMV-TOT
N.º de movimentos de vertente	71 (50%)	71 (50%)	142 (100%)
N.º de unidades de terreno	914 (52,1%)	841 (47,9%)	1.755 (100%)
Área planimétrica (m ²)	22.850 (52,1%)	21.025 (47,9%)	43.875 (100%)

Como se pode observar na tabela anterior, o IMV-MOD e o IMV-VAL têm exatamente o mesmo número de movimentos de vertente (71), correspondendo a metade do IMV-TOT. No entanto, o IMV-MOD, abrange um número de unidades de terreno ligeiramente superior, o que se traduz numa área planimétrica maior do que a do IMV-VAL em 825 m².

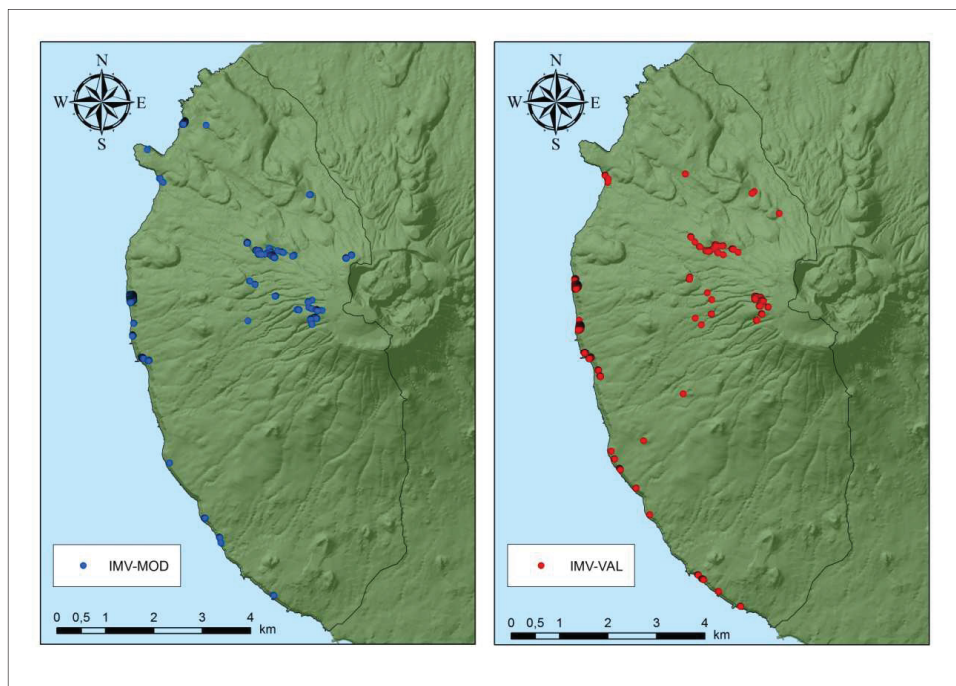


Figura 5.22 - Representação da distribuição geográfica dos movimentos de vertente incluídos no grupo de modelação (IMV-MOD, a azul) e no grupo de validação (IMV-VAL, a vermelho). Mapa apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Na figura 5.22, é apresentada a distribuição geográfica dos movimentos de vertente do IMV-MOD e do IMV-TOT, representados por pontos, uma vez que, em muitos casos, os respetivos polígonos não seriam visíveis à escala da imagem, dadas as suas reduzidas dimensões.

Para a determinação da curva de sucesso do modelo considerando apenas o IMV-MOD, todo o processo anteriormente executado com base no IMV-TOT foi repetido, sendo que a respetiva parametrização referente ao Método do Valor Informativo pode ser consultada no Anexo I do presente trabalho.

Em geral, as variações observadas nos valores informativos determinados com base no IMV-TOT e no IMV-MOD não são significativas, sendo que, para além disso, verifica-se a manutenção, genericamente, das classes com maior propensão para a ocorrência de movimentos de vertente, pelo que se comprova uma clara robustez e representatividade do inventário de movimentos de vertente. Por outro lado, a diferença nos valores das AAC's das SRC's obtidas com base no IMV-TOT (0,981) e no IMV-MOD (0,979) é residual (0,002).

Na prática, verifica-se que o inventário de movimentos de vertente, mesmo apenas com 50% dos seus registos, garante semelhantemente as relações estabelecidas entre as classes dos fatores de predisposição e a distribuição espacial da área instabilizada.

Na figura 5.23, apresenta-se a SRC gerada para o modelo de suscetibilidade desenvolvido e validado com o IMV-MOD e a PRC resultante para o modelo desenvolvido com o IMV-MOD e validado com o IMV-VAL.

Como é possível verificar, a SRC e a PRC não apresentam visualmente diferenças significativas, tendo um comportamento muito idêntico, com um crescimento inicial muito acentuado, o que é indicativo da clara concordância na relação das classes dos fatores de predisposição com o IMV-MOD e com o IMV-VAL.

A SRC apresenta uma AAC de 0,979, o que comprova uma excelente capacidade de ajuste (*goodness of fit*) do modelo. Por seu turno, a PRC apresenta, como seria de esperar, uma AAC ligeiramente mais baixa do que a da SRC, mas, ainda assim, com um valor extremamente elevado, de 0,970, atestando assim a elevada capacidade preditiva (*predicting skill*) do algoritmo. Na verdade, o modelo desenvolvido, tem capacidade de prever 90% dos movimentos de vertente em apenas cerca de 6% da área mais suscetível a movimentos de vertente. Da mesma forma, para prever 99% dos movimentos de vertente, é necessário apenas 35% da área mais suscetível da área de estudo.

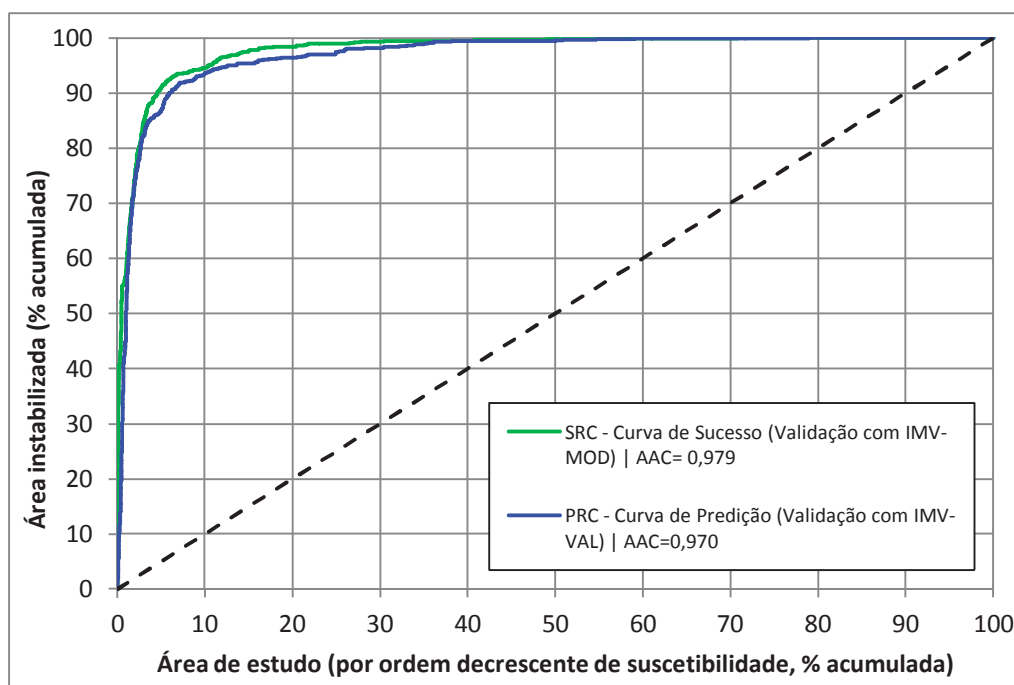


Figura 5.23 - Curva de sucesso (SRC) e curva de predição (PRC) para o algoritmo definido com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta os onze fatores de predisposição utilizados. A tracejada é apresentada a reta de calibração.

Conclui-se assim que, segundo a proposta de classificação apresentada por Guzzetti *et al.* (2006b), também a SRC, desenvolvida e validada com o IMV-MOD (AAC = 0,979) e a PRC, gerada com o IMV-MOD e validada com o IMV-VAL (AAC = 0,970), são tidas como "excelentes ou extremamente satisfatórias", tendo em conta a classificação de Guzzetti *et al.* (2006b).

5.8.4 CLASSIFICAÇÃO DO MAPA DE SUSCETIBILIDADE SELECIONADO

Como referido anteriormente, os mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente obtidos com aplicação de métodos estatísticos apresentam um valor de suscetibilidade para cada pixel, numa escala contínua de valores, pelo que se torna necessário classificar os resultados finais, com base em critérios adequados aos objetivos pretendidos, de modo a facilitar a sua visualização e interpretação.

Na figura 5.24, para demonstrar a importância do processo de classificação dos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente, ilustra-se o mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente da área de estudo antes da sua classificação num número limitado de classes e, como se pode observar, a imagem correspondente é caótica, já que reflete a enorme gama de valores informativos verificados nas unidades matriciais que compõem a área de estudo. Assim, antes do referido processo de classificação do mapa de suscetibilidade não é possível efetuar uma análise clara e efetiva dos resultados, sendo impraticável a sua utilização para efeitos de ordenamento do território e/ou planeamento de emergência.

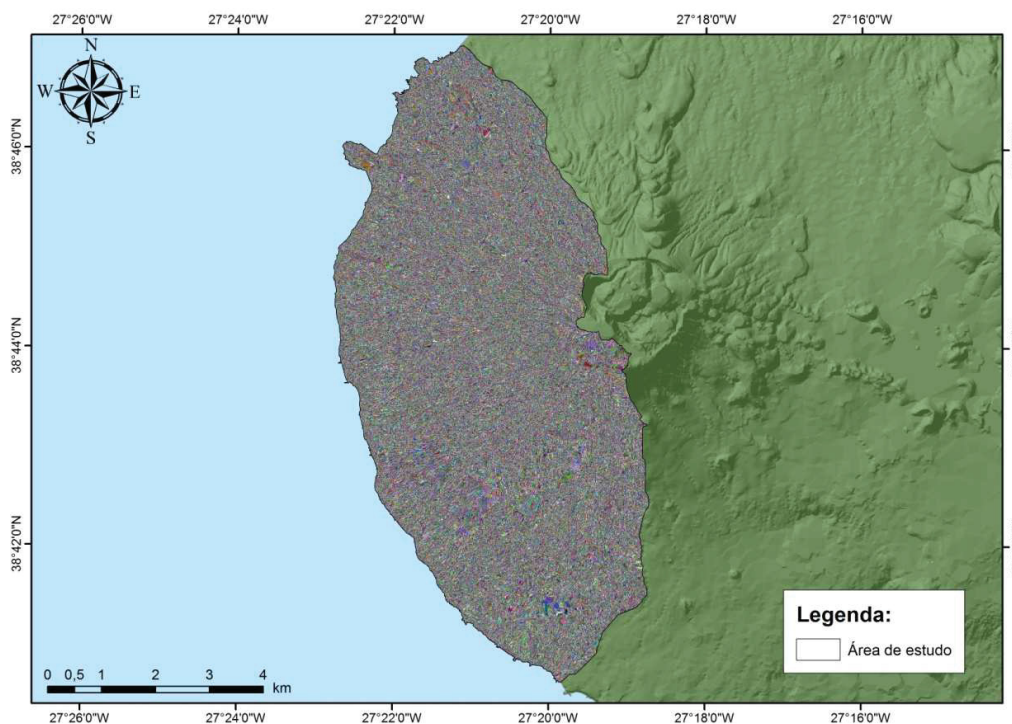


Figura 5.24 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente antes do processo de classificação final (escala contínua de valores), apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Neste trabalho, o mapa final selecionado, obtido com base no método do valor informativo e que considera os onze fatores de predisposição estudados, foi reclassificado em apenas 4 classes de suscetibilidade a movimentos de vertente, tal como proposto por Julião *et al.* (2009), com as seguintes designações qualitativas de suscetibilidade: 1) muito elevada, 2) elevada; 3) moderada; e 4) reduzida ou nula.

O método utilizado para proceder à respetiva classificação, baseou-se na percentagem de área instável prevista por interpretação da curva de sucesso (*e.g.* Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Marques, 2013), adotando os seguintes critérios (tabela 5.23):

- 1) A classe de suscetibilidade muito elevada contém 90% da área instabilizada;
- 2) A classe de suscetibilidade elevada, em conjunto com a classe de suscetibilidade muito elevada, contém 95% da área instabilizada;
- 3) A classe de suscetibilidade moderada, em conjunto com as classes de suscetibilidade muito elevada e elevada, contém 99% da área instabilizada;

4) A classe de suscetibilidade reduzida ou nula, em conjunto com as classes de suscetibilidade muito elevada, elevada e moderada, contêm 100% da área instabilizada.

Tabela 5.23 - Critérios de separação das classes de suscetibilidade, através da percentagem de área instabilizada prevista com base na interpretação da curva de sucesso (SRC).

Classe de Suscetibilidade	Capacidade preditiva (%)	Área instabilizada (% acumulada)	Área de estudo (% acumulada)
Muito elevada	90	90	3,75
Elevada	5	95	7,02
Moderada	4	99	23,33
Reduzida ou nula	1	100	100,00

Para sustentar a tomada de decisão quanto aos critérios adotados para divisão das classes, determinou-se a razão de eficiência (rE) para as classes definidas, cujos valores podem ser consultados na tabela 5.24.

Tabela 5.24 - Razão de eficiência (rE) das classes de suscetibilidade definidas para o mapa final e classificação das mesmas de acordo com a proposta apresentada por Guzzetti *et al.* (2006b)

Classe de Suscetibilidade	rE	Classificação de Guzzetti <i>et al.</i> , (2006b)
Muito elevada	23,98	Significativa (> 1,5)
Elevada	1,55	Significativa (> 1,5)
Moderada	0,24	Significativa (<0,5)
Reduzida ou nula	0,01	Significativa (<0,5)

Como se constata pela análise da informação presente na tabela 5.24, tendo em conta a classificação proposta por Guzzetti *et al.* (2006b), todas as classes são "significativas", já que as duas classes de suscetibilidade mais elevada apresentam valores de rE superiores a 1,5 e que as duas classes de suscetibilidade mais baixa apresentam valores de rE inferiores a 0,5.

Na realidade, destacam-se as classes extremas, ou seja, a classe de suscetibilidade muito elevada apresenta um valor rE extremamente elevado (23,98), enquanto que a classe de suscetibilidade reduzida ou nula apresenta um valor de rE muito baixo (0,01), razão pela qual, mesmo considerando a classificação proposta por Chung e Fabbri (2003),

cujos limites são manifestamente mais exigentes (ver ponto 5.7), ambas a classes seriam classificadas como "*muito significativas*".

Na figura 5.25, é apresentado o mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente da área de estudo, desenvolvido com base no Método do Valor Informativo, utilizando os onze fatores de predisposição estudados e classificado tendo em conta a percentagem de área prevista pela curva de sucesso (SRC), de acordo com os critérios anteriormente descritos. Este mapa é também apresentado, com maior grau de detalhe, nos Anexos III e IV do presente trabalho.

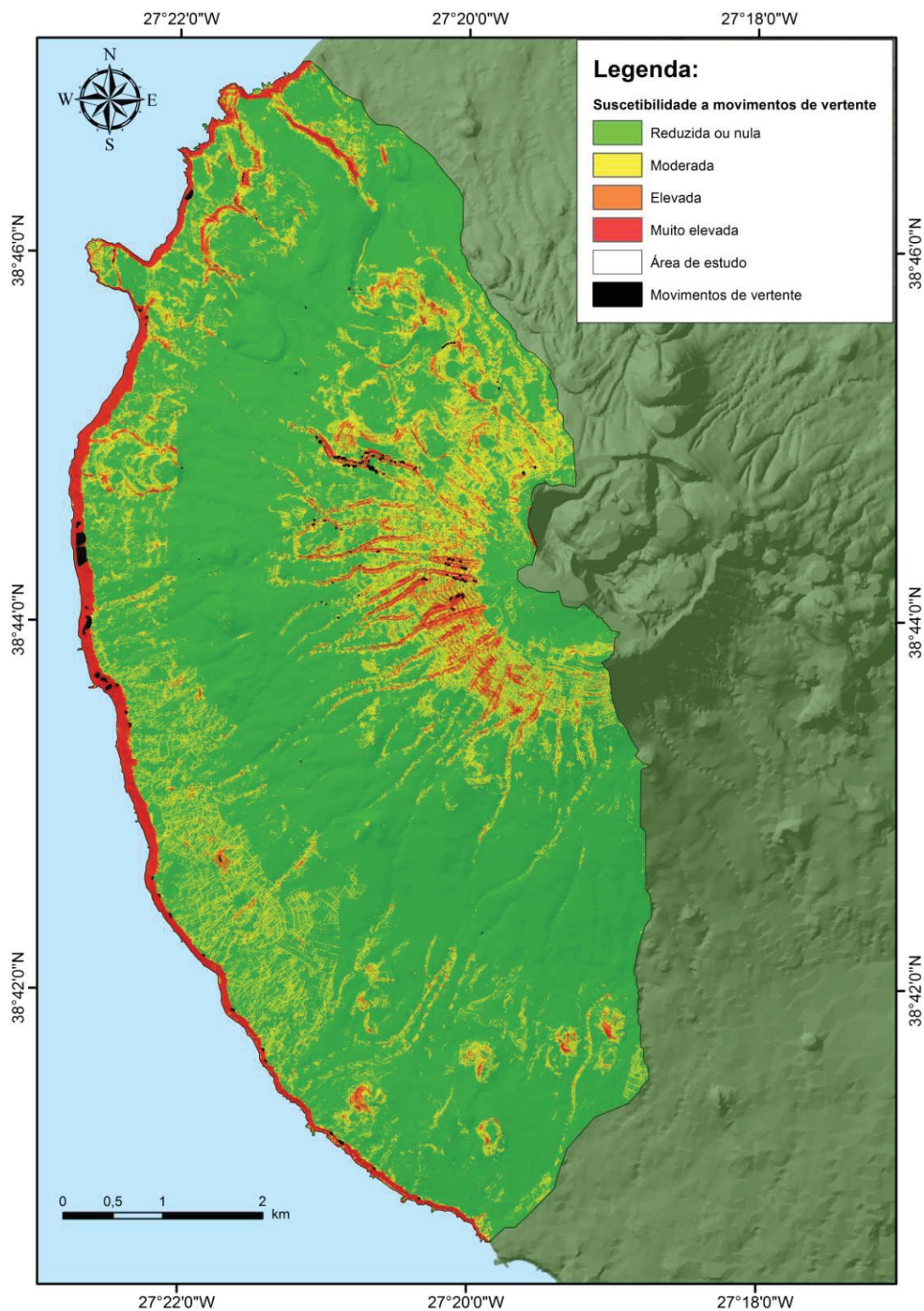


Figura 5.25 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente da área de estudo, desenvolvido com base no Método do Valor Informativo (com onze fatores de predisposição), classificado tendo em conta a percentagem de área instabilizada prevista pela curva de sucesso (SRC), apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Tendo em conta o sistema de classificação adotado, na figura 5.26 é apresentada a distribuição da área de estudo por cada classe de suscetibilidade a movimentos de vertente. Verifica-se que 7,02% da área de estudo apresenta suscetibilidade muito elevada ou elevada. Por outro lado, 16,31% da área de estudo apresenta suscetibilidade moderada, enquanto que 76,67% da área apresenta suscetibilidade reduzida ou nula.

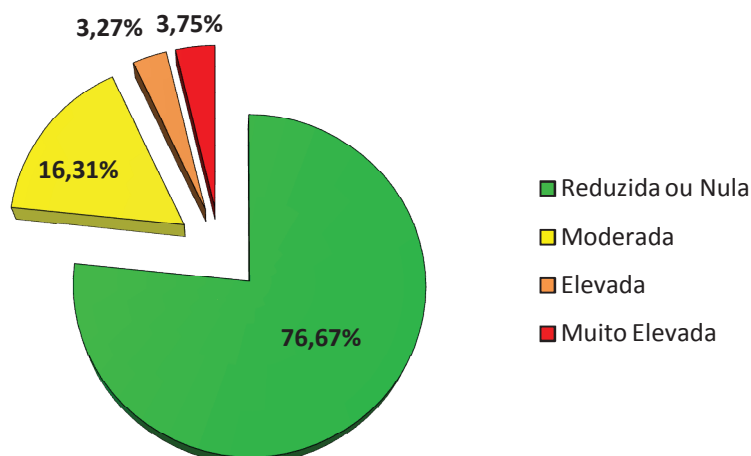


Figura 5.26 - Distribuição da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade.

Como referido anteriormente, o mapa apresentado para a área de estudo tem por base apenas a suscetibilidade à rotura de movimentos de vertente. No entanto e apesar de não ter sido um dos objetivos deste estudo, é importante referir que a modelação das áreas de propagação dos movimentos de vertente, tende a aumentar consideravelmente a área de estudo englobada nas classes de suscetibilidade mais elevada, como se pode comprovar no trabalho desenvolvido por Marques (2013), no concelho da Povoação, na ilha de São Miguel (Açores). A título de exemplo, no referido trabalho, a percentagem de área incluída na classe de suscetibilidade "Muito elevada" cresce de 17,4% para 33,6% ao considerar-se, adicionalmente, a área de propagação dos movimentos de vertente.

5.8.5 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS EM RISCO

Segundo Julião *et al.* (2009), a identificação dos elementos em risco resulta da simples sobreposição dos elementos expostos com os mapas de suscetibilidade desenvolvidos, determinando-se, dessa forma, "as áreas de risco sem efetuar a avaliação quantitativa do mesmo". De acordo com o autor, este processo representa "um importante elemento para o planeamento de emergência e para o ordenamento do território, servindo de base para a formulação das opções a consubstanciar nos PDM e PME".

Finalizado o mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolvido para a área de estudo, para a identificação dos elementos em risco, utilizou-se o levantamento do edificado e das acessibilidades da ilha Terceira, realizado pelos Serviços de Cartografia da Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos (SRHE, 2001) (ver secção 3.5.3), à escala de 1:25.000, como ilustrado na figura 5.27. Para uma análise mais detalhada, mapa de identificação dos elementos em risco na área de estudo pode ser, adicionalmente, consultado no Anexo IV do presente trabalho.

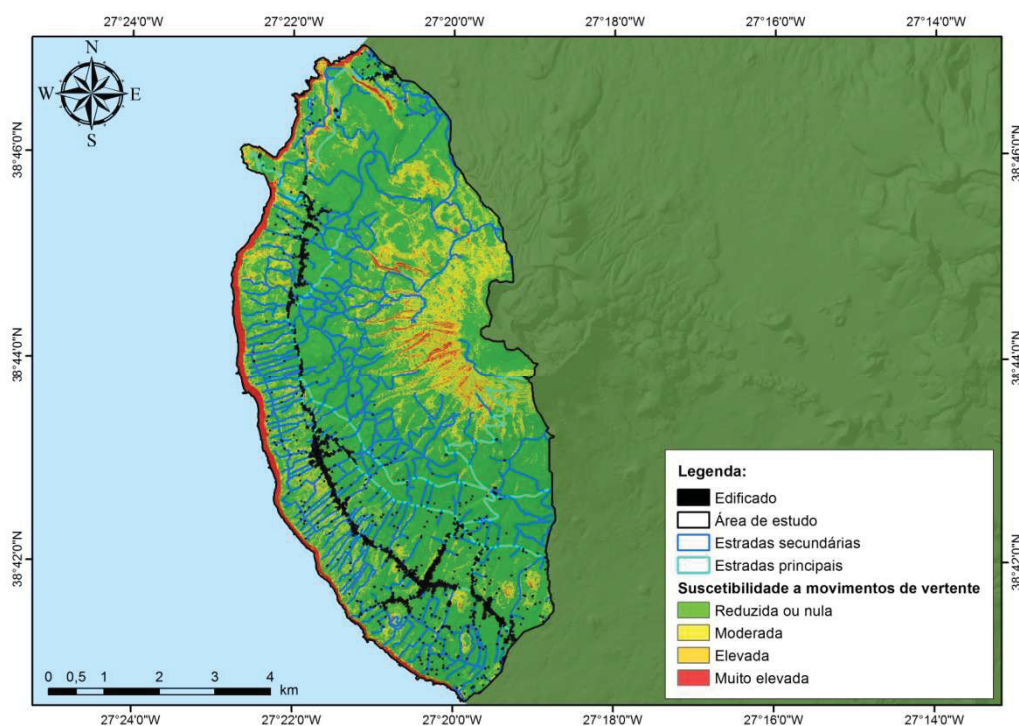


Figura 5.27 - Ilustração da sobreposição dos elementos expostos com o mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente da área de estudo. Mapa apresentado em coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, fuso 26 N.

Relativamente ao edificado, foram utilizados os 1.865 edifícios pertencentes à área de estudo, cartografados sob forma de polígonos. De forma conservadora, nas situações em que um edifício abrange unidades de terreno de diferentes classes de suscetibilidade, foi considerada a classe de suscetibilidade mais elevada para a sua classificação.

Os resultados da sobreposição do edificado ao mapa de suscetibilidade desenvolvido para a área de estudo são apresentados na figura 5.28.

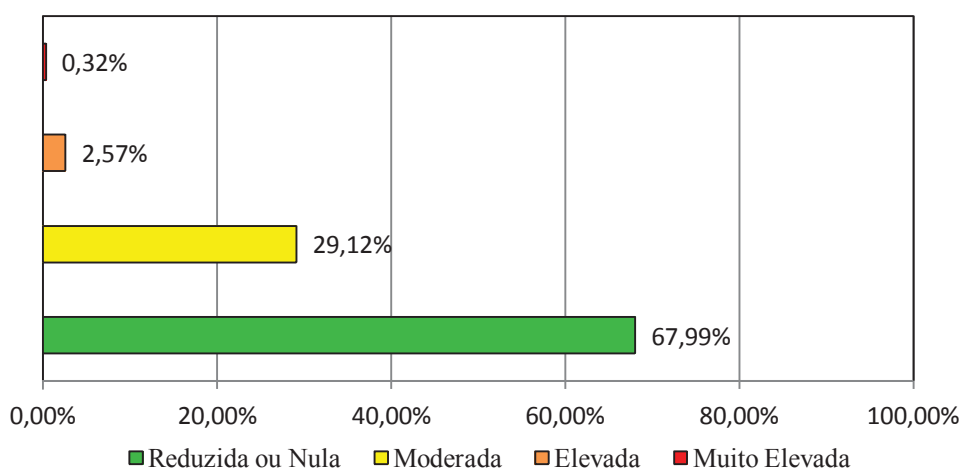


Figura 5.28 - Distribuição do edificado da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade.

Pela análise gráfica, verifica-se que a grande maioria do edificado se encontra implantado em zonas de suscetibilidade reduzida ou nula. No entanto, a classe de suscetibilidade moderada abrange 543 edifícios, enquanto que 48 edifícios estão localizados em áreas de suscetibilidade elevada e 5 edifícios em zonas de suscetibilidade muito elevada.

Relativamente às acessibilidades, foram consideradas as estradas principais e secundárias (caminhos), originalmente representadas por linhas, que, genericamente, se referem ao eixo central das vias. As estradas principais existentes na área de estudo apresentam um extensão total de 38,82 km, enquanto que as estradas secundárias apresentam um comprimento de 187,8 km.

Para a respetiva sobreposição ao mapa de suscetibilidade, através da ferramenta *Geoprocessing*, do software ArcGis 10.1, foi criado um *buffer* para cada um dos dois tipos de acessibilidades, centrado na linha original, atribuindo-se às estradas principais

uma largura total de 10 m e às estradas secundárias uma largura de 5 m, sendo que, genericamente, estas medidas representam adequadamente as larguras verificadas, respetivamente, nos dois tipos de estradas. Posteriormente, os referidos *buffers* foram convertidos para formato matricial, utilizando unidades de terrenos de 5 m x 5 m, por forma a manter a correspondência com o mapa de suscetibilidade.

A determinação das áreas das acessibilidades correspondentes a cada classe de suscetibilizada foi efetuada através da ferramenta *Spatial Analyst Tools* ("*tabulate area*"), também do software ArcGIS 10.1.

Os resultados da sobreposição das estradas principais e secundárias com o mapa de suscetibilidade desenvolvido para a área de estudo, são apresentados na figura 5.29.

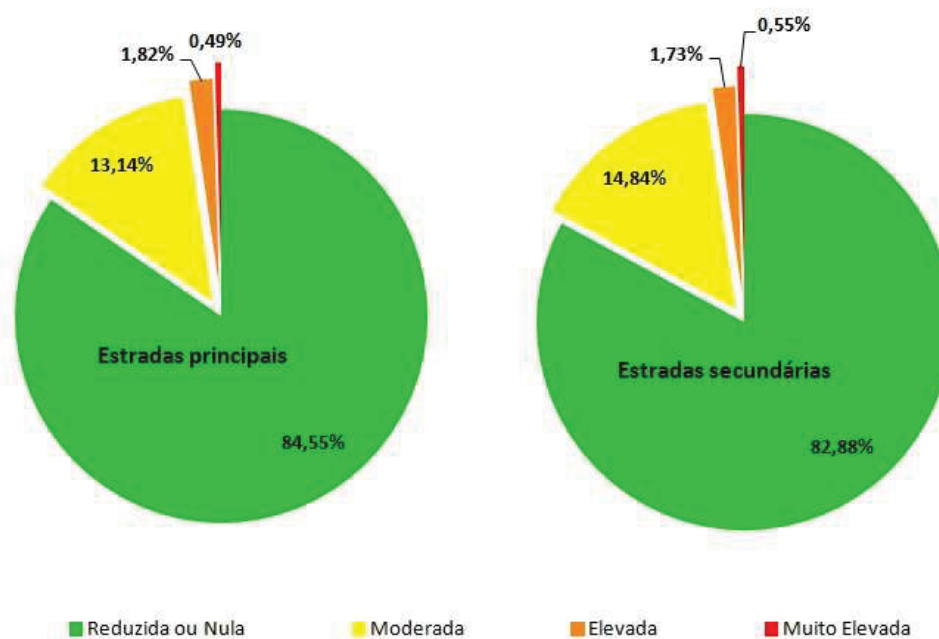


Figura 5.29 - Distribuição (%) das estradas principais e das estradas secundárias da área de estudo por classe de suscetibilidade.

Mais uma vez, importa referir que a determinação das área de propagação dos movimentos de vertente, tende a aumentar a área incluída nas classes de maior suscetibilidade e, nesse caso, as percentagens de elementos em risco abrangidos nas mesmas deverá crescer significativamente.

6. ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS

6.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em trabalhos desenvolvidos numa ótica de gestão interdisciplinar da paisagem, como é o caso, para além da avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente no presente, é também de extrema importância estudar de que forma essa suscetibilidade poderá evoluir em diferentes cenários, no futuro, por forma a avaliar os impactos que poderão derivar da sua variação espacial.

Neste sentido, entre as variáveis independentes utilizadas como fatores de predisposição em modelos de suscetibilidade a movimentos de vertente, importa ter em conta a evolução do comportamento das variáveis geo-ambientais dinâmicas, especialmente aquelas que, pelo menos à nossa escala temporal, não seja possível controlar diretamente.

Assim sendo, de entre as onze variáveis utilizadas como fatores de predisposição no presente trabalho, importa estudar e avaliar de que forma a evolução da distribuição espacial da Precipitação Anual Acumulada (PAA), que é o 4.º fator de predisposição mais influente no modelo de suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolvido (ver secção 5.8.1), poderá influenciar a variação espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, em diferentes cenários de alterações climáticas globais, bem como que impactos poderão daí derivar em termos de elementos em risco, sendo esses os principais objetivos estabelecidos para a realização deste capítulo.

6.2 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS E CENÁRIOS FUTUROS

O aquecimento global resulta de um balanço positivo entre a energia que entra e a que sai do planeta, associado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) às emissões de gases com efeito de estufa, sendo este fenómeno responsável por alterações climáticas globais (Miguel, 2007).

O 4.º e 5.º Relatórios de Avaliação do IPCC (AR4 - *Fourth Assessment Report*, IPCC, 2007; AR5 - *Fifth Assessment Report*, IPCC, 2013), trouxeram novas e fortes evidências de que o sistema energético utilizado pela sociedade atual, baseado parcialmente na queima de combustíveis fósseis, terá impactos significativos sobre o clima, em virtude da acumulação de gases com efeito de estufa (principalmente dióxido de carbono) na atmosfera, influenciando os padrões futuros de temperatura e precipitação em todo o mundo. Segundo Sales *et al.* (2015), essas modificações podem implicar problemas graves em regiões vulneráveis, particularmente em setores como agricultura e recursos hídricos, os quais já sofrem de impactos da variação climática natural, que podem ser agravados num clima mais quente e com possíveis mudanças nos padrões de chuva à escala regional.

A bibliografia disponível sobre as causas, efeitos e impactos das alterações climáticas globais é extensa (*e.g.* Alvarez, 1998; Hansen *et al.*, 2000; Kessel, 2000; Rodrigues, 2001; Oppenheimer e Alley, 2004; Nicholls e Lowe, 2004; Santos e Miranda, 2006; Novo, 2007; Dawson e Spannagle, 2009; Moss *et al.*, 2010; Dow e Downing, 2011; Guemas *et al.*, 2012; Tomé, 2013; Ferreira, 2016), destacando-se, para o efeito, o AR4 e AR5 do IPCC (IPCC, 2007; IPCC, 2013; 2014a; 2014b; 2014c).

Segundo Aaheim *et al.* (2010), é cada vez maior a perceção de que, em matéria de clima, as medidas e políticas a adotar não se devem cingir apenas à mitigação, devendo centrar-se também na adaptação às alterações climáticas. Apesar disso, as ações de mitigação continuam a ter prioridade nas agendas políticas (*e.g.* IPCC, 2014c; Ferreira, 2016), uma vez que requerem a tomada de decisões no imediato, enquanto a adaptação é vista como um conjunto de ações que apenas requerem atenção num futuro relativamente distante.

Apesar disso, segundo Wilbanks *et al.* (2007 *in* IPCC, 2007), o AR4 do IPCC (2007), deixa uma clara mensagem de que um dos maiores desafios no desenvolvimento de

estratégias de adaptação às alterações climáticas globais se prende com um crescente risco a perigos naturais.

Na realidade, a dificuldade em lidar-se com os riscos no presente é de tal ordem que raramente se equaciona projetar formas de encarar riscos futuros. Ainda assim, apesar das evidentes dificuldades, uma avaliação da propensão à ocorrência de determinados tipos de perigos naturais e a forma como estes podem ser influenciados pelas alterações climáticas globais é uma peça elementar para o desenvolvimento de estratégias de adaptação (Aaheim *et al.*, 2010), razão pela qual, neste capítulo, se pretende proceder à avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, na área de estudo, em cenários de alterações climáticas globais, para diferentes horizontes temporais.

6.3 CENÁRIOS DE CONCENTRAÇÃO DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA

Até à publicação do AR4, os cenários do IPCC eram desenvolvidos e aplicados sequencialmente numa cadeia linear causal que se estendia desde os fatores socioeconómicos que influenciam as emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera, a processos climáticos e aos impactos previsíveis. O procedimento sequencial envolvia a produção de cenários de emissões de GEE baseados em diferentes cenários socioeconómicos, produção de estimativas de concentrações e forçamento radiativo resultante dessas emissões, produção de cenários climáticos e, finalmente, a sua utilização em estudos de impacto.

No entanto, apesar dos cenários de alterações climáticas estarem muito dependentes das atividades humanas e dos modelos económicos adotados pelo conjunto das comunidades humanas no seu todo (Rodrigues, 2001), concluiu-se que o procedimento de produção de cenários, anteriormente mencionado, se revelou muito longo e demorado, pelo que, para encurtar o tempo entre o desenvolvimento de cenários de emissões e a utilização dos cenários climáticos resultantes em estudos de impacto, foi desenvolvida uma metodologia designada de “produção paralela” para criar e utilizar cenários (Bernardino e Espírito Santo, 2015).

Assim, o AR5 faz a projeção de novos cenários de concentração de gases com efeito de estufa (GEE), denominados de RCP - *Representative Concentration Pathways* (Moss *et al.*, 2010), que substituem os anteriores SRES - *Special Report on Emission Scenarios*,

(Nakicenovic *et al.*, 2010) e que, de acordo com Bernardino e Espírito Santo (2015), apenas refletem "o que os peritos consideram poderem ser emissões futuras plausíveis baseadas em tendências socioeconómicas, tecnológicas e ambientais com base em modelos de avaliação integrada (*integrated assessment models*) e que cada RCP fornece apenas um de muitos cenários possíveis que dariam origem a um forçamento radiativo com características específicas".

Os RCP foram desenvolvidos por grupos de trabalho e modelos distintos e a sua denominação prende-se com a previsão dos respetivos forçamentos radiativos durante o século XXI, utilizados como dados de entrada nos modelos (*e.g.* Moss *et al.*, 2010; Meinshausen *et al.*, 2011).

Na tabela 6.1, descrevem-se sucintamente os diferentes RCP, sendo que uma descrição mais pormenorizada pode ser consultada em Moss *et al.* (2010), em RCP Database (2009) ou ainda nas respetivas publicações, indicadas na referida tabela.

Tabela 6.1 - Descrição dos RCP (*Representative Concentration Pathways*) apresentados no AR5 do IPCC (2013).

Designação	Forçamento radiativo em 2100	Tipo de forçamento	Equipa responsável /modelo utilizado	Publicação
RCP 2.6 (ou RCP 3-PD)	Pico de $\approx 3,0$ W/m ² a meados do século, decaindo para $\approx 2,6$ W/m ²	Pico e declínio	PBL/IMAGE	van Vuuren <i>et al.</i> (2007).
RCP 4.5	$\approx 4,5$ W/m ²	Estabilização sem pico	PNNL/MiniCAM	Clarke <i>et al.</i> (2007)
RCP 6.0	$\approx 6,0$ W/m ²	Estabilização sem pico	NIES/AIM	Hijioka <i>et al.</i> (2008)
RCP 8.5	$\approx 8,5$ W/m ²	Crescente	IIASA/MESSAGE	Riahi <i>et al.</i> (2007)

Assim, o RCP 2.6 é considerado um cenário de mitigação, com objetivo de manter o aumento global da temperatura abaixo dos 2°C, em comparação com temperaturas da era pré-industrial, sendo que os RCP 4.5 e 6.0 são considerados cenários intermédios, enquanto que o RCP 8.5 corresponde a um cenário com uma taxa de emissão de GEE muito elevada.

Segundo o IPCC (2013a), para o final do século, a temperatura deve aumentar, em média: 1°C para o RCP 2.6; 1.8°C para RCP 4.5; 2.2°C para o RCP 6.0; e 3.7°C para o RCP 8.0.

6.4 CENÁRIOS FUTUROS DE PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA UTILIZADOS NA MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

Para estudos de mitigação e adaptação a alterações climáticas, é necessário dispor de informação à escala regional e/ou local, que não é providenciada por Modelos Climáticos Globais (MCG). Assim, são necessárias técnicas de regionalização das análises geradas pelos MCG's, como o *downscaling* dinâmico, no qual os resultados servem de entrada para Modelos Climáticos Regionais (MCR). Segundo Tomé (2013), os MCG's podem oferecer informações sobre alterações do clima de grande utilidade para escalas continentais, sendo que, no entanto, estes modelos não podem representar com precisão mudanças no clima à escala local, como por exemplo precipitação devida a efeitos orográficos.

Para a modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente em cenários de alterações climáticas globais, foram utilizadas grelhas de precipitação anual acumulada (PAA) referentes aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do IPCC, cuja regionalização para os Açores foi feita através do modelo CIELO (Clima Insular à Escala Local), desenvolvido por Azevedo (1996), tendo os dados resultantes sido cedidos para este efeito.

Deste processo resultaram seis grelhas de PAA, isto é, para cada cenário foram geradas três grelhas de distribuição espacial da precipitação, referentes às previsões até 2039 (4.5-39 e 8.5-39), 2069 (4.5-69 e 8.5-69) e 2099 (4.5-99 e 8.5-99).

Por forma a ilustrar a variação da distribuição espacial entre a PAA utilizada inicialmente (média dos últimos 30 anos) no modelo de suscetibilidade a movimentos de vertente e a prevista para os vários cenários de alterações climáticas definidos, nas figuras 6.1 e 6.2 ilustram-se as grelhas de precipitação utilizadas para modelar a suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, para os cenários 4.5 e 8.5, respetivamente, considerando os diferentes horizontes temporais.

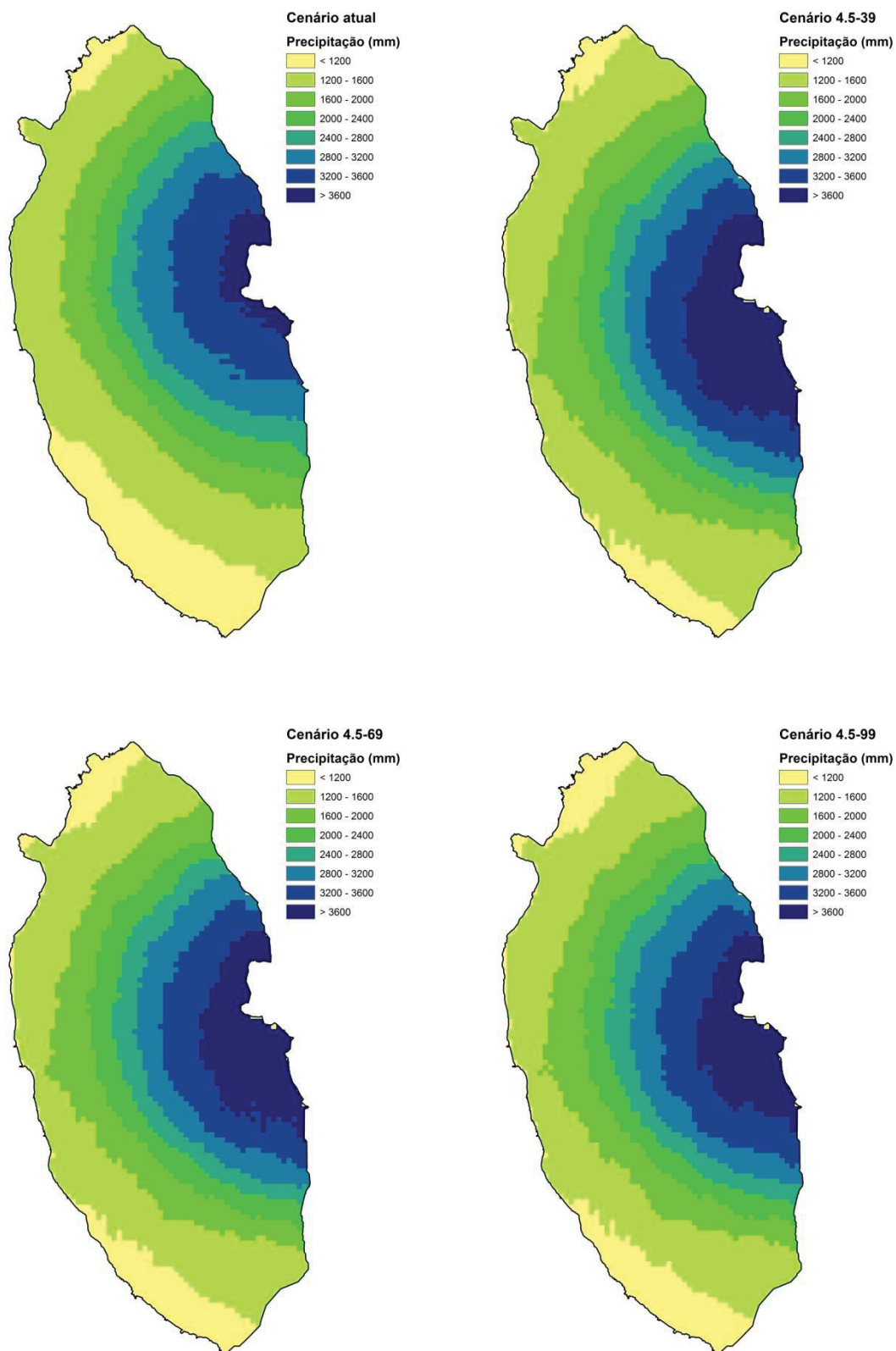


Figura 6.1 - Distribuição espacial da Precipitação Anual Acumulada (PAA) na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 4.5.

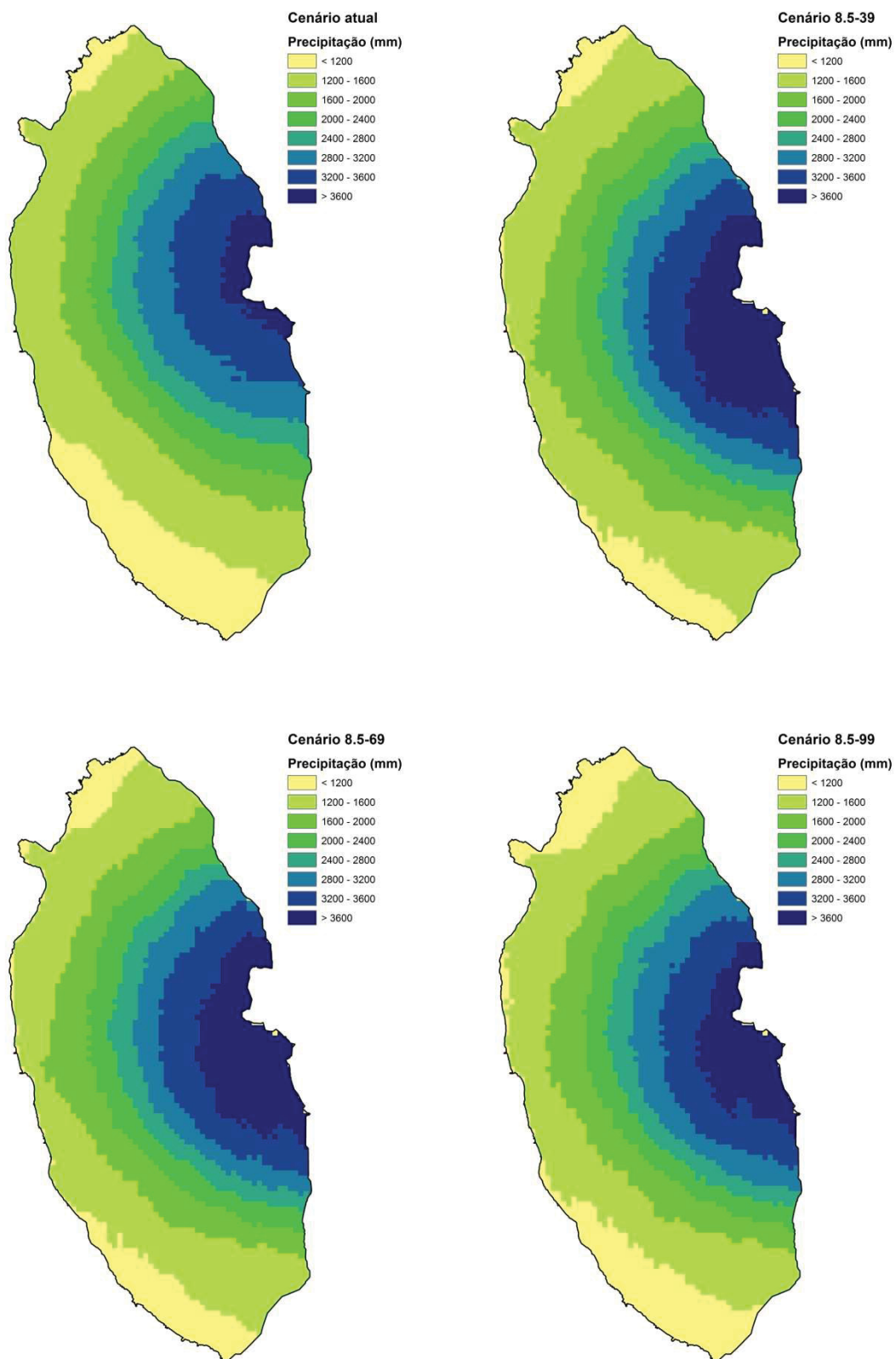


Figura 6.2 - Distribuição espacial da Precipitação Anual Acumulada (PAA) na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 8.5.

6.5 MODELAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE COM BASE EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS

As grelhas de PAA apresentadas no ponto anterior, referentes aos RCP 4.5 e 8.5, para os horizontes temporais de 2039, 2069 e 2099, foram utilizadas como fatores de predisposição, substituindo a grelha de PAA original, dando origem a seis novos mapas de suscetibilidade para a área de estudo.

Na prática, terminado e validado o modelo de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente desenvolvido para a área de estudo, procedeu-se novamente à modelação substituindo, progressivamente, nos dados de entrada do modelo (fatores de predisposição), a grelha de precipitação inicialmente utilizada pelas grelhas de precipitação referentes a cada um dos dois cenários considerados. Para cada mapa de PAA todo o processo de ponderação foi repetido, estimando-se as respetivas densidades de movimentos de vertente para a determinação dos valores informativos para as classes de cada uma destas novas variáveis (ver capítulo 5), obtendo-se, como resultado, seis novos mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente

A utilização de um método estatístico bivariado para avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, onde a relação é estabelecida individualmente entre cada fator de predisposição e a distribuição de movimentos de vertente, ou seja, onde o valor da ponderação de cada classe é determinado diretamente com base na correspondente densidade de movimentos de vertente (ver secções 5.3.4.5 a 5.3.4.7), demonstrou ser extremamente vantajosa para o objetivo estabelecido, permitindo substituir no algoritmo definido apenas um dos fatores de predisposição sem influenciar os restantes.

6.5.1 MAPAS DE SUSCETIBILIDADE PARA O CENÁRIO 4.5

Na figura 6.3 são apresentados os mapas de suscetibilidade a movimentos resultantes da utilização, no modelo de suscetibilidade desenvolvido, das novas grelhas de PAA, geradas com base no RCP 4.5, bem como o mapa de suscetibilidade atual, por forma a permitir uma comparação visual da variação das respetivas distribuições espaciais da suscetibilidade na área de estudo. Para uma análise mais refinada, no Anexo III do presente trabalho são também apresentados os referidos mapas, com maior grau de detalhe.

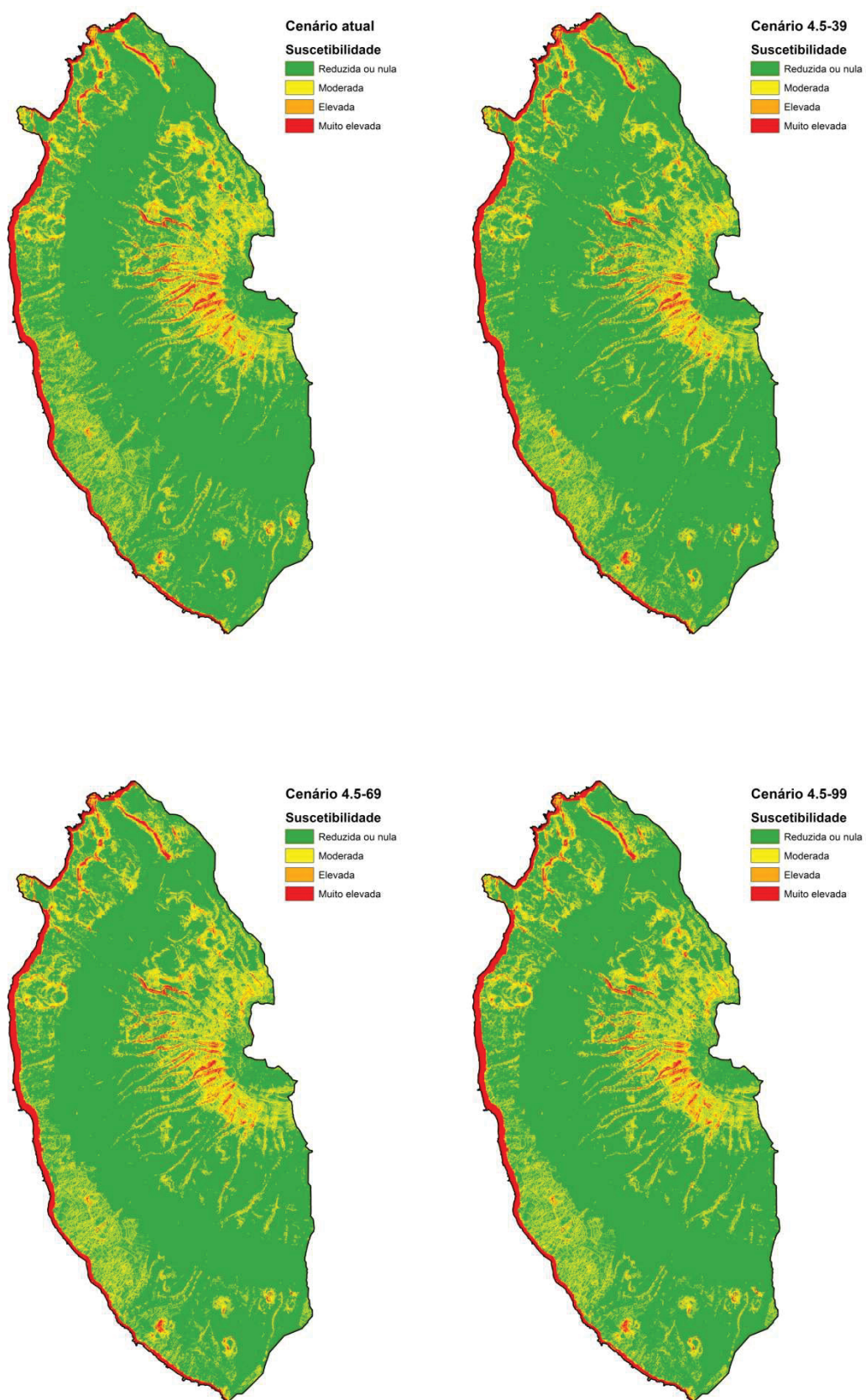


Figura 6.3 - Distribuição espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 4.5.

Para facilitar a interpretação dos resultados, mais concretamente em termos das variações na distribuição espacial da suscetibilidade, na figura 6.4 ilustra-se a distribuição da área de estudo por cada classe de suscetibilidade a movimentos de vertente, para a situação atual e para os diversos horizontes temporais do cenário 4.5.

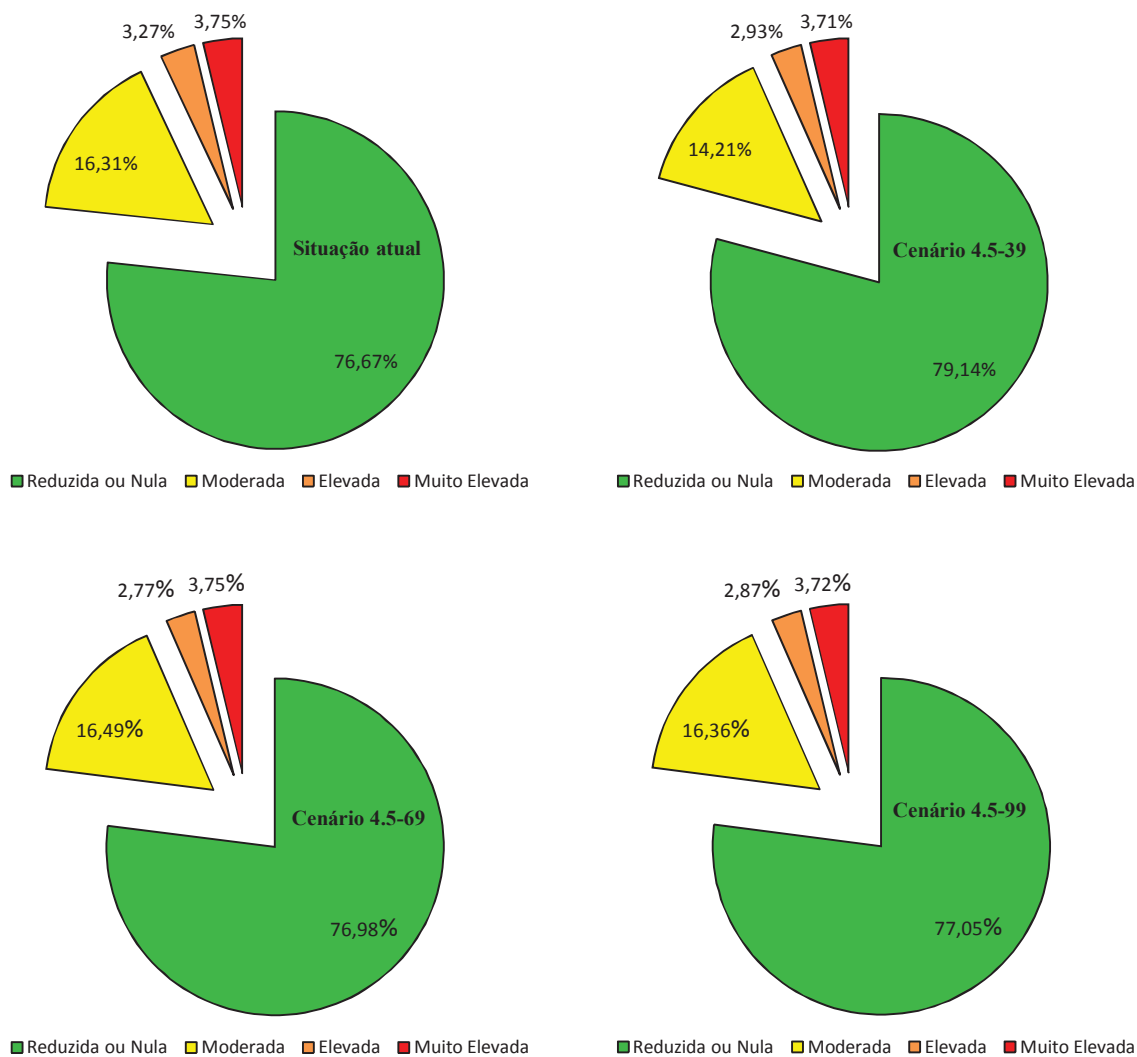


Figura 6.4 - Distribuição da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 4.5.

Como se pode verificar na figura anterior, a evolução da área de estudo (%) englobada em cada classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para os diferentes horizontes temporais do cenário 4.5, apresenta variações residuais, com tendência para a estabilização da área contida na classe de suscetibilidade muito elevada. São de salientar ainda pequenos aumentos na classe de suscetibilidade reduzida ou nula, face à redução

da área contida na classe elevada, com exceção da previsão para o ano 2039, onde o maior aumento relativo fica também a dever-se à redução da área incluída na classe de suscetibilidade moderada.

6.5.2 MAPAS DE SUSCETIBILIDADE PARA O CENÁRIO 8.5

Na figura 6.5 são apresentados os mapas de suscetibilidade a movimentos resultantes da utilização, no modelo de suscetibilidade desenvolvido, das novas grelhas de PAA, geradas com base no RCP 8.5, bem como o mapa de suscetibilidade atual, por forma a permitir, também neste caso, uma comparação visual da variação das respetivas distribuições espaciais da suscetibilidade na área de estudo. Adicionalmente, no Anexo III do presente trabalho, são apresentados os referidos mapas com maior grau de detalhe.

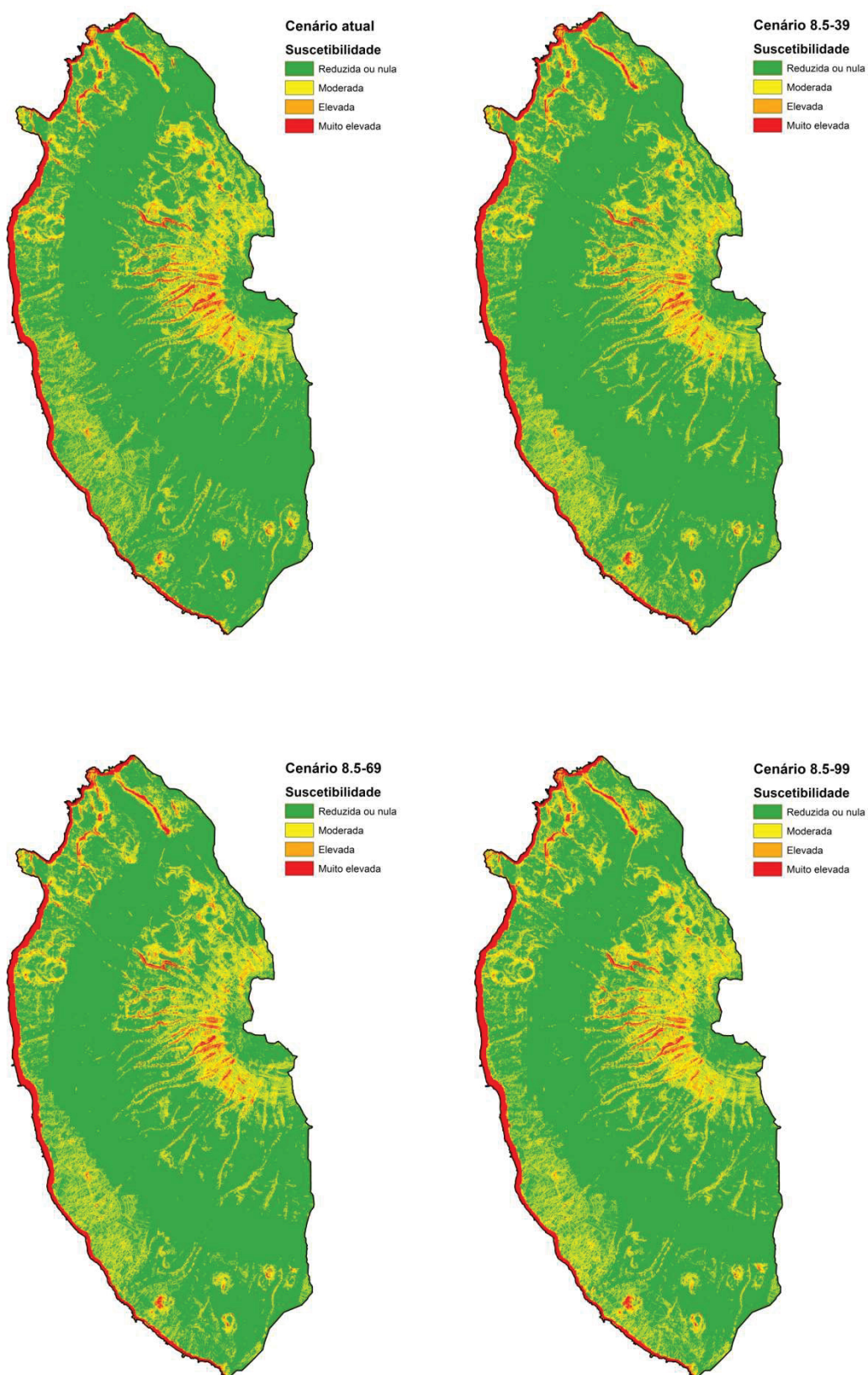


Figura 6.5 - Distribuição espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 8.5.

Na figura 6.6 ilustram-se as variações na distribuição da área de estudo por cada classe de suscetibilidade a movimentos de vertente entre a situação atual e os diversos horizontes temporais do cenário 8.5.

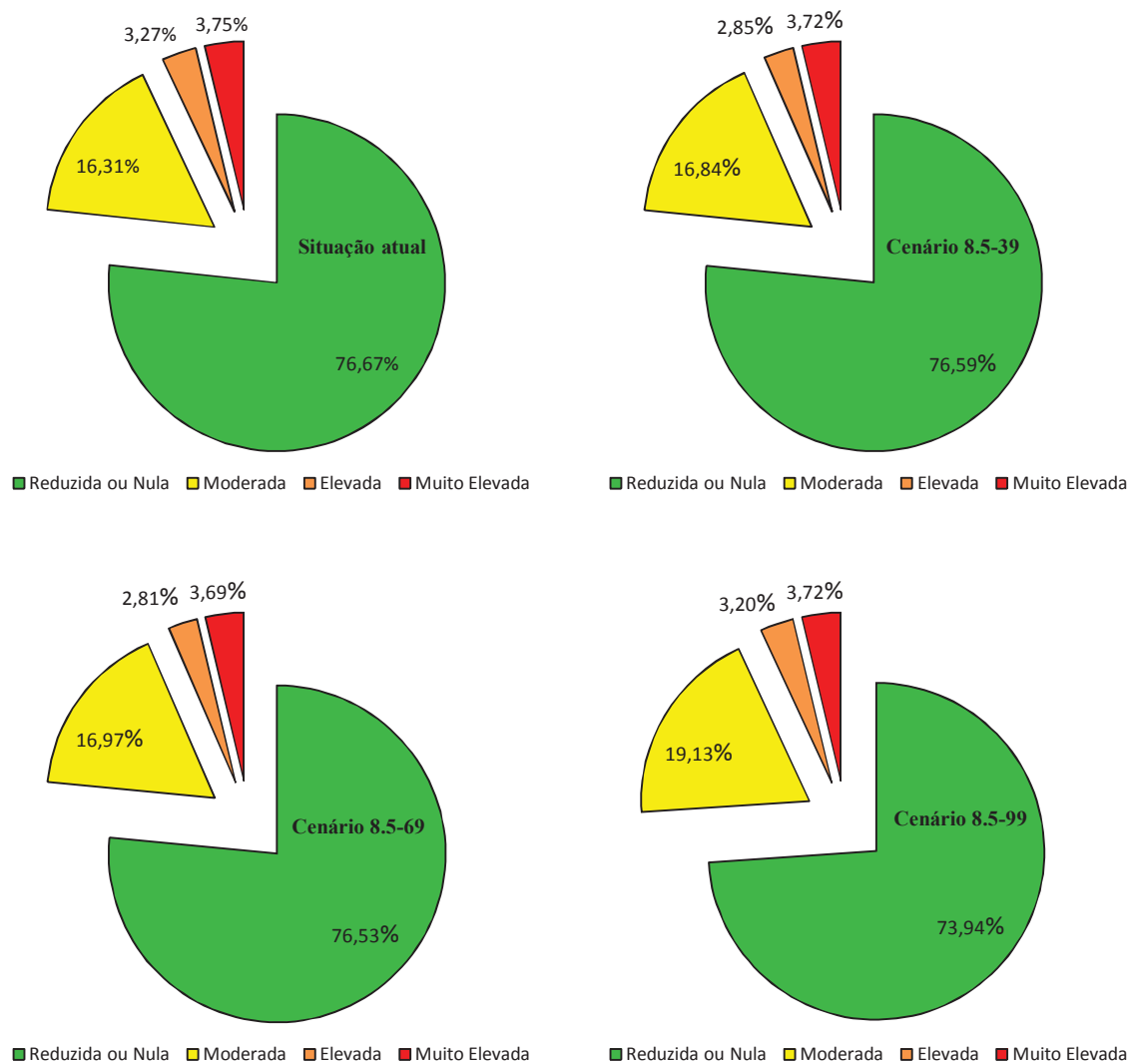


Figura 6.6 - Distribuição da área de estudo (%) por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente, para a situação atual e para os diferentes horizontes temporais definidos no cenário 8.5.

À imagem do que havia sucedido para o cenário 4.5, analisando a figura 6.6, observar-se que, no cenário 8.5, volta a haver uma tendência para a estabilização da área contida na classe de suscetibilidade muito elevada, com variações decrescentes mínimas, havendo também uma pequena diminuição da área contida na classe de elevada suscetibilidade.

Relativamente às classes de suscetibilidade reduzida ou nula e moderada, verifica-se que as respetivas evoluções variam numa razão inversa entre elas, sendo que as variações são muito ténues para 2039 e 2069. No entanto, para 2099 projetam-se variações algo significativas, caracterizadas pela diminuição da classe de suscetibilidade reduzida em mais de 2,5 pontos percentuais e pelo aumento da classe moderada em mais de 2 pontos percentuais, acompanhada pelo incremento, relativamente a 2039 e 2069, da área contida na classe elevada, para níveis sensivelmente equivalentes aos atuais.

Assim sendo, é de destacar a projeção feita para o ano de 2099, uma vez que se verifica uma tendência para a manutenção do peso das classes de suscetibilidade muito elevada e elevada, indicando no entanto, um aumento da representatividade da classe moderada em contraposição ao que se verifica para a classe de suscetibilidade reduzida ou nula. Para os restantes horizontes temporais do cenário 8.5, as pequenas variações verificadas são pouco significativas.

6.6 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS EM RISCO TENDO EM CONTA OS CENÁRIOS ESTUDADOS

6.6.1 CENÁRIO 4.5

Relativamente ao edificado, na tabela 6.2 são apresentadas as distribuições dos edifícios da área de estudo pelas classes de suscetibilidade a movimentos de vertente no cenário 4.5, tendo em conta as diferentes projeções temporais, bem como as variações em relação à situação verificada no presente.

Tabela 6.2 - Distribuição do edificado por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 4.5 e respetivas variações em relação à situação atual.

Classe de suscetibilidade	Situação atual	Cenário 4.5 - 39		Cenário 4.5 - 69		Cenário 4.5 - 99	
	# Edifícios	# Edifícios	Variação (%)	# Edifícios	Variação (%)	# Edifícios	Variação (%)
Reduzida ou nula	1.268	1.492	17,67	1.349	6,39	1.327	4,65
Moderada	543	348	-35,91	479	-11,79	503	-7,37
Elevada	48	23	-52,08	32	-33,33	31	-35,42
Muito elevada	6	2	-66,67	5	-16,67	4	-33,33

Analisando a tabela 6.2, relativamente à situação atual, podemos verificar que em todas as projeções do cenário 4.5 há uma tendência para o aumento do número de edifícios enquadrados na classe de suscetibilidade reduzida ou nula, contrariamente ao que se verifica para as restantes classes. Porém, esse aumento é mais evidente na projeção para 2039, diminuindo progressivamente para 2069 e 2099.

Para a classe de suscetibilidade moderada, verifica-se uma evolução inversa à verificada para a classe reduzida ou nula, onde, relativamente à situação atual, se observa uma redução significativa do número de edifícios abrangidos para o ano 2039, sendo que, no entanto, esse número aumenta progressivamente para 2069 e 2099.

No que se refere às classes de suscetibilidade elevada e muito elevada, verifica-se, para ambas, uma diminuição do número de edifícios abrangidos na projeção para 2039, registando-se um aumento significativo para 2069, que se inverte ligeiramente na projeção para 2099, sendo que, todavia, os valores verificados para estas duas últimas projeções se situam bastante abaixo dos determinados para o presente.

Todas as variações observadas são concordantes com as correspondentes variações referentes aos totais de área de estudo englobada nas várias classes de suscetibilidade, onde para o ano de 2039 se verifica um aumento significativo da classe de suscetibilidade reduzida ou nula, em detrimento de uma quebra na classe moderada, bem como diminuições da expressão das classes elevada e muito elevada.

Por outro lado, as variações verificadas na distribuição da área de estudo pelas classes de suscetibilidade reduzida ou nula e moderada para as projeções de 2069 e 2099, em relação ao ano de 2039, onde os respetivos pesos se aproximam dos verificados na atualidade, bem como as pequenas variações verificadas nas classes elevada e muito elevada, explicam perfeitamente as correspondentes variações ocorridas na distribuição do edificado.

Ainda assim, no global, verifica-se, para todas as variantes do cenário 4.5, uma redução da quantidade de edifícios enquadrados nas classes de suscetibilidade mais elevadas.

No que diz respeito às estradas principais, na figura 6.7 são apresentadas as respetivas distribuições pelas classes de suscetibilidade a movimentos de vertente para o cenário 4.5, tendo em conta os diferentes universos temporais, bem como as variações em relação à situação atual.

Pela interpretação da referida figura, contata-se que a área de estradas principais incluída nas classes de suscetibilidade muito elevada, elevada e moderada decresce na projeção para 2039, sendo que esse decréscimo se traduz diretamente num aumento da quantidade de estradas englobadas na classe de suscetibilidade reduzida ou nula, em relação ao que se verifica presentemente.

Relativamente às projeções para 2069 e 2099, em comparação com a projeção para 2039, há uma tendência para a diminuição progressiva da expressão da classe de suscetibilidade reduzida ou nula, que se traduz num aumento da representatividade das classes moderada e elevada, acompanhado de uma estabilização do peso da classe de suscetibilidade muito elevada, ainda que com uma quebra residual entre 2069 e 2099.

No entanto, refira-se que para todas as projeções do cenário 4.5, à imagem do que sucede com o edificado, as percentagens de estradas principais incluídas nas 3 classes de suscetibilidade mais elevadas é sempre inferior às correspondentes percentagens de estradas verificadas para a situação atual. Como tal, conclui-se que para o cenário 4.5,

genericamente, as estradas principais da área de estudo estão expostas a uma menor suscetibilidade a movimentos de vertente, comparativamente à situação atual.

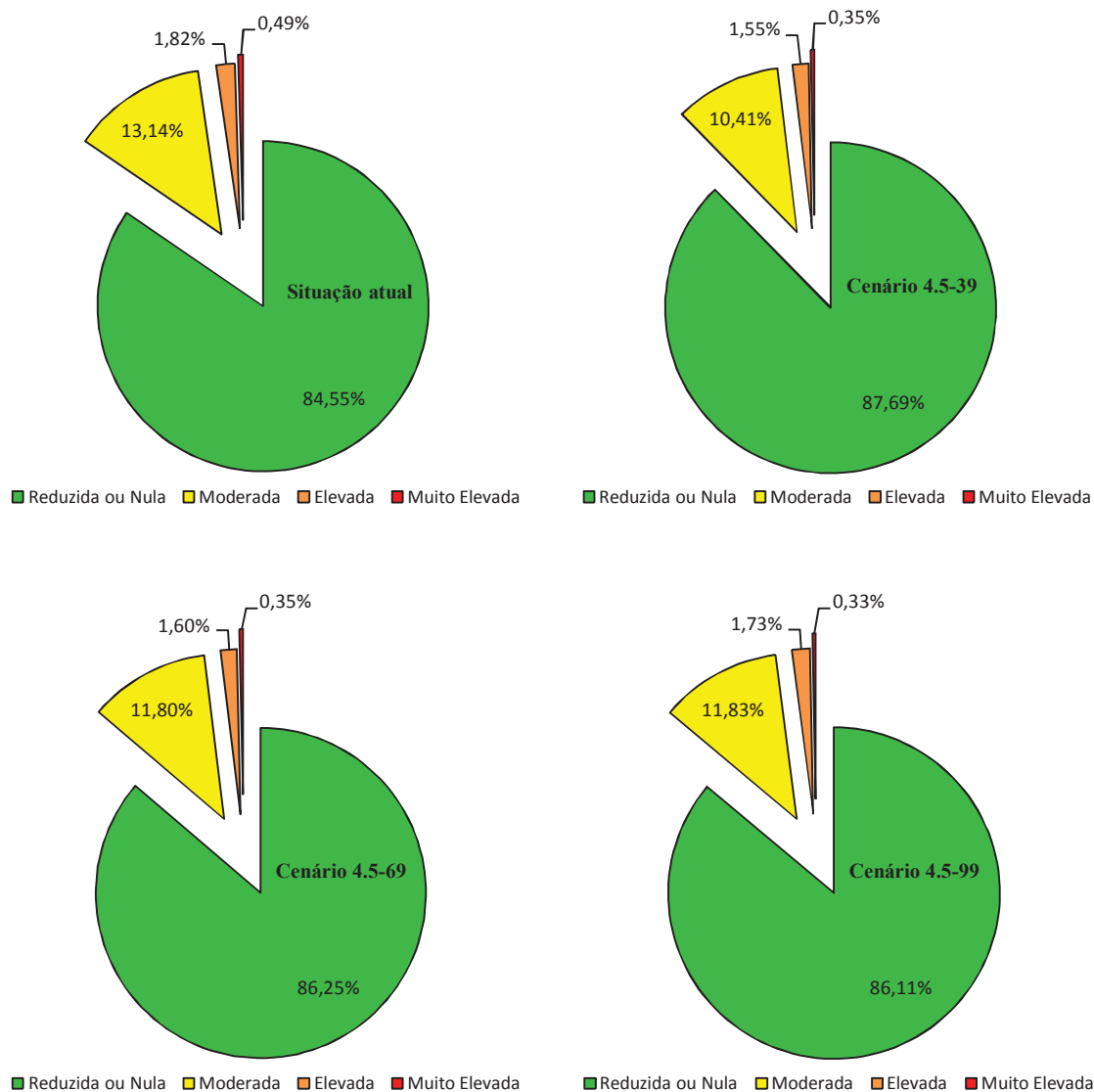


Figura 6.7 - Distribuição das estradas principais por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 4.5 e respetivas variações em relação à situação atual.

Por último, na figura 6.8 podem observar-se as variações nas distribuições das estradas secundárias pelas classes de suscetibilidade a movimentos de vertente para o cenário 4.5, tendo em conta os diferentes universos temporais.

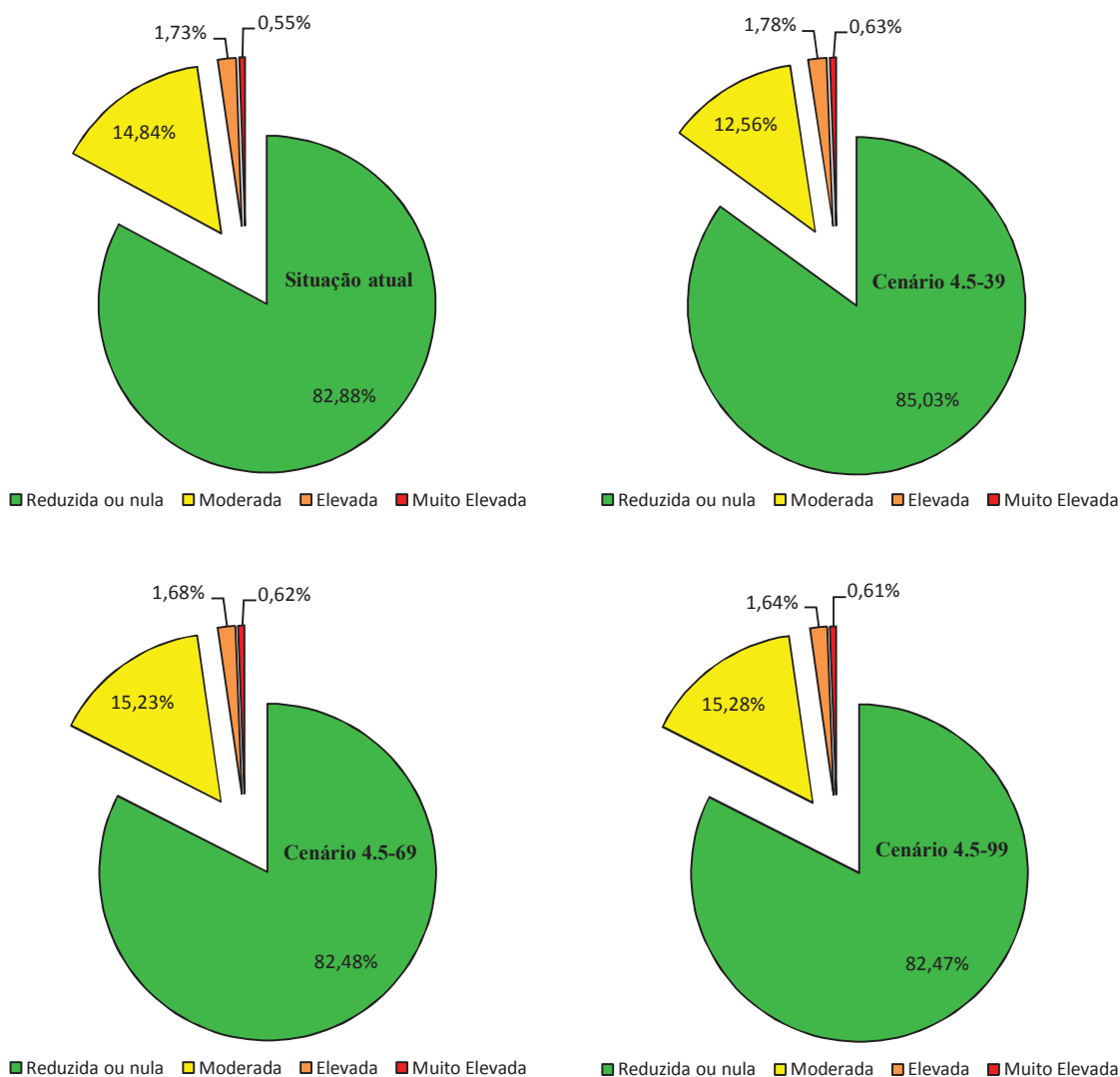


Figura 6.8 - Distribuição das estradas secundárias por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 4.5 e respetivas variações em relação à situação atual.

Como se pode observar, a situação em relação às estradas secundárias é completamente distinta da verificada relativamente ao edificado e às estradas principais, já que, comparativamente à situação atual, com exceção do que acontece com a classe moderada na projeção para 2039, em todas as projeções verifica-se um aumento progressivo da área de estradas secundárias incluídas nas três classes de suscetibilidade a movimentos de vertente mais elevada, em detrimento de uma redução da percentagem incluída na classe de suscetibilidade reduzida ou nula.

6.6.2 CENÁRIO 8.5

Na tabela 6.3 são apresentadas as distribuições do edificado pelas classes de suscetibilidade a movimentos de vertente para o cenário 8.5, tendo em conta os diferentes universos temporais, bem como as variações em relação à situação presente.

Tabela 6.3 - Distribuição do edificado por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 8.5 e respetivas variações em relação à situação atual.

Classe de suscetibilidade	Situação atual	Cenário 8.5 - 39		Cenário 8.5 - 69		Cenário 8.5 - 99	
	# Edifícios	# Edifícios	Variação (%)	# Edifícios	Variação (%)	# Edifícios	Variação (%)
Reduzida ou nula	1268	1396	10,09	1346	6,15	1244	-1,89
Moderada	543	434	-20,07	484	-10,87	589	8,47
Elevada	48	32	-33,33	31	-35,42	31	-35,42
Muito elevada	6	3	-50,00	4	-33,33	1	-83,33

Analisando a tabela 6.3, relativamente ao cenário atual, pode verificar-se que na projeção para 2039 há uma redução do edificado englobado nas três classes de suscetibilidade mais elevada, que se traduz num aumento significativo da expressão da classe de suscetibilidade reduzida ou nula. No entanto, na projeção para 2069, apesar da classe moderada continuar a incluir menos edifícios do que no cenário atual, verifica-se um aumento da sua representatividade em relação ao que se verifica na projeção para 2039, em contraste com o que acontece com a classe de suscetibilidade reduzida ou nula, sendo que essas tendências se acentuam na projeção para 2099, onde a classe moderada passa a abranger mais edifícios do que no presente e onde, em sentido contrário, a classe reduzida ou nula passa a abranger menos edifícios do que na situação atual.

Apesar do aumento da preponderância da classe de suscetibilidade moderada nas projeções para 2069 e 2099, verifica-se uma ligeira diminuição no que diz respeito à classe elevada e um pequeno aumento, seguido de um significativo decréscimo, no que se refere à classe de suscetibilidade muito elevada, sendo que nessas classes os valores determinados são sempre muito inferiores ao verificado presentemente.

Em geral, é de salientar uma diminuição no grau de suscetibilidade a que o edificado da área de estudo está sujeito, com exceção da projeção para 2099, onde se verifica um acréscimo de edifícios incluídos na classe de suscetibilidade moderada.

Na figura 6.9 são apresentadas as distribuições das percentagens das estradas principais pelas classes de suscetibilidade a movimentos de vertente para o cenário 8.5, tendo em conta os diferentes universos temporais, bem como as respetivas variações em relação à situação atual.

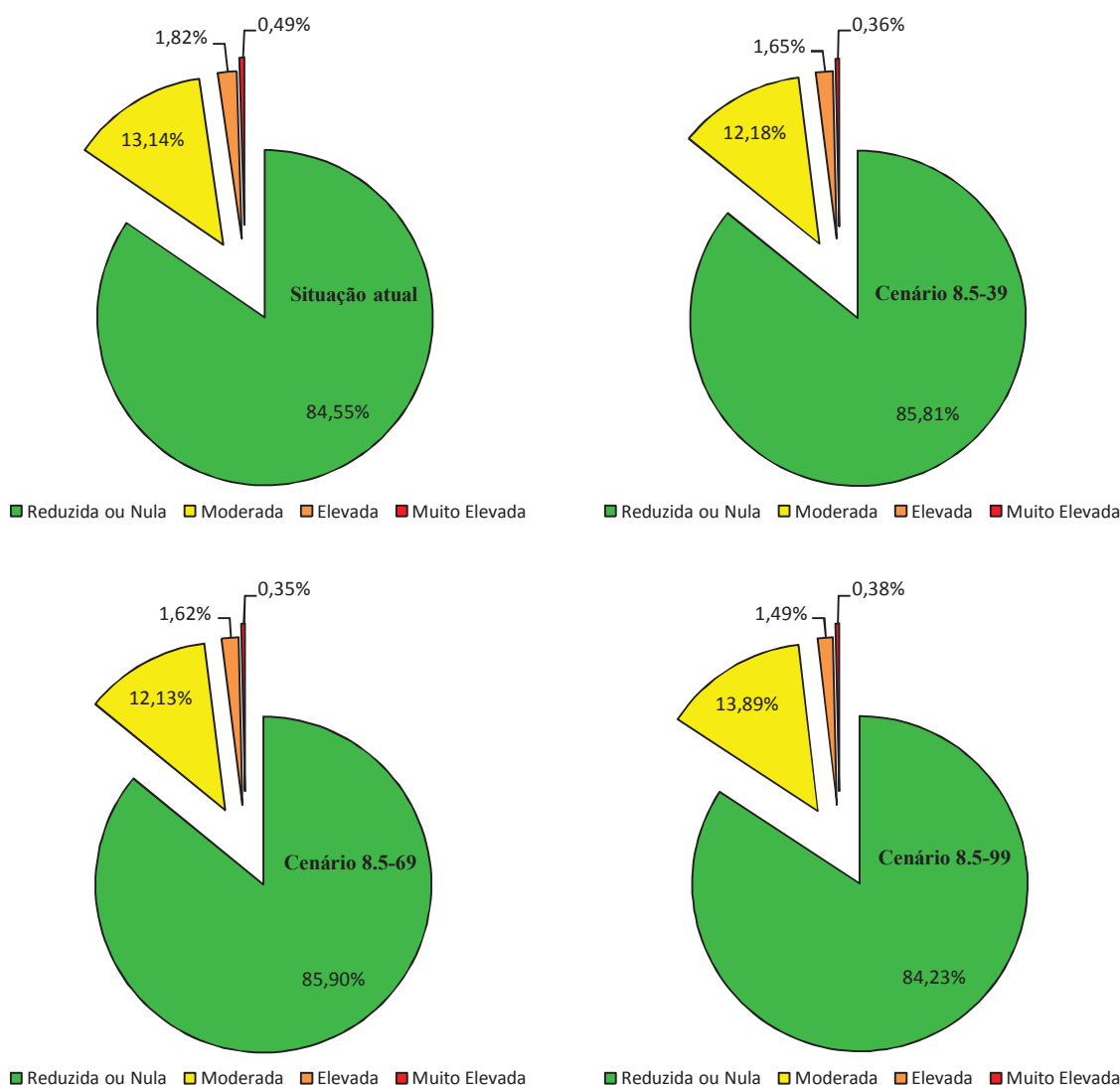


Figura 6.9 - Distribuição das estradas principais por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 8.5 e respetivas variações em relação à situação atual.

Pela análise da figura anterior é possível observar que, mais uma vez, se verifica ao longo do tempo uma variação inversa entre a representatividade das classes reduzida ou nula e moderada, sendo que, em relação ao panorama atual, há uma diminuição da área das estradas principais incluídas na classe de suscetibilidade moderada na projeção para 2039, que volta a diminuir ligeiramente na projeção para 2069. No entanto, na projeção para 2099 a expressão da classe moderada aumenta significativamente, ultrapassando a que se verifica atualmente.

A classe de suscetibilidade elevada sofre oscilações semelhantes às verificadas na classe moderada, ainda que menos significativas e sem que o aumento do seu peso chegue a ser superior, na projeção para 2099, ao verificado no presente. No que se refere à classe de suscetibilidade muito elevada, relativamente ao atual cenário, registam-se pequenas reduções no seu peso para as projeções de 2039 e 2069, acompanhadas também de um pequeno aumento para 2099, mantendo-se, porém, sempre abaixo dos valores verificados presentemente.

Tal como verificado para o edificado, neste cenário há uma notória tendência para a diminuição do grau de suscetibilidade a que as estradas principais estão expostas, uma vez que a representatividade das classes de suscetibilidade mais elevada decresce na maioria dos casos, não voltando a atingir os valores verificados no presente, excetuando-se, ainda assim, o caso da classe moderada na projeção para 2099.

Por fim, como se constata analisando a figura 6.10, no que diz respeito às estradas secundárias, regista-se novamente uma inversão das tendências, sendo que, para todas as projeções, as expressões das classes de suscetibilidade moderada, elevada e muito elevada são sempre maiores do que as correspondentes na situação atual. O mesmo é dizer que a classe de suscetibilidade reduzida ou nula inclui sempre menores percentagens de estradas secundárias do que atualmente.

De entre as projeções, destaca-se a referente ao ano de 2099, onde se verificam as maiores representatividades relativas das classes de suscetibilidade moderada e elevada, com aumentos significativos, bem como o segundo maior valor para a classe muito elevada e, por conseguinte, o menor peso da classe de suscetibilidade reduzida ou nula.

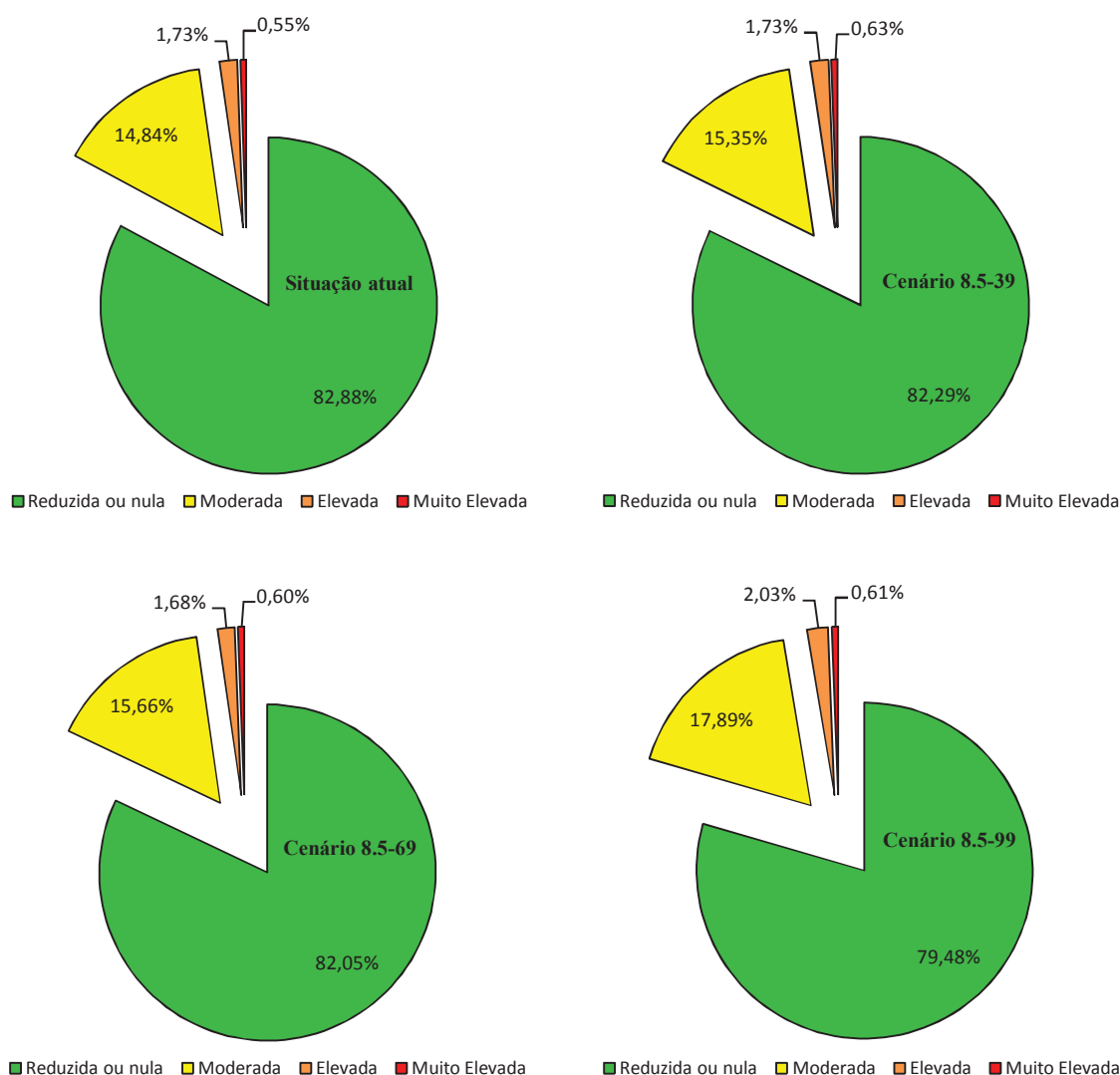


Figura 6.10 - Distribuição das estradas secundárias por classe de suscetibilidade a movimentos de vertente para as diversas projeções temporais do cenário 8.5 e respetivas variações em relação à situação atual.

6.6.3 ANÁLISE COMPARATIVA DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE MODELADA PARA OS CENÁRIOS 4.5 E 8.5.

A análise comparativa da variação da distribuição dos vários elementos pelas diversas classes de suscetibilidade a movimentos de vertente, entre o cenário 4.5 e o cenário 8.5, para as três projeções disponíveis, e a respetiva relação com os valores verificados na situação atual, permite também tecer algumas considerações importantes, pelo que, na tabela 6.4 se sistematizam os resultados obtidos e anteriormente apresentados nas figuras 6.4 e 6.6 a 6.10, bem como nas tabelas 6.2 e 6.3.

Tabela 6.4 - Quadro síntese da distribuição dos vários elementos considerados pelas diferentes classes de suscetibilidade a movimentos de vertente, para as três projeções dos cenários 4.5 e 8.5 e na situação atual.

Evolução da suscetibilidade	Projeção	2039		2069		2099		Atual
	Classe/Cenário	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5	
Área de estudo	Reduzida ou nula	79,14%	76,59%	76,98%	76,53%	77,05%	73,94%	76,67%
	Moderada	14,21%	16,84%	16,49%	16,97%	16,36%	19,13%	16,31%
	Elevada	2,93%	2,85%	2,77%	2,81%	2,87%	3,20%	3,27%
	Muito elevada	3,71%	3,72%	3,75%	3,69%	3,72%	3,72%	3,75%
Edificado	Reduzida ou nula	80,00%	74,85%	72,33%	72,17%	71,15%	66,70%	67,99%
	Moderada	18,66%	23,27%	25,68%	25,95%	26,97%	31,58%	29,12%
	Elevada	1,23%	1,72%	1,72%	1,66%	1,66%	1,66%	2,57%
	Muito elevada	0,11%	0,16%	0,27%	0,21%	0,21%	0,05%	0,32%
Estradas Principais	Reduzida ou nula	87,69%	85,81%	86,25%	85,90%	86,11%	84,23%	84,55%
	Moderada	10,41%	12,18%	11,80%	12,13%	11,83%	13,89%	13,14%
	Elevada	1,55%	1,65%	1,60%	1,62%	1,73%	1,49%	1,82%
	Muito elevada	0,35%	0,36%	0,35%	0,35%	0,33%	0,38%	0,49%
Estradas Secundárias	Reduzida ou nula	85,03%	82,29%	82,48%	82,05%	82,47%	79,48%	82,88%
	Moderada	12,56%	15,35%	15,23%	15,66%	15,28%	17,89%	14,84%
	Elevada	1,78%	1,73%	1,68%	1,68%	1,64%	2,03%	1,73%
	Muito elevada	0,63%	0,63%	0,62%	0,60%	0,61%	0,61%	0,55%

Como se pode observar pelos dados presentes na tabela 6.4, centrando a análise na distribuição da área de estudo pelas classes de suscetibilidade, o cenário 4.5 apresenta, em todas as projeções, uma maior representatividade da classe reduzida ou nula do que a verificada no cenário 8.5 e na situação atual.

O inverso é verificado no que se refere à classe moderada, em todas as projeções, sendo mais expressiva para o cenário 8.5 do que para o 4.5 e para o caso atual.

Em relação à classe de suscetibilidade elevada, as maiores percentagens são obtidas no cenário 8.5, com exceção da projeção para 2039. No entanto, apenas na projeção para 2099, os valores ultrapassam os valores verificados na atualidade.

Por fim, no que diz respeito à área de estudo englobada na classe de suscetibilidade muito elevada, os valores são muito semelhantes para os dois cenários, sendo ligeiramente superiores para o cenário 8.5 na projeção para 2039, ligeiramente superiores para cenário 4.5 na projeção para 2069 e sendo iguais na projeção para 2099,

sem que em nenhum dos casos venham a ser superiores aos valores existentes atualmente para esta classe.

Assim, pode concluir-se que, a concretizar-se o cenário 4.5, genericamente, se verifica uma diminuição da suscetibilidade a movimentos de vertente na área de estudo, uma vez que se regista um aumento da representatividade da classe reduzida ou nula em todas as projeções, face ao que acontece atualmente, sendo que a expressão das classes de suscetibilidade mais elevadas é quase sempre inferior à atual, com exceção do que acontece na classe moderada para as projeções para 2069 e 2099, onde são residualmente superiores, e na classe muito elevada para 2069, onde os valores são iguais.

Conclui-se ainda que o cenário 8.5 corresponde a um ligeiro aumento da suscetibilidade a movimentos na área de estudo, verificando-se, para todas as projeções, em relação ao cenário atual, uma redução na percentagem de área incluída na classe de suscetibilidade reduzida ou nula e um aumento da área de estudo engobada na classe de suscetibilidade moderada. Por outro lado, apesar da representatividade das classes de suscetibilidade elevada e muito elevada na situação atual ser maior do que a verificada nas três projeções para o cenário 8.5, na realidade os valores são muito semelhantes. É de destacar ainda a projeção para 2099, onde as percentagens da área de estudo incluídas nas classes elevada e muito elevada são praticamente iguais às verificadas no presente, mas onde a expressão da classe de suscetibilidade moderada é significativamente superior.

A evolução da forma como a área de estudo se distribui pelas classes de suscetibilidade a movimentos de vertente, influencia, naturalmente, a respetiva distribuição dos elementos em risco.

Desta forma, tendo em conta que, neste capítulo, a modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente apenas difere da modelação original no que se refere às grelhas de PAA, utilizando-se as derivadas dos cenários RCP 4.5 e 8.5 em detrimento das originalmente utilizadas, verifica-se uma natural influência da precipitação na distribuição da área de estudo pelas diferentes classes de suscetibilidade. Uma vez que as maiores variações na distribuição espacial da PAA se traduzem num aumento da precipitação em maiores altitudes, o aumento da área contida nas classes de suscetibilidade mais elevada é verificado também em maiores altitudes.

A referida tendência em altitude, explica perfeitamente o facto de, com exceção do que acontece com a classe moderada na projeção para 2069, no cenário 8.5 a representatividade das classes de suscetibilidade mais elevada, no caso do edificado, nunca ultrapassar a verificada na situação atual, já que a esmagadora maioria do edificado se concentra em baixas altitudes. O mesmo raciocínio pode se efetuado para as estradas principais, já que também se distribuem, maioritariamente, em baixas altitudes.

No entanto, relativamente às estradas secundárias, tendo em conta que a sua distribuição é mais homogénea em toda a área de estudo, concentrando uma grande parte da respetiva percentagem em zonas de maiores altitudes, verifica-se que a respetiva distribuição pelas classes de suscetibilidade mais elevada aumenta significativamente, sendo que, em ambos os cenários e na generalidade das projeções, as respetivas expressões são superiores às verificadas na situação atual, indicando um agravamento da suscetibilidade a movimentos de vertente a que as mesmas estão expostas, destacando-se o cenário 8.5, onde esses valores são bastante superiores aos verificados no presente, especialmente no que se refere à projeção para o ano de 2099.

A justificação para uma distribuição mais homogénea das estradas secundárias ao longo da área de estudo, explicando uma grande incidência em zonas de maior altitude, ao contrário do que se verifica para as estradas principais, prede-se essencialmente com a lógica de construção e utilização dos dois tipos de acessibilidade. Isto é, enquanto as estradas principais têm como objetivo fazer a ligação entre freguesias e entre aglomerados populacionais, geralmente estão localizadas a baixas altitudes, as estradas secundárias têm como propósito, em grande parte dos casos, o acesso a propriedades, a terrenos agrícolas ou florestais e a pastagens, que estendem até maiores altitudes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O complexo enquadramento geodinâmico do arquipélago dos Açores, dominado pela presença de importantes estruturas tectónicas, fruto da sua localização geográfica correspondente à tripla junção das placas litosféricas Americana, Africana e Euroasiática, leva a que as ilhas sejam afetadas por uma grande diversidade de perigos naturais, de entre os quais se destacam os movimentos de vertente, pela respetiva frequência de ocorrência e pela destruição que provocam, resultante muitas vezes em perda de vidas e em danos materiais.

7.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O **primeiro objetivo específico** da presente dissertação prendia-se com a inventariação e cartografia dos movimentos de vertente na área de estudo, que constitui uma etapa fundamental para o estudo deste tipo de fenómenos. Em resultado do levantamento exaustivo de campo e da análise monoscópica de ortofotos, foi possível elaborar um inventário histórico detalhado de movimentos de vertente na área de estudo (IMV), constituído por 207 deslizamentos translacionais superficiais (profundidade do plano de rotura máxima de 3,5 m), sob a forma de polígonos.

Uma das conclusões mais importantes e que reforça a importância do trabalho de campo para a criação de inventários desta natureza, prende-se com a elevada margem de erro associada a trabalhos baseados apenas em deteção remota. Neste trabalho, dos 346 potenciais movimentos de vertente assinalados numa primeira fase, por fotointerpretação, apenas 27,46% foram validados em campo, tratando-se os restantes de erros de deteção. Por outro lado, em campo foram ainda identificadas e cartografadas mais 124 cicatrizes de movimentos de vertente, cujo processo de fotointerpretação não havia evidenciado, seja pela reduzida dimensão dos movimentos de vertente, seja por

terem ocorrido posteriormente à criação dos ortofotomapas utilizados ou ainda pelo facto de muitas cicatrizes ficarem completamente ocultadas e/ou camufladas pela densa vegetação.

Em resumo, do total de movimentos de vertente que constituíam o inventário final, 43,38% foram cartografados por fotointerpretação, sendo que os restantes 56,62% derivaram do levantamento de campo, revelando claramente que a elaboração de inventários de movimentos de vertente exclusivamente por fotointerpretação os torna excessivamente falíveis e muito pouco rigorosos e representativos da realidade local.

Os 207 movimentos de vertente que compõem o inventário de movimentos de vertente (IMV), apresentam, no total, uma área planimétrica de aproximadamente 43.800 m² e um volume de material instabilizado estimado de cerca de 97.300 m³, distribuídos pelas freguesias da Serreta (62,56%), Doze Ribeiras (30,14%) e Santa Bárbara (7,30%).

Com a elaboração de um mapa de densidade de movimentos de vertente foi possível concluir que a maior abundância geográfica de movimentos de vertente está associada a estruturas morfológicas bem definidas na paisagem, caracterizadas por elevados declives, como escarpas de falhas, arribas litorais e taludes de cursos de água.

Para dar resposta ao **segundo objetivo específico** proposto neste trabalho, de proceder à caracterização morfométrica dos movimentos de vertente, com base no IMV foram determinados oito parâmetros e dois índices morfométricos, com base em medições planimétricas (2D) e superficiais (3D), e analisadas as relações entre os mesmos.

Deste processo, além de se determinarem as características morfométricas gerais dos movimentos de vertente da área de estudo, concluiu-se que existem diferenças significativas nos valores gerados pelos cálculos efetuados em medições planimétricas e superficiais, sendo os valores determinados em 3D sistematicamente superiores ao determinados em 2D, crescendo essa diferença substancialmente com o aumento do declive.

A relevância desta conclusão relaciona-se com o facto de diversos autores recorrerem à utilização da área planimétrica da cicatriz dos movimentos de vertente e ao volume do material instabilizado para quantificar a magnitude dos movimentos de vertente, alegando que, dados os declives pouco acentuados das respetivas áreas de estudo, o erro associado a essa simplificação não é estatisticamente relevante. No entanto, tendo em conta os elevados declives que caracterizam uma parte significativa da área de estudo

deste trabalho, bem como da paisagem da maioria das ilhas do arquipélago, a determinação e utilização dos parâmetros em 2D, levaria a uma adulteração da frequência de eventos de diferentes magnitudes ou gamas de magnitudes, levando, como tal, a erros grosseiros na determinação da probabilidade de excedência. Como tal, neste trabalho, foram considerados os parâmetros determinados em 3D, opção que deve ser sempre adotada em trabalhos desta natureza.

Ainda relativamente ao cálculo dos parâmetros morfométricos, verificou-se que a utilização de ferramentas automáticas para o seu cálculo, por vezes, induz a erros graves, pelo que importa proceder, invariavelmente, a uma análise crítica dos resultados. Neste trabalho, a utilização de uma ferramenta automática, em ambiente SIG, para o cálculo do comprimento planimétrico da cicatriz e da largura da cicatriz, teve como resultado uma determinação de valores incorretos para os referidos parâmetros em 87,44% dos movimentos de vertente, devido a uma limitação da ferramenta. Este facto apenas foi detetado pelo estabelecimento de uma segunda metodologia de cálculo, determinando-se os referidos parâmetros manual e individualmente para a totalidade do IMV. Esta conclusão é deveras importante, não apenas por se referirem a parâmetros incluídos na análise morfométrica dos movimentos de vertente, mas também porque tanto a largura como o comprimento estão na base do cálculo de outros parâmetros e índices morfométricos.

Através da aplicação de testes estatísticos, foi possível confirmar que os valores dos diferentes parâmetros e índices morfométricos não apresentam uma distribuição normal. Como tal e no intuito de cumprir com os pressupostos da aplicação de testes paramétricos em estatística inferencial, aplicou-se o logaritmo natural às séries de dados originais, que resultou, em termos genéricos, numa melhoria expressiva do ajuste à distribuição normal, em todos os parâmetros e índices morfométricos.

Para a determinação do grau de associação entre os diferentes parâmetros e índices morfométricos, foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson, que permitiu concluir que, em termos gerais, todos os parâmetros apresentam elevados graus de associação positiva, apontando para uma elevada interdependência entre os mesmos, com exceção do ângulo da cicatriz e dos índices de alongamento e de circularidade. Destaca-se ainda que os elevados graus de associação entre a área da cicatriz com a profundidade máxima do plano de rotura e o volume de material estabilizado,

demonstram que um aumento da profundidade máxima de rotura implica um aumento da área da cicatriz e do volume de material instabilizado e vice-versa.

Em relação ao **terceiro objetivo específico** fixado para este trabalho, utilizou-se a área da cicatriz como variável que quantifica a magnitude dos movimentos de vertente, para a produção de curvas de frequência-magnitude do IMV. Pela avaliação do ajuste de 61 distribuições de probabilidade teóricas, através da aplicação de testes estatísticos, concluiu-se que, a distribuição log-normal de três parâmetros é a que garante o melhor ajuste possível à distribuição de valores da área da cicatriz.

Foi ainda possível verificar que se confirma a existência de uma tendência potencial negativa para grande parte da distribuição dos valores de área da cicatriz, bem como um ponto de inflexão (*rollover*) em que essa tendência é invertida, o que permitiu concluir que os movimentos de vertentes de menor dimensão não são os mais frequentes da distribuição.

Com o objetivo de se calcular a probabilidade de excedência para os valores da área da cicatriz, tendo por base a distribuição log-normal de três parâmetros, determinaram-se as funções de densidade cumulativa, constatando-se que, como seria expetável, a probabilidade de excedência varia na razão inversa do valor da área do movimento de vertente correspondente, registando um declínio drástico à medida que se vai aumentando a ordem de grandeza. Assim, verifica-se que a probabilidade de excedência para movimentos com área de cicatriz maior do que 100 m^2 , é relativamente elevada ($1-F(A_{MV}>100) = 0,3$), mantendo-se ainda uma probabilidade considerável para eventos com áreas de cicatriz maiores do que 1.000 m^2 ($1-F(A_{MV}>1.000) = 0,04$). A probabilidade de excedência decresce drástica e progressivamente para eventos com área de cicatriz superiores a 10.000 m^2 ($1-F(A_{MV}>10.000) = 0,0018$) e 100.000 m^2 ($1-F(A_{MV}>100.000) = 0,00002$). Determinou-se ainda que a probabilidade de excedência para um evento com uma área de cicatriz superior à do maior movimento de vertente registado no IMV ($\sim 19.494 \text{ m}^2$) é de $0,00054$.

Um dos principais objetivos gerais da presente dissertação consistia na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na zona Oeste da ilha Terceira, sendo que esta tarefa implicou cumprir o quarto, quinto e sexto objetivos específicos propostos. Para tal, foi utilizado o Método do Valor Informativo, que corresponde a um método estatístico bivariado, em ambiente SIG.

No que se refere aos dados de entrada no modelo desenvolvido, como variável dependente foram utilizados as cicatrizes dos movimentos de vertente do IMV, enquanto que como variáveis independentes foram utilizados onze fatores de predisposição referentes à área de estudo, dos quais seis foram derivados do Modelo Numérico de Elevação (declive, exposição, área de contribuição, perfil longitudinal das vertentes, perfil transversal das vertentes e o inverso do *wetness index*) e os restantes cinco correspondem a fatores geo-ambientais, não derivados do Modelo Numérico de Elevação (precipitação anual acumulada, geologia, uso do solo, densidade de drenagem e distância aos cursos de água).

Dando resposta **ao quarto objetivo específico** deste trabalho, no sentido de avaliar a influência de cada um dos fatores de predisposição considerados e avaliar a adequabilidade da sua inclusão ou não no modelo final, os mesmos foram hierarquizados tendo em conta a respetiva capacidade de discriminar território em termos de suscetibilidade a movimentos de vertente, através do cálculo da área abaixo da curva de sucesso, que tem por base a favorabilidade das diferentes classes de cada fator de predisposição para a ocorrência de movimentos de vertente. Como resultado determinou-se a seguinte ordem hierárquica dos fatores de predisposição: 1.º - declive; 2.º - uso do solo; 3.º - geologia; 4.º - precipitação anual acumulada; 5.º - exposição; 6.º - perfil longitudinal das vertentes; 7.º - inverso do *wetness index*; 8.º - perfil transversal das vertentes; 9.º - distancia aos cursos de água; 10.º - área de contribuição; 11.º - densidade de drenagem.

Com base na ordem hierárquica determinada, estudou-se o ajuste do modelo de suscetibilidade aos dados de entrada, pela adição sequencial dos diversos fatores de suscetibilidade, sendo que os resultados demonstram uma melhoria substancial no ajuste do modelo até à inclusão do terceiro fator de predisposição, sendo que, a partir do quarto fator se verificam oscilações residuais, até à inclusão do último fator de predisposição.

Foi possível verificar que as maiores variações no ajuste do modelo ocorreram essencialmente nos 20% da área classificada como suscetível à ocorrência de movimentos de vertente, o que significa, na prática, que com a utilização apenas do declive (1.º na hierarquização) as áreas que apresentam maior estabilidade ficam, desde logo, identificadas e que com a inclusão progressiva de novos fatores de predisposição

ao modelo, a qualidade do algoritmo apenas é melhorada em relação às áreas de maior instabilidade e propensão à ocorrência de movimentos de vertente.

Na prática, concluiu-se que a utilização dos onze fatores de predisposição não acrescenta capacidade preditiva ao modelo, mas também não a retira de forma significativa, não se verificando uma deterioração expressiva do ajuste do algoritmo aos dados de entrada para que haja uma exclusão obrigatória de fatores, nem uma variação importante na organização espacial da suscetibilidade, pelo que todos os fatores de predisposição foram incluídos no modelo final de suscetibilidade a movimentos de vertente.

O valor obtido para a área abaixo da curva de sucesso foi de 0,981, que permitiu classificar o modelo de suscetibilidade desenvolvido com os onze fatores de predisposição como *excelente ou extremamente satisfatório*. Com a conclusão desta tarefa, estava realizado também o **quinto objetivo específico da tese**.

Relativamente ao **sexto objetivo específico** desta dissertação, para a validação e determinação da capacidade preditiva do modelo, o inventário total de movimentos de vertente (IMV-TOT) foi aleatoriamente dividido em dois grupos: um de modelação (IMV-MOD) e outro de validação (IMV-VAL). Concluiu-se que os valores obtidos para as áreas abaixo das curvas de sucesso e de predição apresentam uma diferença mínima (0,09), comprovando assim uma elevada concordância nas relações entre os movimentos de vertentes dos dois grupos e as classes do fatores de predisposição considerados.

Assim, o valor de 0,979 obtido para a área abaixo da curva de sucesso para o modelo de suscetibilidade desenvolvido e validado com o grupo de modelação, comprova uma excelente capacidade de ajuste, enquanto que o valor de 0,970 observado na área abaixo da curva de predição para o modelo de suscetibilidade desenvolvido com o grupo de modelação e validado com o grupo de validação, atesta uma elevada capacidade de predição do mesmo. Na prática, o modelo desenvolvido tem capacidade de predizer 90% dos movimentos de vertente em apenas cerca de 6% da área mais suscetível a movimentos de vertente. Da mesma forma, para prever 99% dos movimentos de vertente, é necessário isolar apenas 35% da área mais suscetível da área de estudo.

Tendo em conta que o mapa final desenvolvido apresenta valores de suscetibilidade, para cada pixel, numa escala contínua de valores, procedeu-se à sua classificação em

quatro classes qualitativas, com base na percentagem de área instável prevista por interpretação da curva de sucesso, sustentando a decisão referente aos limites das classes, pela determinação das respectivas razões de eficiência, cujos resultados permitem classificar todas as classes definidas como *significativas*.

Com base na classificação adotada conclui-se que 7,02% da área de estudo apresenta suscetibilidade a movimentos de vertente muito elevada ou elevada. Por outro lado, 16,31% da área de estudo apresenta suscetibilidade moderada, enquanto que 76,67% da área apresenta suscetibilidade reduzida ou nula. Ressalva-se que o mapa de suscetibilidade desenvolvido para a área de estudo reflete apenas a suscetibilidade à rotura de movimentos de vertente e que a modelação adicional das áreas de propagação dos movimentos de vertente, tende a aumentar consideravelmente a área de estudo englobada nas classes de suscetibilidade mais elevadas.

Tendo em conta o **sétimo objetivo específico** do trabalho, para a identificação dos elementos expostos à ocorrência de movimentos de vertente, procedeu-se ao cruzamento do edificado e das estradas principais e secundárias com o mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente. Como resultado concluiu-se que 3,89% dos edifícios estão localizados em zonas de suscetibilidade elevada a muito elevada, enquanto que 29,12% e 67,99% dos edifícios se inserem, respetivamente, em zonas de suscetibilidade moderada e reduzida ou nula. Em relação às acessibilidades, verificou-se que 15,45% das estradas principais e 17,12% das estradas secundárias se localizam em zonas abrangidas pelas três classes de suscetibilidade a movimentos de vertente mais elevadas.

Para a conclusão do **oitavo objetivo específico**, foram modelados novos mapas de suscetibilidade, utilizando, para tal, grelhas de precipitação anual acumulada referentes a dois cenários de alterações climáticas (RCP 4.5 e RCP 8.5) previstos pelo IPCC, regionalizadas pelo modelo CIELO, para a ilha Terceira, para os horizontes temporais de 2039, 2069 e 2099.

Como resultado, para o cenário 4.5, verificaram-se variações residuais, com tendência para a estabilização da área contida na classe de suscetibilidade muito elevada, bem como oscilações residuais nas restantes classes de suscetibilidade, com exceção da previsão para o ano 2039, onde se verificou aumento da área contida na classe reduzida ou nula em detrimento da área abrangida pela classe moderada. Relativamente ao

cenário 8.5, verificou-se também uma tendência para a estabilização da área contida em todas as classes de suscetibilidade, com exceção, neste caso, da previsão para 2099, onde se verificaram áreas compreendidas pelas classes de suscetibilidade elevada e muito elevada semelhantes às atuais, mas com um aumento significativo da área contida na classe de suscetibilidade moderada e um correspondente decréscimo da área classificada como de reduzida ou nula suscetibilidade. Com estes resultados, cumpriu-se o **nono objetivo específico** deste trabalho.

O **décimo e último objetivo específico** proposto no âmbito desta dissertação, concretizou-se pelo cruzamento de cada um dos seis mapas de suscetibilidade produzidos para os três horizontes temporais, dos dois cenários considerados, com o edificado e com as estradas principais e secundárias.

Como resultados principais, verifica-se, no cenário 4.5, uma diminuição das percentagens do edificado e das estradas principais abrangidas pelas classes de suscetibilidade mais elevada, comparativamente com o verificado atualmente. No entanto, no caso das estradas secundárias, com exceção da classe elevada, assiste-se a um aumento generalizado da percentagem de estradas englobadas nas classes de suscetibilidade mais elevada.

No cenário 8.5, tal como no cenário 4.5, verifica-se uma diminuição das percentagens do edificado e das estradas principais abrangidas pelas classes de suscetibilidade mais elevada, com exceção da classe de suscetibilidade moderada na previsão para 2099, que regista aumentos em relação ao verificado na atualidade. Relativamente às estradas secundárias, observa-se, para todos os horizontes temporais, um aumento generalizado da percentagem de estradas englobadas em todas as classes de maior suscetibilidade.

De um modo geral, face à situação atual, o cenário 4.5 aponta para uma redução da suscetibilidade a que o edificado e as estradas principais estão expostos, enquanto que o cenário 8.5, nomeadamente ao nível da classe de suscetibilidade moderada, aponta para um ligeiro aumento do risco de exposição desses elementos. Em ambos os cenários, a suscetibilidade a movimentos de vertentes referente às estradas secundárias aumenta, comparativamente com a situação atual, com destaque para o cenário 8.5, onde esses aumentos são significativos, especialmente na previsão para 2099.

A maior suscetibilidade das estradas secundárias, em comparação com o edificado e com as estradas principais, revelada nestes cenários de alterações climáticas, estará,

seguramente, associada à sua distribuição homogénea em toda a área de estudo, alcançando maiores altitudes, onde os efeitos da evolução da precipitação se repercutem mais marcadamente no aumento da suscetibilidade a movimentos de vertente.

7.2 PRINCIPAIS LINHAS DE INVESTIGAÇÃO A DESENVOLVER

Na sequência do trabalho realizado, importa prosseguir outros projetos e linhas de investigação, cuja integração não foi possível no âmbito deste trabalho, por diversas limitações, especialmente de tempo, associadas a uma dissertação de doutoramento, que se enunciam de seguida:

- 1) Alargar o inventário de movimentos histórico ao resto da ilha Terceira e, possivelmente, a outras ilhas do arquipélago dos Açores;
- 2) Atualizar, com periodicidade constante, o inventário histórico de movimentos de vertente, com base em levantamentos de campo de pormenor e por intermédio de fotointerpretação, garantindo o acesso a novas imagens de satélite ou fotografias aéreas, que permitam a criação de inventários de evento;
- 3) Atualizar os mapas de fatores de predisposição com base em novas cartografias de base, preferencialmente produzidas com escalas superiores;
- 4) Testar a utilização de novos fatores de predisposição para os quais haja cartografia disponível, testando a sua influência relativa em termos de suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente e explorar novas ferramentas digitais que permitam produzir novos mapas de fatores de predisposição;
- 5) Testar novas metodologias de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, com recurso a diferentes métodos estatísticos bivariados e multivariados, comparando os seus desempenhos relativamente ao ajuste dos modelos aos dados de entrada e à capacidade preditiva;
- 6) Alargar o trabalho de avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente à restante área da ilha Terceira, considerando além da suscetibilidade à rotura, também a suscetibilidade à propagação dos movimentos de vertente;
- 7) Estabelecer análises comparativas entre o trabalho produzido no âmbito desta dissertação e outros trabalhos desta natureza realizados nos Açores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

- Aaheim, A., Chaturvedi, R. e Sagadevan, A. (2010) – Integrated modelling approaches to the assessment of climate change impacts on forests. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 16: 247-266.
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S. e Boyce, G. M. (2002) – *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 712 p.
- Abreu, M. (2008) – O subsistema geologia-geomorfologia na delimitação da estrutura ecológica e no ordenamento do território. *Arquitectura e Vida*. 91: 48-53.
- Agterberg, F. P. e Cheng, Q. (2002) – Conditional independence test for Weights-of-Evidence modelling. *Natural Resources Research*. 11(4): 249-255.
- Aleotti, P. e Chowdhury, R. (1999) – Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 58: 21-44.
- Alexander, D. (1995) – A survey of the field of natural hazards and disasters studies, In: A. Carrara and F. Guzzetti (eds), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands: 1–20.
- Ali, G., Birkel, C., Tetzlaff, D., Soulsby, C., McDonnell, J. e Tarolli, P. (2013) – A comparison of wetness indices for the prediction of connected saturated areas under contrasted conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 399-413.
- Alvarez, A. (1998) – *Climate Change and Extreme Events Workshop for the U.S. South Atlantic Coastal and Caribbean Region*. Florida International University, Miami, FL, International Hurricane Center. Eastern US. Florida.
- Amaral, P. (2005) – *Monitorização de vertentes instáveis no concelho da Povoação, ilha de S. Miguel (Açores): Ensaios com base na utilização de uma estação total*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 148 p.
- Amaral, P., Zêzere, J.L., Marques, R., Trota, A., Rodrigues, R. e Gaspar, J.L. (2007b) – A aplicação de uma estação total automática na detecção e acompanhamento de fenómenos de instabilidade geomorfológica no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. V: 67-74.

- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, Marques, F., Queiroz, G., Ramos, T. e Gonçalves, M.C. (2009c) – Caracterização hidrológica e geotécnica de solos vulcânicos pomíticos com vista à integração em modelos determinísticos para avaliação da instabilidade de vertentes no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. VI: 127-132.
- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J.L., Queiroz, G., Marques, F. (2009d) – Aplicação de um modelo hidrológico e geotécnico à instabilidade de vertentes desencadeada por precipitação intensa no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. VI: 133-138.
- Ardizzone, F., Cardinalli, M., Carrara, A., Guzzetti, F., e Reichenbach, P. (2002) – Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2: 3-14.
- Ardizzone, F., Balducci, V., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F. e Peruccacci, S. (2006) – Multiple-scale modelling for landslide susceptibility for hazards assessment. *Geophysical Research Abstracts*. 8: 04503.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005) – The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*. 65 (1-2): 15-31.
- Azevedo, E. (1996) – *Modelação do Clima Insular à Escala Local. Modelo CIELO aplicado à ilha Terceira*. Dissertação de Doutoramento em Ciências Agrárias. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores, 247 p.
- Azevedo, E. (2001) – Condicionantes dinâmicas do clima no arquipélago dos Açores. Elementos para o seu estudo. *Açoreana*. 9 (3): 309-317.

B

- Baeza, C. e Corominas, J. (2001) – Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*. 26: 1251-1263.
- Baeza, C., Lantada, N. e Moya, J. (2010) – Influence of sample and terrain unit on landslide susceptibility assessment at La pobla de Lillet, Eastern Pyrenees, Spain. *Environmental Earth Sciences*. 60: 155-167.
- Bateira, C. e Soares, L. (1997) – Movimentos de massa no Norte de Portugal. Factores da sua ocorrência. *Territorium - Revista de geografia física aplicada no ordenamento do território e gestão de riscos naturais*. 4: 63-77.
- Bateira, C., Soares, L., e Garcia, J. (1998a) – O “terramoto” de S. João (Melgaço) em 1841: um percurso pela geomorfologia histórica. *Inforgeo*. 12/13: 83-98.
- Bateira, C., Resendes, J. e Rebelo, F. (1998b) – Escoamento torrencial e processo geomorfológicos na bacia da Povoação (S. Miguel, Açores). As cheias de 14 de Dezembro de 1996. *Territorium - Revista de geografia física aplicada no ordenamento do território e gestão de riscos naturais*. Minerva, Coimbra. 5: 5-24.

- Bateira, C. (2001) – *Movimentos de Vertente no NW de Portugal, susceptibilidade geomorfológica e sistemas de informação geográfica*. Dissertação de doutoramento em Geografia Física. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto. 469 p.
- Bateira, C., Pereira, S., Martins, L., e Santos, M. (2008) – Susceptibilidade a movimentos de vertente e cheias repentinas no apoio à Protecção Civil. *Revista da Faculdade de Letras - Geografia - Universidade do Porto*. série II, V II: 33-56.
- Bateira, C., Martins, L., Santos, M., e Pereira, S. (2011) – *Cartografia da suscetibilidade a movimentos de vertente na Região Demarcada do Douro*. Universidade Lusófona. Porto. 38 p.
- Beguiría, S. (2006) – Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*. 37: 315-329.
- Bernardino, M e Espirito Santo, F. (2015) – *Identificação de metodologias para a definição de cenários climáticos no contexto das alterações climáticas no sector do turismo*. LNEC e IPMA, Projeto AdaPT AC:T, v0. Lisboa.
- Beven, K. J. e Kirkby, M. J. (1979) – A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*. 24: 43–69.
- Blahut, J., van Westen e C., Sterlacchini, S. (2010) – Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*. 119: 36–51.
- Bonham-Carter, G.F. (1994) – *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Computer methods in the geosciences*. Pergamon Press, Geological survey of Canada. Ottawa. Canada. 398 p.
- Bonham-Carter, G.F. e Agterberg, F.P. (1999) – Arc-WofE_a GIS tool for statistical integration of mineral exploration datasets. The 52th Session of the International Statistical Institute. *Bulletin of the International Statistical Institute*. Helsinki, Finland, 4 p.
- Brabb, E.E. (1984) – Minimum landslide damage in the United States, 1973-1983. *U.S Geological Survey Open-File Report*. 84-486, 5 p.
- Brabb, E.E., e Harrod, B.L. (1989) – *Landslides: Extent and Economic Significance*. AA Balkema, Rotterdam. 385 p.
- Brardinoni, F., Slaymaker, O. and Hassan, M.A. (2003). Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*. 54:3-4 179-196.
- Brardinoni, F. e Church, M. (2004) – Representing the landslide magnitude-frequency relation: Capilano river basin, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29: 115 – 124.
- Brenning, A. (2005) – Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5: 853–862.
- Brunetti, M. T., Guzzetti, F. e Rossi, M. (2009) – Probability distribution of landslide volumes. *Non linear processes in geophysics*. 16: 179-188.

Bulut, F., Boynukalin, S., Tarhan, S. e Ataoglu, E. (2000) – Reliability of landslide isopleth maps. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 58: 2 95-98.

C

Callegari-Jacques, M. (2003) – *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre: Artemed. 255p.

Calvert, A.T., Moore, R.B., McGeehin, J.P. e Rodrigues da Silva, A.M. (2006) – Volcanic history and ⁴⁰Ar/³⁹Ar and ¹⁴C geochronology of Terceira Island, Azores, Portugal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 156 (1–2): 103–115.

Campbell, R. H. (1973) – *Isopleth map of landslide deposits, Point Dume Quadrangle, Los Angeles County, California; an experiment in generalizing and quantifying areal distribution of landslides*. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF - 535, scale 1:24.000.

Cancela d'Abreu, A., Pinto-Correia, T. e Oliveira, R. (2002) – *Contributos para a Identificação e Caracterização das Unidades de Paisagem em Portugal Continental*. V: 1 - 4. DGOTDU Ed. 2004.

Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. e Reichenbach, P. (2002) – Landslide hazard map for the Upper Tiber River basin. *CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche Publication n. 2116*, scale 1:100.000.

Carrara, A. (1983) – A multivariate model for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*. 15: 403-426.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. e Reichenbach, P. (1991) – GIS Techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landform*. 16 (5): 427–445.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. e Reichenbach, P. (1995) – GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher: 135–176.

Carrara A, Guzzetti F, Cardinali M e Reichenbach P. (1999) – Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards*. 20(2– 3):117–135.

Carrara, A., Crosta, G. e Frattini, P. (2003) – Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28: 1125-1142.

Carrara, A., Crosta, G. e Frattini, P. (2008) – Comparing models of debris flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*. 94: 353–378.

Cascini, L. (2008) – Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*. 102: 164-177.

Castellanos, E. A. (2008) – *Multi-scale landslide risk assessment in Cuba*. Dissertação de doutoramento apresentada à Universidade de Utrecht. Utrecht. 273 p.

- Chen, P. e Popovich, P. (2002) – *Correlation: parametric and nonparametric measures*. Thousand Oaks: Sage Publication, Inc. 95 p.
- Chung, C.F. e Fabbri, A. (1993) – The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*. 2 (2): 122-138.
- Chung C. e Fabbri, A. (1999) – Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 65(12): 1389-1399.
- Chung, C. e Fabbri, A. (2003) – Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*. 30: 451-472.
- Chung, C. e Fabbri, A. (2005) – Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In T. Glade, M. Anderson, & M. J. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley and Sons. 139-174.
- Chung, C. e Fabbri, A. (2008) – Predicting landslides for risk analysis - spatial models tested by a cross-validation technique. *Geomorphology*. 94: 438-452.
- Claessens, L., Heuvelink, G. B. M.; Schoorl, J. M. e Veldkamp, A. (2005) – DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*. 30: 461 – 467.
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J. e Richels, R. (2007)– *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations*. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA, 154 p.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. e Vescovi, P. (2010) – Landslide failure and runout susceptibility in the upper T. Ceno valley (Northern Apennines, Italy). *Natural Hazards*. 52: 1 – 29.
- CLIMAAT– Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos (2016) – Centro do Clima Meteorologia e mudanças globais da Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. Disponível em: <http://www.climaat.angra.uac.pt/>. Acesso em Julho de 2016.
- Conforti, M., Robustelli, G., Muto, F. e Critelli, S. (2012) – Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vittravo river catchment (Calabria, south Italy). *Natural Hazards*. 61:127–141.
- Conoscent, C., Rotigliano, E., Cama, M., Caraballo-Arias, N., Lombardo, L. e Valerio, Agnesi, V. (2016) – Exploring the effect of absence selection on landslide susceptibility models: A case study in Sicily, Italy. *Geomorphology*. 261: 222–235.
- Constância, J. (1960) – Quadro físico da ilha de S. Miguel. *Boletim do Centro de Estudos Geográficos*. Coimbra. 2(18): 121-139.
- Corominas, J., e Moya, J. (1999) – Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River Basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*. 30: 79-93.

Corominas, J. (2000) – Landslides and Climate. Keynote Lecture. In E. Bromhead, N. Dixon, & M. L. Ibsen (Eds.), *Proceeding of 8th International Symposium on Landslides* (Vol. 4, pp. 1-33). Cardiff: A. A. Balkema.

Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J. M., Altimir, J., e Amigó, J. (2003) – Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*. 30: 421-435.

Cox, D.R. (2006). *Principles of Statistical Inference*. Cambridge University Press, Cambridge. 158 p.

Crosta, G.B. e Frattini, P. (2003) – Distributed modeling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 3 (1–2): 81–93.

Crozier, M. J. (1986). *Landslides: Causes, consequences & environment*. Croom Helm Pub., London. 252 p.

Crozier, M. J. e Glade, T. (2005) Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: Glade, T., Anderson, M.G. e Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 1-40.

Cruden, D. (1991) – A simple definition of a landslide. *Bulletin of International Association of Engineering Geology*. 43: 27-29.

Cruden, D. e Varnes, D. (1996) – Landslide types and processes. In: A.K. Turner, A. K. e Shuster, R. L. (Eds.), *Landslide investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC. 36-75.

CVARG – Centro de Vulcanologia e Avaliação dos Riscos Geológicos (2016) – Observatório Sismológico e Vulcanológico da Universidade dos Açores. Ponta Delgada Disponível em: <http://www.cvarg.azores.gov.pt/>. Acesso em Maio de 2016.

D

Dai, F.C. e Lee, C.F. (2001) – Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*. 59: 253-266.

Dawson, B. e Spannagle, M. (2009) – *The Complete Guide to Climate Change*. Routledge. London. 436 p.

Davis, J.C. (1986) – *Statistics and data analysis in geology*. 2nd edition. Kansas geological survey. John Wiley and Sons. 646 p.

DGE - Direcção Geral de Estatística (1913) – Censos de 1910. *Fogos - população de residência habitual e população de facto, distinguindo sexo, nacionalidade, naturalidade, estado civil e instrução. Censo da população de Portugal no 1º de Dezembro de 1911*. Lisboa.

DGE - Direcção Geral de Estatística (1923) – Censos de 1920. *Fogos - população de residência habitual e população de facto, distinguindo sexo, nacionalidade, naturalidade, estado civil e instrução. Censo da População de Portugal no 1º de Dezembro de 1920: 6º Recenseamento Geral da População*. Vol. I. Lisboa.

DGE - Direcção Geral de Estatística (1933) – Censos de 1930. *Famílias, população de residência habitual e população de facto, distinguindo sexo, nacionalidade, naturalidade, estado civil e instrução. 7.º Recenseamento Geral da População e V Recenseamento Geral da Habitação*. Cap. I. Lisboa.

DIAS, E. (1996) – *Vegetação Natural do Açores Ecologia e Sintaxonomia das Florestas Naturais*. Dissertação de Doutoramento no ramo de Biologia, especialidade de Ecologia. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 302 p.

Dias, E. e Melo, C. (2010) – Factors influencing the distribution of Azorean mountain vegetation: implications for nature conservation. *Biodiversity Conservation*. 19: 3311-3326.

Dikau, R. (1990) – Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. *Zeitschrift für Geomorphologie* N. F., Supp.-Bd. 50: 45 – 55.

Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L. e Ibsen, M.L. (1996) – *Landslide recognition. Identification, movements and causes*. John Wiley and Sons. Chichester. 251 p.

Dimuccio, L. A., Ferreira, R. e Cunha, L. (2006) – Aplicação de um modelo de redes neurais na elaboração de mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente. Um exemplo numa área a sul de Coimbra (Portugal Central). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. 3:281-289.

Djuric, N., Beševic, M., Djuric, D., Prokic, A. e Kukaras, D. (2015) – Causes and Consequences of Certain Landslides in Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina. *Earth and Planetary Science*. 15: 159- 164.

Dow, K. e Downing. T. E. (2011) – *The Atlas of Climate Change: Mapping the World's Greatest challenge. Third Edition*. Berkeley: University of California Press and London. 128 p.

E

EM-DAT (2012). EM-DAT – The international disaster database. Acesso em Abril de 2016 em <http://www.emdat.be/>.

F

Fabbri, A.G., Chung, C.F., Cendrero, C., Remondo, J. (2003) – Is prediction of future landslides possible with a GIS? *Natural Hazards*. 30 (3): 487–503.

Feizizadeh, B. e Blaschke, T. (2013) – GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: Comparing three methods for the urmia lake basin, Iran. *Natural Hazards*. 65: 2105–2128.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. e Savage, W. (2008) – Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*. 102: 99–111.

Feraud, G., Kanboka, I e. Allegre C.J. (1980) – K/Ar ages and stress pattern in the Azores: geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*. 46: 275-286.

Fernandéz, T., Irigaray, C., El Hamdouni, E., e Chacón, J. (2003) – Methodology for landslide susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa area (Granada Spain). *Natural Hazards*. 30: 297-308.

Ferreira, T. (2016) – *A comunicação de risco na mitigação das alterações climáticas globais: Como promover práticas pró-ambientais? (Ilha Terceira, Açores)*. Dissertação de Doutoramento em Gestão Interdisciplinar da Paisagem. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 166 p.

Fontes, J. C. G. (1999) – *Comportamento Hidrológico dos solos agrícolas da Terceira*. Dissertação de Doutoramento em Ciências Agrárias, especialidade em Engenharia Rural. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 330 p.

Forman, T. e Godron, M. (1986) – *Landscape ecology*. John Wiley & Sons, New York. 620 pp.

França, Z., Cruz J.V., Nunes, J.C. e Forjaz V.H. (2003) – Geologia dos Açores: uma perspectiva actual. *Açoreana* 10 (1): 11-140.

Frattoni, P., Crosta, G., Carrara, A. (2010) – Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*. 111: 62 – 72.

Fuyii, Y. (1969) – Frequency distribution of landslides caused by heavy rainfall. *Journal Seismological Society Japan*. 22: 244-247.

G

Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F. e Reichenbach, P. (2008) – Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*. 94: 268–289.

Garcia, R.A.C. (2002) – *Avaliação do risco de movimentos de vertente na Depressão da Abadia (Torres Vedras)*. Tese de Mestrado em Geografia Física e Ambiente. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. 140 p.

Garcia, R.A.C. (2012) – *Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa. Lisboa. 437 p.

Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C. e Zêzere, J.L. (2014) – Distribuição da densidade de probabilidade de magnitude de deslizamentos na região norte de Lisboa, Portugal. *Comunicações Geológicas*. 10: 897-901.

Gaspar, J., Goulart, C., Queiroz, G., Silveira, D. e Gomes, A. (2004) – Dynamic structure and data sets of a GIS database for geological risk analysis in the Azores volcanic islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 4: 1-10.

Glade, T.; Crozier, M. J. (2005). The nature of landslide hazard impact in Glade, T.; Anderson, M.; Crozier, M. J. (Eds.) *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester: 43 – 74.

- Gomes, A. (2003) – *Contribuição para o estudo dos riscos geológicos associados ao Vulcão das Sete Cidades (Ilha de S. Miguel, Açores)*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores. 129 p.
- Gomes, A., Gaspar, J.L., Goulart, C. e Queiroz, G. (2005) – Evaluation of landslide susceptibility on Sete Cidades Volcano (S. Miguel Island, Azores). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5: 251-257.
- Gomes, A. M. (2010). *Produtividade e qualidade de uma pastagem de Lolium perenne e Trifolium repens e de uma pastagem à base de espécies espontâneas, instaladas numa zona de média altitude da Ilha Terceira (Açores)*. Dissertação de Doutoramento em Ciências Agrárias, especialidade Fitotecnia. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E. e Foltz, R.B. (2000) – Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS. *4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling: Problems, Prospects and Research Needs*. Alberta, Canada.
- Gorsevski, P.V.; Gessler, P. E.; Foltz, R.B. e Elliot, W.J. (2006) – Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. *Transactions in GIS*. 10(3): 395 – 415.
- Goulart, C. (2004) – *Aplicação de sistemas de informação geográfica à análise de riscos geológicos*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 119 p.
- Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K. e Laudon, H. (2009) – Modeling spatial patterns of saturated areas: a comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*. 373: 15–23.
- Greenbaum, D., Bowker, M. R., Dau, I., Dropsy, H., Grealley, K. B., McDonald, A. J. W., Marsh, S. H., Northmore, K. J., O'Connor, E. A., Prasad, S. e Tragheim, D. G. (1995a) – *Rapid methods of landslide hazard mapping: Fiji case study*. British Geological Survey, Technical Report WC/95/28. 107 p.
- Greenbaum, D., Tutton, M., Bowker, M.R., Browne, T.J., Buleka, J., Grealley, K.B., Kuna, G., McDonald, A.J.W., Marsh, S.H., O'Connor, E.A. e Tragheim, D.G. (1995b) – *Rapid methods for landslide hazard mapping: Papua New Guinea case study*. British Geological Survey, Technical Report WC/95/27. 121 p.
- Guemas, V., Doblas-Reyes, F., Andreu-Burillo, I. e Asif, M. (2012) – Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade, *Nature Climate Change*. 3: 649-653.
- Guha-Sapir, D., Hargitt, D. e Hoyois, P. (2004) – *Thirty years of natural disasters 1974-2003: the numbers*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, UCL, Presses Universitaires de Louvain.
- Guillard, C. e Zêzere, J. L. (2012) – Landslide Susceptibility Assessment and validation in the Framework of Municipal Planning in Portugal: The Case of Loures Municipality. *Environmental Management*. 50: 721-735.
- Güntner, A., Seibert, J. e Uhlenbrook, S. (2004) – Modeling spatial patterns of saturated areas: an evaluation of different terrain indices. *Water Resources Research*. 40: W05114.

Guzzetti, F., Cardinali, M. e Reichenbach, P. (1994) – The AVI Project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*. 18 (4): 623-633.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. e Reichenbach, P. (1999) – Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. 31: 181-216.

Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. e Carrara, A. (2000). Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental Management*. 25 (3): 247-263.

Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L. e Reichenbach, P. (2002) – Power-law correlations of landslide areas in Central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*. 195: 169-183.

Guzzetti F. (2005) – *Landslide hazard and risk assessment. Concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslide susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation*. PhD Thesis, Bonn. 373 p.

Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F. e Cardinali, M. (2006a) – Landslide hazard assessment in the Collazone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 6: 115-131.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. e Galli, M. (2006b) – Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*. 81: 166-184.

Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reichenbach, P. e Rossi, M. (2008) – Distribution of landslides in the upper Tiber River Basin, Central Italy. *Geomorphology*. 96: 105-122.

Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M. e Valigi, D. (2009) – Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*. 279: 222 – 229.

Guzzetti, F., Mondini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. e Chang, K. (2012) – Landslide inventory maps: new tools for and old problem. *Earth-Science Reviews*. 112: 42-66.

H

Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J. e Tung, F. (1995) – Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong. In: Carrara, A. e Guzzetti, F. (Eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.

Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A. e Oinas, V. (2000) – Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 97: 9875-9880.

Harmon, R.S. e Doe III, W. (2001) – *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Springer-Verlag. 535 p.

He, Y.P., Xie, H., Cui, P., Wei, F.Q., Zhong, D.L. e Gardner, J.S. (2003) – GIS-based hazard mapping and zonation of debris flows in Xiaojiang Basin, southwestern China. *Environmental Geology*. 45: 286-293.

- Hengl, T. (2006) – Finding the right pixel size. *Computer & geosciences*. 32: 1283-1298.
- Hengl, T. (2009) – *A practical guide to geostatistical mapping*. University of Amsterdam. Amsterdam.
- Hervás, J., Barredo, J., Rosin, P., Pasuto, A., Mantovani, F., e Silvano, S. (2003) – Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy. *Geomorphology*. 54: 63-75.
- Highland, L. e Bobrowsky, P. (2008) – *The landslide handbook – A guide to understanding landslides*. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey. 129 p.
- Hijioka, Y., Matsuoka, Y., Nishimoto, H., Masui, M. e Kainuma, M. (2008) – Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environmental Engineering*. 13: 97-108.
- Hildenbrand, A., Weis, D., Madureira, P. e Marques, F. (2014) – Recent plate re-organization at the Azores Triple Junction: Evidence from combined geochemical and geochronological data on Faial, S. Jorge and Terceira volcanic islands. *Lithos*. 210/211: 27-39.
- Hovius, N., Stark, C.P. e Allen, P.A. (1997) – Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology*. 25: 231-234.
- Hungr, O., McDougall, S., Wise, M. e Cullen, M. (2008) – Magnitude-frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief. *Geomorphology*. 96: 355–365.
- Hutchinson, J.N. (1995) – Keynote paper: Landslide hazard assessment. *Proceedings of the 6th ISL*, Christchurch. 3: 1805-1841.

I

- IDNDR – International Decade for Natural Disaster Reduction (1987) – Resolução n.º 42/169, de 11 de Dezembro de 1987, da Assembleia-Geral da Nações Unidas. Genebra.
- INE - Instituto Nacional de Estatística. (1945) – *Censos 1950: Distritos de Angra do Heroísmo, Horta, Ponta Delgada e Funchal. Volumes XX a XXIII*. VIII Recenseamento Geral da População de Portugal no continente e ilhas adjacentes em 12 de Dezembro de 1940. Lisboa.
- INE – Instituto Nacional de Estatística (1952). Censos de 1950. *População residente e presente, famílias, casais, mulheres casadas, convivências, estrangeiros, cegos, surdos-mudos e órfãos. IX Recenseamento Geral da População no continente e ilhas adjacentes em 15 de Dezembro de 1950*. Tomo I. Lisboa
- INE – Instituto Nacional de Estatística (1963). Censos de 1960. *Famílias, convivências e população residente e presente, por freguesias, concelhos, distritos e centros urbanos. X Recenseamento Geral da População no continente e ilhas adjacentes às 0h de 15 de Dezembro*. Tomo II. Lisboa.
- INE – Instituto Nacional de Estatística (1975). Censos de 1970. *Região Autónoma dos Açores. 11.º Recenseamento Geral da População e 1 Recenseamento da Habitação - população e alojamentos por lugares*. Lisboa.

INE – Instituto Nacional de Estatística (1983). Censos 1981. *Região Autónoma dos Açores. Resultados Definitivos. XII Recenseamento Geral da População e II Recenseamento Geral da Habitação*. Lisboa.

INE – Instituto Nacional de Estatística (1993) – Censos 1991. *Região Autónoma dos Açores. Resultados Definitivos. XIII Recenseamento Geral da População e III Recenseamento Geral da Habitação*. 7.º Vol. Lisboa.

INE – Instituto Nacional de Estatística (2002) – Censos 2001. *Região Autónoma dos Açores. Resultados Definitivos. XIV Recenseamento Geral da População e IV Recenseamento Geral da Habitação*. Lisboa.

INE – Instituto Nacional de Estatística (2012) – Censos 2011. *Região Autónoma dos Açores. Resultados Definitivos. XV Recenseamento Geral da População e V Recenseamento Geral da Habitação*. Lisboa.

IPCC (2007) – *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

IPCC (2014 a) – *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p.

IPCC (2014 b) – *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 p.

IPCC (2014 c) – *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISDR – International Strategy for Disaster Reduction (1999) – The Geneva Mandate on Disaster Reduction. Geneva: United Nations.

J

Julião, R., Nery, F., Ribeiro, J., Branco, M., e Zêzere, J. (2009) – *Guia Metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal*. Autoridade Nacional de Protecção Civil, Direcção Geral do ordenamento do território e Desenvolvimento Urbano, Instituto Geográfico Português. Lisboa. 91 p.

K

Kemp, L. D., Bonham-Carter, G. F. e Raines, G. L. (1999) – *Arc-WofE: Arcview extension for weights of evidence mapping*.

Kessel, D., (2000) – Global warming - facts, assessment, countermeasures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 26: 157-168.

L

Lameiras, G. (2006) – Avaliação do impacte do sismo de 1998 na ilha do Faial. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores, 168p.

Lan, H.X., Lee, C.F., Zhou, C.H. e Martin, C.D. (2005) – Dynamic characteristics analysis of shallow landslides in response to rainfall event using GIS. *Environmental Geology*. 47: 254- 267.

Lang, A., Moya, J., Corominas, J., Schrott, L. e Dikau, R. (1999) – Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*. 30 (1–2): 33–52.

Lee, S., Choi, J. e Min K. (2002) – Landslide susceptibility analysis and verification using the bayesian probability model. *Environmental geology*. 43:120-131.

Lee, S. (2004) – Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS. *Environmental Management*. 34: 223-232.

Lee, S., Ryu, J., Min, K. e Won, J. (2004) – Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28 (12): 1361-1376.

Lee, S. (2005) – Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data journals. *International Journal of Remote Sensing*. 26: 1477–1491.

Lee, S. e Pradhan, B. (2007) – Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslide*. 4: 33–41.

Lilliefors, H. (1967) – On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*. 62: 399–402.

Liu, J.G., Mason, P.J., Clerici, N., Chen, S., Davis, A., Miao, F., Deng, H. e Liang, L. (2004) – Landslide hazard assessment in the Three Gorges area of the Yangtze river using ASTER imagery: Zigui-Badong. *Geomorphology*. 61 (1-2): 171-187.

Luckman, P.G., Gibson, R.D. e Derose, R.C. (1999) – Landslide erosion risk to New Zealand pastoral steeplands productivity. *Land Degradation & Development*. 10: 49-65.

M

Madruga, J.S. (1995) – *Características e génese do horizonte plácico em solos vulcânicos dos Açores*. Dissertação de Doutoramento em Ciências Agrárias. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo.

Magalhães, M. (2007) – Paisagem – Perspectiva da Arquitectura Paisagista. Faculdade de Letras – Universidade de Lisboa, Departamento de Filosofia, Lisboa. *Philosophica*. 29: 103 - 113.

Mahalingam, R. e Olsen, M. (2015) – Evaluation of the influence of source and spatial resolution of DEMs on derivative products used in landslide mapping. *Natural Hazards and Risk*. DOI: 10.1080/19475705.2015.1115431

Malamud, B.D. e Turcotte, D.L. (1999) – Self-organized criticality applied to natural hazards. *Natural Hazards*. 20 (2): 93-116.

Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. e Reichenbach, P. (2004a) – Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29: 687-711.

Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. e Reichenbach, P. (2004b) – Landslides, earthquakes and erosion. *Earth and Planetary Science Letters*. 229: 45-59.

Malheiro, A. e Fraga, C. (1995) – *Ponta da Fajã - Ilha das Flores. Situação da falésia envolvente em Novembro de 1995*. Doc. LREC: Nota Técnica 30/95. 6 p.

Malheiro, A., 2006. Geological hazards in the Azores archipelago: Volcanic terrain instability and human vulnerability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 156 (1-2): 158-171.

Manfreda, S., Brocca, L., Moramarco, T., Melone, F. e Sheffield, J. (2014) – A physically based approach for the estimation of root-zone soil moisture from surface measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18: 1199 - 1212.

Marôco, J. (2003) – *Análise Estatística com utilização do SPSS*. 3ª Edição. Edições Silabo. Lisboa. 822 p.

Marques, M. e Madeira, M. (1975) – Aspetos gerais da defesa da paisagem na ilha de S. Miguel (Açores). 1 - O Maciço das Lagoas. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*. 35: 31-40.

Marques, M. e Madeira, M. (1977) – Aspetos gerais da defesa da paisagem na ilha de S. Miguel (Açores). 1 - O Maciço do Fogo e o Planalto dos Graminhais. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*. 37: 137-152.

Marques, R., 2004. *Contribuição para o conhecimento da instabilidade geomorfológica nos Açores: Estudo de movimentos de vertente associados a diferentes mecanismos desencadeantes*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores. Ponta Delgada. 147 p.

Marques, R., Zêzere, J.L., Queiroz, G. e Coutinho, R. (2007b) – Actividade geomorfológica desencadeada pela crise sísmica de 2005 no Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores): avaliação da susceptibilidade com recurso a regressão logística. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. Vol. V: 47-61.

Marques, R., Zêzere, J.L., Amaral, P., Trigo, R., Queiroz, G. e Gaspar, J.L. (2008c) – Preliminary developments and implementation of an early warning system for landslides based on real-time ground based meteorological monitoring in Povoação County (S. Miguel, Azores). *Geophysical Research Abstracts*. 10: EGU2008 - A - 11183.

Marques, R., Zêzere, J. L., Trigo, R., Gaspar, J. L., Trigo, I. (2008d) – Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation. *Hydrological Processes*. 22: 478–494.

Marques, R., Zêzere, J.L., Gaspar, J.L. e Amaral, P. (2009a) – Reconstituição e modelação probabilística da escoada detritica de Vila Franca do Campo desencadeada pelo sismo de 22 de Outubro de 1522 (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. VI: 175-182.

Marques, R., Amaral, P., Zêzere, J. L., Queiroz, G. e Goulart, C. (2009b) – Estudo comparativo de diferentes métodos probabilísticos para a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente: um caso de estudo no vale da Ribeira Quente (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*. VI: 183 – 190.

Marques, R. (2013) – *Estudo de Movimentos de vertente no Concelho da Povoação (Ilha de São Miguel, Açores): Inventariação, caracterização e análise de suscetibilidade*. Dissertação de Doutoramento em Geologia, especialidade de Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. Ponta Delgada. 644 p.

Medeiros, J. (2004) – *Contribuição para o estudo dos riscos geológicos no Concelho de Vila Franca do Campo (S. Miguel, Açores) e suas implicações em termos de planeamento de emergência*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 145 p.

Méheux, K., Dominey-Howes, D. e Lloyd, K. (2007) – Natural hazard impacts in small island developing states: A review of current knowledge and future research needs. *Natural Hazards*. 40: 429–446.

Meinhardt, M., Fink, M. e Tünschel, H. (2015) – Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. *Geomorphology*. 234: 80–97.

Meinshausen, M., Smith, S., Calvin, K.; Daniel, J., Kainuma, M., Lamarque, J-F., Matsumoto, K., Montzka, S., Raper, S., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. e van Vuuren, D. (2011) – The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*. 109:213–241.

Mendonça, E. E. P. (2012) – *Serviços dos Ecossistemas na Ilha Terceira: estudo preliminar com ênfase no sequestro de carbono e na biodiversidade*. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 120 p.

Miguel, A. (2010) – *Avaliação da vulnerabilidade da orla costeira da ilha Terceira - Açores à variação do nível médio da água do mar*. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 104 p.

Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1994) – A physically based model for the topographic control of shallow landsliding. *Water Resources Research*. 30 (4): 1153-1171.

Moore, I.D., O' Loughlin, E.M. e Burch, G.J. (1988) – A computer based topographic model and its hydrologic and ecological applications. *Earth Surface Processes and Landforms*. 13: 305-320.

Moore, I.D. e Grayson, R.B. (1991) – Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*. 27(6): 1171-1191.

Moreiras, S.M. (2004) – Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza valley, Mendoza Province, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29: 255-266.

Moreiras, S.M. (2005) – Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza valley, Argentina. *Geomorphology*. 66 (1-4): 345-357.

Moss, H., Edmonds, A., Hibbard, A., Manning, R., Rose, K., van Vuuren, P., Carter, R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, A., Mitchell, B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, J., Stouffer, J., Thomson, M., Weyant, P. e Wilbanks, J. (2010) – The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463 (11): 747-756.

Müller, V.C. (1953) – *A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area*. New York: Virginia and Tennessee. Dept. of Geology. 3:30.

N

Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukhetjess, A. e Khire, M.V. (2000) –Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 58 (4): 275-287.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Devries, B., Fenhann J., Gaffin, S., Gregory, A. e Grübler, A. (2010) – *Emission scenarios* – Special Report of Working Group III of the IPCC. Geneva and Cambridge University Press, Cambridge. 595 p.

Needham, H., Francheteau, J. (1974). Some characteristics of the Rift Valley in the Atlantic Ocean near 36 48' north. *Earth and planetary Science Letters*. 22: 29-43.

Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y. e Durmaz S. (2008) – Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*. 94: 401–418.

Ng, K.C., Parry, S., King, J.P., Franks, C.A. e Shaw, R. (2003) – *Guidelines for natural terrain hazard studies*. Geotechnical Engineering Office., Geo Report 138. 138 p.

Nicholls, R. J. e Lowe. J. A. (2004) – Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global Environmental Change*. 14: 229- 244.

Nossin, J. (1999) – Monitoring of hazards and urban growth in Villavicencio, Colombia, using scanned air photos and satellite imagery. *GeoJournal*. 49(2): 151-158.

Novo, M. E. (2007) – *Alterações climáticas e seus impactos nos recursos hídricos em ilhas de pequena dimensão (caso de estudo: Açores – ilha Terceira)*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo.

Nunes, J.C. (2000) – Notas sobre a geologia da Ilha Terceira (Açores). *Açoreana*. 9(2): 205-215.

Nunes, J. C., Lima, E. A., Costa, M. P. e Porteiro, A. (2010) – Vulcanismo e paisagens vulcânicas dos Açores: contributo para o geoturismo e o projecto Geoparque Açores. GEOTIC – Sociedade Geológica de Portugal. VIII Congresso Nacional de Geologia. V 18:16.

Nunes, J. C. (2012) – *Notas sobre a geologia da Ilha Terceira (Açores)*. V Congresso Ibérico da Ciência do Solo 2012 - Guia de Campo. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. Ponta Delgada.

O

Oliveira, S.C. (2012) – *Incidência espacial e temporal da instabilidade geomorfológica na bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos)*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa. 452 p.

Oppenheimer, M. e Alley, B. (2004) – The west Antarctic ice sheet and long term climate policy. *Climatic Change*. 64: 1-10.

Oughton, J. (2005) – Global Warming. *Reports on Progress in Physics*. 68: 1343-1403.

O' Loughlin, E.M. (1986) – Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*. 22 (5): 794-804.

P

Pacheco, J., Coutinho, R., Wallenstein, N., Pimentel, A., Marques, R. e Silva, R. (2007) – *POOC Flores – Plano de Ordenamento da Orla Costeira das Flores – 2ª Fase – Estudo prévio de ordenamento (Componente Geológica)*. Gestão Sustentável do Desenvolvimento Social, Económico e Ecológico das Áreas Litorais da Macaronésia. Iniciativa Comunitária INTERREG III B 2000-2006. 77 p.

Pacheco J.M., Ferreira, T., Queiroz, G., Wallenstein, N., Coutinho, R., Cruz, J.V., Pimentel, R. Silva, JR.L. Gaspar, J.L.R. e Goulart, C. (2011) – Notas sobre a geologia do arquipélago dos Açores. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha e J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal*, Escolar Editora.

Pelletier, J. D., Malamud, B. Blodget, T. e Turcotte, D. L. (1997) – Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. *Engineering Geology*. 48: 255 – 268.

Pereira, S. (2009) – *Perigosidade a movimentos de vertente na região norte de Portugal*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Faculdade de Letras da Universidade do Porto. 370 p.

Pereira, S.; Zêzere, J. L. e Bateira, C. (2012) – Technical note: Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12: 979-988.

Pestana, D.D. e Velosa, S.F. (2008) – *Introdução à probabilidade e à estatística*. Vol. I, 3.^a Edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.

Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J. e Glade, T. (2014) – Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study of lower Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 14: 95–118.

Piedade, A. M. M., Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C. e Oliveira, S. C. (2011) – Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na região a norte de Lisboa. *Finisterra*. 46 (91): 9 – 26.

Pinheiro, J. A. V. F. (1990) – *Estudo dos Principais Tipos de Solos da Ilha Terceira (Açores)*. Dissertação de Doutoramento em Ciências Agrárias. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 212 p.

Pinto-Correia T. (2000) – As medidas agro-ambientais como instrumento integrado para a preservação da paisagem rural: a importância da sensibilização dos técnicos locais e dos chefes de exploração. *GeoInova*. 1: 81-98.

Poli, S. e Sterlacchini, S. (2007) – Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique. *Natural Resources Research*. 16 (2): 121 – 134.

Popescu, M. (1994) – A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 50: 71-74.

Popescu, M. (1996) – *From Landslide Causes To Landslide Remediation, Special Lecture*. Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides. Trondheim. 1: 75-96.

Popescu, M. (2002) – *Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options*. Keynote Lecture. Proceedings 3rd International Conference on Landslides. Slope Stability and Safety of Infra-Structures. Singapore. 61-81.

Q

Quaresma, I. (2008) – *Inventariação e análise de eventos hidro-geomorfológicos com carácter danoso em Portugal Continental*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física. Especialização em Geografia Física, Recursos e Riscos Ambientais, Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. 100 p.

R

- Ramos, C., Zêzere, J. e Reis, E. (2010) – *Avaliação da susceptibilidade aos perigos naturais da Região de Lisboa e Vale do Tejo. Prospectiva e Planeamento. Ordenamento Territorial e Sustentabilidade*. Departamento de Prospectiva e Planeamento e Relações Internacionais. Lisboa. (17): 57-73.
- Raposo, A. (1987) – *O fenómeno das chuvas torrenciais de Setembro a Novembro de 1986 e suas consequências. Povoação e Faial da Terra, 1986*. Secretaria Regional do Equipamento Social.
- Raposo, A. (1988) – *As chuvas torrenciais de Setembro a Novembro de 1986 e suas consequências. Povoação e Faial da Terra*. 1^{as} Jornadas do Ambiente. Angra do Heroísmo.
- Raspini, F., Ciampalini, A., Conte, S., Lombardi, L., Nocentini, M., Gigli, G., Ferretti, A. e Casagli, N. (2015) – Exploitation of Amplitude and Phase of Satellite SAR Images for Landslide Mapping: The Case of Montescaglioso (South Italy). *Remote Sensing*. 7: 14576-14596.
- Rebelo, F. (1985) – Identificação dos processo erosivos actuais na parte ocidental da ilha de São Miguel (Açores). *Cadernos de Geografia*. Coimbra. IEG. 121-139.
- Rebelo, F. (1991) – Geografia Física e riscos naturais. Alguns exemplos de riscos geomorfológicos em vertentes e arribas no domínio mediterrâneo. *Biblos*. 67: 353-371.
- Rebelo, F. (1997) – Risco e crise nas inundações rápidas em espaço urbano. Alguns exemplos portugueses analisados a diferentes escalas. *Territorium - Revista de geografia física aplicada no ordenamento do território e gestão de riscos naturais*. Minerva. Coimbra. 4: 29-47.
- Reis, E. J. M. (2006) – *As bacias hidrográficas das ribeiras da serra de Grândola: dinâmica hidrológica e factores condicionantes*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Remondo, J., González, A., Dias de Terán, J. e Cendrero, A. (2003a) – Landslide Susceptibility Models Utilizing Spatial Data Analysis Techniques. A Case Study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural Hazards*. 30 (3): 267-279.
- Remondo, J., González, A., Dias de Terán, J., Cendrero, A., Fabbri, A. e Chung, J. (2003b) – Validation of landslide susceptibility maps: examples and applications from a case study in northern Spain. *Natural Hazards*. 30: 437-449.
- Resendes, J. (2004) - *Avaliação de riscos geológicos e planeamento de emergência no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores)*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores. 149 p.
- Ribeiro-Telles, G. (1994) – Paisagem Global, *in Paisagem* (Abreu, M. C. Ed.). DGOTDU, Lisboa.
- Ricardo, R. P., Madeira, M. V., Medina, J. M. B., Marques M. M. e Furtado, A. F. S. (1977) – Esboço Pedológico da Ilha de S. Miguel (Açores). *An. Inst. Sup. Agron. Lisboa*. 37: 275-385.
- Rochete, C. (2004) – *Dinâmica de vertentes em montanhas ocidentais do Portugal Central*. Coimbra: Dissertação de doutoramento apresentada na Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.

Rodrigues, F. C. (1993) – *Hidrologia da Ilha Terceira – Contributo para o seu conhecimento*. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 139 p.

Rodrigues, A. F. (2001) – *Aerossóis atmosféricos com efeitos no clima: Níveis e processos de transformação no centro do Atlântico Norte*. Dissertação de Doutoramento. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo.

Rodrigues, F. C. (2002) – *Hidrogeologia da Ilha Terceira (Açores – Portugal)*. Dissertação de Doutoramento no Ramo de Engenharia. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo.

Rodrigues, F.C e Rodrigues, A.F. (2002) – Distribution of environmental isotopes in precipitation on a small oceanic island (Terceira - Azores): Some particularities based on preliminary results. *Arquipélago: Agrarian Science and Environment*. 1: 1-6.

S

Sales, D., Costa, A., Silva, E., Júnior, F., Cavalcante, A., Medeiros, S., Marin, A., Guimarães, S., Júnior, L. e Pereira, J. (2015) – Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 30 (4) 435 - 456.

Santos F. e Miranda P. (2006). *Projeto SIAM II. Alterações Climáticas em Portugal: Cenários, impactos e medidas de adaptação*. Gradiva, Lisboa. 505 p.

Sarkar, S. e Anbalagan, R. (2008) – Landslide Hazard Zonation Mapping and Comparative Analysis of Hazard Zonation Maps. *Journal of Mountain Science*. 5(3): 232-240.

Sarkar, S., Kanungo, D., Patra, A. e Kumar, P. (2008) – GIS Based Spatial Data Analysis for Landslide Susceptibility Mapping. *Journal of Mountain Science*. 5(1): 52-62.

Schlögel, R., Malet, J.-P., Reichenbach, P., Remaître, A. e Doubre, C. (2015) – Analysis of a landslide multi-date inventory in a complex mountain landscape: the Ubaye valley case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 15: 2369–2389.

Schuster, R. e Wieczorek, G. (2002) – Landslide triggers and types. In Rubár, Stemberk e Wagner (Eds.). *Landslides: Proceedings of the First European Conference on Landslides, 24-26 June*. Prague. Czech Republic. Sweets & Zeitlinger.

Searle, R. (1980) – Tectonic pattern of the Azores spreading centre and triple junction. *Earth and Planetary Science Letters*. 51: 415- 434.

Self, S. (1976) – The recent volcanology of Terceira, Azores. *Journal of the Geological Society of London*. 132: 645-666.

Sepúlveda, S. e Petley, D. (2015) – Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 15: 1821–1833.

- Shahabi, H., Ahmad, B. e Khezri, S. (2013) – Evaluation and comparison of bivariate and multivariate statistical methods for landslide susceptibility mapping (case study: Zab basin). *Arabian Journal of Geosciences*. 6: 3885–3907.
- Shahabi, H. e Hashim, M. (2015) – Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and remote sensing data in tropical environment. *Scientific Reports*. 5 : 9899.
- Silveira, D. (2002) – *Caracterização da sismicidade histórica da ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos. Universidade dos Açores, 149 p.
- Soeters, R. e van Westen, C. (1996) – Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, A. K e Schuster R. L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press. Washington, D.C.. Special Report 247:129-177.
- Sørensen, R., Zinko, U. e Seibert, J. (2006) – On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*. 10: 101 – 112.
- Speight JG. (1977) – Landform pattern description from aerial photographs. *Photogrammetry*. 32: 161–182.
- SPSS (2006) – *SPSS Base 15.0 User's Guide*. SPSS Inc. 591 p.
- SRAM - Secretaria Regional do Ambiente e do Mar (2007) – Carta de ocupação do solo da Região Autónoma dos Açores (Ilha Terceira). Escala 1:50.000. Produzida pela empresa Geothermal no âmbito do Projeto “Sinergia e Cooperação na Gestão do Solo da Região Macaronésia” (SUEMAC), aprovado pelo programa comunitário INTERREG III-B Açores-Madeira-Canárias.
- SRHE - Secretaria Regional da Habitação e Equipamento (2001) – Cartografia vectorial da Ilha Terceira (escala 1:25 000), Secretaria Regional da habitação e Equipamentos, Serviços de Cartografia.
- Stark CP e Hovius, N. (2001) – The characterization of landslide size distributions. *Geophysical Research Letters*. 28: 1091–1094.
- Sterlacchini, S., Ballabio, C., Blahut, J., Masetti, M. e Sorichetta, A. (2011) – Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. *Geomorphology*. 125: 51 – 61.
- Surdeanu, V. (1986) – Landslides and their role in reservoir silting. In Slaymaker, O. e Balteanu, D. (Eds.), *Geomorphology and Land Management*. Zeitschrift fur Geomorphologie N. F.. Suppl. - Bd. 58:165 - 171.
- Süzen, M. L. e Doyuran, V. (2004) – A comparison of GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*. 45: 665-679.
- Swets, J. A. (1988) – Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*. 240: 1285-1293.

T

Tarboton, D. G. (1997) – A new method for determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. 33 (2): 309 – 319.

Tarboton, D. G. (2010) – *TauDEM 5.0. Guide to using Taudem line functions*.

Tarboton, D. G. e Mohammed, I. M. (2010) – *TauDEM 5.0 - Quick start Guide to using Taudem ArcGisToolbox*.

Tarboton, D. G. e Mohammed, I. M. (2013) - *TauDEM 5.1 – Quick start Guide to using Taudem ArcGisToolbox*.

Thierry, Y., Malet, J-P., Sterlacchini, S., Puissant, A. e Maquaire, O. (2007) – Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*. 92: 38-59.

Thuiler, W., Lafourcade, B e Araujo, M. (2009) – *ModOperating Manual for BIOMOD*. Universite Joseph Fourier. Laboratoire d'Ecologie Alpine. Grenoble. 90 p.

Tomé, R., 2013 – *Mudanças Climáticas nas Regiões Insulares*. Dissertação de Doutorado em Física. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. Angra do Heroísmo. 136 p.

Tsai, T. e Chen, H. (2010) – Effects of degree of saturation on shallow landslides triggered by rainfall. *Environmental Earth Sciences*. 59: 1285–1295.

U

UNDRO – Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator (1979) – *Natural Disaster and Vulnerability Analysis*. Report of Expert Group Meeting. Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator. Geneva. 48 p.

W

Wallenstein, N., Duncan A.M., Chester, D.K. e Marques, R. (2007) – Fogo Volcano (São Miguel, Azores): a hazardous landform. *Zeitschrift für Geomorphology*. 3: 259 - 270.

Wang, Q., Dongchuan Wang, D., Huang, Y., Wang 1, Zhang, L., Guo, Q., Chen, W., Chen, C. e Sang, M. (2015) – Landslide Susceptibility Mapping Based on Selected Optimal Combination of Landslide Predisposing Factors in a Large Catchment. *Sustainability*. 7: 16653–16669.

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. e Davis, I. (2004) – *At Risk*. Natural hazards, people's vulnerability and disasters (Second Edition ed.). London: Taylor & Francis Group.

WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1990) – A Suggested Method for Reporting a Landslide. *Bulletin International Association for Engineering Geology*. Paris. 41 : 5-12.

WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory (1991) – A suggested method for a landslide summary. *Bulletin of the International Association of Enginerring Geology*. Paris. 47: 101-110.

WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory (1993a) – A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Paris. 47: 53-57.

WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory (1993b) – Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies. Canadian Geotechnical Society. Richmond.

V

Valadão, P. (2002) – *Contribuição para o estudo de movimentos de vertente nos Açores*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores. 120 p.

Valadão, P., Gaspar, J.L., Queiroz, G. e Ferreira, T. (2002) – Landslides density map of S. Miguel island, Azores archipelago. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2: 51-56.

van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten G., Vandekerckhove, L. (2006) – Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*. 76: 392-410.

van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers G., Verstraeten, G. e Demoulin, A. (2007) – Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region. *Earth and Planetary Science Letters*. 256: 588-603.

van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Van Gils, M. e van Rompaey, A. (2010) – Human environment interactions in residential areas susceptible to landsliding: the Flemish Ardennes case study. *Area*. 42 (3), 339–358.

van Den Eeckhaut, M. e Hervás, J. (2011) – State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk. *Geomorphology*. 139/140: 545-558.

van Westen, C. (1993) – Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation. *ITC Publication*. ITC, Enschede. 15: 245 p.

van Westen, C., Rengers, N., e Soeters, R. (2003) – Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*. 30: 399-419.

van Westen, C., Van Asch, T. e Soeters, R (2006) – Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65: 167–184.

van Westen, C., Castellanos, E. e Kuriakose, S. (2008) – Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology*. 102: 112–131.

van Vuuren, D., Elzen, M., Lucas, P., Eickhout, B., Strengers, B., van Ruijven, B., Wonink, S. e van Houdt, R. (2007) – Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-006-9172-9.

VARNES D.J. (1978) – *Slope movement and types and processes. Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board. National Academy of Science. Washington D.C. Special Report 176: 11-33.

Varnes DJ e IAEG-CLOMMS - International Association of Engineering Geology- Commission on landslides and other mass movements on slopes (1984) – *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.. UNESCO Press. Paris.

Vieira, A. (2005) – *Riscos Geológicos inerentes às fajãs da ilha de São Jorge: Casos específicos das fajãs detríticas dos Cubres e de São João*. Tese de Mestrado em Gestão e Conservação da Natureza. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores. 101 p.

Y

Yan, T. Z. (1988) – Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China. In Bonnard, C. (Ed.) *Landslides*. Proceedings of the 5th International Symposium in Landslides, Lausanne. A. A. Balkema, Rotterdam. 2: 1263 – 1268.

Yin, K. L. e Yan, T. Z. (1988) – Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In Bonnard, C. (Ed.) *Landslides*. Proceedings of the 5th International Symposium in Landslides, Lausanne. A. A. Balkema, Rotterdam, Rotterdam. 2: 1269 – 1272.

Z

Zbyszewski, G. (1961) – Étude géologique de l'île de S. Miguel (Açores). *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*. 45: 5-79.

Zbyszewski, G., Medeiros, A.C., Ferreira, O.V. e Assunção, C.T. (1970) – *Carta Geológica de Portugal - Ilha Terceira (Açores). Escala 1/50.000*. Carta Gravada e Impressa pelo Instituto Geográfico e Cadastral.

Zbyszewski, G., Medeiros, A.C., Ferreira, O.V. e Assunção, C.T (1971) – *Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50.000*. Notícia explicativa da folha Ilha Terceira (Açores). Serviços Geológicos de Portugal. 43 p.

Zêzere, J. L. (1997) – *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa. 575 p.

Zêzere, J. L., Ferreira, A. e Rodrigues, M. (1999) – Landslides in the north of Lisbon region (Portugal): Conditioning and triggering factors. *Physics and Chemistry of the Earth*. 24(10): 925-934.

Zêzere, J. L. (2002) – Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2: 73-82.

- Zêzere, J. L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M., Vieira, G. e Ferreira, A. (2004) – Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 4: 133-146.
- Zêzere, J. L., Trigo, R. e Trigo, I. (2005a) – Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5: 331-344.
- Zêzere, J. L., Pereira, A. e Morgado, P. (2005b) – *Perigos naturais e tecnológicos no território de Portugal Continental*. Actas do X Colóquio Ibérico de Geografia - A Geografia Ibérica no contexto europeu. Évora. 17 p.
- Zêzere, J. L., Oliveira, S., Garcia, R. e Reis, E. (2007) – Landslide risk analysis in the area north of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements. *Landslides*. 4: 123-136.
- Zêzere, J. L., Garcia, R., Oliveira, S. e Reis, E. (2008) – Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*. 94: 467-495.
- Zêzere, J.L. (2016) – Comunicações pessoais. Post-graduate Training School. *Landslides and other Geological Hazards in Active Volcanic Environments*. European Geosciences Union / FORM-OSE. Ponta Delgada.
- Zhang, X., Drake, N.A., Wainwright, J. e Mulligan, M (1999) – Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: scaling issues and a fractal method for their solution. *Earth Surf Proces Landforms*. 24:763-779.



Universidade dos Açores
Departamento de Ciências Agrárias

Alonso Teixeira Miguel

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS
DE VERTENTE NA ZONA OESTE DA ILHA TERCEIRA**

ANEXOS

Angra do Heroísmo

2016

ANEXO I

**COEFICIENTES DO VALOR INFORMATIVO UTILIZADOS NA
ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE**

Tabela AI - Valor informativo (*I_i*) para cada uma das classes, de cada fator de predisposição, considerando como variável dependente: 1) a totalidade do inventário de movimentos de vertente (IMV-TOT); e 2) apenas os movimentos de vertente do grupo de modelação (IMV-MOD).

FATOR DE PREDISPOSIÇÃO	CLASSE		Valor informativo (<i>I_i</i>)		
			IMV-TOT	IMV-MOD	Variação
DECLIVE (º)	DEC 1	[0-5]	-2,254	-1,669	-0,584
	DEC 2	]5-10]	-1,644	-1,872	0,229
	DEC 3	]10-15]	-2,106	-1,646	-0,459
	DEC 4	]15-20]	-0,948	-0,738	-0,211
	DEC 5	]20-25]	-0,667	-0,509	-0,158
	DEC 6	]25-30]	-0,095	-0,059	-0,036
	DEC 7	]30-35]	0,307	0,362	-0,054
	DEC 8	]35-40]	0,816	0,763	0,054
	DEC 9	]40-45]	1,191	1,143	0,048
	DEC 10	]45-50]	1,508	1,433	0,074
	DEC 11	]50-55]	1,599	1,591	0,008
	DEC 12	]55-60]	1,629	1,627	0,002
	DEC 13	]60-85]	1,563	1,658	-0,096
USO	USO 1	Agrícola	-0,976	-2,294	1,319
	USO 2	Urbano	-0,976	-2,294	1,319
	USO 3	Pastagem	-0,826	-0,858	0,032
	USO 4	Florestal	-0,497	-0,415	-0,082
	USO 5	Vegetação Natural	-0,212	-0,153	-0,058
	USO 6	Áreas Descobertas	1,408	1,407	0,001
GEO	GEO 1	Traquitos e traqui-andesitos	-1,209	-1,372	0,164
	GEO 2	Complexo basáltico	0,060	-0,242	0,302
	GEO 3	Complexo andesítico	0,678	0,675	0,003
	GEO 4	Materiais de projeção	-0,700	-0,448	-0,252
	GEO 5	Cones de escórias	-0,258	-0,220	-0,038
PAA	PAA 1	< 1200	-0,137	-0,044	-0,093
	PAA 2	]1200-1600]	0,377	0,343	0,034
	PAA 3	]1600-2000]	-2,386	-0,671	-1,715
	PAA 4	]2000-2400]	-2,240	-0,671	-1,569
	PAA 5	]2400-2800]	-0,722	-0,671	-0,051
	PAA 6	]2800-3200]	-0,141	-0,027	-0,114
	PAA 7	]3200-3600]	-0,129	-0,128	-0,001
	PAA 8	> 3600	-0,534	-0,251	-0,283
EXP	EXP 1	Zonas Planas (-1)	-1,188	-0,362	-0,826
	EXP 2	N]337,5-22,5]	-0,254	-0,362	0,108
	EXP 3	NE]22,5-67,5]	-0,105	0,058	-0,163
	EXP 4	E]67,5-112,5]	-0,717	-0,362	-0,355
	EXP 5	SE]112,5-157,5]	-1,188	-0,362	-0,826
	EXP 6	S]157,5-202,5]	-0,434	-0,204	-0,230
	EXP 7	SW]202,5-247,5]	-0,288	-0,309	0,021
	EXP 8	W]247,5-292,5]	0,445	0,401	0,044
	EXP 9	NW]292,5-337,5]	-0,272	-0,126	-0,146

Tabela AI (continuação) - Valor informativo (*Ii*) para cada uma das classes, de cada fator de predisposição, considerando como variável dependente: 1) a totalidade do inventário de movimentos de vertente (IMV-TOT); e 2) apenas os movimentos de vertente do grupo de modelação (IMV-MOD).

FATOR DE PREDISPOSIÇÃO	CLASSE		Valor informativo (<i>Ii</i>)		
			IMV-TOT	IMV-MOD	Variação
PLV	PLV 1	Convexo (< -0,05)	0,271	0,254	0,017
	PLV 2	Retilíneo ([-0,05;0,05])	-1,310	-1,391	0,081
	PLV 3	Côncavo (> 0,05)	0,195	0,219	-0,024
IWI	IWI 1	[0,0000-0,0010]	-0,911	-1,741	0,831
	IWI 2	]0,0010-0,0025]	-0,088	-0,826	0,738
	IWI 3	]0,0025-0,0050]	-0,233	-0,427	0,194
	IWI 4	]0,0050-0,0075]	-0,529	-0,848	0,319
	IWI 5	]0,0075-0,0100]	-0,289	-0,518	0,229
	IWI 6	]0,0100-0,0250]	-0,456	-1,377	0,921
	IWI 7	]0,0250-0,0500]	-0,367	-0,799	0,432
	IWI 8	]0,0500-0,0750]	-0,567	-0,817	0,250
	IWI 9	]0,0750-0,1000]	-0,541	-0,944	0,403
	IWI 10	> 0,1000	0,196	0,245	-0,049
PTV	PTV 1	Côncavo (< -0,05)	0,184	0,207	-0,023
	PTV 2	Retilíneo ([-0,05;0,05])	-0,482	-0,627	0,146
	PTV 3	Convexo (> 0,05)	0,075	0,082	-0,006
DCA	DCA 1	[0-25]	0,216	0,094	0,121
	DCA 2	]25-50]	-0,149	-0,243	0,093
	DCA 3	]50-75]	-0,275	-0,517	0,242
	DCA 4	]75-100]	-0,279	-0,323	0,044
	DCA 5	]100-125]	0,131	0,151	-0,020
	DCA 6	]125-150]	0,253	0,263	-0,010
	DCA 7	> 150	-0,071	0,111	-0,182
ACT	ACT 1	[1-25]	-0,113	0,034	-0,147
	ACT 2	]25-50]	0,004	0,076	-0,072
	ACT 3	]50-100]	-0,039	-0,009	-0,030
	ACT 4	]100-200]	0,041	0,070	-0,029
	ACT 5	]200-400]	0,075	0,074	0,001
	ACT 6	]400-800]	-0,174	-0,482	0,308
	ACT 7	]800-1600]	0,104	-0,373	0,478
	ACT 8	]1600-3200]	0,272	-0,174	0,446
	ACT 9	> 3200	0,062	-0,422	0,484
DDR	DDR 1	0	0,028	0,114	-0,086
	DDR 2	]0-5]	-0,651	-0,618	-0,033
	DDR 3	]5-10]	0,108	0,090	0,018
	DDR 4	]10-15]	-0,015	-0,218	0,203
	DDR 5	]15-20]	-0,651	-0,618	-0,033
	DDR 6	]20-25]	-0,058	-0,165	0,107

ANEXO II

MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE RESULTANTES DAS DIFERENTES COMBINAÇÕES DE FATORES DE PREDISPOSIÇÃO, COM BASE NO MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO, CLASSIFICADOS POR QUARTIS

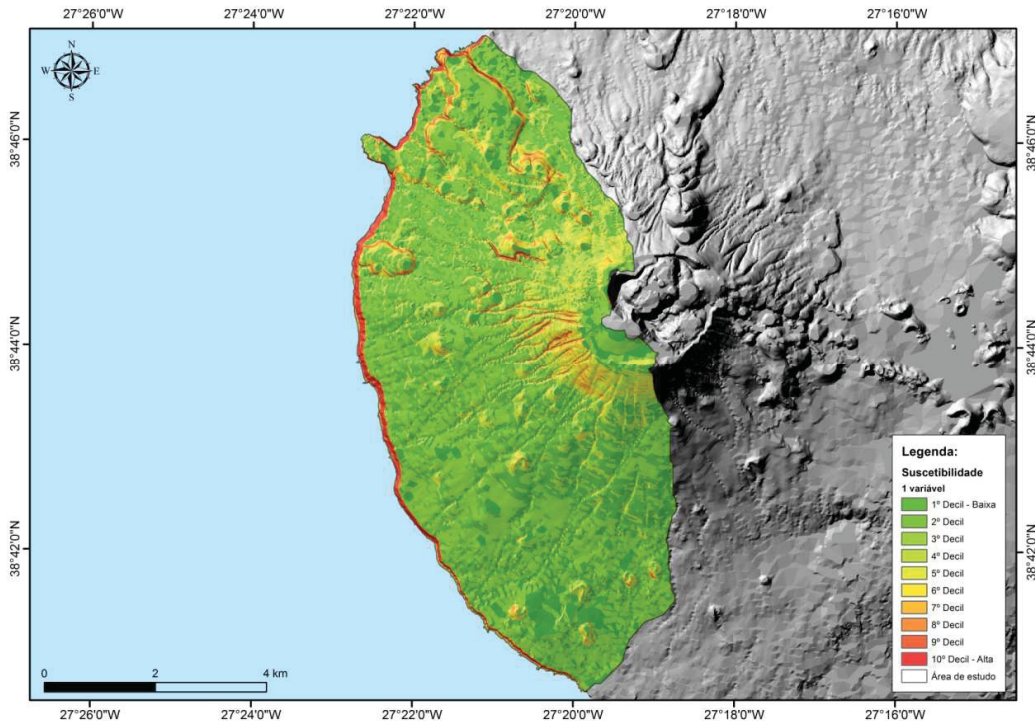


Figura AII-1 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta um fator de predisposição: DEC.

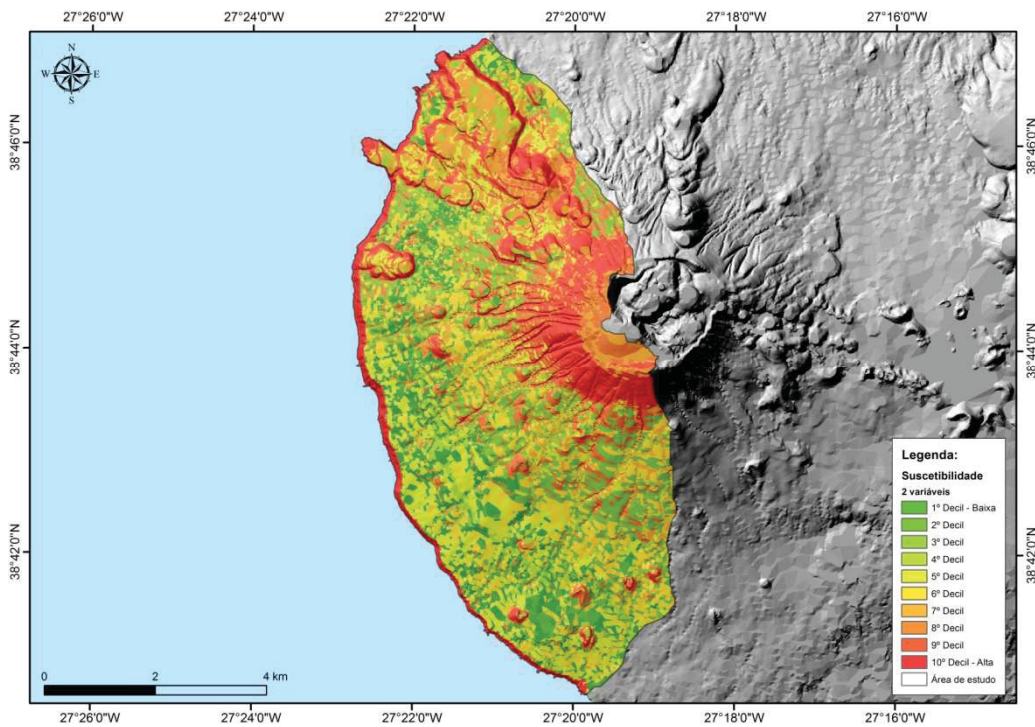


Figura AII-2 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta dois fatores de predisposição: DEC e USO.

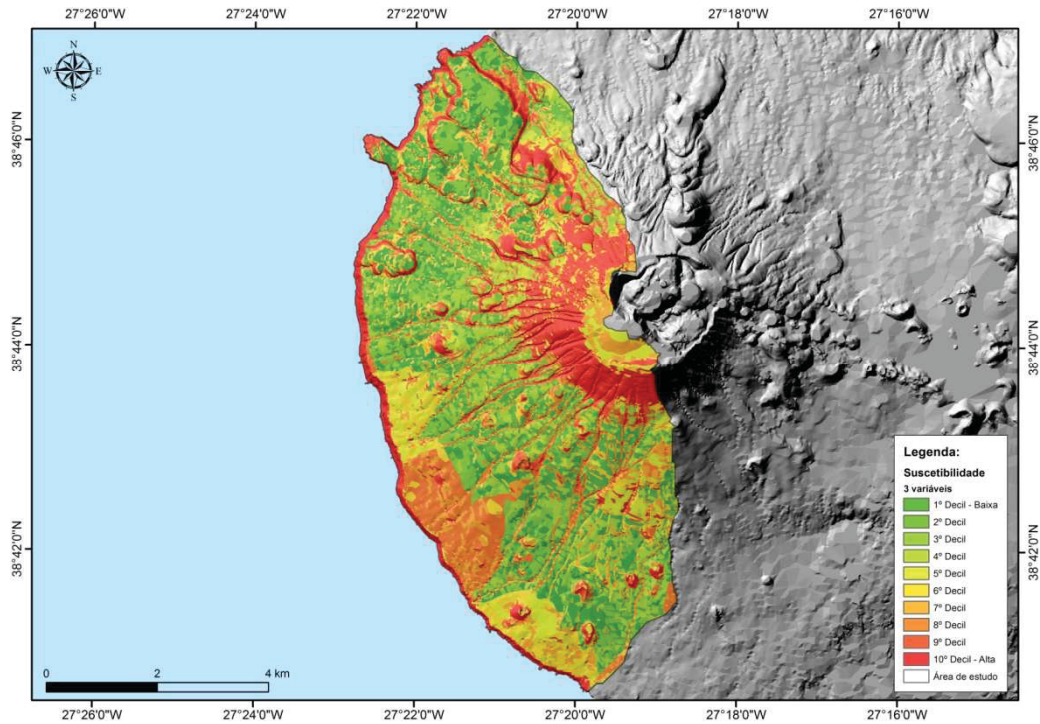


Figura AII-3 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta três fatores de predisposição: DEC, USO e GEO.

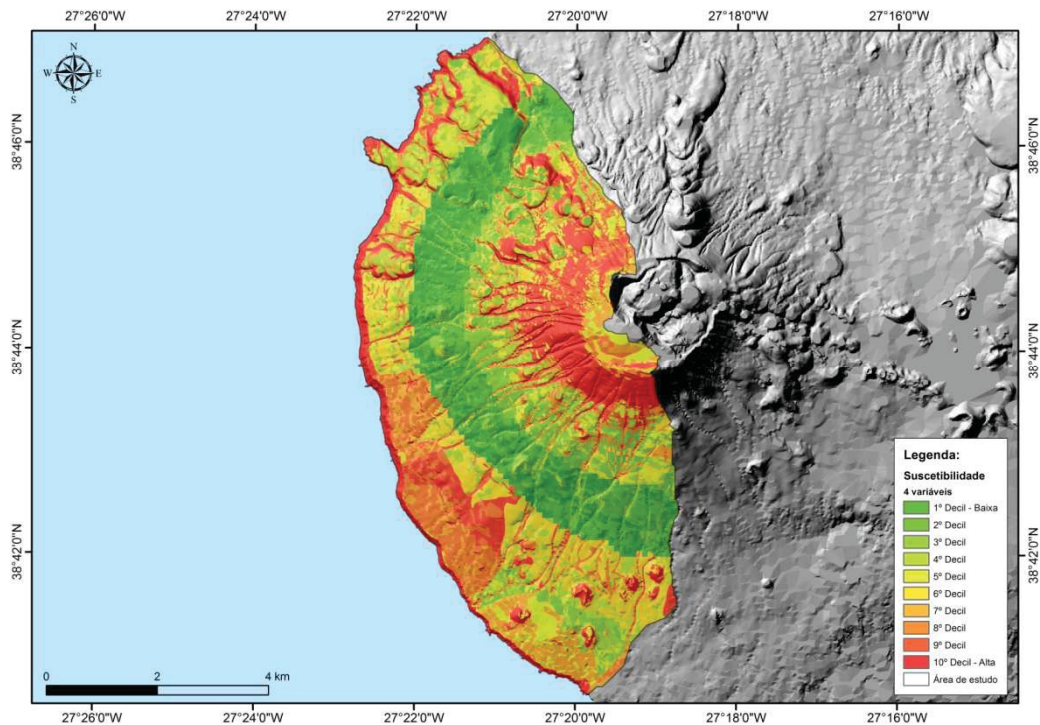


Figura AII-4 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta quatro fatores de predisposição: DEC, USO, GEO e PAA.

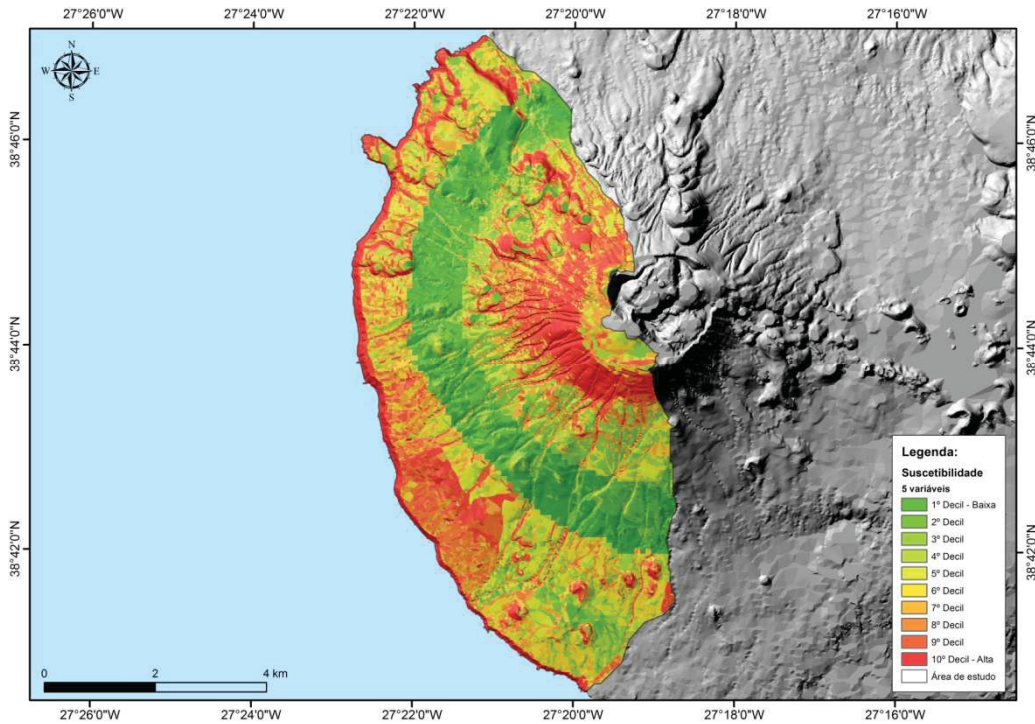


Figura AII-5 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta cinco fatores de predisposição: DEC, USO, GEO, PAA e EXP.

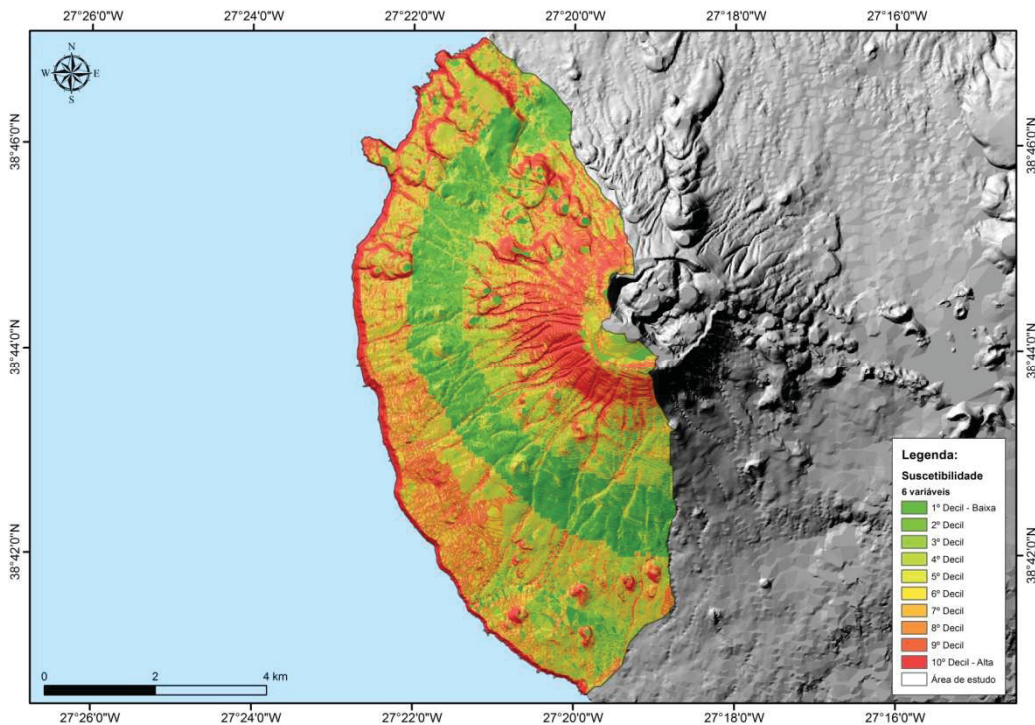


Figura AII-6 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta seis fatores de predisposição: DEC, USO, GEO, PAA, EXP e PLV.

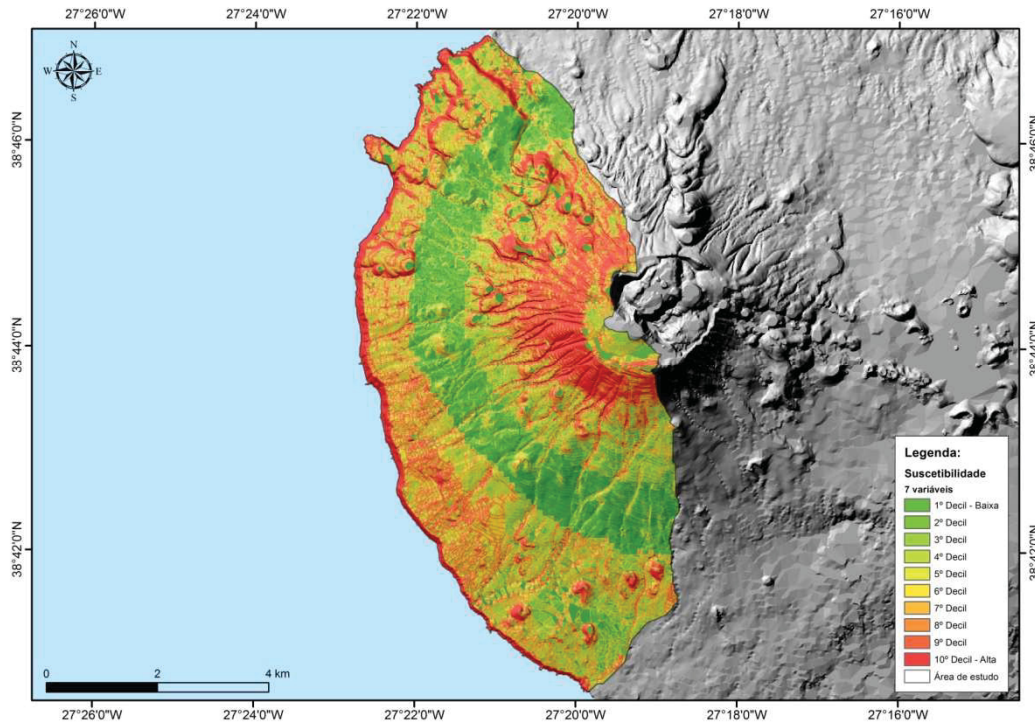


Figura AII-7 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta sete fatores de predisposição: DEC, USO, GEO, PAA, EXP, PLV e IWI.

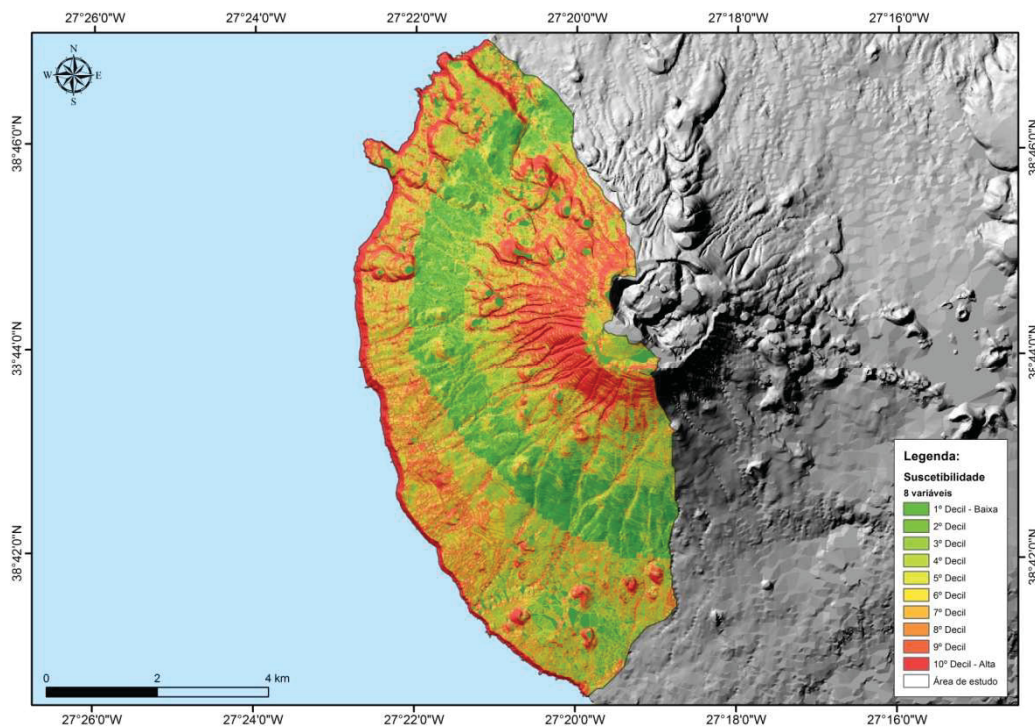


Figura AII-8 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta oito fatores de predisposição: DEC, USO, GEO, PAA, EXP, PLV, IWI e PTV.

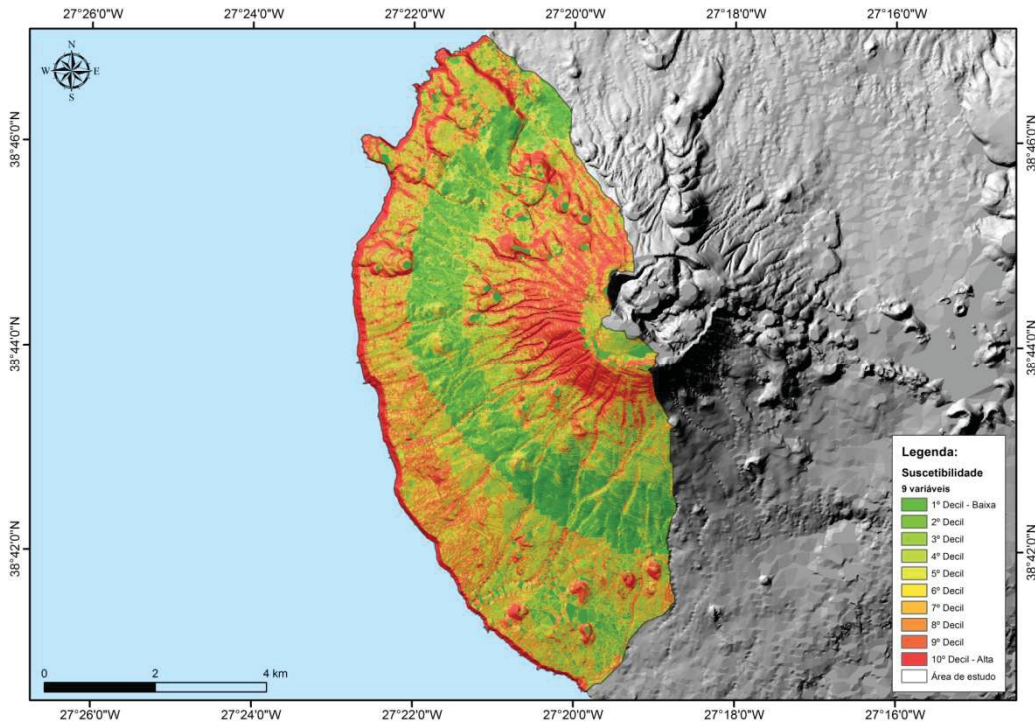


Figura AII-9 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta nove fatores de predisposição: DEC, USO, GEO, PAA, EXP, PLV, IWI, PTV e DCA.

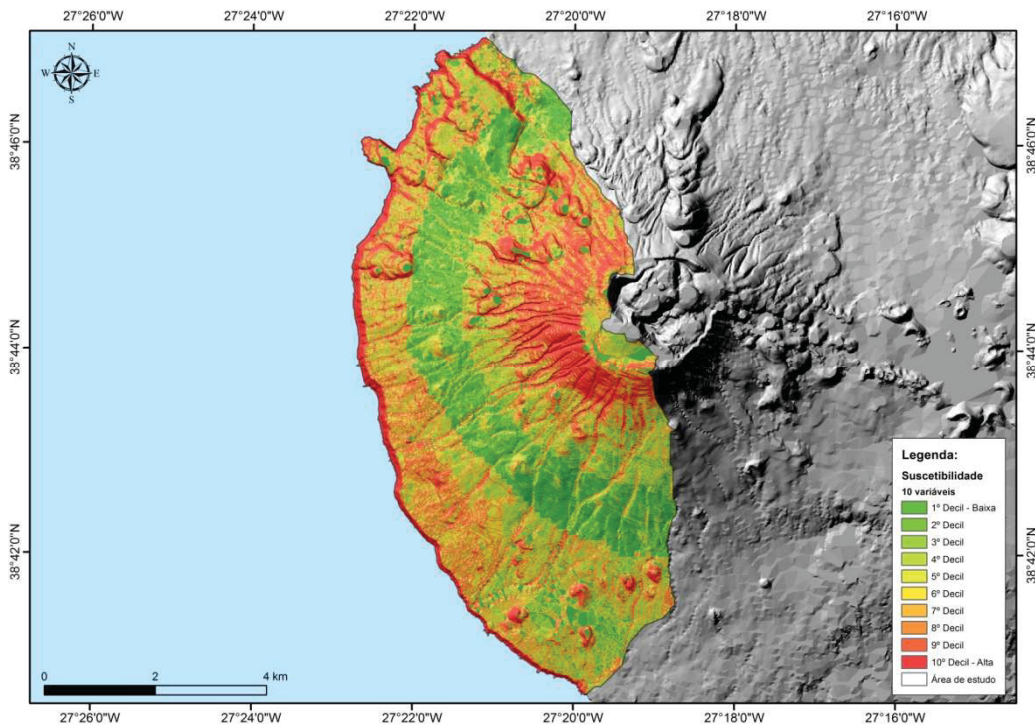


Figura AII-10 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta dez fatores de predisposição: DEC, USO, GEO, PAA, EXP, PLV, IWI, PTV, DCA e ACT.

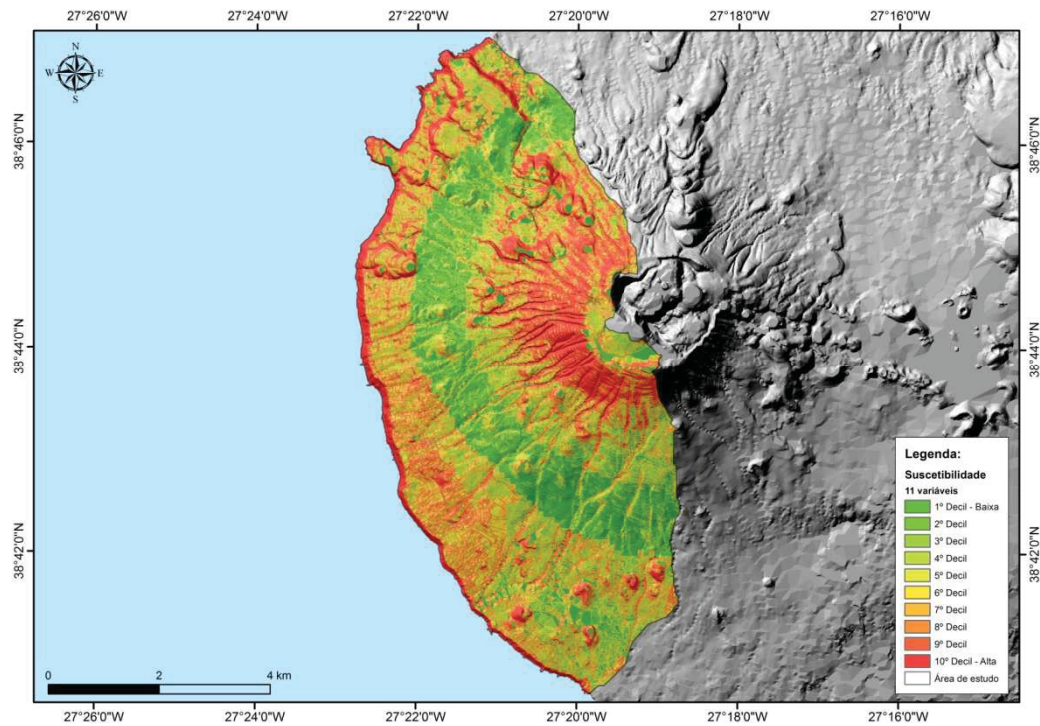


Figura AII-11 - Mapa de suscetibilidade produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, tendo em conta onze fatores de predisposição: DEC, USO, GEO, PAA, EXP, PLV, IWI, PTV, DCA, ACT e DDR.

ANEXO III

MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE RESULTANTES DA MODELAÇÃO REALIZADA PARA DOIS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS (RCP 4.5 E RCP 8.5), TENDO EM CONTA OS HORIZONTES TEMPORAIS DE 2039, 2069 E 2099, COM BASE NO MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO UTILIZA, UTILIZANDO ONZE FATORES DE PREDISPOSIÇÃO.

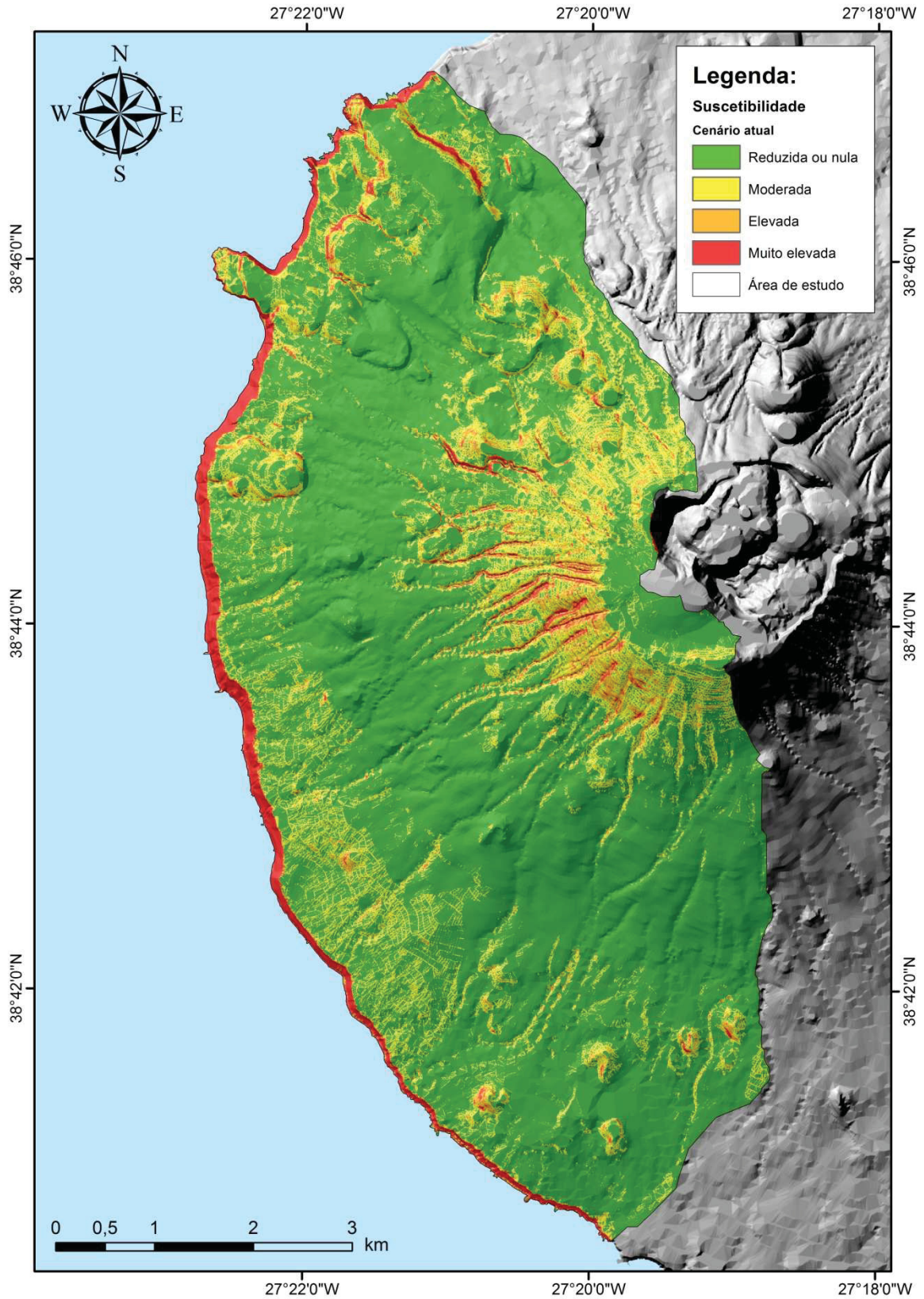


Figura AIII-1 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, com onze fatores de predisposição, tendo em conta a situação atual.

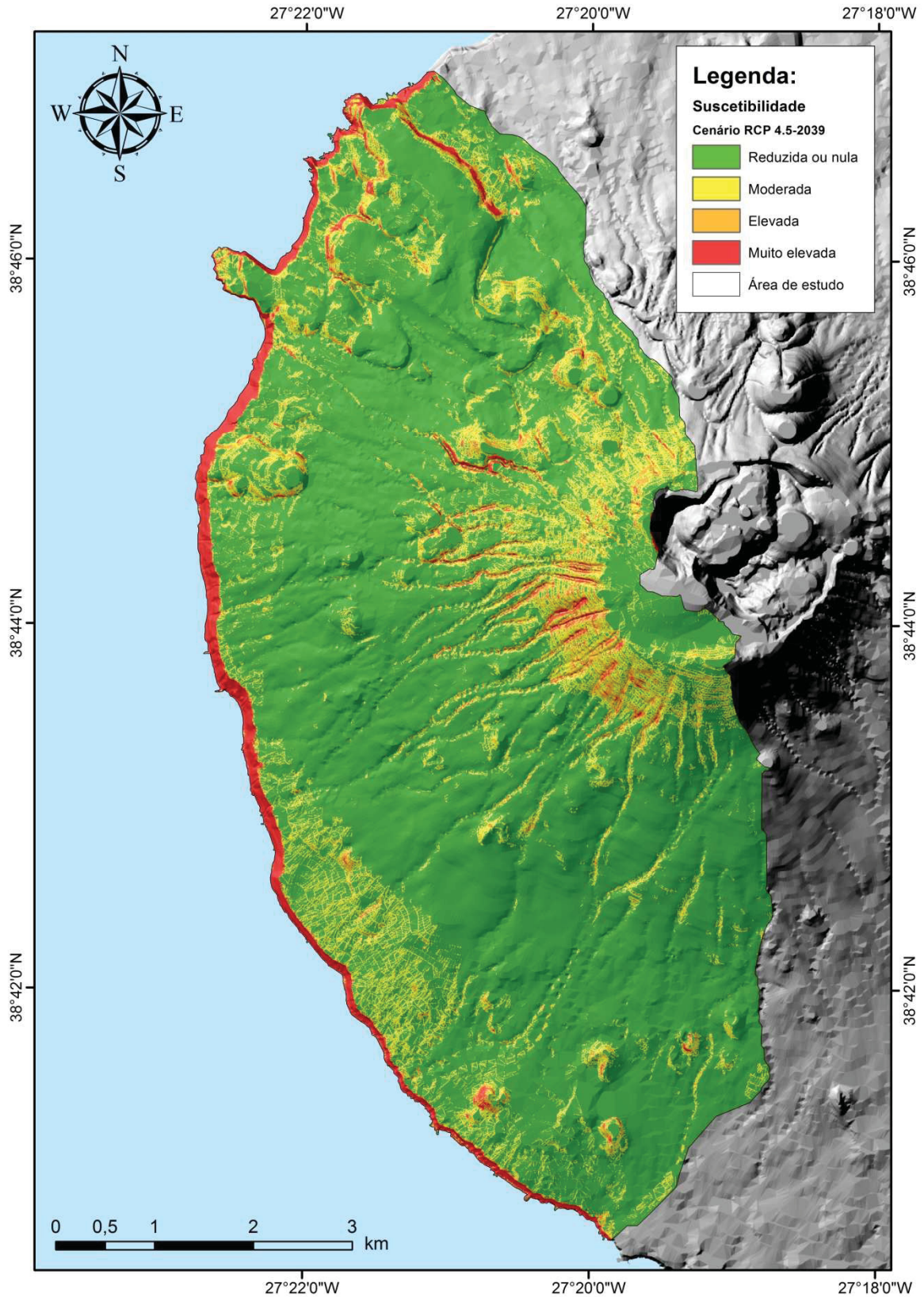


Figura AIII-2 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, com onze fatores de predisposição, tendo em conta o cenário RCP 4.5 para o horizonte temporal de 2039.

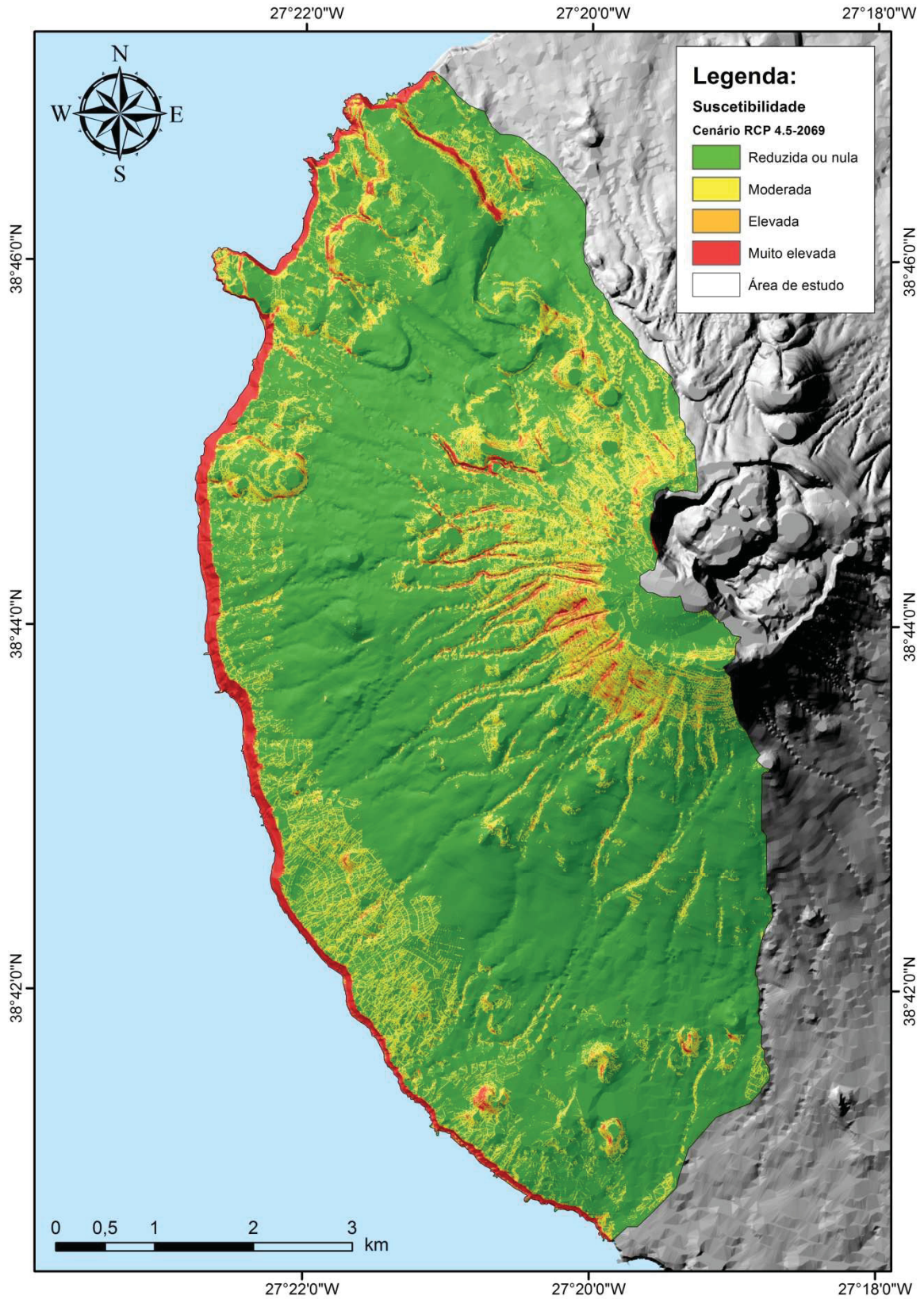


Figura AIII-3 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, com onze fatores de predisposição, tendo em conta o cenário RCP 4.5 para o horizonte temporal de 2069.

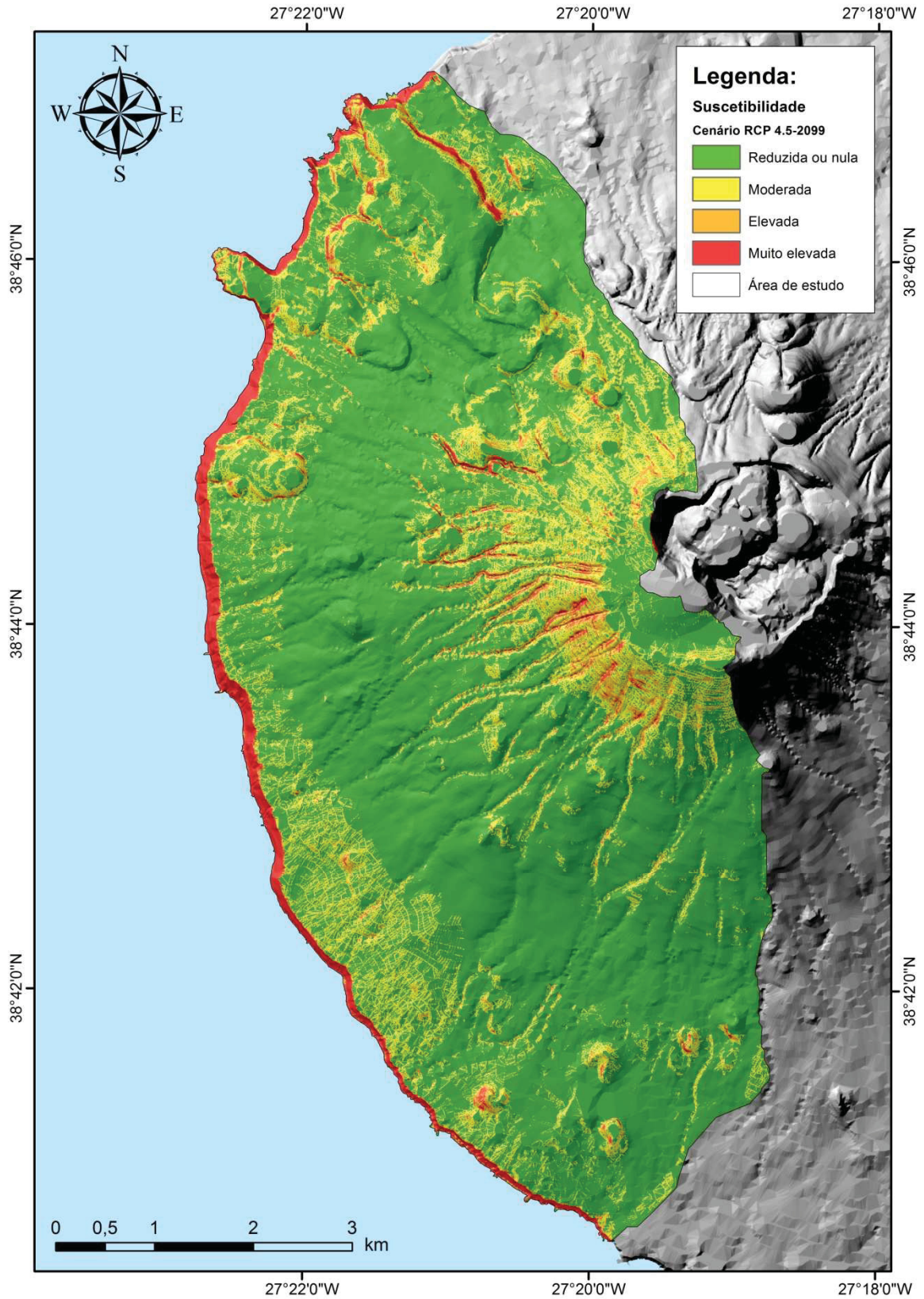


Figura AIII-4 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, com onze fatores de predisposição, tendo em conta o cenário RCP 4.5 para o horizonte temporal de 2099.

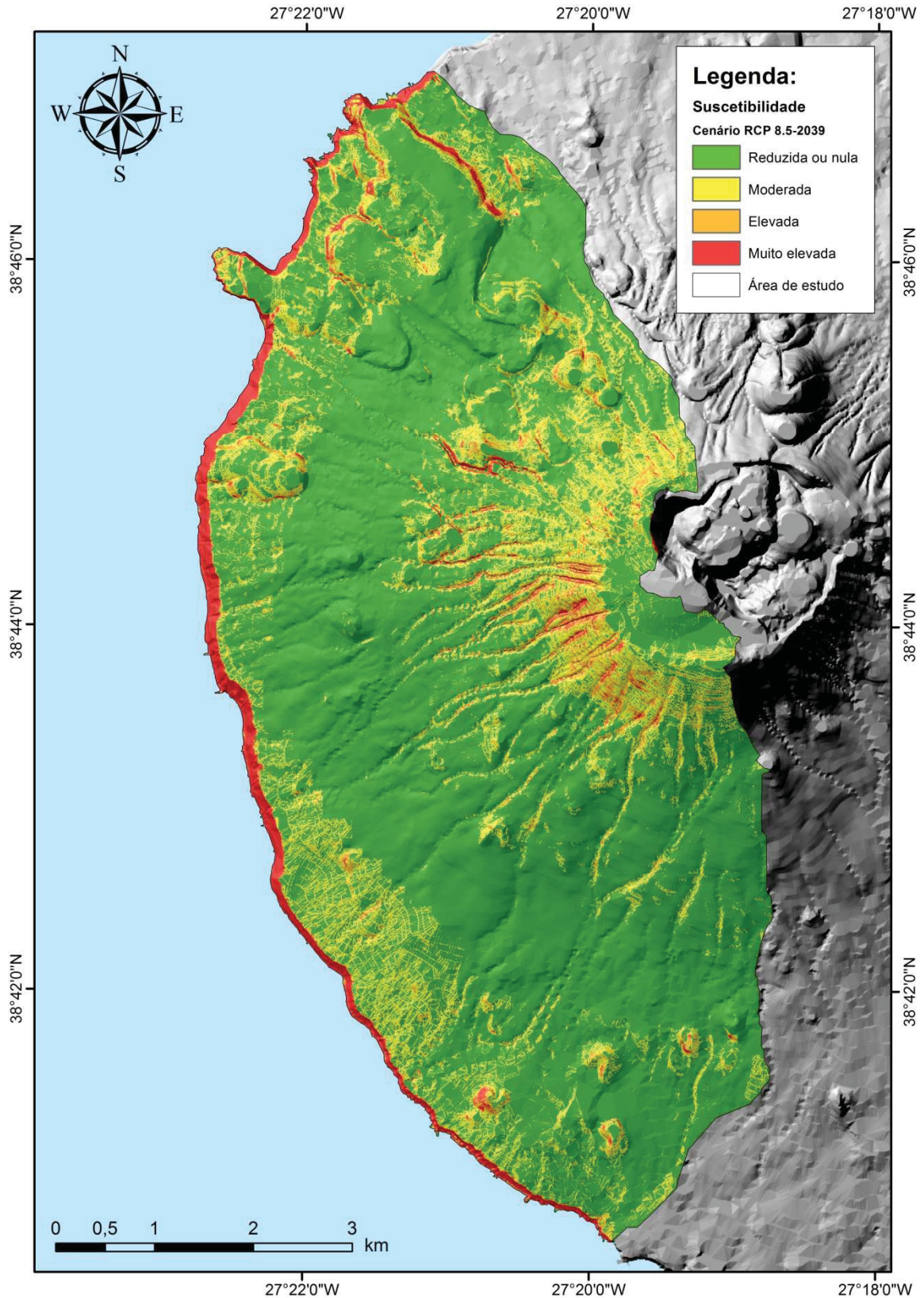


Figura AIII-5 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, com onze fatores de predisposição, tendo em conta o cenário RCP 8.5 para o horizonte temporal de 2039.

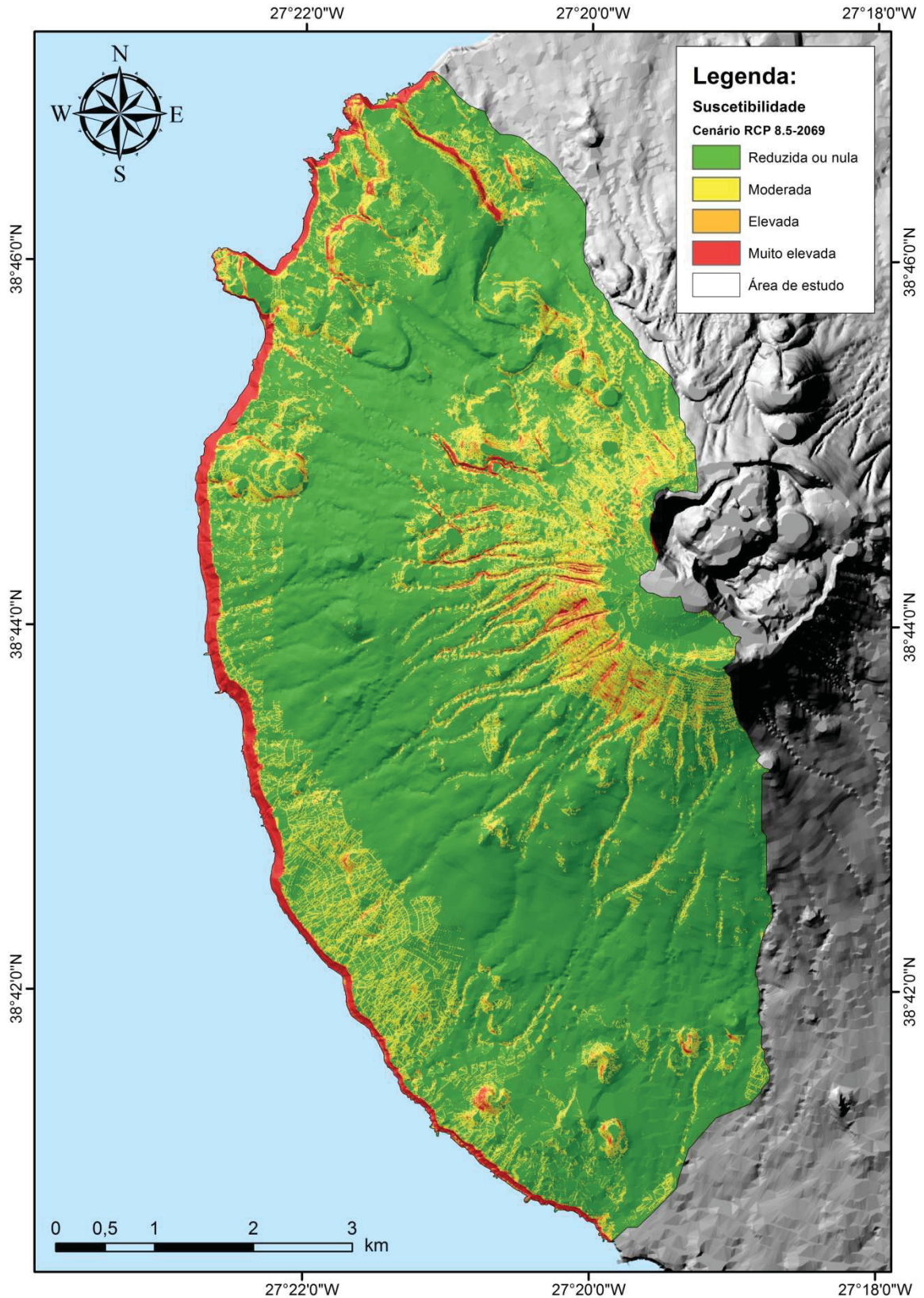


Figura AIII-6 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, com onze fatores de predisposição, tendo em conta o cenário RCP 8.5 para o horizonte temporal de 2069.

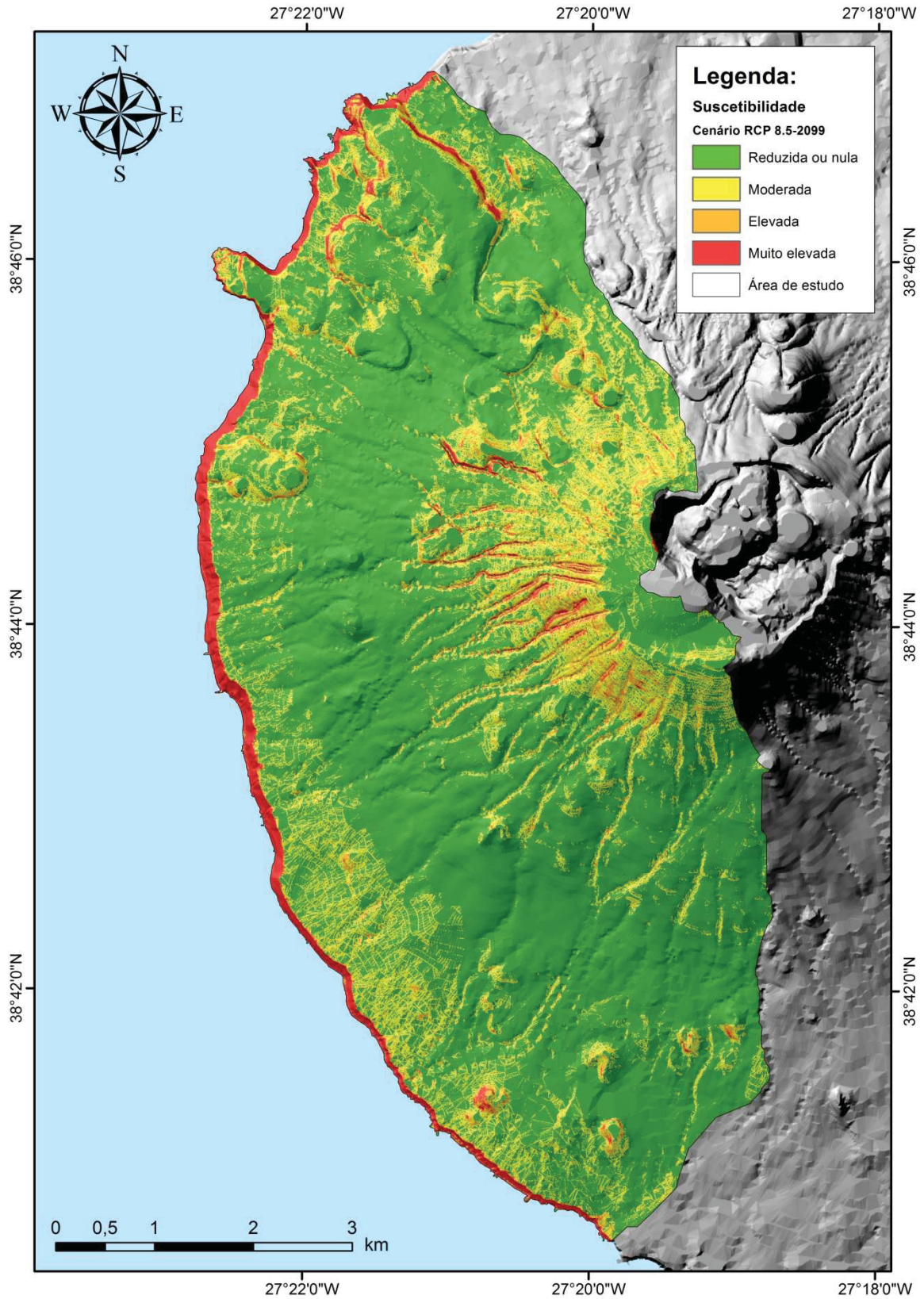


Figura AIII-7 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de vertente produzido para a área de estudo, com base no Método do Valor Informativo, com onze fatores de predisposição, tendo em conta o cenário RCP 8.5 para o horizonte temporal de 2099.

ANEXO IV

**MAPA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE DA
ZONA OESTE DA ILHA TERCEIRA**

27°22'0"W

27°20'0"W

27°18'0"W



Legenda:

- Área de estudo
- Lagoas
- Edificado
- Estradas principais
- Estradas secundárias
- Cursos de Água

Suscetibilidade

- Reduzida ou nula
- Moderada
- Elevada
- Muito elevada

38°46'0"N

38°46'0"N

38°44'0"N

38°44'0"N

38°42'0"N

38°42'0"N



Miguel, A. (2016) - Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na zona Oeste da ilha Terceira.
 Tese de doutoramento em Gestão Interdisciplinar da Paisagem. Departamento de Ciências Agrárias. Universidade dos Açores.
 Mapa apresentado com coordenadas no sistema UTM, datum WGS84, Zona 26N.

27°22'0"W

27°20'0"W

27°18'0"W