INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

UNIVERSIDADE da MADEIRA

lrec laboratório regional de engenharia civil, IP-RAM

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE ALUVIÕES NA ILHA DA MADEIRA

Relatório Base

(Versão 01)

Dezembro de 2010

ÍNDICE

TEXTO

ÍNDICE i

TEXTO i

FIGURAS v

QUADROS xi

FICHA TÉCNICA xiv

AGRADECIMENTOS xvii

APRESENTAÇÃO 1

1 INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO GERAL 3

1.1 OBJECTIVOS E ÂMBITO DO ESTUDO 3

1.2 PRINCIPAIS ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS 4

2 ANTECEDENTES NA ILHA DA MADEIRA E COMPLEXIDADE DO FENÓMENO 7

2.1 ANTECEDENTES 7

2.2 COMPLEXIDADE DO FENÓMENO 9

3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA EM ESTUDO E DE ASPECTOS ASSOCIADOS AO FENÓMENO 13

3.1 INTRODUÇÃO 13

3.2 CARACTERIZAÇÃO BIOFÍSICA 15

3.2.1 Geologia 15

3.2.2 Solos 17

3.2.3 Hidrogeologia 19

3.2.4 Geomorfologia 20

3.2.5 Hidrografia 24

3.2.6 Caracterização da ocupação do solo do território das bacias 27

3.2.7 Vegetação 29

3.3 MONITORIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO 33

3.4 CARACTERIZAÇÃO DE PRECIPITAÇÕES INTENSAS 41

3.4.1 Introdução 41

3.4.2 Precipitações máximas anuais 42

3.4.3 Análise de tendências 43

3.4.4 Análise estatística e estimativas de precipitações máximas anuais em postos udométricos e em bacias hidrográficas 44

3.4.5 Comparação entre precipitações máximas anuais em bacias hidrográficas estimadas de modo distribuído e pelo método de Thiessen 48

3.4.6 Linhas de possibilidade udométrica 49

3.5 PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAL SÓLIDO 55

3.5.1 Introdução 55

3.5.2 Erosão distribuída 57

3.5.3 Movimentos de vertente 58

3.5.4 Fluxos mistos com carga sólida significativa 60

4 CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO DE 20/2/2010 63

4.1 INTRODUÇÃO 63

4.2 SITUAÇÃO METEOROLÓGICA 63

4.2.1 Breve enquadramento das condições gerais da circulação atmosférica no Atlântico Norte no Inverno de 2009/2010 63

4.2.2 O contexto sinóptico da tempestade 64

4.3 ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO 67

4.3.1 Precipitação acumulada de Outubro de 2009 a Fevereiro de 2010 67

4.3.2 Precipitação diária em 20 de Fevereiro de 2010 68

4.3.3 Evolução da precipitação ao longo do dia 20 de Fevereiro de 2010 70

4.3.4 Máximos de precipitação para intervalos subdiários 76

4.3.5 Grau de excepcionalidade do evento de precipitação de Fevereiro de 2010 82

4.4 ANÁLISE DOS ESCOAMENTOS LÍQUIDOS 85

4.5 EROSÃO DISTRIBUIDA 91

4.6 SUSCEPTIBILIDADE DAS VERTENTES À INSTABILIZAÇÃO 96

4.7 INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO 100

4.8 MOVIMENTOS DE VERTENTE 102

4.8.1 Introdução 102

4.8.2 Informação de base 102

4.8.3 Metodologia 104

4.8.4 Estimação dos volumes de sedimentos produzidos 107

4.8.5 Análise espacial da distribuição dos deslizamentos 121

4.9 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMETRICA 135

4.10 ESCOAMENTO SÓLIDO (ALUVIÕES) 140

4.10.1 Enquadramento 140

4.10.2 Identificação do tipo de aluviões e dados de base 143

4.10.3 Apresentação e discussão dos resultados da simulação do escoamento estratificado 147

4.11 Sintese dos resultados 150

5 AVALIAÇÃO DO RISCO E MEDIDAS DE PROTECÇÃO 151

5.1 ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL E PRESSUPOSTOS 151

5.2 CARACTERIZAÇÃO E APRECIAÇÃO DO RISCO POTENCIAL 152

5.3 MEDIDAS MITIGADORAS DO RISCO 154

6 PRINCIPIOS ORIENTADORES DE PROTECÇÃO CONTRA ALUVIÕES 159

I - Retenção de material sólido 159

II - Controlo do transporte de material sólido 162

III - Atenuação da vulnerabilidade das áreas expostas 164

IV - Controlo da exposição ao risco 169

V - Previsão e aviso – Sistema estruturado de previsão 171

VI - Formação e Informação ao público 174

7 CONCLUSÕES 175

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 177

FIGURAS

Figura 1 - Estrutura e Grupo pluridisciplinar responsável pelo estudo..... 4

Figura 2 - Localização das bacias hidrográficas objecto de estudo e da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos. 13

Figura 3 - Pormenor da localização das bacias hidrográficas objecto de estudo e da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos. 14

Figura 4 - Carta geológica da ilha da Madeira (LNEG, 2009)..... 15

Figura 5 - Carta de solos da Madeira para os concelhos em estudo (*adaptado de*: Ricardo *et al.*, 1992); em cima Ribeira Brava e em baixo Funchal. 18

Figura 6 - Área ocupada pelos diferentes tipos de solo nas duas zonas de estudo: Funchal e Ribeira Brava. 19

Figura 7 – Esquema hidrogeológico conceptual para a ilha da Madeira (Prada et al., 2005) 20

Figura 8 - Mapa hipsométrico da área em estudo 21

Figura 9 - Curvas hipsométricas das ribeiras em análise. 22

Figura 10 - Mapa de declives da área em estudo 23

Figura 11 - Histogramas de declives das ribeiras em análise. 23

Figura 12 - Redes de drenagem das bacias hidrográficas 25

Figura 13 - Perfis longitudinais das ribeiras em análise e da ribeira dos Socorridos. 26

Figura 14 - Distribuição da área por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal..... 27

Figura 15 - Distribuição da área por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava 28

Figura 16 - Distribuição da área Florestal por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal..... 28

Figura 17 - Distribuição da área Florestal por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava 29

Figura 18 - Distribuição espacial das estações de monitorização existentes na Madeira. 40

Figura 19 - Pormenor da distribuição espacial das estações de monitorização na zona de estudo e áreas próximas. 41

Figura 20 - Definição esquemáticas das bacias e sub bacias para as quais foram obtidas séries de precipitações diárias. 42

Figura 21 - Posto do Areeiro. Representação esquemática das amostras de precipitações máximas anuais em 1 e 2 dias (à esquerda), e das mesmas amostras expressas em termos adimensionais, mediante divisão pelas respectivas medias. 44

Figura 22 - Precipitações máximas anuais em 1 a 3 dias no posto do Areeiro. Ajuste das leis de Gumbel e Pearson III. 45

Figura 23 - Precipitações máximas anuais de 1 a 3 dias na bacia hidrográfica da Ribeira Brava..... 48

Figura 24 - Comparação entre precipitações máximas anuais com durações entre 1 h e 6 dias e com diferentes períodos de retorno estimadas com base, por um lado, no intervalo de aquisição de informação das 9:00 às 9:00 h e, por outro lado, em qualquer período com início à hora fixa. 50

Figura 25 - Períodos de retorno de 10 e de 1000 anos. Linhas de possibilidade udométrica com unidades e com precipitações adimensionais. 52

Figura 26 - Posto udométrico do Funchal-Observatório. Linhas de possibilidade udométrica para diferentes períodos de retorno (em cima à esquerda), com precipitações expressas em termos adimensionais (em cima à direita), e pormenor com inclusão dos pontos representativos das precipitações intensas em Santa Catarina/Aeroporto (em baixo ao centro). 53

Figura 27 - Tipos de movimentos de vertente: 1- Queda; 2- Tombamento; 3 – Escorregamento; 4– Expansão lateral; 5 – Fluxo (IGS, 1993)..... 60

Figura 28 - Evolução diária do índice da Oscilação do Atlântico Norte (http://www.cgd.ucar.edu)..... 64

Figura 29 - Aspectos da situação sinóptica do dia 20.02.2010 (0:00 UTC): a- altitudes da superfície isobárica de 500 hPa, reanálises-2) do National Center for Environmental Prediction (NCEP); b – campo de vento aos 300 hPA, reanálises-2 NCEP; c - Pressão ao

nível médio do mar, reanálises-2 NCEP d – carta sinóptica de superfície. Fontes: http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/ e http://archive.atmos.colostate.edu 66

Figura 30 - Aspectos da evolução da estrutura vertical da atmosfera, no Funchal, entre os dias 19 e 20 de Fevereiro de 2010 (12:00 UTC): A – sondagens aerológicas; B – perfil vertical da razão de mistura (g/Kg); C – perfil vertical da temperatura potencial equivalente (˚K). A vermelho indicam-se as os valores das diferentes variáveis no dia 19.02.2010 e a azul os do dia 20.02.2010. 67

Figura 31 - Precipitação acumulada entre Outubro e Fevereiro em vários postos 68

Figura 32 - Distribuição da precipitação diária de 20 Fevereiro de 2010 na ilha da Madeira (0 – 0 horas) 70

Figura 33 - Precipitação horária a 20 de Fevereiro de 2010 (5h00-11h00). Hora UTC 72

Figura 34 - Precipitação horária a 20 de Fevereiro de 2010 (11h00 – 17h00). Hora UTC 73

Figura 35 - Intensidade máxima de precipitação em função da duração para várias zonas de ilha. 79

Figura 36 - Precipitação máxima acumulada em 10 minutos no dia 20 de Fevereiro. 80

Figura 37 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 30 minutos, no dia 20 de Fevereiro 80

Figura 38 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 1 hora, no dia 20 de Fevereiro. 81

Figura 39 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 3 horas, no dia 20 de Fevereiro. 81

Figura 40 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 6 horas, no dia 20 de Fevereiro. 82

Figura 41 - Localização e identificação das secções analisadas no presente estudo. 86

Figura 42 - Hietograma da precipitação (Wischemeier) para o dia 20 de Fevereiro 92

Figura 43 - Erosividade da precipitação (Wischemeier) para o dia 20 de Fevereiro 93

Figura 44 - Evolução em profundidade da pressão intersticial em alguns dias relevantes para solos menos permeáveis (Caso 1) (valores positivos: pressão intersticial; valores negativos: sucção) 99

Figura 45 - Evolução em profundidade da pressão intersticial em alguns dias relevantes para solos muito permeáveis (Caso 2) (valores positivos: pressão intersticial; valores negativos: sucção). 99

Figura 46: Imagem obtida pelo satélite Geoeye-1, no dia 28 de Fevereiro de 2010. 105

Figura 47 - Esquema da metodologia utilizada para efectuar a cartografia dos deslizamentos e estimação das respectivas áreas e volumes. 106

Figura 48 – Cartografia dos deslizamentos identificados numa zona do Funchal (Exemplo). 108

Figura 49 - Histograma da espessura média dos deslizamentos levantados (Funchal) 109

Figura 50 - Histograma da espessura média dos deslizamentos levantados (Ribeira Brava) ... 109

Figura 51 - Vista da Baía do Funchal obtida a partir do satélite Geoeye-1, no dia 23 de Fevereiro de 2010. 111

Figura 52 – Áreas de deslizamentos por sub-bacia do Funchal (classes 1 e 3) 112

Figura 53 - Áreas de deslizamentos por sub-bacia do Funchal (classes 1, 2 e 3) 113

Figura 54 - Áreas de deslizamentos por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1 e 3) 117

Figura 55 - Áreas de deslizamentos por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1, 2 e3) 118

Figura 56 – Distribuição da área de deslizamentos por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal 121

Figura 57 – Distribuição da área e número de deslizamentos por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava 122

Figura 58 – Proporção de área de cada classe de ocupação (COS2007, nível1) afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal 122

Figura 59 – Proporção de área de cada classe de ocupação (COS2007, nível1) afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava 123

Figura 60 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por proporção de área afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal..... 124

Figura 61 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por proporção de área afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava 124

Figura 62 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal 125

Figura 63 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava..... 125

Figura 64 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes com cicatrizes superiores a 80 m^2 nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal 126

Figura 65 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes com cicatrizes superiores a 80 m^2 nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava. 126

Figura 66 – Distribuição das áreas por classe de declive nas bacias hidrográficas..... 127

Figura 67 – Distribuição das áreas por classe de declive nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal. 128

Figura 68 – Distribuição das áreas por classe de declive nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava. 128

Figura 69 – Mapa da rede viária e deslizamentos nas Bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal 129

Figura 70 – Proporção em área e número de deslizamentos na envolvente da rede viária nas Bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal 130

Figura 71 – Mapa da rede viária e deslizamentos nas Bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava 130

Figura 72 – Proporção em área e número de deslizamentos na envolvente da rede viária nas Bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava 131

Figura 73 - Mapa dos tipos de solo e de deslizamentos nas bacias hidrográficas da Ribeira Brava 132

Figura 74 - Mapa dos tipos de solo e de deslizamentos nas bacias hidrográficas do Funchal 132

Figura 75 – Área total das cicatrizes de deslizamento por tipo de solo para as bacias hidrográficas dos concelhos do Funchal e da Ribeira Brava. 133

Figura 76 – Razão entre a área de cicatrizes de deslizamentos e as áreas do tipo de solo para a região do Funchal e da Ribeira Brava. 133

Figura 77 – Nº de horas com precipitação superior a 10mm. 134

Figura 78 – Nº de horas com precipitação superior a 30mm. 135

Figura 79 - Localização dos troços onde foram realizadas medições de granulometria. 137

Figura 80 - Aspecto geral dos materiais depositados no leito da ribeira de São João/Santo António. Medição de blocos de basalto que ocupam a parte superior do leito (esquerda). Depósito de cascalho e areia, constituindo um nível de referência na parte superior do leito – escala 1 metro (direita). 138

Figura 81 - Parâmetros geométricos de blocos (> ≈1 m de comprimento) não remexidos, depositados em segmentos dos leitos das ribeiras de São João, Santa Luzia e ribeira Brava/Pico. 139

Figura 82 - Tipos de aluviões susceptíveis de serem modelados. Esquerda: *sheet-flow* (escoamento estratificado); direita: *debris-flow* (escoamento de frente abrupta). O transporte selectivo e a segregação vertical, registada no *debris-flow*, são fenómenos não susceptíveis de serem simulados com o modelo utilizado. 143

Figura 83 - Caudais estimados pelo modelo hidrológico (pontos) e caudais usados na simulação numérica (linhas). 144

Figura 84 - Resultados da simulação de um escoamento de detritos plenamente desenvolvido ao longo da ribeira de São João. Coluna esquerda: caudais; coluna direita: profundidades. Resultados entre t = 0 min e t = 16,6 min com intervalos de 8,3 min. 146

Figura 85 - Variação das cotas do fundo (t = 90 min). 147

Figura 86 - Exemplos de secções em que ocorre diminuição da largura da ribeira. 148

Figura 87 - Alturas do escoamento (t = 60 min). 149

QUADROS

Quadro 1 - Síntese histórica das principais aluviões da ilha da Madeira. 8

Quadro 2 - Dados gerais sobre as bacias hidrográficas objecto de estudo. 14

Quadro 3 – Unidades geológicas de origem vulcânica presentes na área em estudo. 16

Quadro 4 - Comprimento das redes hidrográficas em análise. 26

Quadro 5 – Declives das ribeiras em análise e da ribeira dos Socorridos (%) 27

Quadro 6 - Estações de monitorização existentes na Ilha da Madeira..... 35

Quadro 7 - Estimativas das precipitações máximas anuais com diferentes durações entre 1 e 6 dias e períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos, em oito dos postos udométricos analisados. 46

Quadro 8 - Posto udométrico Funchal - Observatório. Estimativas das precipitações máximas anuais com durações entre 10 e 30 minutos e períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos. 46

Quadro 9 - Posto udométrico Funchal - Observatório. Estimativas das precipitações máximas anuais com durações entre 1 e 18 horas e períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos. 47

Quadro 10 - Estimativas das precipitações máximas anuais diferentes durações e períodos de retorno. Comparação com os resultados decorrentes da aplicação do método de Thiessen a quarto bacias hidrográficas. 49

Na tentativa de “verter” o estudo efectuado numa recomendação de cálculo de precipitações intensas a fazer intervir na análise de cheias em bacias hidrográficas da Ilha da Madeira e até que se disponha de informação udométrica adicional que permita reformular/completar tal estudo, propõe-se que, para uma dada secção da rede hidrográfica onde se pretenda estimar caudais ou hidrogramas de cheia para um dado período de retorno, T: (i) se proceda à identificação dos postos udométricos com influência em tal bacia; (ii) com base na análise estatística aplicada às amostras de precipitações máximas anuais com a duração de 24 h, registadas no período das 9:00 às 9:00 h, disponíveis nesses postos, se estime a precipitação na bacia hidrográfica com o

período de retorno T e com a duração de 24 h; (iii) e que se "reparta" essa precipitação para a duração pretendida mediante utilização dos coeficientes de repartição obtidos para o posto do Funchal-Observatório que, para o efeito, são sistematizados no Quadro 11, a par com as precipitações que lhes deram origem. A análise de cheias deverá compreender ainda uma análise de sensibilidade que pondere, por um lado, a majoração da precipitação assim obtida por aplicação dos resultados da Figura 24, e, por um lado, o cálculo de tal precipitação baseado em Faria; Godinho, 1983. 54

Quadro 12 – Posto do Funchal-Observatório. Quocientes entre precipitações máximas anuais com durações inferiores a 24 h (no numerador) e de 24 h (no denominador) para diferentes períodos de retorno. 55

Quadro 13 - Características da precipitação (mm) no mês de Fevereiro de 2010 68

Quadro 14 - Características da precipitação horária a 20 Fevereiro de 2010 74

Quadro 15 - Valores de precipitação em 10 min 76

Quadro 16 - Máximos de precipitação para intervalos subdiários 78

Quadro 17 - Análise da excepcionalidade das precipitações com durações de 24, 48, 72, 96, 120 e 144 horas, finalizando às 9:00 h do dia 21 de Fevereiro de 2010. 84

Quadro 18 - Funchal – Observatório. Excepcionalidade do acontecimento pluvioso de 20 de Fevereiro. 84

Quadro 19 - Estimativa do tempo de concentração (horas) para as diferentes bacias hidrográficas 85

Quadro 20 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções de João Gomes. 88

Quadro 21 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da RIbeira de Santa Luzia 88

Quadro 22 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da Ribeira de São João 89

Quadro 23 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da Ribeira Brava 90

Quadro 24 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da Ribeira da Tabua 91

Quadro 25 – Classificação pericial dos polígonos das cicatrizes das bacias do Funchal 106

Quadro 26 - Estimativa das áreas ocultas por nuvens e sombras nas imagens Geoeye utilizadas na classificação 107

Quadro 27 - Resultados da validação quantitativa do conjunto das bacias do Funchal 108

Quadro 28 - Resultados da validação quantitativa do conjunto das bacias da Ribeira Brava 109

Quadro 29 – Volumes produzidos nas bacias do Funchal 110

Quadro 30 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia do Funchal (classes 1-3) 114

Quadro 31 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia do Funchal (classes 1, 2 e 3) 115

Quadro 32: Volumes produzidos nas bacias da Ribeira Brava 116

Quadro 33 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1-3) 119

Quadro 34 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1, 2 e3) 120

Quadro 35 - Fracções granulométricas dos depósitos de cobertura 136

Quadro 36 - Volumes de material sólido resultantes de episódios de instabilização das camadas superficiais das encostas. 145

Quadro 37 – Sintese das estimativas de volumes de material sólido 150

FICHA TÉCNICA

Coordenação	António Betâmio de Almeida (IST)
	Rodrigo Proença de Oliveira (IST)
	Paulo França (UMa) e Domingos Rodrigues (UMa)
	Daniel Figueira da Silva (LREC-IPRAM)
Climatologia	Sérgio da Silva Lopes (LREC-IPRAM)
	Carlos Magro (LREC-IPRAM)
	António Lopes (IGOT/LREC-IPRAM)
	Marcelo Fragoso (IGOT/LREC-IPRAM)
	Maria João Alcoforado (IGOT/LREC-IPRAM)
Hidrologia	Manuela Portela (IST)
	Rodrigo Proença de Oliveira (IST)
	Sérgio da Silva Lopes (LREC-IPRAM)
	Gonçalo Saint-Maurice (Bolseiro de Investigação do IST)
	Artur Silva (Bolseiro de Investigação do IST)
Hidráulica	António Heleno Cardoso (IST)
	Rui Ferreira (IST)
	Gaspar Teixeira de Queirós (Bolseiro de Investigação do IST)
Hidráulica sedimentológica	Miguel Azevedo Coutinho (IST)
Geomática	António Jorge de Sousa (IST)
	Sandra Heleno (IST)
	Alexandre Gonçalves (IST)
	Ana Paula Falcão (IST)
	Maria João Pereira (IST)
	Pedro Pina (IST)
	Cristina Lira (Bolseira de Investigação do IST)
	Magda Matias (Bolseira de Investigação do IST)
	Maura Lousada (Bolseira de Investigação do IST)
Geologia	Jaime Alberto dos Santos (IST)
	Isabel Lopes (IST)
	Manuel Francisco Pereira (IST)
	Amélia Dionísio (IST)
	Domingos Rodrigues (UMa)
	Uriel Abreu (UMa)
Geotecnia	Jaime Alberto dos Santos (IST)
	Rafaela Cardoso (IST)
	Fernando Vieira (LREC-IPRAM)
Ambiente e coberto vegetal	Miguel Sequeira (UMa)
	José Jesus (UMa)
	Aida Pupo Correira (UMa)
	Albano Figueiredo (UMa)
Estruturas	Paulo França (UMa)
	João Azevedo (IST)

Trabalho de campo	Paulo França (UMa)
	Susana Prada (UMa)
	Joana André Reis (UMa)
	Ana Vanessa Spínola (Aluna do Mestrado em Engenharia Civil, UMa)
	Celso Figueira (Bolseiro de Investigação da UMA)
	Nuno Aguiar (Bolseiro de Investigação da UMA)
	Hugo Teixeira (Aluno do Mestrado em Engenharia Civil, UMa)
	João Castro (Aluno do Mestrado em Engenharia Civil, UMa)
	Dário Fernandes (Aluno do Mestrado em Engenharia Civil, UMa)
Sistemas de informação	Alexandre Gonçalves (IST)
	Sérgio da Silva Lopes (LREC)
	Maria João Neves (DRIGOT)

AGRADECIMENTOS

O Instituto Superior Técnico, a Universidade da Madeira e o Laboratório Regional de Engenharia Civil da Região Autónoma (RAM), agradecem ao Secretário Regional do Equipamento Social da RAM a confiança depositada na equipa constituida no âmbito de um Protocolo de colaboração científica para o estudo das enxurradas que ocorreram no dia 20 de Fevereiro de 2010 e os princípios gerais orientadores para protecção futura contra este tipo de fenómeno.

Em nome da Equipa Técnica, os responsáveis pela coordenação do estudo registam e agradecem a colaboração e o apoio que receberam de diversos organismos regionais e nacionais, bem como a colaboração de membros da sociedade civil que contribuíram com sugestões e informações. Esta colaboração foi fundamental para a prossecução dos objectivos gerais do trabalho, em prol de uma maior segurança, para pessoas e bens, no que concerne os efeitos do fenómeno natural em causa.

Regista-se, em particular, a colaboração da Investimentos e Gestão da Água, SA (IGA), nomeadamente à Engª Nélia Sousa e à Engª Madalena Fugaréu, o apoio prestado na compilação e verificação dos dados de precipitação provenientes dos seus postos de monitorização.

Agradece-se também à Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais, à Direcção Regional de Florestas, à Estradas da Madeira SA, à Câmara Municipal do Funchal, à Câmara Municipal do da Ribeira Brava, ao Investimentos Habitacionais da Madeira EPE, à Associação Comercial e Industrial do Funchal e ao Serviço Regional de Protecção Civil o apoio dado e os elementos disponibilizados.

O trabalho da Direcção Regional de Informação Geográfica e Ordenamento do Território (DRIGOT) e o empenho da respectiva Directora Dra. Maria João Neves, na obtenção e fornecimento de informação geográfica, foram fundamentais para a realização deste estudo e merecedores de um agradecimento muito especial.

É também devido um reconhecimento especial ao Instituto de Meteorologia pela disponibilização do registo histórico do posto udográfico do Funchal. Em particular, agradece-se ao Dr. Vitor Prior, Delegado Regional da Madeira, a sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas sobre os dados.

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE ALUVIÕES NA ILHA DA MADEIRA

APRESENTAÇÃO

O Instituto Superior Técnico, a Universidade da Madeira e o Laboratório Regional de Engenharia Civil apresentam o "Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões", elaborado para a Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, na sequência do evento de 20 de Fevereiro de 2010.

O Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões é composto por um relatório base e por dez volumes de anexos. O relatório base sintetiza as principais conclusões do estudo e expõe uma proposta de princípios orientadores das intervenções de protecção contras as aluviões, elaborada com base na reflexão do Grupo de Estudo suscitada pela análise das características locais e do processo fenomenológico associado à ocorrência de aluviões na ilha da Madeira e, em particular, do referido evento de 20/2/2010. Os volumes de anexos complementam o relatório síntese com a apresentação pormenorizada dos resultados das análises técnicas das várias áreas científicas com interesse para o estudo.

A lista completa de volumes é a seguinte:

- Relatório Base;
- Anexo A – Caracterização das precipitações intensas;
- Anexo B – O papel do coberto vegetal;
- Anexo C – Cartografia dos deslizamentos;
- Anexo D – Caracterização geotécnica;
- Anexo E - Avaliação da erosão distribuída pela aplicação da Equação Universal de Perda de Solos;
- Anexo F – Escoamentos mistos ou bifásicos;
- Anexo G – Levantamento de dados de campo da ribeira João Gomes;
- Anexo H – Levantamento de dados de campo da ribeira de Santa Luzia;
- Anexo I – Levantamento de dados de campo da ribeira de São João;
- Anexo J – Levantamento de dados de campo da ribeira Brava;
- Anexo K – Levantamento de dados de campo da ribeira da Tabua;

Lisboa, 30 de Dezembro de 2010

Pela Equipa de Estudo

A Coordenação

António Betâmio de Almeida

Prof. Cat. Emérito (IST – UTL)

Rodrigo Proença de Oliveira

Prof. Auxiliar (IST – UTL)

1 INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO GERAL

1.1 OBJECTIVOS E ÂMBITO DO ESTUDO

De acordo com o Plano Regional de Água da Madeira (SRA/INAG, 2003), citando bibliografia histórica fundamentada, ocorreram desde o início do século XIX cerca de 30 aluviões[i] de intensidade significativa, constituídas por cheias rápidas e violentas com transporte de concentrações elevadas de material sólido. É de destacar a ocorrência de 1803, ano em que se verificaram inundações catastróficas em toda a ilha, particularmente na região do Funchal tendo perecido cerca de 1000 pessoas. Sucessivos eventos da mesma natureza mas com intensidades diversas têm ocorrido na zona do Funchal e em outras áreas da ilha da Madeira.

O evento grave mais recente ocorreu no dia 20 de Fevereiro de 2010 (20/02/2010) em que, na sequência de um prolongado período chuvoso na ilha da Madeira, uma situação meteorológica adversa provocou uma aluvião excepcional que atingiu, com elevada intensidade, alguns concelhos da vertente Sul da ilha, em particular os concelhos do Funchal e da Ribeira Brava. São de lamentar dezenas de vítimas mortais e alguns desaparecidos, bem como elevados danos materiais e a destruição de infra-estruturas. Em 22 de Dezembro de 2009 e em 2 de Fevereiro de 2010 tinham já ocorrido fenómenos semelhantes, mas com muito menores consequências, respectivamente nos concelhos de S. Vicente e de Santana (ribeira do Faial).

Neste quadro, a Secretaria Regional do Equipamento Social (SRES) estabeleceu um protocolo de cooperação académica, científica e técnica com o Instituto Superior Técnico (IST), a Universidade da Madeira (UMa) e o Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) no âmbito do qual foi constituído um Grupo de Estudo pluridisciplinar (Figura 1) para elaborar o "Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na ilha da Madeira", com o objectivo de avaliar e caracterizar os riscos associados a este tipo de cheias (aluviões), de estabelecer os princípios que devem orientar as intervenções para defesa contra os seus efeitos e de fornecer elementos que permitam justificar os investimentos a realizar na recuperação e na protecção, na sequência do evento de 20/02/2010. A equipa técnica contou com a colaboração de um grupo de alunos, enquadrados por docentes da UMa que desenvolveram trabalhos de campo. Esta actividade permitiu apoiar a elaboração de trabalhos académicos e proporcionar o

[i] Segundo o Dicionário da Academia de Ciências de Lisboa, este termo pode significar inundação muito grande, grande cheia ou enxurrada. Este significado está em vigor na ilha da Madeira. Na descrição das enxurradas de 9 de Outubro de 1803, Eduardo Pereira utiliza abundantemente o termo aluvião para designar o evento ("Ilhas de Zarco" – Vol.I, 1939)

contacto dos alunos com o fenómeno e o risco de aluviões. Regista-se ainda o contributo na análise do fenómeno meteorológico dos investigadores do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território (IGOT), que integraram o Grupo de Estudo de modo indirecto, através da relação de cooperação científica que o LREC mantém com esta instituição académica.

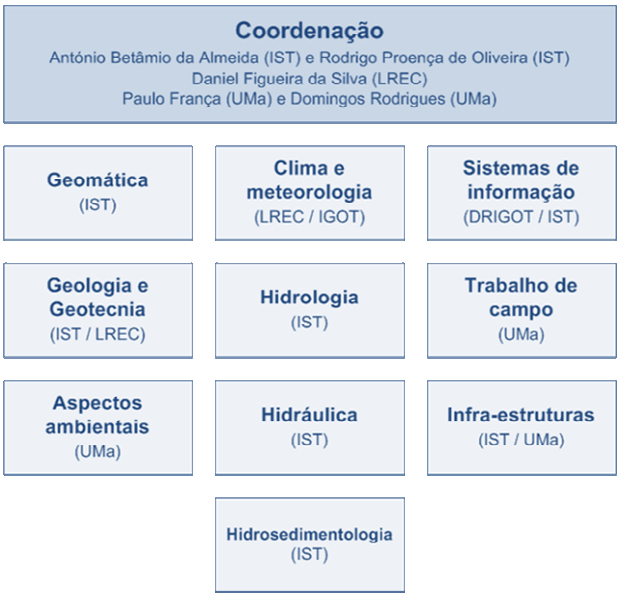

Figura 1 - Estrutura e Grupo pluridisciplinar responsável pelo estudo.

O Grupo de Estudo tem também a incumbência de transferir conhecimentos úteis para os consultores – projectistas que elaboram os projectos de execução de intervenções especiais no quadro de acções de defesa contra aluviões desencadeadas pela SRES.

O âmbito geográfico do estudo compreende a área abrangida pelas bacias hidrográficas mais afectadas pelo evento 20/2/2010, ou seja as bacias das ribeiras de João Gomes, Santa Luzia, São João, do concelho do Funchal e as ribeiras da Ribeira Brava e Tabua, do concelho da Ribeira Brava, não estando incluído o estudo do comportamento dos sistemas urbanos de drenagem pluvial e da estabilização de taludes nas zonas urbanas nomeadamente na cidade do Funchal. Alguns destes aspectos importantes são objecto de outras acções e estudos salientando-se, nomeadamente, os estudos sobre a segurança de encostas entretanto promovidos pela Câmara Municipal do Funchal.

1.2 PRINCIPAIS ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS

Os trabalhos de Grupo de Estudo decorram entre 1 de Maio e 31 de Outubro de 2010 e abrangeram um conjunto de actividades que podem ser agrupadas do seguinte modo:

- Recolha de dados e obtenção de elementos de base para análise, nomeadamente fotografias de satélite, fotografias aéreas e um modelo digital de terreno ([ii]) (todos obtidos após o evento 20/2/2010) e outros elementos úteis para o trabalho;
- Visitas e trabalhos de campo nas áreas das bacias hidrográficas consideradas no âmbito do estudo;
- Análise bibliográfica e contactos internacionais;
- Recolha de informação, junto de organismos regionais e nacionais e de sugestões por parte da sociedade civil;
- Análise sistemática dos elementos obtidos por detecção remota e dos dados udométricos para a caracterização dos movimentos de material sólidos e da precipitação;
- Preparação de modelos computacionais e de metodologias aproximadas de cálculo;
- Elaboração de sínteses interpretativas preliminares;
- Colaboração com as equipas de projectistas na procura de soluções possíveis e selecção de critérios de cálculo para intervenções de engenharia;
- Diálogo e harmonização de actividades promovidas por entidades que desenvolvem estudos e projectos de defesa contras as aluviões e as inundações, nomeadamente para a Secretaria Regional do Equipamento Social, Estradas da Madeira e Câmara Municipal do Funchal;
- Elaboração e apresentação pública dos princípios orientadores de defesa contra aluviões.

No âmbito das actividades referidas foram já elaborados os seguintes documentos:

- Plano Metodológico – Julho 2010.
- Princípios Orientadores de Protecção contra as Aluviões (versão preliminar) – Agosto 2010.
- Relatório final que inclui um conjunto anexos técnicos (em fase de conclusão).

[ii] Por atrasos na respectiva elaboração, este modelo ficou disponível no mês de Outubro de 2010.

2 ANTECEDENTES NA ILHA DA MADEIRA E COMPLEXIDADE DO FENÓMENO

2.1 ANTECEDENTES

O fenómeno das aluviões na Madeira tem sido referenciado em vários trabalhos de carácter mais ou menos científico, por vezes com a designação quase equivalente de "torrente".

Ao abordar os cursos de água da ilha da Madeira, Pereira (1939), sublinha a quase ausência de caudal das ribeiras na estação do Verão, sendo que no Inverno *«...crescem torrencialmente, transbordam das margens e arrastam das montanhas toneladas de penedos, rolando-os e batendo uns contra os outros num ruído sinistro e aterrador, ao mesmo tempo que arrebatam terrenos de cultura, derrubam pontes e chegam por vezes a causar enormes prejuízos em habitações, pessoas, terras e animais»*.

Ruy Mayer apresenta a definição de uma "torrente" como sendo "uma água que só corre copiosamente durante as temporadas ou chuvas grossas, e sempre com grande violência, sendo o seu leito sujeito a muitas variações e irregularidades, pela curta duração das cheias " (Mayer, 1991, pág 10, citando Nogueira da Gama). Citando bibliografia clássica anterior, Ruy Mayer indica que "as "torrentes" têm uma propriedade perfeitamente específica: escavam na montanha, depositam no vale e divagam depois, em consequência dos depósitos". Citando Scipion Gras, Mayer realça as seguintes duas características deste tipo de curso de água: a aparição brusca e a violência das cheias e o facto de os declives serem acentuados e irregulares. No seu trabalho apresenta uma classificação das "torrentes" e a composição típica das mesmas: bacia de recepção, canal de condução e leito ou cone de dejecção. Ruy Mayer inclui ainda no seu trabalho métodos e obras de correcção das "torrentes" e de consolidação de ravinas. As características das "torrentes" e dos factores associados à respectiva correcção são objecto de desenvolvimento no livro elaborado por Campos Andrade (Andrade, 1982) no qual são referidos exemplos de intervenções em Portugal, nomeadamente na ilha de Porto Santo. Andrade indica que uma "torrente" é todo o curso de água sujeito a cheias súbitas, embora de curta duração, onde a água atinge apreciável velocidade, essencialmente na parte superior do curso, em função da grande inclinação do leito (em geral mais de 6% e nunca menos de 2%) ou do acréscimo de densidade provocado pelos carrejos (Andrade, 1982, pág 18).

Nesta obra, o autor faz referência explícita à bacia de recepção e troço inicial do canal de condução da ribeira de Santa Luzia, na encosta sul do Pico do Areeiro, assinalando terem sido

as origens responsáveis pela aluvião de 9 de Outubro de 1803 que destruiu parte da cidade do Funchal.

Orlando Ribeiro, ao comentar o regime das águas na ilha da Madeira, refere algumas «*inundações catastróficas*» que assolaram a ilha. Tais calamidades estão associadas a «*chuvas excepcionais... frequentemente desastrosas, que enchem as ribeiras, arrastam blocos com algumas centenas de quilos, destroem pontes, danificam casas, inundando a parte baixa das aglomerações situadas à beira-mar, e pondo em perigo bens e pessoas»* (Ribeiro, 1985). A compilação mais recente e pormenorizada da história das aluviões foi realizada pelo Doutor Raimundo Quintal em dois artigos (Quintal, 1999a e 1999b). O Quadro 1 sintetiza as principais aluviões ocorridos nos séculos XIX e XX e início do sec. XXI e as suas principais consequências. Uma parte da informação aqui apresentada foi adaptada de Lopes (2003) e (Lopes & Aguiar, 2009a e 2009b).

Quadro 1 - Síntese histórica das principais aluviões da ilha da Madeira.

Data	**Zona**	**Vítimas e danos**
9 de Outubro de 1803	Funchal	800 - 1000 vítimas
26 de Fevereiro de 1920	Funchal Ribeira Brava, Camacha	5 vítimas
6 de Março de 1929	S. Vicente	32 vítimas, 11 casas e 100 palheiros destruídos
30 de Dezembro de 1939	Madalena do Mar (principais danos)	4 vítimas
11 de Fevereiro de 1956	Curral das Freiras	2 vítimas
3 de Novembro de 1956	Machico, Santa Cruz	6 vítimas
3 a 6 de Janeiro de 1963	Ribeira Brava, Serra de Água	5 vítimas
9 de Janeiro de 1970	Ribeira Brava , Serra de Água	4 vítimas
21 de Setembro de 1972	Santo António	2 vítimas
20 de Dezembro de 1977	Estreito de Câmara de Lobos	4 vítimas e 45 desalojados
23 e 24 de Janeiro de 1979	Machico, Porto da Cruz, Camacha, Canhas, Calheta e Fajã do Penedo	14 vítimas
29 de Outubro de 1993	Por toda a ilha da Madeira	4 vítimas, 4 desaparecidas, 306 desajolados, 76 habitações afectadas e 27 feridos
5 e 6 de Março de 2001	Curral das Freiras e S. Vicente	5 vítimas (turistas alemães) e 120 pessoas desalojadas
22 Dezembro de 2009	Madalena do Mar e S. Vicente	Destruição de vias de comunicação e habitações

Em consequência da aluvião de 1803, as ribeiras da cidade do Funchal foram canalizadas, sob a direcção do Brigadeiro Reinaldo Oudirot, entre 1804 e 1806. Não obstante estas obras, em 1815 e em 1842 ocorreram cheias que provocaram alguns danos na cidade. Para além dos eventos registados no Quadro 1, ocorreram muitos outros que não tiveram consequências tão graves: "Houve mais aluviões, porém menos trágicos e temerosos, em 18 de Novembro de

1765; 20 de Novembro de 1848; 6 de Janeiro de 1856; 1 de Janeiro de 1876; 3 de Outubro de 1895; 9 de Novembro de 1901; 26 de Fevereiro de 1920; 6 de Março de 1921" (Pereira, 1939).

Nas últimas dezenas de anos foram executados estudos e intervenções para regularização dos leitos das ribeiras e protecção de zonas urbanas em expansão. Na sequência da ocorrência de cheias mais violentas foram sendo estudadas e propostas medidas especiais de protecção, nomeadamente para a protecção da cidade do Funchal. Algumas destas propostas não se revelaram exequíveis (e.g. o desvio de cheias para o mar através de túneis). Estudos hidrológicos e hidráulicos mais recentes apresentaram propostas de correcção pontual dos leitos de ribeiras como foi o caso do estudo elaborado pela Hidrotécnica Portuguesa para a ribeira de Santa Luzia, entre Viveiros e Tornos, após a aluvião de 29 de Outubro de 1993.

O Plano Regional da Água da Madeira (PRAM) (SRA/INAG, 2003) identifica este tipo de risco, descreve as respectivas características e propõe algumas medidas específicas.

2.2 COMPLEXIDADE DO FENÓMENO

A ocorrência de movimentos de detritos e de cheias repentinas designadas por aluvião na ilha da Madeira constitui um fenómeno natural perigoso e gerador de um risco potencial significativo e permanente para os respectivos habitantes, conforme tem sido salientado por diversos autores (e.g. Quintal, 1999a e 1999b; Rodrigues D. & Francisco Ayala-Carcedo 2000, 2003; Rodrigues, 2005; e Abreu, Tavares e Rodrigues, 2008).

O impacto social e mediático do evento de 20 de Fevereiro de 2010 motivou a intervenção pública de especialistas tendo alguns, publicado artigos com a descrição do fenómeno, dos principais factores críticos ou causas associadas e feito propostas de mitigação do respectivo risco (e.g. Valente, 2010 e Silva, Almeida e Gomes, 2010).

Incidindo em bacias hidrográficas com pequena área e em linhas de água com elevado declive (zonas muito montanhosas) e vales encaixados e num território com pouca disponibilidade de áreas planas ou adequadas a uma expansão urbana ou industrial livre dos perigos de enxurradas, de deslizamentos ou de outras instabilidades geotécnicas, o fenómeno das aluviões na ilha da Madeira constitui, simultaneamente, um processo natural complexo e uma ameaça à segurança de pessoas e bens. Esta realidade exige um sistema de medidas de protecção e de gestão do risco muito fiável e rigoroso. Com efeito, as características naturais da ilha são muito favoráveis à formação de aluviões com elevada perigosidade: disponibilidade de material sólido (detritos) facilmente mobilizável nas encostas e leitos de ribeiras, em particular na sequência de precipitações intensas, formação muito rápida de cheias (bacias

com um tempo de resposta relativamente curto). Por seu turno, verifica-se uma significativa exposição ao perigo das vias de comunicação antigas e de zonas construídas, em particular nas zonas terminais (cones de dejecção) das ribeiras, ocupadas por construções. É o caso das principais localidades e áreas urbanas consolidadas. A ocupação de algumas encostas potencialmente susceptíveis de instabilizarem durante períodos de elevada precipitação, torna o processo particularmente difícil no que respeita a prevenção do risco.

A componente ou fase sólida do processo é a que induz uma grande complexidade e perigosidade ao fenómeno e faz diferenciar, de modo muito significativo, este tipo de cheia de outras, nomeadamente das cheias que ocorrem usualmente noutras áreas do território nacional. Com efeito, o controlo da formação e da propagação dos escoamentos mistos água – sólido com elevadas velocidades e concentrações de detritos de grande dimensão, que podem ser da ordem de 80% ("debris flows"), exige conhecimentos e dados específicos que ainda não estão disponíveis de um modo prático. Por seu turno, o desencadeamento destes escoamentos por acção de uma precipitação depende de um conjunto de factores. A identificação de correlações empíricas, validadas a nível regional exige uma recolha contínua de informações e dados ao longo de um conjunto de anos de forma a ser possível definir os indicadores de aviso ou de alerta mais fiáveis. Neste domínio, salienta-se o trabalho pioneiro de Nel Caine em 1980, sobre a utilização de curvas de intensidade e duração de precipitação no desencadeamento de movimentos de massa e de escoamentos de detritos ou "debris flows" (Caine, 1980). Este trabalho e a metodologia proposta têm vindo a ser desenvolvidos, aplicados e melhorados em diversas partes do mundo, nomeadamente em algumas zonas de Portugal, conforme é referenciado, em Stark et al (2008 e 2007) e Zêzere, Ferreira e Rodrigues (1999).

Tendo em conta estes pressupostos, a estruturação do controlo deste tipo particular de cheias, com as condições locais adversas da ilha da Madeira, é muito mais difícil do que a simples aplicação de procedimentos e conhecimentos já consolidados para os outros casos de protecção contra cheias e inundações e exige para o seu estudo a conjugação de diferentes saberes.

Estas dificuldades também são sentidas em outras zonas do mundo (e.g. em zonas alpinas da Europa) onde fenómenos semelhantes ocorrem com frequência e com grande perigosidade. Algumas ocorrências provocaram elevados danos e vítimas mortais como foi o caso da enxurrada que ocorreu em Dezembro de 1999 na Venezuela que, segundo as estimativas da cruz vermelha internacional provocou cerca de 30.000 mortos. A melhoria dos conhecimentos científicos e técnicos, aliada à capacidade computacional, têm permitido avanços significativos

na simulação e previsão do comportamento dos escoamentos mistos. A experiência empírica, acumulada por estudos e recolha de dados específicos e sistemáticos, pela construção e exploração de estruturas de retenção e protecção especiais e a melhoria nos sistemas de previsão têm permitido a implementação de sistemas mais adaptados de protecção e de mitigação do risco em algumas zonas do mundo. Salientam-se os casos da Itália e da Áustria na Europa e do Japão na Ásia, existindo numerosa bibliografia recente sobre este tópico (e.g. Casale e Margottini, 1999 e Takahashi, 1991 e 2007, entre outros). Trata-se, contudo, de um domínio científico longe de estar consolidado onde a investigação prossegue. Em Portugal, este tópico também é muito inovador e merece um esforço de investigação aplicada, em particular na ilha da Madeira. Com o estudo agora elaborado para a SERS da Região Autónoma da Madeira, o Grupo constituído por investigadores do IST, UMa e LREC pretendeu contribuir para um avanço dos conhecimentos e o desenvolvimento de trabalhos de investigação futuros neste domínio.

3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA EM ESTUDO E DE ASPECTOS ASSOCIADOS AO FENÓMENO

3.1 INTRODUÇÃO

O presente estudo abrange as bacias hidrográficas de cinco ribeiras da vertente sul da Ilha da Madeira: Ribeira da Tabua, Ribeira Brava, São João, Santa Luzia e João Gomes (Figura 2). Apresenta-se na Figura 3 uma vista detalhada da zona de estudo. As figuras incluem também a bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos a qual, não obstante não ser objecto deste estudo, tem interesse estudo dada a sua dimensão, localização e características semelhantes às das bacias consideradas na análise.

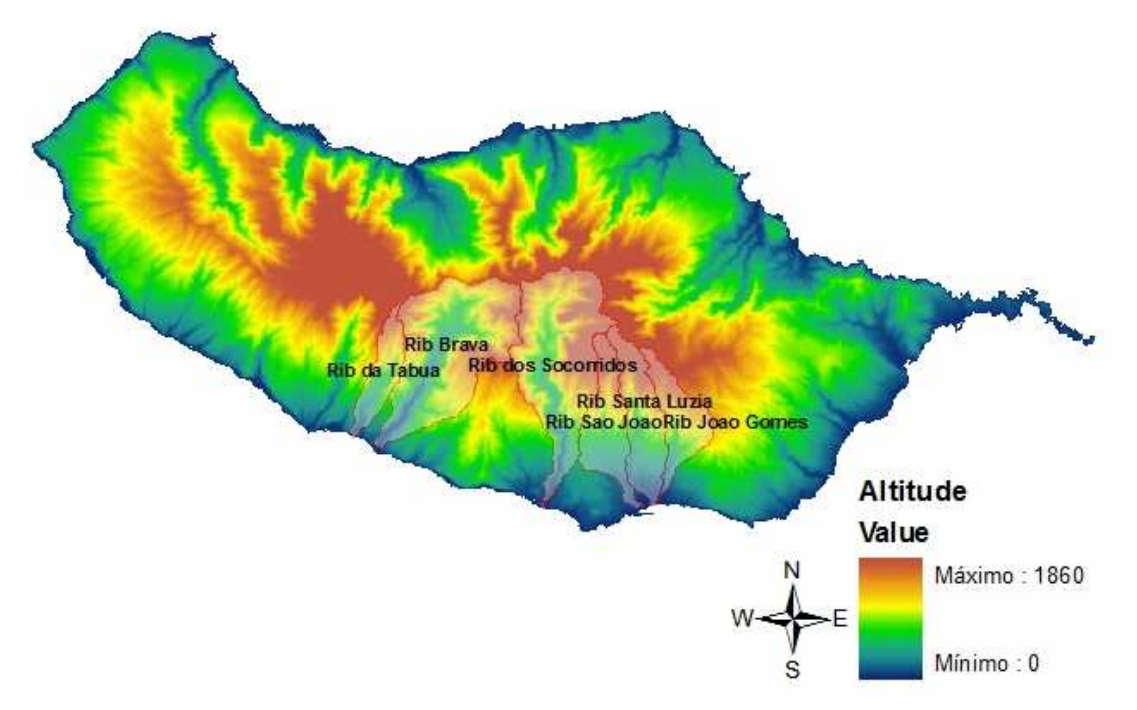

Figura 2 - Localização das bacias hidrográficas objecto de estudo e da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos.

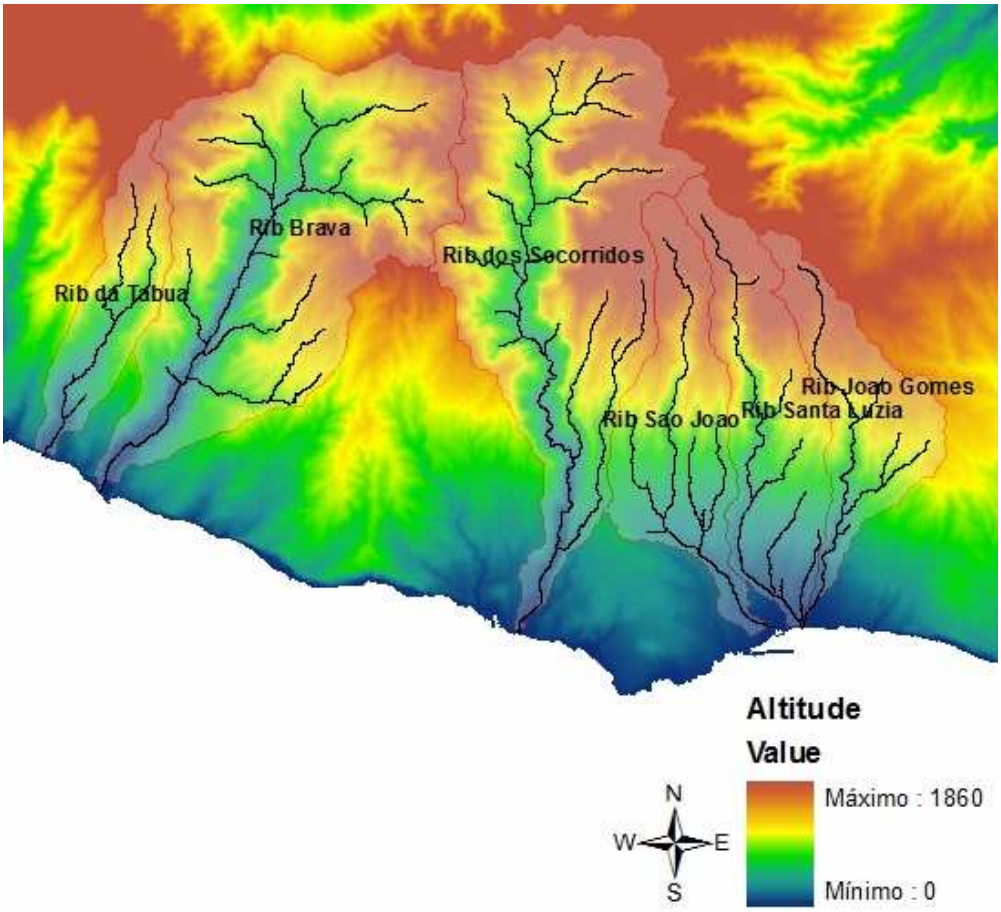

Figura 3 - Pormenor da localização das bacias hidrográficas objecto de estudo e da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos.

No Quadro 2 são apresentados alguns dados gerais relativos às bacias hidrográficas das ribeiras em análise.

Quadro 2 - Dados gerais sobre as bacias hidrográficas objecto de estudo.

Nome da bacia	Área (km²)	Altitude máxima (m)	Declive médio (º)
Ribeira da Tabua	8,8	1572	33
Ribeira Brava	40,9	1689	37
Ribeira dos Socorridos	38,7	1860	43
Ribeira de São João (ou de Santo António)	14,7	1763	25
Ribeira de Santa Luzia	15,6	1785	27
Ribeira de João Gomes	11,4	1595	25

Apresenta-se, seguidamente, a caracterização sucinta de alguns aspectos ou factores importantes para o estudo das aluviões na ilha da Madeira.

3.2 CARACTERIZAÇÃO BIOFÍSICA

3.2.1 Geologia

Os trabalhos de correlação estratigráfica em regiões predominantemente vulcânicas, onde as rochas magmáticas constituem mais de 98% do material aflorante, são extremamente complicados. Adicionando, no caso da Madeira, o carácter poligenético do vulcanismo, a extrema monotonia litológica, o relevo acidentado e a abundante cobertura vegetal, o trabalho de cartografia geológica torna-se ainda mais difícil (Mata, 1996).

Como consequência destas dificuldades, a cartografia geológica iniciou-se apenas com a publicação da carta geológica à escala de 1/50.000 da ilha da Madeira, pelos Serviços Geológicos de Portugal em 1975 (Zbyszewski *et al.*, 1975). Esta carta apresenta um modelo com cinco complexos vulcânicos (β_1- β_5). Recentemente foi publicada pelo LNEG (LNEG, 2009), uma nova carta à escala 1:80.000, que apresenta uma divisão simplificada em Complexo de Base, Complexos intermédios e Complexos Superiores (Figura 4). Uma simplificação da geologia vulcânica da ilha era já proposta por diversos autores, entre eles Mata (1996) e Geldmacher et al. (2000).

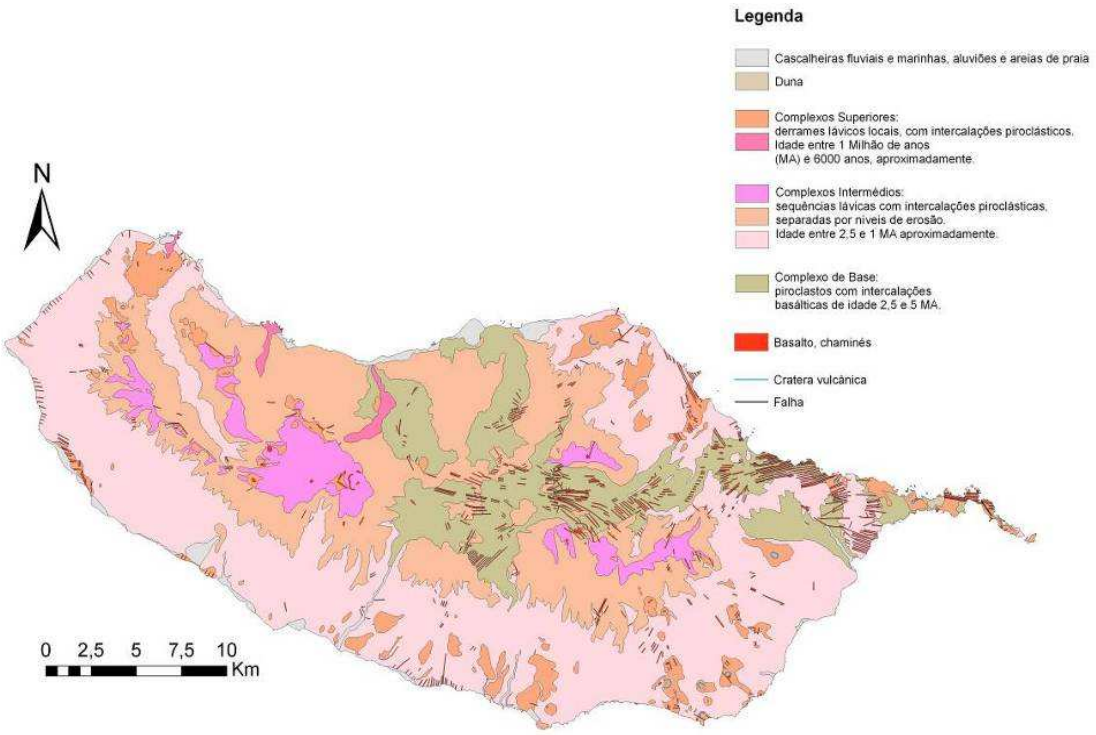

Figura 4 - Carta geológica da ilha da Madeira (LNEG, 2009)

Do ponto de vista geológico, a área em estudo abrange essencialmente duas unidades:

- O Complexo de Base (Miocénico Superior - Pliocénico) constituído, maioritariamente, por depósitos piroclásticos e brechas vulcânicas, sendo as escoadas lávicas claramente secundárias. Em alguns pontos, esta unidade é interceptada por uma densa rede filoniana, sobretudo na parte central da ilha.
- Os Complexos Intermédios que são compostos, fundamentalmente, por escoadas lávicas basálticas (alcalinas) que ocorreram do Pliocénico até ao Plistocénico. Esta unidade cobre toda a ilha, com sequências de lavas de mais de 500 metros de espessura, interceptadas pontualmente por filões subverticais.

Os Complexos Superiores, correspondem essencialmente a aparelhos vulcânicos, cones de escórias e a depósitos piroclásticos.

Quadro 3 – Unidades geológicas de origem vulcânica presentes na área em estudo.

Concelho / **Zona**	**Funchal**	**Ribeira Brava**
Alta	Complexos Intermédios ($ß_4$ e $ß_3$)	Complexos Intermédios ($ß_3$); na zona mais a Norte e mais escavada da bacia da Ribeira Brava, com a diminuição de altitude encontra-se aflorante o Complexo de Base ($ß_1$)
Intermédia e Linha de costa	Complexos Intermédios ($ß_2$); Complexos Superiores	Complexos Intermédios ($ß_2$); Complexos Superiores

Além das formações vulcânicas até aqui referidas, existem ainda na ilha formações sedimentares. Tendo em conta a área em estudo e o objectivo deste trabalho, é importante destacar os depósitos de vertente, os depósitos aluvionares e os depósitos de cobertura.

Os primeiros correspondem a acumulações por gravidade, resultantes de movimentos de massa de vertente que ocorrem ao longo dos vales fluviais e das arribas. São compostos essencialmente por materiais detríticos, muito heterométricos, oriundos da capa de alteração do solo, de produtos piroclásticos pouco coesos, etc. Quanto aos depósitos aluvionares das ribeiras madeirenses estes são, no geral, grosseiros, torrenciais e instáveis (Carvalho e Brandão, 1991).

Os depósitos de cobertura são constituídos essencialmente pelos solos de alteração das formações vulcânicas que não sofreram transporte, compostos essencialmente por materiais detríticos, heterométricos de pequena espessura.

Além destes materiais, e não descritos na bibliografia, é importante referir os numerosos depósitos de aterro, de origem antrópica, cujas acumulações podem ter grande possança e cuja natureza e composição é variável em função do objectivo construtivo.

De uma forma geral, estes materiais praticamente não se encontram cartografados, aparecendo unicamente os depósitos aluvionares e as acumulações em praias. No entanto, no presente trabalho, a identificação de áreas em que são aflorantes depósitos aluvionares, depósitos de vertente e depósitos de cobertura e aterro, é de grande importância, devido à maior susceptibilidade destes materiais a serem removidos por acção da erosão. Em alguns trabalhos de cariz geotécnico é possível encontrar alguma cartografia de materiais recentes, mas apenas para pequenas áreas de estudo (Rosa, 1995; Cenorgeo, 2010).

A cartografia detalhada dos depósitos recentes (aluvionares, vertente, cobertura e aterro) da área em estudo é inexistente, mas de grande importância. Pelo que foi verificado nos trabalhos de campo, que foram efectivamente estes depósitos que contribuíram com o maior volume de material mobilizado no evento de 20.02.2010 e são eles que constituem a maior fonte de material disponível a ser mobilizado em eventos futuros, quer nas cabeceiras das ribeiras, quer ao longo dos seus leitos. A caracterização de litologias e espessuras destes materiais deve ser considerada como um trabalho futuro necessário para a minimização do risco de aluviões na ilha da Madeira.

3.2.2 Solos

A carta dos solos da ilha da Madeira (Ricardo *et al.*, 1992) segue a classificação estabelecida pela FAO/UNESCO para o “Soil Map of the World”.

Como a geologia da Madeira é predominantemente de composição basáltica, os solos predominantes na ilha caracterizam-se, quanto à composição, por serem naturalmente de natureza basáltica. Apesar dos solos da Madeira sofrerem uso intensivo, e poderem ser na sua grande maioria classificados como “Anthrosols”, os autores da carta (Ricardo *et al.*, 1992) optaram por apresentar uma classificação de acordo com a unidade (solo) original não antropizada. Assim, estes solos correspondem a fases antrópicas da unidade original.

Nos concelhos em estudo são identificados na carta os seguintes grupos (Figura 5): “Terreno Acidentado Dístrico” (TAd), “Terreno Acidentado Êutrico” (TAe), “Eutric Vertisols” (VRe), “Haplic Phaeozems” (PHh), “Humic Cambosols” (CMu), “Chromic Cambosols” (CMx), “Umbric Andosols” (ANu) e “Vitric Andosols” (ANz). No caso do Concelho da Ribeira Brava encontram-se ainda “Eutric Fluvisols” (FLe).

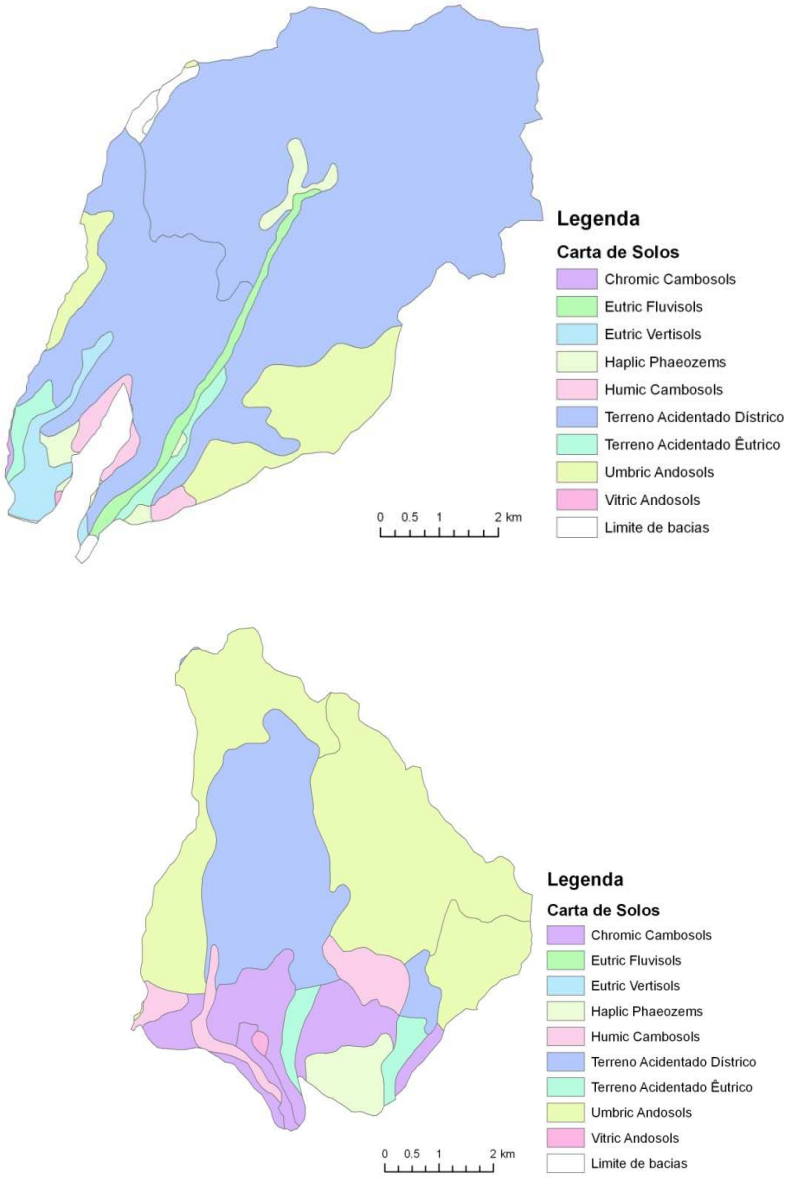

Figura 5 - Carta de solos da Madeira para os concelhos em estudo (*adaptado de*: Ricardo *et al.*, 1992); em cima Ribeira Brava e em baixo Funchal.

Na Figura 6 é apresentada a distribuição da percentagem de área para os tipos de solo identificados nos concelhos do Funchal e da Ribeira Brava. Verifica-se que no caso da Ribeira Brava os solos predominantes são o Terreno Acidentado Dístrico e os Umbric Andosols, enquanto que no concelho do Funchal predominam os Umbric Andosols, o Terreno Acidentado Dístrico e os Chromic Cambosols.

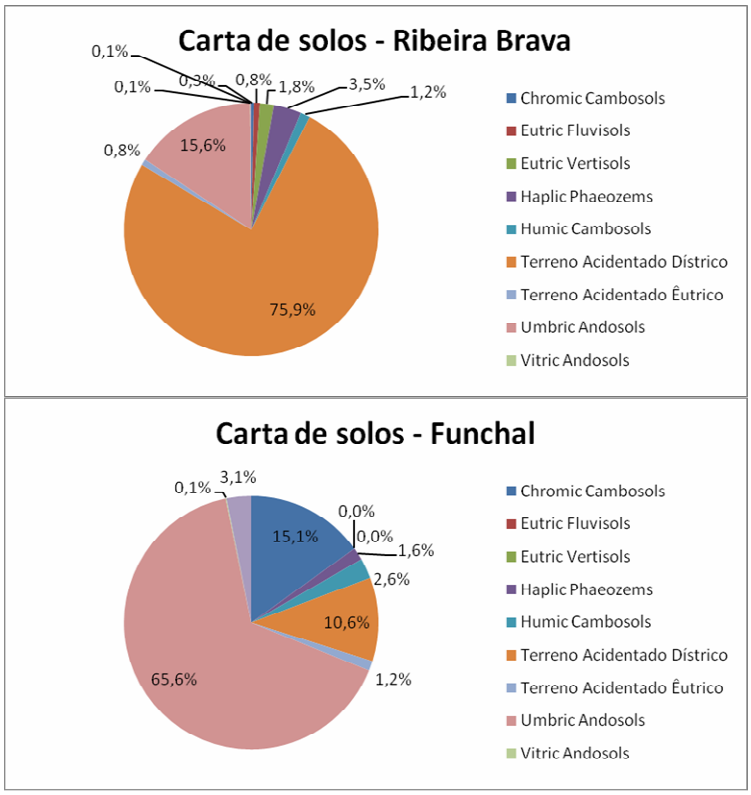

Figura 6 - Área ocupada pelos diferentes tipos de solo nas duas zonas de estudo: Funchal e Ribeira Brava.

3.2.3 Hidrogeologia

O modelo hidrogeológico da ilha da Madeira (Figura 7) é constituído por (Prada e tal., 2005):

- *Aquíferos suspensos*, situados em altitude estão relacionados com formações pouco permeáveis ou impermeáveis, tais como tufos, escoadas argilificadas, níveis de cozimento em paleossolos ou basaltos alterados e depósitos freatomagmáticos. Os aquíferos suspensos podem ser subdivididos em superficiais, situados a cotas mais elevadas, e em profundos que se situam ainda em altitude mas nas cotas mais baixas. Os aquíferos suspensos superficiais são muito susceptíveis às variações do clima, variando os seus caudais ao longo do ano hidrológico, função da recarga, podendo mesmo ter épocas em que esgotam. Por sua vez, os profundos, tem caudais muito menos sensíveis às variações climatéricas.
- *Aquífero vulcânico generalizado* (Aquífero de base) parece existir a partir de uma certa profundidade. Este aquífero tem características diferenciadas em função das formações que constituem o núcleo da ilha. O Complexo de base ($ß_1$ ou Complexo Vulcânico Antigo como refere a autora) constituído por formações na sua maioria muito alteradas, caracteriza-se por transmissividades mais baixas, enquanto que os Complexos Vulcânicos Intermédios ($ß_2$ a $ß_4$ ou Complexo Principal como referido pela autora) são

caracterizados por materiais de forte transmissibilidade. A zona profunda saturada da ilha tem ligação à zona saturada no litoral definindo-se assim o Aquífero Vulcânico Generalizado, que se situa no interior da ilha a uma cota de 1000 metros.

- *Aquíferos compartimentados*, relacionados com filões subverticais, actuando estes como barreiras em zonas muito localizadas. Quando estes compartimentos se situam abaixo do nível de saturação regional, podem dar origem a compartimentos ou células secas, localizadas em zonas que não recebem recarga.

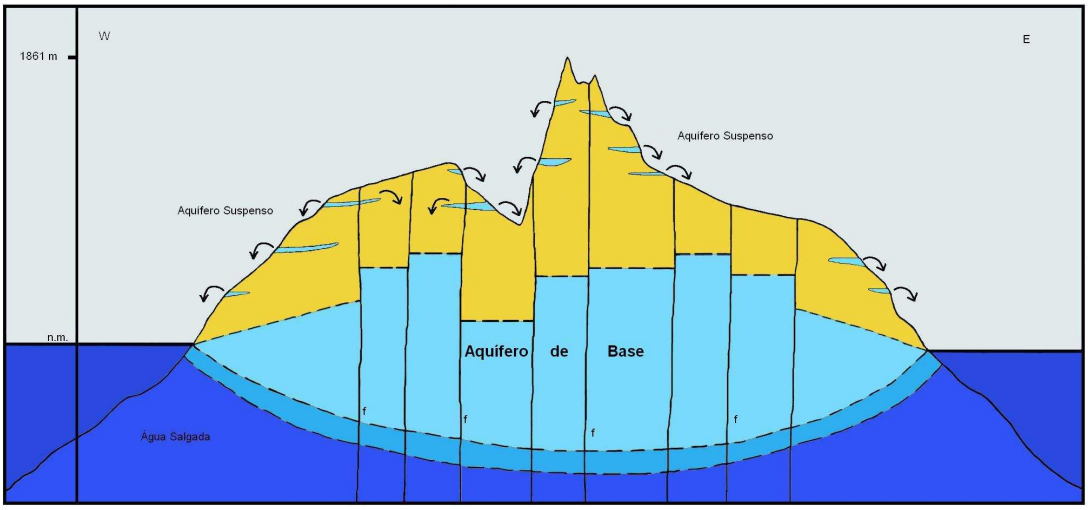

Figura 7 – Esquema hidrogeológico conceptual para a ilha da Madeira (Prada et al., 2005)

As zonas de recarga dos aquíferos situam-se nas zonas mais altas da ilha, onde a precipitação é maior. O fluxo nestas zonas é descendente e localmente dão origem a aquíferos suspensos. Estes aquíferos, particularmente os mais superficiais, que não apresentam escoamento contínuo, podem contribuir activamente como factor despoletador de movimentos de massa.

A partir de uma determinada profundidade, acima dos 1000 m entra-se na zona saturada que é limitada superiormente por um nível freático e inferiormente por uma zona de transição com água salgada.

O fluxo da zona saturada é divergente do centro da ilha para a periferia (Prada, 2000).

3.2.4 Geomorfologia

A ilha da Madeira apresenta 35% da área emersa com altitudes superiores a 1000 m e cerca de 90% acima da cota dos 500 m (Carvalho e Brandão, 1991). Os pontos de maior altitude situam-se na zona centro-oriental, atingindo no Pico Ruivo (Santana) os 1862 m.

A configuração geomorfológica da ilha da Madeira é consequência de diversos factores, que passam pela estrutura, forma e idade do edifício vulcânico que lhes deu origem, pelas suas litologias e respectiva disposição e finalmente pelos agentes erosivos externos. Os principais

agentes erosivos activos nesta ilha são o clima e a precipitação, que influenciam fortemente o desenvolvimento da rede hidrográfica, e a acção das ondas nas zonas costeiras (Carvalho e Brandão, 1991).

Do ponto de vista geomorfológico a ilha da Madeira pode subdividir-se nas três unidades clássicas seguintes: o planalto do Paul da Serra, o Maciço Vulcânico Central e a Ponta de São Lourenço. As ribeiras em estudo incluem-se nas unidades do Paul da Serra e do Maciço Vulcânico Central.

A Figura 8 apresenta o mapa hipsométrico da área em estudo e a Figura 9 apresenta as curvas hipsométricas das bacias hidrográficas objecto do presente estudo e ainda da bacia hidrográfica da ribeira dos Socorridos. Em todas as bacias hidrográficas a altitude do terreno varia entre o nível do mar e valores próximos dos 1800 metros.

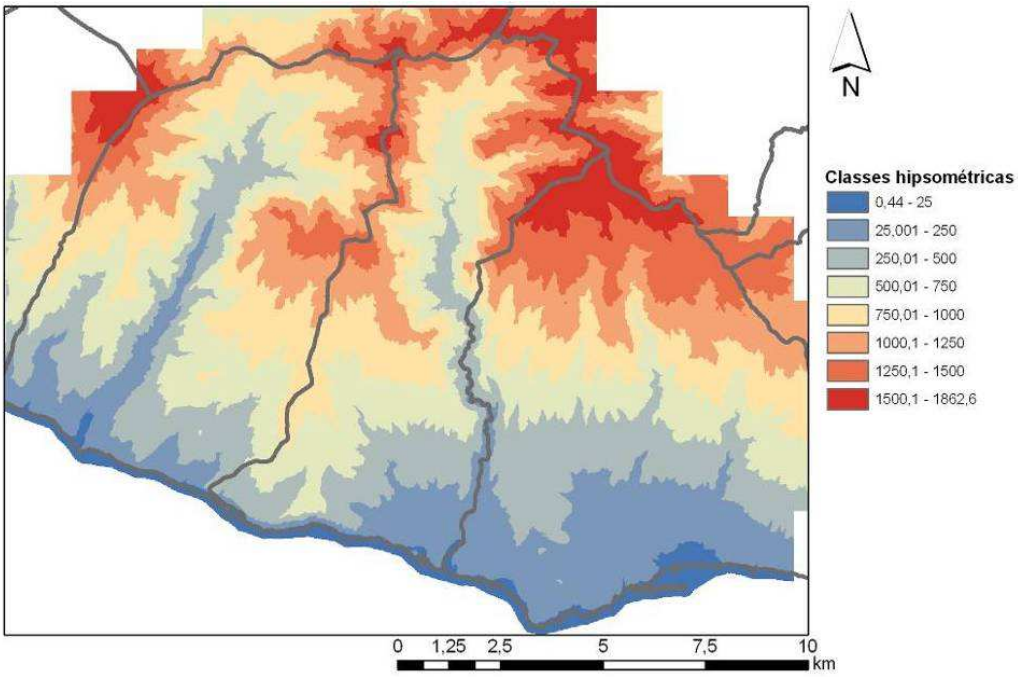

Figura 8 - Mapa hipsométrico da área em estudo

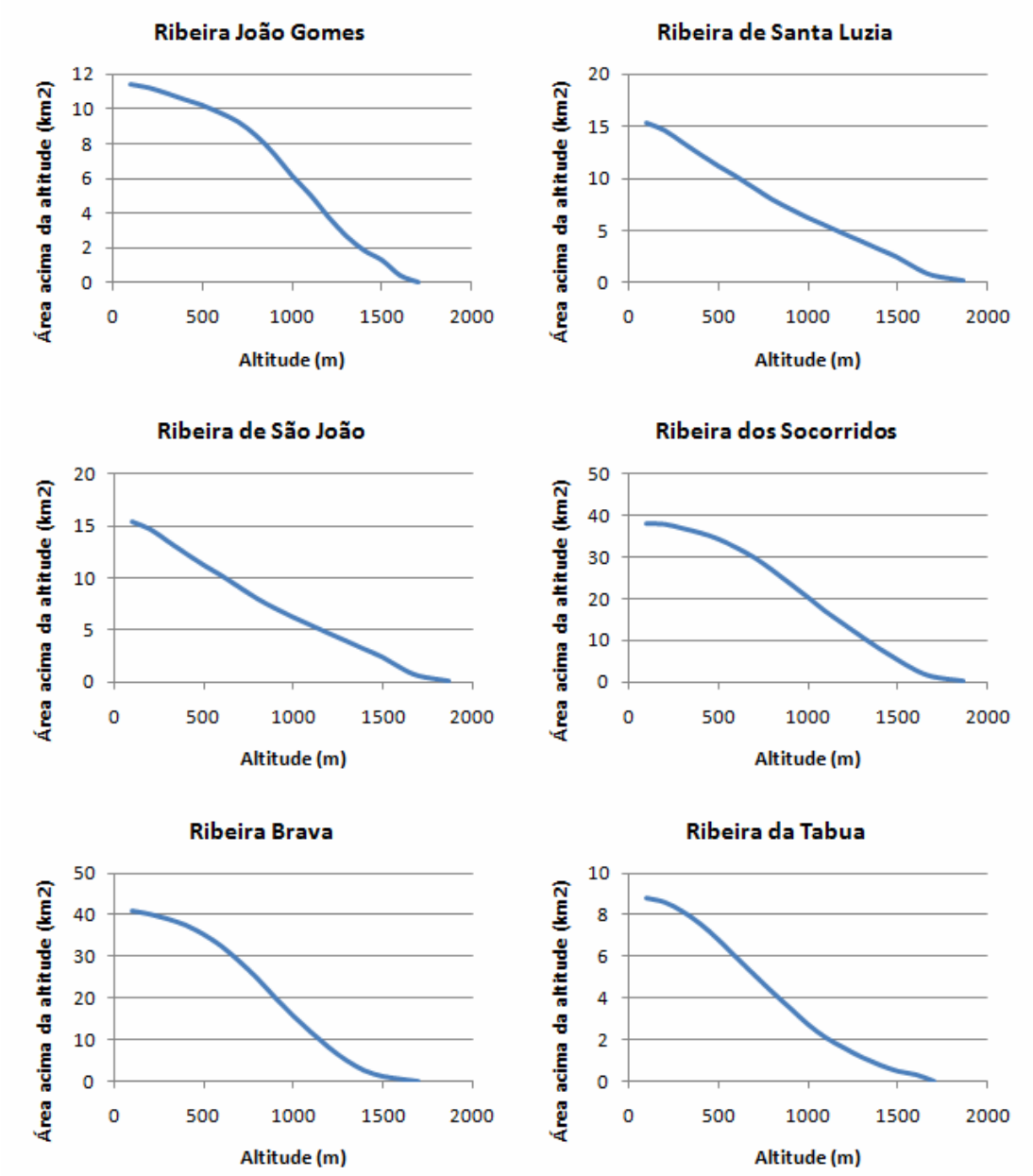

Figura 9 - Curvas hipsométricas das ribeiras em análise.

A Figura 10 apresenta a carta de declives da zona em estudo e a Figura 11 mostra os histogramas dos valores de declive de cada bacia hidrográfica. O declive médio das bacias em estudo varia entre os 28º (53%) e os 37º (75%), existindo em todas áreas significativas com declives superiores a 50º (120%).

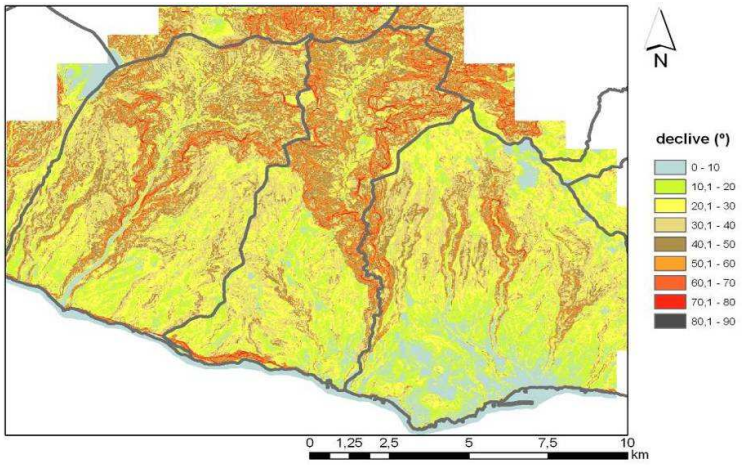

Figura 10 - Mapa de declives da área em estudo

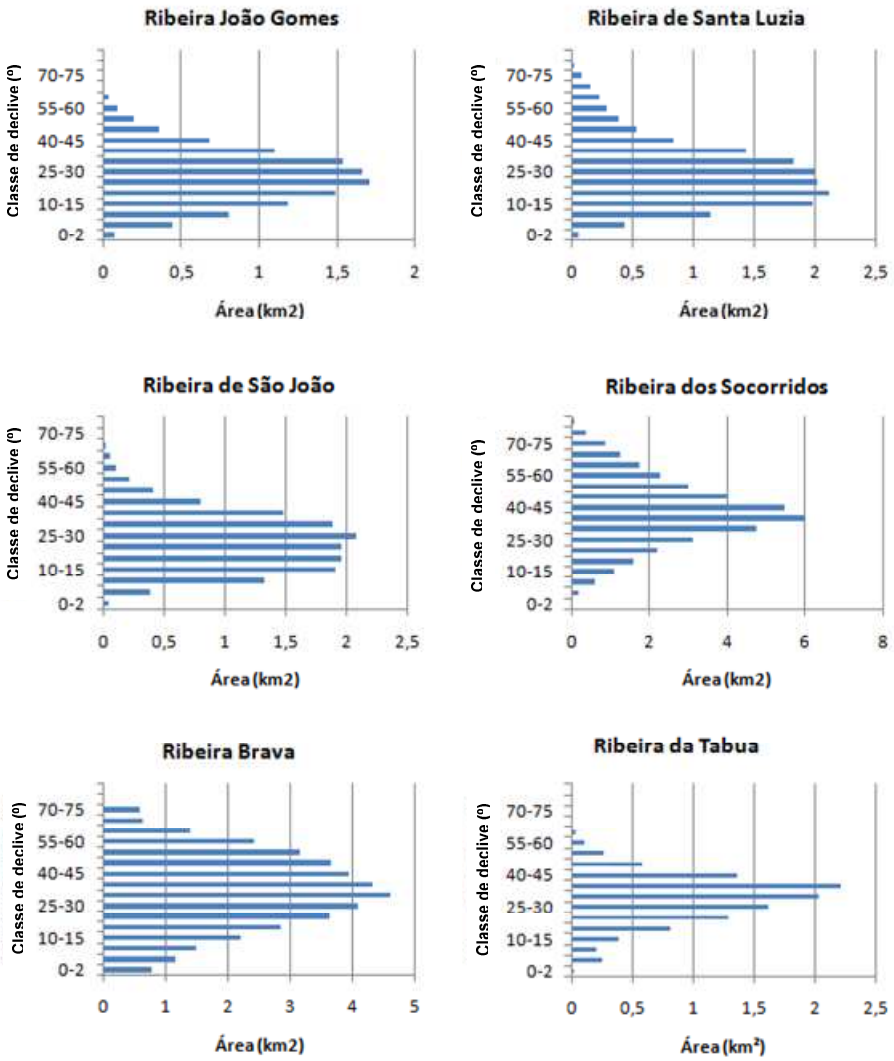

Figura 11 - Histogramas de declives das ribeiras em análise.

3.2.5 Hidrografia

A elevada altitude média da ilha da Madeira, associada à elevada pluviosidade, confere ao agente exógeno água uma grande capacidade modeladora do relevo. A ilha é sulcada por inúmeros vales, profundos, escavados pelas águas que correm sem regularidade, com carácter, essencialmente, torrencial.

Apesar de a ilha não ser, estruturalmente, constituída por um único cone, geometricamente, tem uma forma oval, condicionando a sua rede de drenagem que é semelhante ao tipo radial centrífugo, divergindo as linhas de água, das zonas altas do interior, para as baixas da periferia da ilha. Os cursos de água são curtos e de orientação, aproximadamente, perpendicular à linha da costa.

Os vales são geralmente profundos, estreitos e de perfil transversal em V. A verticalidade das vertentes verifica-se, sempre que há predominância de escoadas sãs, resistentes, em relação a níveis de piroclastos ou a escoadas muito alteradas, onde, pelo contrário, os vales são mais abertos (Prada, 2000).

A Figura 12 apresenta a rede de drenagem da área em estudo. O Quadro 4 completa esta figura, apresentando os valores de comprimento da rede e de densidade de drenagem.

As ribeiras de São João, Santa Luzia, João Gomes e da Tabua apresentam um padrão de drenagem paralelo, típico de regimes de escoamento em formações vulcânicas recentes, em geral resistentes, embora, na região do Funchal, localmente, possam estar alterados e apresentar disjunção esferoidal desenvolvida. Em termos geomorfológicos, os cursos de água apresentam bacias hidrográficas alongadas, com um grau de encaixe muito acentuado e vales de perfil transversal em forma de V. O troço final das ribeiras de São João e Santa Luzia sofre uma inflexão no seu traçado, de N-S para NW-SE, em consequência da presença de escoadas basálticas, muito espessas, mais resistentes do que os materiais a montante (informação oral de S. Prada). Os canais de drenagem (talvegues), são paralelos a sub-paralelos entre si e exorreicos.

A Ribeira da Ribeira Brava apresenta uma bacia hidrográfica em forma de funil, em que a depressão da Serra de Água, *versus,* a muito encaixada Ribeira Brava, que a drena, constituem, no seu conjunto, um bom exemplo do comportamento contrastante que as diferentes unidades vulcano-estratigráficas evidenciam, face aos agentes erosivos. Esta ribeira, em termos de caracterização morfológica, apresenta, sobretudo a montante, um padrão de drenagem dendrítica, característico de áreas onde predominam formações vulcânicas (derrames lávicos e piroclastos de queda, com intercalações conglomeráticas), muito

alteradas, com comportamento isotrópico relativamente ao processo erosivo pluvial e fluvial. A jusante, o canal de escoamento, escavado em formações mais recentes e mais resistentes, apresenta um padrão de drenagem composto dendrítico paralelo (informação oral de S. Prada). Neste modelo de drenagem, os talvegues não possuem orientação preferencial e/ou organização sistemática, possuindo diversos comprimentos. No território em análise, a tipologia de drenagem é exorreica.

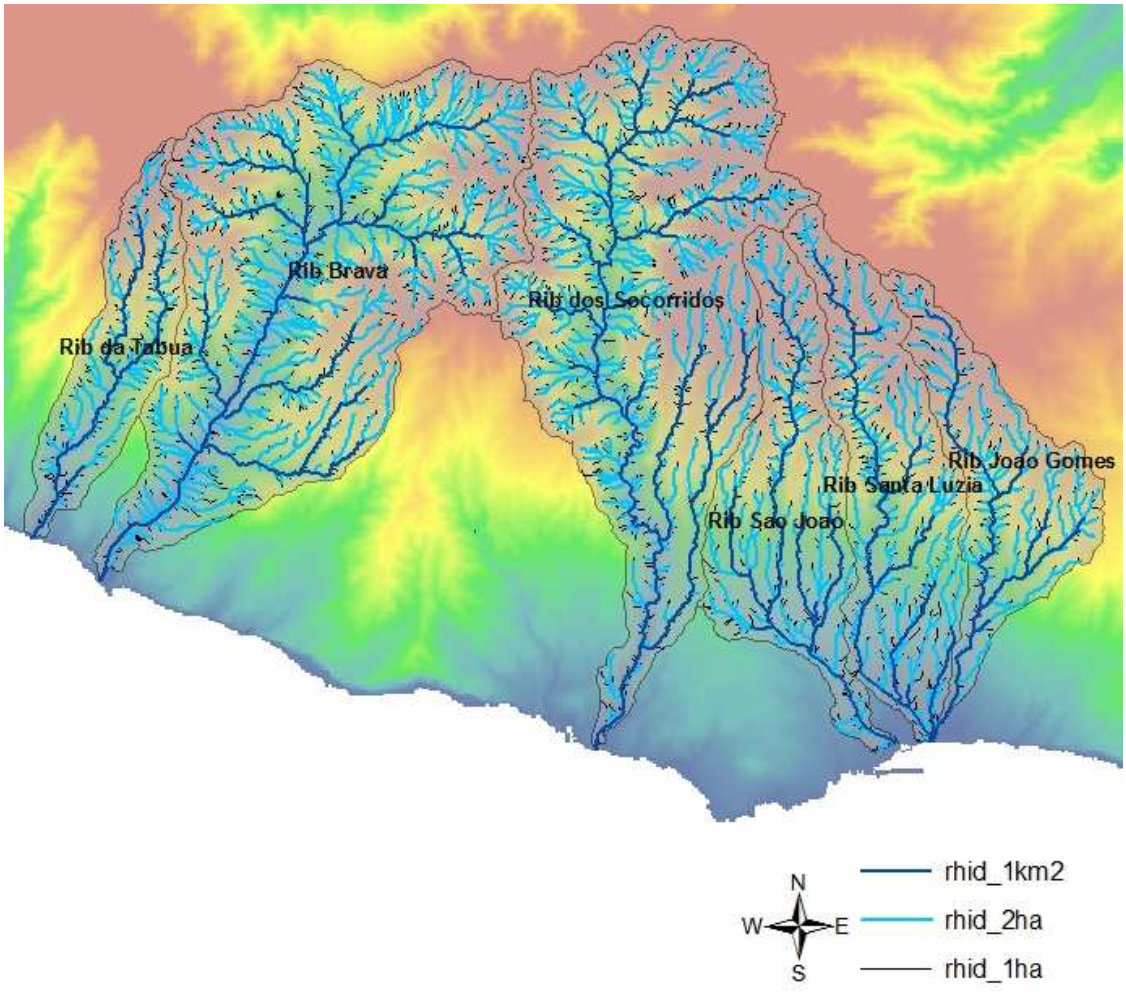

Figura 12 - Redes de drenagem das bacias hidrográficas

A Figura 13 apresenta os perfis longitudinais das principais ribeiras, sendo complementada pelo Quadro 5 que apresenta os valores de declive em função do desenvolvimento das ribeiras.

Quadro 4 - Comprimento das redes hidrográficas em análise.

Bacia hidrográfica	Área (km²)	Comprimento total da rede de drenagem em função da area mínima a montante (m)			Densidade de drenagem em função da area mínima a montante (km/km2)		
		A > 1 ha	A > 2ha	A > 1km²	A > 1 ha	A > 2 ha	A > 1km²
Tabua	8,8	49.358	34.525	11.279	5,61	3,92	1,28
Brava	40,9	247.167	183.704	38.701	6,04	4,49	0,95
Socorridos	38,7	223.602	163.734	43.020	5,78	4,23	1,11
São Joao	14,7	82.676	62.729	19.490	5,64	4,28	1,33
Santa Luzia	15,6	92.162	68.158	20.035	5,90	4,36	1,28
Joao Gomes	11,4	60.483	48.160	15.372	5,30	4,22	1,35

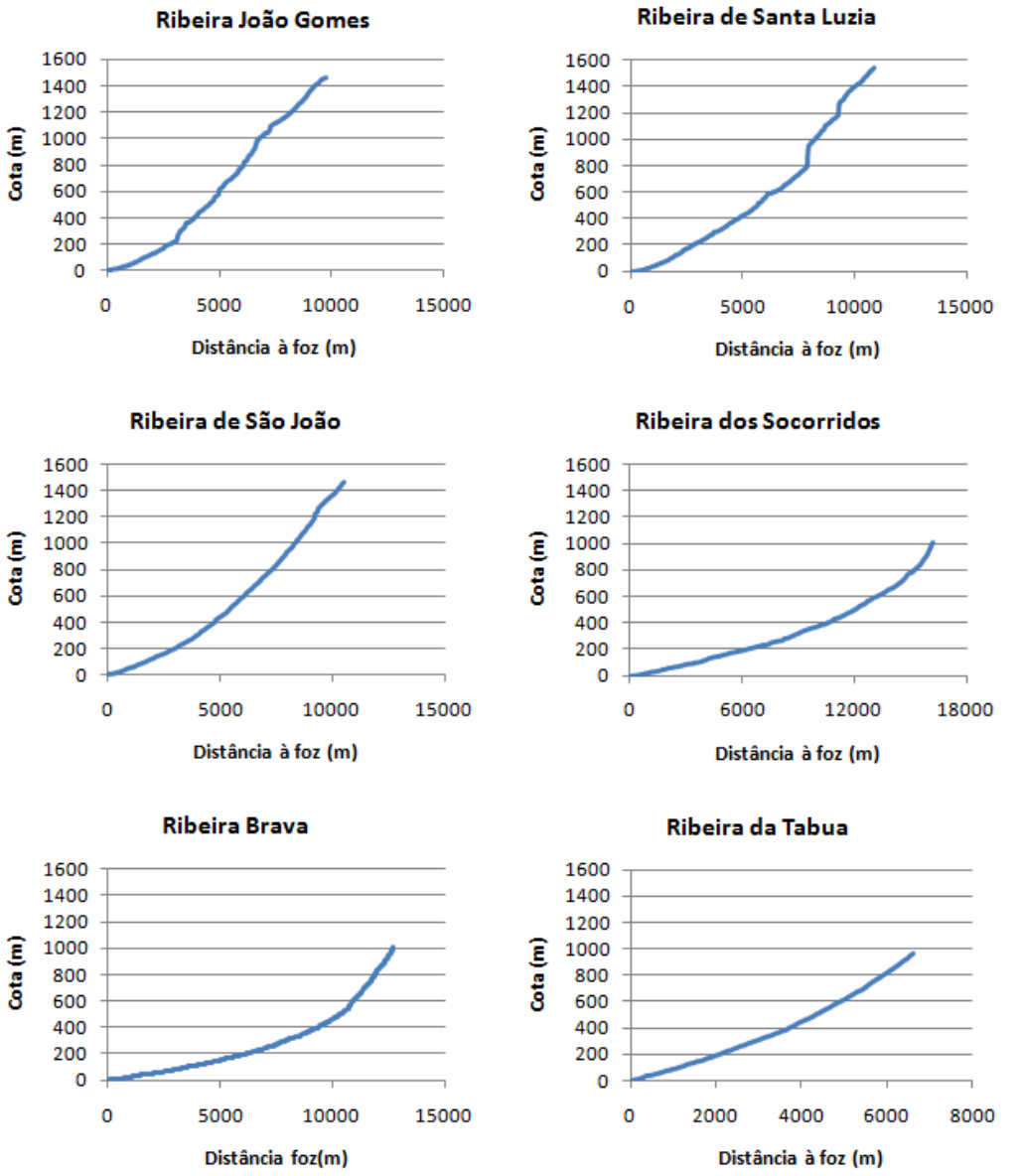

Figura 13 - Perfis longitudinais das ribeiras em análise e da ribeira dos Socorridos.

Quadro 5 – Declives das ribeiras em análise e da ribeira dos Socorridos (%)

Troço de ribeira (distância à foz)	João Gomes	Santa Luzia	São João	Socorridos	Ribeira Brava	Tabua
0 – 2 km	5,5	5,5	3,5	2,5	2,5	11,0
2 – 4 km	14,0	9,5	7,5	3,5	3,0	14,0
4 – 6 km	18,0	11,0	12,0	4,0	4,0	21,0
6 – 8 km	20,5	13,5	15,0	4,0	5,5	
8 – 10 km	15,5	30,5	20,0	5,5	8,0	
10 – 12 km			23,0	6,5	18,5	
12 – 14 km				8,0		
14 – 15 km				12,0		

3.2.6 Caracterização da ocupação do solo do território das bacias

A análise que se apresenta baseia-se no cruzamento entre os deslizamentos cartografados através de análise de imagens de detecção remota e a carta COS 2007 da Ilha da Madeira. A Figura 14 e a Figura 15 mostram que a classe dominante em ambas as áreas definidas é a das Florestas e Meios Naturais e Semi-Naturais atingindo os 95% na área da Ribeira Brava. No entanto, na área do Funchal existe uma transição de cerca de 27.5% da área para a classe de Territórios Artificializados. A proporção da classe Áreas Agrícolas e Agro-Florestais é muito semelhante em ambas as áreas rondando os 3%.

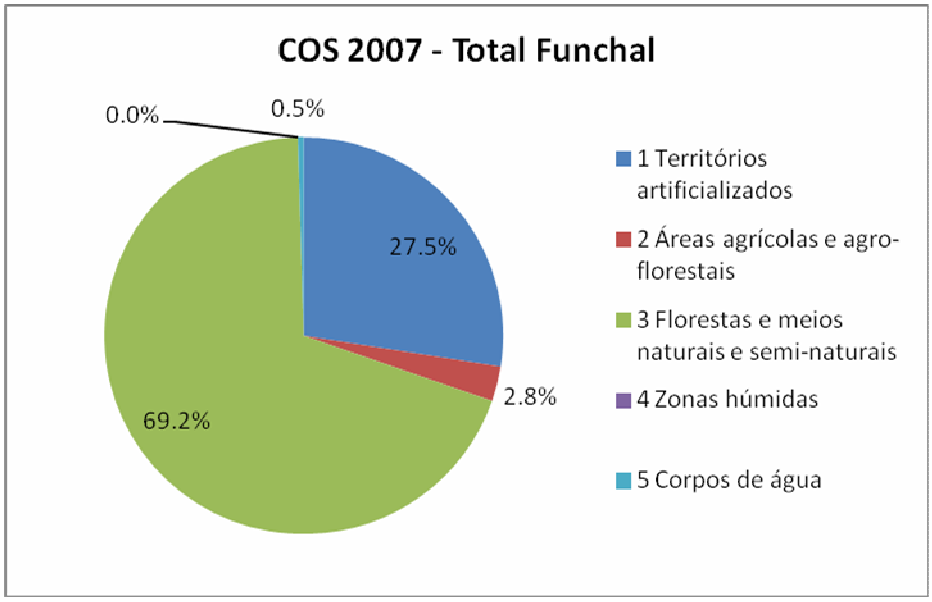

Figura 14 - Distribuição da área por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

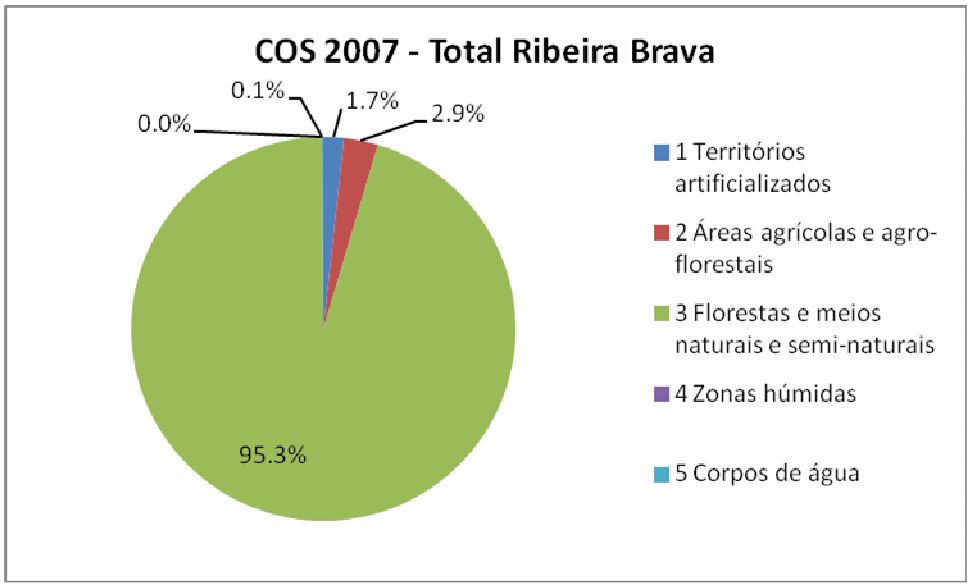

Figura 15 - Distribuição da área por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

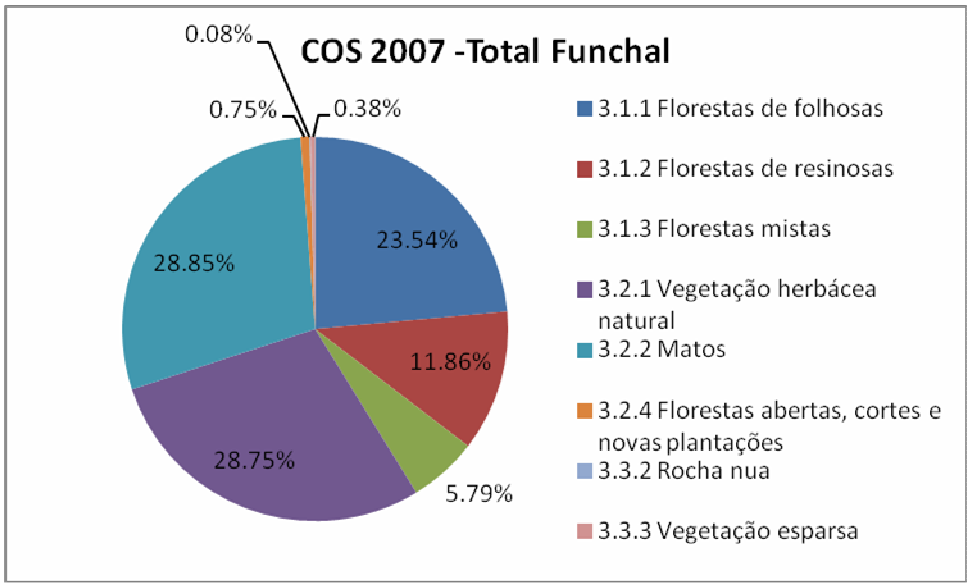

Figura 16 - Distribuição da área Florestal por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal.

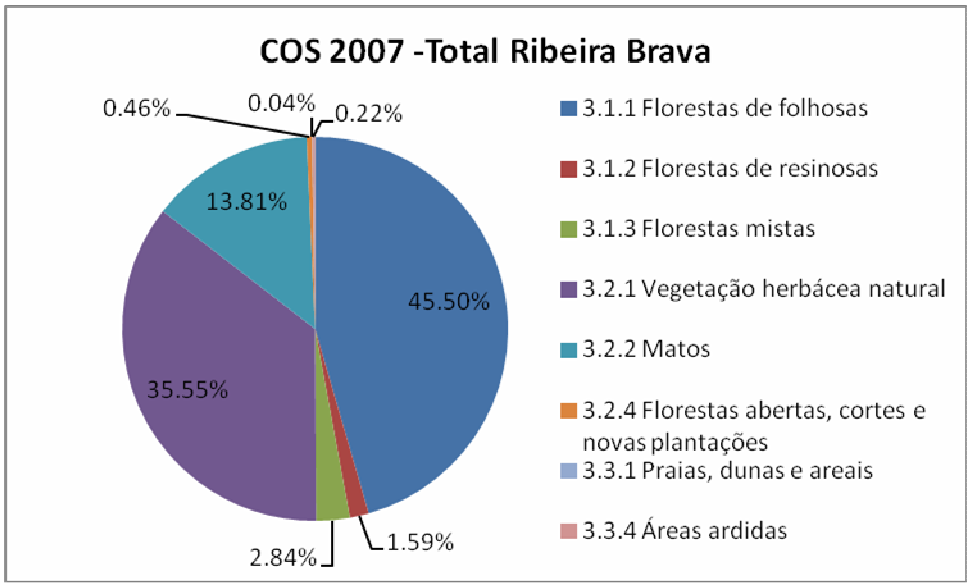

Figura 17 - Distribuição da área Florestal por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

Relativamente à ocupação florestal, existe no caso da Ribeira Brava (Figura 17) uma clara dominância de Florestas de Folhosas (45%), seguida de Vegetação Herbácea (35%) e por Matos (14%); as restantes classes têm uma ocupação residual (6%). No caso da área do Funchal (Figura 16) existe uma distribuição mais homogenénea entre as 3 classes florestais dominantes: Matos (29%), Vegetação Herbácea Natural e Florestas de Folhosas (24%); depois em menor proporção mas ainda com alguma relevância apresentam-se as classes de Florestas Resinosas (12%) e as Florestas Mistas (6%). Na Ribeira Brava a Floresta de Folhosas é dominada pela classe de Floresta Natural da Madeira (83%), seguida de longe por uma pequena proporção de Floresta de Eucalipto (10%). No Funchal a classe de Floresta Natural da Madeira não tem expressão (<1%), e a classe de Floresta de Folhosas é dominada pela Floresta de Eucalipto (57%) seguida da Floresta de Espécies Invasoras (37%). A classe de Floresta Resinosas que surge na área do Funchal encontra-se dividida quase em iguais proporções entre a Floresta de Pinheiro Bravo (56%) e Floresta de Outras Resinosas (44%).

3.2.7 Vegetação

A posição geográfica da Madeira relativamente às massas continentais da África, Europa e América, assim como em relação aos outros arquipélagos atlânticos condicionou a origem e evolução da flora indígena da Madeira. Esta é considerada, em parte, como sendo de origem reliquial representando vestígios da vegetação boreo-tropical que predominou na bacia

ocidental do mar de *Tethys*, durante o Terciário onde as crises ambientais[iii] ocorridas neste período e posteriormente durante o Plistocénico, teriam afectado a vegetação continental, conduzindo à sua extinção. Esta flora paleo-endémica que corresponde essencialmente a pteridófitos e às árvores dominantes[iv] nos meios florestais é acompanhada por outro tipo de flora, não reliquial: a flora neo-endémica, com origem em eventos de colonização a partir de *taxa* ancestrais mediterrânicos, eurossiberianos e americanos que resultaram dum longo processo evolutivo com forte radiação adaptativa[v]; a flora paleo-mediterrânica, comum à área circum-mediterrânica, e a flora neo-mediterrânica malacófila originada em ciclos de colonização mais recentes (Capelo *et al.*, 2004).

Na ilha da Madeira a vegetação encontra-se estratificada por andares relacionados com a variação das condições climáticas em que cada um possui uma vegetação natural potencial muito própria, que existiria sem intervenção do homem. Existem cinco andares bioclimáticos que variam de acordo com a altitude e exposição a norte ou a sul, permitindo relacionar a distribuição das comunidades vegetais com a temperatura e precipitação (Mesquita, Capelo & Sousa, 2004). Numa simplificação da distribuição proposta por Capelo e colaboradores (2004), a ocupação dos diferentes andares bioclimáticos pela vegetação climácica e primeira etapa de substituição poderá ser a seguinte:

i. No andar inframediterrânico, mais baixo e exclusivo da costa Sul, ocorrem as comunidades edafoxerófilas que ocupam as áreas costeiras, das quais se destacam o zambujal (*Mayteno umbellatae-Oleetum madeirensis* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Menezes de Sequeira & Rivas-Martinez 2000), microbosque dominado por *Olea europaea* L. subsp. *maderensis* Lowe[vi] e *Maytenus umbellata* (R. Br. In Buch) Mabb.[vii], e a respectiva etapa de substituição, a comunidade de figueira-do-inferno (*Euphorbietum piscatoriae* Sjögren *ex* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Menezesde Sequeira &

[iii] Mediterraneização do clima subtropical, com o deslocamento do período de chuvas do Verão para o Inverno, as alterações climáticas, com o arrefecimento e aumento global da secura, a par da crise da salinidade provocada pela alternância de condições lacustres ou terrestres e marinhas (Capelo *et al.,*2004).

[iv] Pertencentes aos géneros *Laurus, Ocotea, Apollonias, Clethra, Ilex, Picconia, Herberdenia*, entre outros (Capelo *et al.,*2004).

[v] Como é o caso de plantas lenhosas insulares (*island woodiness*) pertencentes a géneros predominantemente herbáceos em áreas continentais que terão evoluído consequência da falta de herbívoros e necessidade de obter vantagem competitiva na colonização, como *Isoplexis*, *Echium*, *Sonchus*, entre outros (Capelo *et al.,*2004).

[vi] Zambujeiro, oliveira-brava ou oliveira-da-rocha.

[vii] Buxo-da-rocha.

Rivas-Martinez 2000) dominada por *Euphorbia piscatoria* Aiton[viii] que também ocupa posição primária sobre as falésias;

ii. O andar termomediterrânico, localizado até os 700 metros na encosta Sul e 300 metros na vertente Norte, permite a ocorrência de bosque de oliveira-brava, nos biótopos edafoxerófilos de menor altitude da costa Sul, sendo as cotas mais elevadas e a vertente Norte, com maior disponibilidade hídrica, ocupadas por laurissilva do barbusano (*Semele androgynae-Apollonietum barbujanae* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Menezes de Sequeira & Rivas-Martinez 2000), uma floresta dominada por *Apollonias barbujana* (Cav.) Bornm[ix], *Laurus novocanariensis* Rivas Mart.,Lousã, Fern. Prieto, E. Dias, J.C: Costa & Aguiar[x], *Myrica faya* Aiton[xi] e *Ilex canariensis* Poir.[xii], onde abundam as lianas[xiii]. O matagal de substituição da faciação que ocupa as áreas mais baixas da costa Sul é dominado por *Hypericum canariensis* L.[xiv] (*Myrto communis-Hypericetum canariensis* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Menezes de Sequeira & Rivas-Martinez 2004) enquanto que em cotas superiores e na costa norte a substituição é feita pelo matagal de *Erica platycodon* subsp. *maderincola* (D.C. McClint.) Rivas Mart., Capelo, J. C. Costa, Lousã, Fontinha, R. Jardim & M. Seq.[xv], *Erica arborea* e *Myrica faya* onde abundam elementos xero-termófilos como, por exemplo, a *Globularia salicina* Lam.[xvi] (*Globulario salicinae-Ericetum arboreae* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Menezes de Sequeira & Rivas-Martinez 2000).

iii. Nos andares mesomediterrânico, localizado entre 700-1500 metros na face Sul e 300-600 a Norte, e o mesotemperado, localizado exclusivamente na zona Norte entre os 600 e 1300 metros, respectivamente com uma floresta dominada por *Ocotea foetens* (Aiton) Baill.[xvii], *Laurus novocanariensis* e *Clethra arborea* Aiton[xviii], denominada de laurissilva do til (*Clethro arboreae-Ocoteetum foetentis* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Menezes de Sequeira & Rivas-Martinez 2000). A orla e primeira etapa de substituição (*Vaccinio padifolii-Ericetum maderinicolae* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim,

---

[viii] Figueira-do-inferno.
[ix] Barbusano.
[x] Loureiro.
[xi] Faia ou Samouco.
[xii] Azevinho.
[xiii] Como, por exemplo, *Semele androgyna* (L.) Kunth (Alegra-campo), *Convolvulus massonii* Dietr. (corriola), entre outras.
[xiv] Hipericão.
[xv] Urze-das-vassouras ou urze durázia.
[xvi] Malfurada.
[xvii] Til.
[xviii] Folhado, folhadeiro.

Menezes de Sequeira & Rivas-Martinez 2000) é um urzal onde domina *Erica platycodon* subsp. *maderincola*, *Erica arborea* e *Vaccinum padifolium* J. E. Sm. ex Rees[xix] que assume também carácter de clímax infra-florestal nas zonas mais escarpadas.

iv. No andar supratemperado, situado acima dos 1500m na vertente Sul e 1300 na Norte, encontram-se várias comunidades onde se destaca o urzal de altitude (*Polysticho falcinelli-Ericetum arboreae* Capelo, Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Menezes de Sequeira & Rivas-Martinez 2000), comunidade dominada por *Erica arborea* e *Erica platycodon* subsp. *maderincola.* O bosque clímax original, bastante denso, seria co-dominado pelas espécies acima referidas e por *Juniperus cedrus* Webb et Berthel. subsp. *maderensis* (Menezes) Rivas Mart., Capelo, J.C. Costa, Lousã, Fontinha, Jardim & Sequeira.[xx], do qual existem apenas vestígios nos penhascos mais inacessíveis. Os bosques actuais, muito abertos, possuem uma vegetação de sub-bosque dominada por *Polysticum falcinellum*(Sw.) C. Presl e como primeira etapa de substituição uma comunidade dominada por *Erica platycodon* subsp. *maderincola.*

Os complexos de vegetação edafófila incluem as comunidades ripícolas edafo-higrófilas das cabeceiras das ribeiras *Rhamno glandulosi-Sambucetum lanceolati* Rivas-Martinez, Capelo, J.C. Costa, Jardim, Sequeira, Aguiar, Fontinha & Lousã 2003 (laurissilva ripícola do sabugueiro madeirense, onde dominam *Sambucus lanceolata* R.Br.[xxi] e *Rhamnus glandulosa* Aiton[xxii]), dos troços médios das ribeiras *Diplazio caudati-Perseetum indicae* Jardim, Sequeira, capelo, J.C. Costa, Aguiar e Lousã 2003 (laurissilva ripícola do vinhático onde dominam *Persea indica* (L.) K. Spreng.[xxiii] *e Laurus novocanariensis*) e troços finais das ribeiras e quebradas torrenciais *Scrophulario hirtae-salicetum canariensis* Capelo, J.C. Costa, Lousã, Fontinha, Jardim, Sequeira & Rivas-Martinez 2000 (seixal dominado pelo *Salix canariensis* CH. P. Sm. ex Link[xxiv]).

A análise da vegetação actual, com base na Carta de Ocupação do Solo 2007, permite evidenciar o elevado grau de perturbação da vegetação natural nas áreas em estudo. Esta condição está desde logo determinada pela conjugação de vários aspectos: a) elevada representatividade de povoamentos arbóreos dominados por espécies exóticas, ocupando 32% da área das bacias hidrográficas em estudo; b) domínio significativo de formações arbustivas, representando o segundo tipo de vegetação mais comum no conjunto do território

---

[xix] Uveira ou uveira-da-serra.
[xx] Cedro da Madeira
[xxi] Sabugueiro
[xxii] Sanguinho
[xxiii] Vinhático
[xxiv] Seixeiro

em análise (29%); c) predomínio significativo de formações herbáceas nos sectores de cabeceiras das bacias hidrográficas (18%); d) presença de floresta natural reduzida a pequenos fragmentos, os quais ocupam apenas 3% da área, o que representa um profundo afastamento entre as condições actuais e potencias ao nível da vegetação natural.

Existiu uma preocupação que remonta ao séc. XV com a desarborização e a sua relação com a ocorrência de aluviões.

A arborização das serras da Madeira só se tornou efectiva na segunda metade do século XX. Malgrado as recomendações de uma grande maioria dos autores as espécies utilizadas foram maioritariamente exóticas em detrimento das espécies nativas em parte por falta de conhecimento da auto-ecologia e das suas potencialidades enquanto essências florestais. Muitas das espécies exóticas transformaram-se em invasoras capazes de modificar características do ecossistema.

3.3 MONITORIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

A precipitação é um dos factores críticos no processo de formação das aluviões e cheias repentinas pelo que a recolha de dados referentes à precipitação é da maior importância.

A ilha da Madeira possui actualmente três redes de monitorização da precipitação com interesse e representatividade significativa e que são geridas por entidades distintas. Estas redes possuem vários postos udométricos e completam-se nalguns aspectos mas, no seu conjunto, conduzem, simultaneamente, a situações de redundância de dados e de lacunas de informação.

Esta situação afigura-se indesejável pelo potencial desperdício de recursos que propicia e pelas dificuldades que cria na recolha, organização e análise dos dados provenientes de três entidades que adoptaram equipamentos, plataformas tecnológicas e procedimentos distintos. Acresce que no passado existiram situações de mudanças da localização de postos cujo registo se perdeu, o que num território como a Ilha da Madeira com uma variação espacial significativa da precipitação coloca graves problemas de consistência dos registos da precipitação. Neste contexto, apesar da grande disponibilidade demonstrada pelas entidades responsáveis pelas redes foi necessário investir tempo e recursos na preparação e validação dos dados de base de precipitação utilizados no estudo de forma a compatibilizar e validar esses dados.

Os postos de monitorização da precipitação ou postos udométricos da Ilha da Madeira mais antigos foram instalados pela antiga Junta Geral, na sua maioria nas décadas de 1960 e 1970, e

medem valores diários. A sua exploração foi assumida mais tarde pela IGA que assim dispõe de uma rede que cobre toda a ilha com postos que possuem registos de precipitação diária com mais de 15 ou 20 anos. Esta rede foi mais tarde completada com alguns udógrafos automáticos, analógicos e digitais, que medem a precipitação em intervalos horários ou sub-horários.

O posto de monitorização mais antigo é posto do Funchal. Foi instalado em 1854 no Forte de S. Lourenço, tendo em 1947 sido deslocado para o observatório do IM no Lazareto. A partir de 1980 este posto passou a medir a precipitação em intervalos horários. A rede do IM inclui ainda outros postos mais recentes que medem a precipitação num número reduzido de locais em intervalos diários ou sub-diários.

O LREC gere a rede mais recente que cobre a totalidade da ilha com udógrafos associados a dataloggers digitais que na sua maioria medem a precipitação em intervalos de 10 minutos.

A lista completa das estações integradas no estudo é apresentada no Quadro 6. A Figura 18 apresenta o mapa das estações de monitorização, apresentado-se na Figura 19 um plano mais próximo da zona de estudo e respectivas estações de monitorização da área circundante.

Quadro 6 - Estações de monitorização existentes na Ilha da Madeira

Acronimo	Nome	Entid.	Tipo	Interv Monit.	Altitude (m)	Concelho	Início	Fim	Estado	Observações
A.Madeira_EMA	Achada da Madeira - autom	IGA	EMA	1 hora	521	S.Vicente	2006	---	Activa	
A.Madeira	Achada da Madeira - udog	IGA	Udog	1 hora	521	S.Vicente	12-04-1990	2005/2006	Extinta	
Ach.Til	Achada do Til	LREC	Autom	10 min	300	S.Vicente	2004-2005		Activa	
Alegria	Alegria (ETA)	IGA	Autom	5 min	611	Funchal	2004	---	Activa	
Areeiro-IGA	Areeiro – IGA	IGA	Udog	1 hora	1590	Funchal	26-11-1997	---	Activa	
Areeiro-IGAa	Areeiro - IGA autom	IGA	Autom	5 min	1610	Funchal	2004	---	Activa	
Areeiro-LREC	Areeiro (Achada Grande)-LREC	LREC	Autom	10 min	1590	Funchal	2004 - 2005		Activa	
Areeiro-IM	Areeiro-IM (A.Grande)-Conv	IM	Udom	Diário	1610	Funchal			Extinta	
Areeiro-IM	Areeiro-IM (A.Grande)-EMAII	IM	Autom	10 min	1510	Funchal	1998		Activa	
B.Cana-IGA_EMA	Bica da Cana – IGA - EMA	IGA	EMA	5 min	1585	S.Vicente	2004	---	Activa	
B.Cana-IGA	Bica da Cana - IGA - Udom	IGA	udog	1 hora	1585	S.Vicente	27-05-1996	---	Activa	
B.Cana-IM	Bica da Cana – IM	IM	Udom	Diário	1560	S.Vicente	01-01-1961		Activa	
B.Cana-LREC	Bica da cana – LREC	LREC	Autom	1 hora	1600	S.Vicente	Out.2005		Activa	
B.Morte	Boa Morte	LREC	Autom	10 min	540	R.Brava	2004-2005		Activa	
B.Sucesso (JB)	Bom Sucesso (J. Botânico)	JG	Udom	Diário		Funchal			Extinta	
C.Freiras (C.Augusta)	Curral das Freiras (C. da Augusta)	IGA	Udog	diário	771	C.Lobos	2005	2006	Extinta	
C.Freiras (ETA)	Curral das Freiras (ETA)	IGA	Udog	1 hora	743	C.Lobos	2006	---	Activa	
C.Freiras (Igreja)	Curral das Freiras (Igreja)	JG	Udom	Diário		C.Lobos			Extinta	
C.Freiras (L.Branca)	Curral das Freiras (Lapa Branca)	IGA	Udom	Diário	636	C.Lobos	1986/87	1996/97	Extinta	
C.Freiras (Poiso)	Curral das Freiras (Poiso)	IGA	Udog	1 hora		C.Lobos	01-10-1986	31-12-2004	Extinta	
C.Freiras-LREC	Curral das Freiras-LREC	LREC	Autom	10 min	800	C.Lobos	2004-2005		Activa	
Camacha	Camacha	LREC	Autom	10 min	675	Santa Cruz	01-10-1997		Activa	

Canhas	Canhas	JG	Udom	Diário		P.Sol	1943/44	1974/75	Extinta	
Caniçal-IM	Caniçal (IM)	IM	EMA	1 hora		Machico			Activa	
Caniçal	Caniçal	JG	Udom	Diário		Machico	01-01-1953	30-11-1998	Extinta	
Caramujo	Caramujo	JG	Udom	Diário	1260	S.Vicente	01-02-1941	30-06-1969	Extinta	
Cascalho –SJ	Cascalho – S. Jorge	JG	Udom	Diário	630	S.Jorge	01-03-1968	30-04-1982	Extinta	
Ch.Feiteiras	Chão das Feiteiras - IGA	IGA	Udog	1 hora	1170	Machico	01-01-1989	----	Activa	
Ch.Feiteiras	Chão das Feiteiras - LREC	LREC	Autom	10 min	1180	Machico	2007-2008		Activa	Falhas em Fev 2010
Ch.Louros	Chão dos Louros	IGA	Udog	1 hora	900	S.Vicente	01-10-1986	---	Activa	
Ch.Ribeira	Chão da Ribeira	IGA	Udog	1 hora	482	P.Moniz	01-10-1990	31-05-1995	Extinta	
Cova Grande	Cova Grande	IGA	Autom	5 min		Machico			Activa	
Covão	Covão (ETA)	IGA	udom	Diário	510	C.Lobos	01-10-1997	---	Activa	
Encum.-EEM	Encumeada (EEM)	IGA	Udom	Diário	1010	S.Vicente	01-10-1997	----	Activa	
Encum.-IGA	Encumeada - IGA autom	IGA	Autom	5 min	854	R. Brava	2004	---	Activa	
Encum.-LREC	Encumeada – LREC	LREC	Autom	1 hora	1017	S.Vicente	Jul.2006		Activa	Falha técnica a 20Fev.
Encum-JG	Encumeada de S.Vicente	JG	Udom	Diário		S.Vicente			Extinta	
Estanquinhos	Estanquinhos	LREC	Autom	10 min	1590	Pta do Sol	2004-2005		Activa	
F.Nogueira - IGA	Fajã da Nogueira - IGA	IGA	Autom	10 min		Santana			Inactiva	Problemas em Fev. 2010
F.Nogueira - LREC	Fajã da Nogueira - LREC	LREC	Autom	10 min	629	Santana	2007-2008		Activa	
F.Nogueira (C.Meio)	Fajã da Nogueira (Cabeço do Meio)	IGA	udom	Diário	615	Santana	01-10-1997	---	Activa	
F.Nogueira (L.Furão)	Fajã da Nogueira (Lombo Furão)	IGA	Udog	Diário	994	Santana	01-12-1986	2006	Extinta	
F.Nogueira (L.Furão)	Fajã da Nogueira (Lombo Furão)	IGA	Autom	5 mint	994	Santana	2006	---	Activa	
Fajã da Ovelha	Fajã da Ovelha	LREC	Autom	10 min	635	Calheta	2004-2005		Activa	
F.Penedo - IGA	Fajã do Penedo - IGA	IGA	Udom	Diário	637	S.Vicente	14-10-1997	-	Activa	
F.Penedo - LREC	Fajã do Penedo - LREC	LREC	Autom	10 min	637	S.Vicente	2004-2005		Activa	
Fanal	Fanal	LREC	Autom	10 min	1170	P.Moniz	2004-2005		Activa	
F Bispo	Fonte do Bispo	IGA	Autom	5 min	1245	P.Moniz			Activa	
Funchal-Lido	Funchal – Lido	IM	EMA	1 hora	25	Funchal			Activa	
Funchal	Funchal - Observatório	IM	Autom	1 hora	60	Funchal	1998		Activa	

Funchal-EMA	Funchal - Observatório EMA	IM	EMA	10 min	58	Funchal	01-10-1999		Activa	
J.Serra	Jardim da Serra (Esc. Cavaleiros)	IGA	Udom	Diário	870	C.Lobos	01-01-2004	----	Activa	
L. Palheiros	Lombo dos Palheiros	LREC	Autom	10 min	212	Santana	2007-2008		Activa	
Loural	Loural	IGA	Udom	Diário	307	S.Vicente	1944/45	74/75	Extinta	
LREC	LREC (São Martinho)	LREC	Autom	10 min	250	Funchal	2004-2005		Activa	Falha técnica a 20Fev.
LREC-EMA	LREC-EMAS (São Martinho)	LREC	EMA	1 hora	250	Funchal	Jul.2006		Activa	
L.Baixo	Lugar de Baixo	IM	Udom	Diário	15	Pta do Sol	1940/41		Activa	
L.Baixo-EMA	Lugar de Baixo - EMAII	IM	EMA	10 min	48	Ptado Sol	1998		Activa	
Machico (ETA) LREC	Machico (ETA) LREC	LREC	Autom	10 min	160	Machico				
Machico (ETA) IGA	Machico (ETA) IGA	IGA	Udom	Diário	160	Machico	01-10-1997	-	Activa	
Machico (PF)	Machico (Posto Florestal)	LREC	EMA	1 hora	170	Machico	2004-2005		Activa	
Massapez	Massapez	JG	Udom	Diário		Machico	12-03-1941	-	Activa	
Meia Légua	Meia Légua	LREC	Autom	10 min	300	Calheta	2004-2005		Activa	
M.Serra	Meia Serra – Valor Ambiente	LREC	Autom	10 min	1100	Sta Cruz			Activa	
Meio Paúl	Meio Paúl	LREC	Autom	10 min	494	R.Brava	2004-2005	2009-2010	Inactiva	
M.Pereiro	Montado do Pereiro	JG	Udom	Diário	1260	Funchal			Extinta	
Ovil	Ovil	IGA	Autom	5 min	1014	Sta Cruz	2004	---	Activa	
P.S. Lourenço	P.S.Lourenço (C.Sardinha)	LREC	Autom	10 min	50	Machico	2004-2005	2009-2010	Inactiva	Avariado
PEF	Parque Ecológico Funchal	LREC	Autom	1 hora	1300	Funchal	Out.2006		Activa	
P.Urze	Pico da Urze (Jungle Rain)	LREC	Autom	10 min	1365	Calheta	2004-2005		Activa	
P.Pedras	Pico das pedras (Posto Florestal)	LREC	Autom	10 min	1365	Calheta	2004-2005		Activa	
P.Verde	Pico verde (Calheta)	LREC	EMA	1 hora	1020	Calheta	Aug.2005		Activa	
P.Fora	Pinheiro de Fora	LREC	Autom	10 min	750	Calheta	2007-2008		Activa	
Poiso	Poiso	IM	Udom	Diário		Funchal			Extinta	
Poiso	Poiso (Posto Florestal)	IGA	udog	1 hora	1360	Funchal	59/60	---	Activa	
P. Pargo (Autom)	Ponta do Pargo (Autom)	IGA	Tot.Sem	Semana		Calheta	01-10-1949	-	Activa	
P. Pargo (Farol)	Ponta do Pargo (Farol)	IM	Autom	10 min		Calheta			Activa	
P.Pargo	Ponta do Pargo (Qta Dr Vasco)	IM	Udom	Diário		Calheta			Extinta	

P.Sol	Ponta do Sol	LREC	Autom	10 min	130	Pta do Sol	2004-2005		Activa	
P.Moniz (EZ)	Porto Moniz (Estação Zootécnica)	LREC	EMA	1 hora	130	P.Moniz	Aug.2005			
P.Moniz (ETA)	Porto Moniz (ETA)	IGA	Udom	Diário	411	P.Moniz	97/98	01/02	Extinta	
P.Moniz (FG)	Porto Moniz (F.Gado)	JG	Udom	Diário		P. Moniz			Extinta	
Prazeres	Prazeres	LREC	Autom	10 min	632	Calheta	2004-2005		Activa	
Queimadas	Queimadas	JG	Udom	Diário	860	Santana			Extinta	
Rabaçal	Rabaçal	JG	Udom	Diário		Calheta			Extinta	
R.Brava	Ribeira Brava	JG	Udom	Diário	10	R.Brava			Extinta	
R.Brava (ETA)	Ribeira Brava (ETA)	IGA	Udom	Diário	543	Rib. Brava	05-04-1997	---	Activa	
R.Alecrim (EMA)	Ribeira do Alecrim (EMA)	IGA	EMA	5 min	1293	Calheta	2004	---	Activa	Avariada a 20 de Fevereiro
R.Alecrim	Ribeira do Alecrim udog	IGA	Udog	1 hora	1293	Calheta	87/88	---	Activa	
R.Frio	Ribeiro Frio	JG	Udom	Diário		Santana			Extinta	
Rosario	Rosário	IGA	Udom	1 hora	357	S. Vicente	01-04-1987	31-12-1998	Extinta	
Rosário	Rosário – Fajã do Rodrigues	IGA	Autom	5 min	575	S. Vicente	2004	---	Activa	
S.Vicente (PF)	S.Vicente (PF)	LREC	Autom	1 hora		S.Vincente				
Sanatório	Sanatório	JG	Udom	Diário	380	Funchal			Extinta	
S.Catarina	Santa Catarina	LREC	Autom	10 min	120	S.Vicente	2004-2005		Activa	
S.Quiteria	Santa Quitéria (ETA)	IGA	Udom	Diário	320	Funchal	01-10-1997	---	Activa	
S.António	Santo António (Trapiche)	JG	Udom		525	Funchal			Extinta	
S.Serra-Lam.	Santo da Serra (Lamaceiros)	IGA	Autom	5 min	784	Machico	2004	---	Activa	
S.Serra	Santo da Serra (P.F.Casa Velha)	IGA	Udog	1 hora	920	Machico	01-12-1936	---	Activa	
S.Goncalo	São Gonçalo	LREC	Autom	10 min	220	Funchal	2004-2005		Activa	
S.Jorge	São Jorge	IM	UDOG	1 hora	49	Santa Cruz			Activa	
S.Jorge	São Jorge	IM	UDOM	Diário	257	Santana			Activa	
S.Jorge (ETA) a	São Jorge (ETA) – Autom	IM	Autom	10 min	257	Santana	1998		Activa	
S.Jorge (ETA)	São Jorge (ETA) – Udom	IGA	Autom	5 min	500	Santana			Activa	
São Jorge (Farol)	São Jorge (Farol)	LREC	Autom	10 min	500	Santana	01-12-1997	-	Activa	

Seixal	Seixal	LREC	Autom	10 min	270	Santana	2004-2005		Activa	
S.Agua	Serra de Água	IGA	Udom	Diário	586	R. Brava	86/87	97/98	Extinta	
Sítio da Relva	Sítio da Relva	LREC	Autom	10 min	70	P.Moniz	2004-2005		Inactiva	Avariado
Trapiche	Trapiche – LREC	LREC	Autom	10 min	590	Funchal	2004-2005		Activa	
Trapiche-IGAa	Trapiche (Sto António)	IGA	Autom	5 mint	507	Funchal	2004	2006	Extinta	
Trapiche-IGA	Trapiche (Sto António) -udog –IGA	IGA	Udog	1 hora	507	Funchal	04-08-2006	-	Activa	
Trompica	Trompica (Posto Florestal)	LREC	Autom	10 min	1188	C. Lobos	2004-2005		Activa	
V.Lapa	Vale da Lapa	IGA	Udom	Diário	---	Santana	67/68	75/76	Extinta	
V.Paraiso	Vale Paraiso	IGA	Udom	Diário	730	Sra Cruz	01-06-1997	----	Activa	

LEGENDA:
Autom – Udografo com registo digital
EMA – Estação de monitorização ambiental que inclui um udógrafo com registo digital
Udom - Udómetro totalizador diário
Udog – Udógrafo com registo em papel

Figura 18 - Distribuição espacial das estações de monitorização existentes na Madeira.

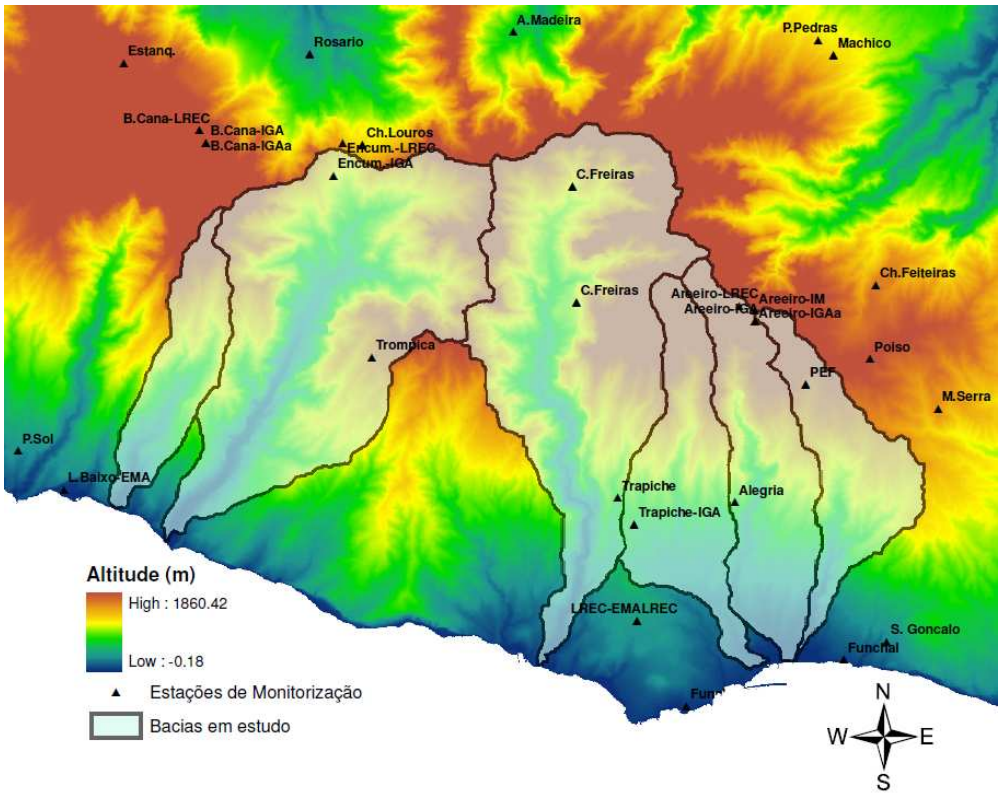

Figura 19 - Pormenor da distribuição espacial das estações de monitorização na zona de estudo e áreas próximas.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DE PRECIPITAÇÕES INTENSAS

3.4.1 Introdução

No âmbito do presente estudo, procedeu-se à caracterização de precipitações intensas na Ilha da Madeira tendo em vista a posterior averiguação da excepcionalidade das precipitações que ocorreram a 20 de Fevereiro de 2010, bem como o estabelecimento de critérios de projecto a aplicar no dimensionamento de obras hidráulicas em que intervenham precipitações intensas.

Os elementos de base utilizados na investigação que se apresenta referem-se a registos diários de precipitação desde o ano hidrológico (que começa no dia 1 de Outubro) de 1935/36 até ao presente. Importa mencionar que o registo de precipitação num determinado dia se refere ao período de 24 h compreendido entre as 9:00 h do dia anterior e as 9:00 h do dia ao qual é atribuído.

A partir desses registos identificaram-se os postos udométricos situados nas regiões do Funchal, da Ribeira Brava, e da Tabua ou tão próximos quanto possível dessas regiões. Uma vez que o tratamento em vista utiliza fundamentalmente ferramentas de análise estatística,

seleccionaram-se, de entre os anteriores postos, os dispondo de registos em 10 ou mais anos, num total de 26 postos udométricos.

Adicionalmente, foram utilizados registos de precipitações horárias e em 10 minutos no posto udométrico do Funchal – Observatório, facultados pelo IM - Instituto de Meteorologia, IP. O período coberto pelos registos decorre entre de 1 de Janeiro de 1980 e 31 de Dezembro de 1995, para a precipitação horária, e entre 1 de Janeiro de 1996 e 30 de Junho de 2010, para a precipitação de 10 minutos.

A partir das séries de precipitação diária nos postos udométricos, foram obtidas, por interpolação espacial baseada na krigagem ordinária (ver item 4.3.2), as superfícies de precipitação diária na zona em que se inserem as bacias hidrográficas que são objecto de estudo. Na posse das superfícies de precipitação diária procedeu-se ao cálculo da série de precipitações diárias em cada uma das bacias e sub bacias identificadas na Figura 20.

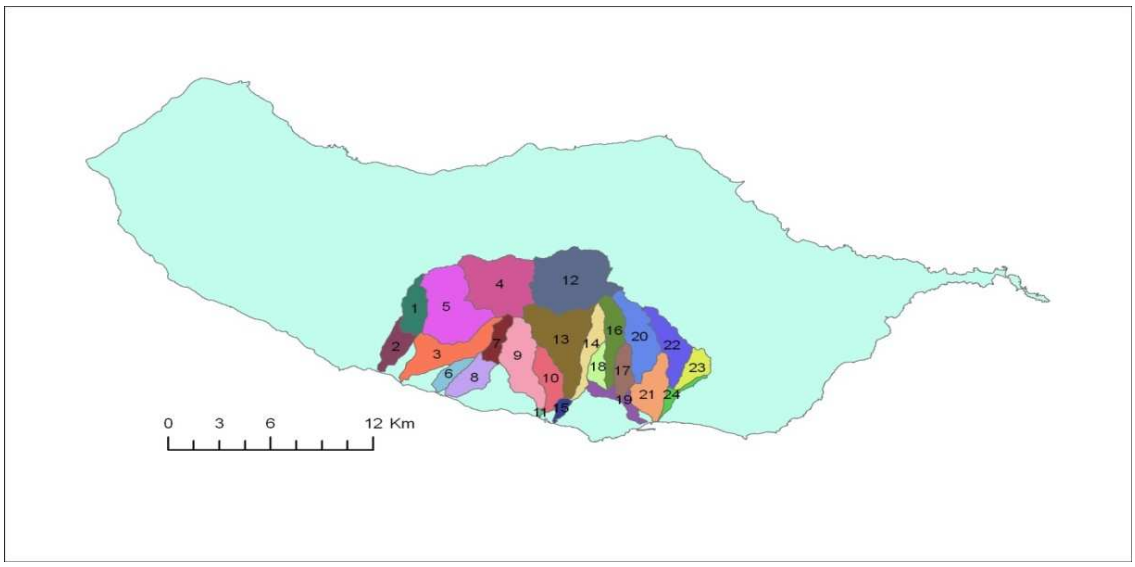

Figura 20 - Definição esquemáticas das bacias e sub bacias para as quais foram obtidas séries de precipitações diárias.

3.4.2 Precipitações máximas anuais

Com base nos anteriores elementos constituíram-se, em cada um dos vinte e seis postos, as séries de precipitações máximas anuais em períodos consecutivos de 1 a 6 dias.

A extensa e detalhada análise dos registos nos postos seleccionados revelou que, em consequência da exclusão dos anos com falhas impossibilitando a determinação de precipitações máximas anuais, resultaram algumas amostras com dimensão inferior a 10 anos que não foram consideradas no prosseguimento no estudo. Obtiveram-se, assim, 20 amostras de precipitações máximas anuais em 1 a 6 dias, com dimensões variáveis entre 10 anos (ETA

da Ribeira Brava) e 70 anos (Funchal - Observatório). Para essas amostras estimaram-se algumas das respectivas características, designadamente, dimensões, valores máximos e mínimos e, no âmbito das características estatísticas, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação e de assimetria.

Relativamente ao posto do Funchal, optou-se por prosseguir o estudo na dupla perspectiva de inclusão e de exclusão do ano hidrológico de 2009/2010, no entendimento de que os registos disponíveis para os primeiros nove meses desse ano (de Outubro a Junho) permitiriam caracterizar as precipitações máximas anuais. Como antes mencionado, para o posto em menção, obtiveram-se do IM as precipitações horárias, entre 1 de Janeiro de 1980 e 31 de Dezembro de 1995, e em 10 minutos, a partir de 1 de Janeiro de 1996. Com base nos anteriores registos, no pressuposto de período de amostragem das 9:00 às 9:00 h e para além das amostras referentes a durações entre 1 e 6 dias, constituíram-se, a partir de 1980/81, as amostras de precipitações máximas anuais com durações de 1, 3, 6, 12 e 18 h, e calcularam-se as correspondentes características estatísticas. A partir dos registos sub horários nesse posto, constituíram-se, por fim, as amostras de precipitações máximas anuais com as durações de 10 e de 30 minutos, também para a "janela" de amostragem das 9:00 às 9:00 h.

Foram também obtidas as séries de precipitações máximas com duração entre 1 e 6 dias, em cada uma das 24 sub bacias a que se refere a Figura 20.

3.4.3 Análise de tendências

Com o intuito de despistar eventuais indícios, quer de menor qualidade dos registos, quer relacionados com tendências, procedeu-se a uma análise muito sumária e exemplificativa, baseada na simples representação gráfica de algumas das amostras de precipitações máximas anuais com durações entre 1 a 6 dias. A Figura 21 referente às amostras de precipitações máximas anuais em 1 e 2 dias no posto do Areeiro exemplifica os resultados obtidos. Tanto naquele posto, como nos demais postos analisados, não se denotaram quebras de homogeneidade que sugerissem tendências evidentes, designadamente, no sentido do aumento persistente das precipitações máximas anuais, sendo que, inclusivamente, tais postos aparentam exibir precipitações em anos mais recentes inferiores às registadas em períodos antecedentes.

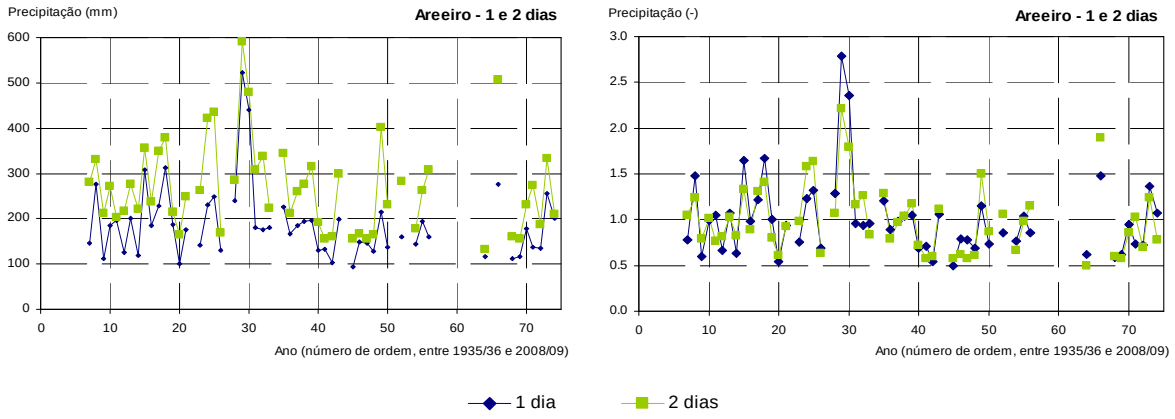

Figura 21 - Posto do Areeiro. Representação esquemática das amostras de precipitações máximas anuais em 1 e 2 dias (à esquerda), e das mesmas amostras expressas em termos adimensionais, mediante divisão pelas respectivas medias.

Concluiu-se, assim, pela qualidade adequada das amostras, sendo que, adicionalmente, não se afigura estar perante uma situação de agravamento/aumento, em anos mais recentes, das precipitações intensas.

3.4.4 Análise estatística e estimativas de precipitações máximas anuais em postos udométricos e em bacias hidrográficas

Tendo em conta os coeficientes de assimetria da generalidade das amostras de precipitações máximas anuais com diferentes durações, admitiu-se, no tratamento estatístico dessas amostras, a aplicabilidade das leis de probabilidade de Gumbel e de Pearson III. A apreciação do ajustamento dessas leis utilizou a representação gráfica das correspondentes amostras e das duas funções de distribuição teóricas complementada pela aplicação do teste do Qui-Quadrado às leis que, de acordo com aquela representação, se afiguravam como exibindo melhor ajustamento. A Figura 22 exemplifica o ajuste gráfico de leis no posto do Areeiro.

Areeiro

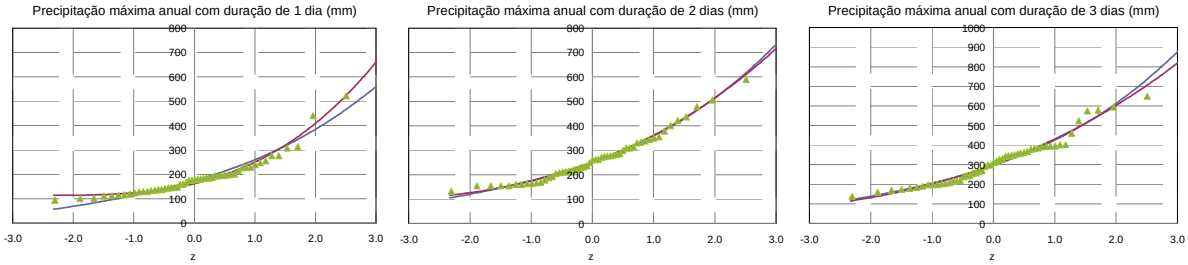

Figura 22 - Precipitações máximas anuais em 1 a 3 dias no posto do Areeiro. Ajuste das leis de Gumbel e Pearson III.

Optou-se por prosseguir a análise adoptando a lei de Pearson III como sendo a que exibe globalmente melhor ajustamento às amostras de precipitações máximas anuais.

Por aplicação de tal lei estimaram-se, seguidamente e em cada um dos 20 postos dispondo de amostras de precipitações máximas com dimensão superior a 10 anos, as precipitações máximas anuais com períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos e com durações entre 1 e 6 dias. Adicionalmente obtiveram-se, para o posto do Funchal, as precipitações máximas anuais com aqueles períodos de retorno e com durações entre e 1 e 18 h e entre 10 e 30 minutos. Os resultados obtidos estão exemplificados no Quadro 7 (para oito dos vinte postos udométricos), no Quadro 8 e no Quadro 9 (relativamente às precipitações com durações inferiores ao dia no Funchal).

Quadro 7 - Estimativas das precipitações máximas anuais com diferentes durações entre 1 e 6 dias e períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos, em oito dos postos udométricos analisados.

Posto	Duração (dias)	Amostra de precipitações máximas anuais						Precipitações máximas anuais				
		Dimen-são	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Média (mm)	Desvio--padrão (mm)	Coef. assimetria (-)	T=10 anos (mm)	T=20 anos (mm)	T=50 anos (mm)	T=100 anos (mm)	T=1000 anos (mm)
Areeiro	1	53	522.3	94.0	187.4	79.2	2.177	287.1	343.5	420.3	480.0	687.7
	2		589.8	131.7	267.3	99.1	1.104	399.4	454.4	523.5	574.2	736.6
	3		649.9	138.7	315.8	119.2	0.882	474.8	536.5	612.8	667.7	840.4
	4		717.7	149.9	363.5	134.7	0.836	543.1	611.8	696.3	757.0	946.8
	5		788.2	156.9	399.7	148.3	0.754	597.2	670.7	760.5	824.6	1023.4
	6		856.0	157.5	426.1	159.8	0.684	638.6	715.9	809.6	876.2	1081.2
Bica da Cana	1	43	259.6	57.6	141.5	40.8	0.671	195.7	215.3	239.1	256.0	307.8
	2		438.6	63.0	209.1	73.7	1.296	307.2	350.4	405.6	446.5	579.9
	3		522.4	63.0	249.8	91.5	1.099	371.9	422.5	486.3	533.0	682.6
	4		564.5	72.4	290.2	102.3	0.713	426.3	476.3	537.1	580.4	714.0
	5		621.9	91.9	319.8	110.2	0.659	466.3	519.1	583.0	628.4	767.6
	6		672.1	91.9	345.8	123.8	0.736	510.6	571.6	646.0	699.1	863.2
Camacha	1	32	176.7	49.0	113.3	34.2	-0.196	156.4	167.7	180.0	188.0	209.7
	2		248.2	67.0	156.6	49.7	0.012	220.4	238.6	259.1	272.8	311.2
	3		262.0	87.7	176.0	50.5	0.038	240.8	259.5	280.7	294.8	334.7
	4		287.4	113.2	202.3	51.9	-0.145	268.0	285.5	304.9	317.6	352.2
	5		318.1	117.6	215.8	55.1	-0.006	286.3	306.2	328.6	343.6	385.4
	6		321.7	118.3	229.1	57.5	-0.188	301.5	320.4	341.2	354.8	391.5
Funchal sem o ano hidrológico 2009/10	1	70	115.6	19.0	59.2	23.0	0.591	89.7	100.4	113.3	122.5	150.2
	2		159.3	26.9	79.1	29.9	0.688	118.8	133.3	150.9	163.4	201.9
	3		190.6	28.0	93.1	35.7	0.705	140.5	157.9	179.0	194.0	240.4
	4		242.6	28.0	102.1	38.6	0.944	153.6	173.9	199.2	217.6	275.5
	5		246.2	28.0	109.2	39.1	0.735	161.3	180.6	204.0	220.8	272.6
	6		251.1	36.4	113.9	39.0	0.668	165.8	184.6	207.3	223.4	273.0
Funchal com o ano hidrológico 2009/10	1	71	115.6	19.0	59.9	23.6	0.595	91.3	102.3	115.7	125.1	153.7
	2		159.3	26.9	80.1	30.9	0.704	121.3	136.3	154.6	167.7	207.8
	3		190.6	28.0	94.1	36.4	0.677	142.4	160.0	181.3	196.4	242.9
	4		242.6	28.0	103.5	40.0	0.941	156.9	178.0	204.2	223.2	283.1
	5		246.2	28.0	110.6	40.4	0.744	164.4	184.4	208.8	226.1	280.0
	6		251.1	36.4	115.4	40.6	0.711	169.4	189.3	213.4	230.6	283.6
Lugar de Baixo	1	56	152.5	19.8	53.2	22.7	1.940	82.4	97.9	118.6	134.5	189.0
	2		222.0	27.0	72.1	29.9	2.400	108.9	131.0	161.5	185.5	270.2
	3		244.5	35.2	82.1	33.7	2.236	124.2	148.4	181.5	207.4	297.5
	4		247.7	36.8	92.2	36.5	1.723	139.8	163.5	194.8	218.6	298.7
	5		247.7	38.0	100.4	37.8	1.293	150.7	172.8	201.1	222.1	290.4
	6		247.7	41.3	105.7	38.4	1.193	156.9	178.8	206.5	226.9	293.0
Montado do Pereiro	1	37	255.6	60.2	147.8	44.7	0.213	206.0	224.0	244.7	258.8	299.8
	2		357.2	99.2	209.7	62.0	0.394	291.2	318.1	349.7	371.6	436.9
	3		370.1	120.8	242.3	65.9	0.430	329.1	358.0	392.2	416.1	487.2
	4		489.3	140.5	280.4	80.0	0.550	386.4	423.3	467.4	498.4	592.4
	5		529.4	177.3	313.2	83.7	0.490	423.7	461.4	506.2	537.5	631.9
	6		536.4	184.2	333.0	86.5	0.355	446.6	483.5	526.7	556.6	645.1
Poiso (Posto Florestal)	1	37	230.3	64.5	142.5	40.5	0.506	196.0	214.4	236.3	251.6	297.8
	2		368.8	96.6	205.3	63.0	0.539	288.7	317.6	352.2	376.4	449.9
	3		415.3	112.0	238.5	71.7	0.165	331.5	359.6	391.9	413.9	477.0
	4		451.8	112.0	270.3	83.1	0.056	377.3	408.3	443.5	467.0	533.8
	5		682.1	133.1	302.6	105.2	1.188	442.9	502.7	578.5	634.3	814.6
	6		688.6	148.1	321.4	105.8	0.957	462.7	518.8	588.5	639.1	799.1
Ribeira Brava	1	30	134.0	29.6	59.5	22.3	1.423	89.0	102.5	119.9	132.9	175.7
	2		144.5	37.4	79.1	26.0	1.063	113.9	128.1	146.0	159.1	200.9
	3		163.8	39.2	89.5	29.9	0.826	129.4	144.5	163.2	176.6	218.4
	4		193.6	39.2	103.5	36.2	0.961	151.9	171.1	195.0	212.4	267.3
	5		197.9	39.2	112.5	37.2	0.655	161.8	179.6	201.1	216.4	263.2
	6		201.6	44.3	119.0	39.2	0.459	170.7	188.1	208.8	223.2	266.4

Quadro 8 - Posto udométrico Funchal - Observatório. Estimativas das precipitações máximas anuais com durações entre 10 e 30 minutos e períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos.

	Duração (minutos)	Amostra de precipitações máximas anuais						Precipitações máximas anuais				
		Dimen-são	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Média (mm)	Desvio--padrão (mm)	Coef. assimetria (-)	T=10 anos (mm)	T=20 anos (mm)	T=50 anos (mm)	T=100 anos (mm)	T=1000 anos (mm)
Sem o ano 2009/2010	10	13	14.0	6.5	10.4	2.5	-0.213	13.6	14.4	15.2	15.8	17.4
	30		36.1	9.4	19.9	7.4	1.060	29.8	33.8	38.9	42.6	54.5
Com o ano 2009/2010	10	14	14.0	6.5	10.5	2.4	-0.301	13.5	14.2	15.0	15.5	16.9
	30		36.1	9.4	20.7	7.8	0.763	31.0	34.9	39.6	43.0	53.5

Quadro 9 - Posto udométrico Funchal - Observatório. Estimativas das precipitações máximas anuais com durações entre 1 e 18 horas e períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos.

	Duração (horas)	Amostra de precipitações máximas anuais						Precipitações máximas anuais				
		Dimen-são	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Média (mm)	Desvio--padrão (mm)	Coef. assimetria (-)	T=10 anos (mm)	T=20 anos (mm)	T=50 anos (mm)	T=100 anos (mm)	T=1000 anos (mm)
Sem o ano 2009/2010	1	28	41.4	10.9	22.5	8.2	0.446	33.3	36.9	41.2	44.2	53.1
	3		70.1	15.3	38.8	12.2	0.434	54.8	60.2	66.5	71.0	84.2
	6		92.6	15.4	47.9	16.4	0.618	69.7	77.4	86.7	93.3	113.5
	12		97.7	18.7	57.0	19.5	0.129	82.2	89.7	98.3	104.1	120.8
	18		110.9	19.0	62.3	23.2	0.172	92.5	101.6	112.1	119.3	139.8
Com o ano 2009/2011	1	29	51.2	10.9	23.5	9.6	0.941	36.4	41.4	47.8	52.3	66.8
	3		71.6	15.3	39.9	13.4	0.600	57.7	64.0	71.6	77.0	93.3
	6		92.6	15.4	48.9	17.0	0.544	71.5	79.3	88.7	95.3	115.2
	12		110.2	18.7	58.8	21.5	0.396	87.2	96.5	107.5	115.1	137.8
	18		110.9	19.0	64.0	24.5	0.215	95.9	105.7	117.1	124.8	147.3

Importa anotar mais uma vez que a análise referente ao posto do Funchal foi sempre efectuada na dupla perspectiva de as amostras englobarem ou não o ano hidrológico de 2009/2010 do que, necessariamente, resultaram dois conjuntos distintos de estimativas das precipitações máximas anuais com diferentes períodos de retorno, conforme se especificou no Quadro 7, no Quadro 8 e no Quadro 9.

Em face da adequação da lei de Pearson III ao tratamento estatístico das precipitações máximas anuais nos postos udométricos, considerou-se igualmente adequada a aplicação de tal lei às precipitações máximas anuais nas sub bacias e bacias hidrográficas a que se refere a Figura 20**.** O ajuste dessa lei às amostras de precipitações máximas anuais com durações entre 1 e 3 dias nas bacias hidrográficas relativas às secções terminais da Ribeira Brava, adoptada a título de exemplo, consta da Figura 23.

À semelhança do procedimento adoptado no caso dos postos udométricos, obtiveram-se as precipitações máximas anuais com períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 1000 anos e com durações entre 1 e 6 dias para a totalidade das sub bacias e bacias hidrográficas consideradas (através de superfícies de precipitação espacialmente interpoladas por krigagem) identificadas na Figura 20.

Ribeira Brava

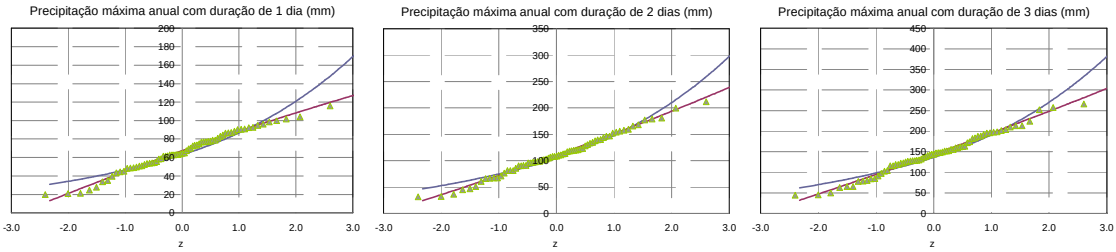

Figura 23 - Precipitações máximas anuais de 1 a 3 dias na bacia hidrográfica da Ribeira Brava

3.4.5 Comparação entre precipitações máximas anuais em bacias hidrográficas estimadas de modo distribuído e pelo método de Thiessen

O projecto de algumas das intervenções a levar a cabo em secções da rede hidrográfica requer que se disponha, para as bacias hidrográficas naquelas secções, de precipitações máximas anuais associadas a determinadas durações e períodos de retorno. Regra geral, a estimativa de tais precipitações de projecto processa-se por ponderação das precipitações fornecidas pela análise estatística para os postos udométricos com influências nas bacias, por aplicação de um método de ponderação espacial, sendo comum a adopção do método de Thiessen.

Com o objectivo de apreciar a influência da distribuição espacial da precipitação na estimativa de precipitações de projecto, entendeu-se, assim ser relevante comparar para as bacias e sub bacias hidrográficas analisadas as estimativas das precipitações máximas anuais com diferentes durações e períodos de retorno fornecidas, por um lado, por krigagem aplicada às amostras de máximos anuais de precipitação nessas bacias e, por outro, decorrentes da aplicação do método de Thiessen às estimativas equivalentes nos postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas.

Os resultados obtidos são exemplificados no Quadro 10 tendo por base as bacias hidrográficas das ribeiras Brava, de São João, de Santa Luzia e de João Gomes. Verifica-se que os valores obtidos pelo método de Thiessen são superiores aos obtidos por krigagem. Com efeito, a forma como foi aplicado o método de Thiessen, directamente aos valores máximos anuais estimados para cada posto para os diferentes períodos de retorno, tem intrínseco o pressuposto de simultaneidade das precipitações de projecto nos postos com influência em cada bacia hidrográfica, o que conduz a estimativas superiores às que decorrem da krigagem aplicada aos valores individuais das séries de máximos anuais ponderados para as próprias bacias hidrográficas.

Quadro 10 - Estimativas das precipitações máximas anuais diferentes durações e períodos de retorno. Comparação com os resultados decorrentes da aplicação do método de Thiessen a quarto bacias hidrográficas.

	Precipitação máxima annual nas bacias hidrográficas obtida pelo método de krigagem (mm)						Precipitação máxima annual nas bacias hidrográficas ponderada pelo método de Thiessen (mm)					
T(anos)	Ribeira Brava						Ribeira Brava					
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias
10	94.1	162.8	209.8	247.2	280.0	312.5	164.1	241.9	285.8	333.8	369.1	399.8
20	101.4	178.3	229.1	267.6	302.8	338.4	180.2	266.8	313.5	367.7	413.0	451.0
50	109.4	196.1	251.2	290.5	328.3	367.5	199.5	296.7	346.4	408.5	467.7	515.8
100	114.6	208.2	266.1	305.7	345.1	386.9	213.2	317.7	369.5	437.3	507.4	563.4
1000	128.8	243.0	308.6	347.7	392.0	441.0	255.4	381.7	439.0	525.1	633.2	717.4
	Ribeira de São João						Ribeira de São João					
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias
10	108.8	168.0	214.8	252.6	284.1	309.6	169.4	227.5	265.7	301.8	330.7	351.6
20	120.0	183.8	236.7	278.1	313.1	341.8	197.9	255.6	298.1	336.7	368.6	391.6
50	133.0	202.0	262.4	308.2	347.5	379.9	235.1	290.5	338.0	379.4	414.8	440.1
100	142.0	214.3	280.2	329.0	371.4	406.5	263.3	315.6	366.7	409.9	447.8	474.5
1000	168.5	250.0	333.1	390.6	442.8	486.3	357.6	395.1	457.0	505.2	550.4	581.1
	Ribeira de Santa Luzia						Ribeira de Santa Luzia					
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias
10	124.2	189.0	233.0	272.4	304.6	329.6	186.1	259.3	304.3	347.3	376.4	397.8
20	138.0	208.4	256.5	299.2	333.8	361.0	221.4	302.5	354.7	403.6	435.9	458.6
50	154.6	231.2	284.3	330.6	368.0	397.5	269.0	359.1	420.5	477.0	513.2	537.4
100	166.2	247.0	303.5	352.2	391.5	422.7	305.7	402.0	470.3	532.1	571.4	596.3
1000	201.4	294.1	360.7	415.9	460.6	496.5	432.6	545.7	636.9	716.0	765.4	791.7
	Ribeira de João Gomes						Ribeira de João Gomes					
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias	6 dias
10	121.7	189.1	231.3	271.0	309.1	332.9	177.2	251.3	288.5	335.2	364.8	384.0
20	132.8	206.8	252.1	295.7	340.6	365.5	199.8	283.3	324.4	378.7	410.4	429.7
50	145.6	227.5	276.2	324.4	378.3	404.1	228.5	323.5	369.6	433.5	468.0	487.0
100	154.2	241.8	292.8	344.1	404.7	431.0	249.7	353.0	402.8	473.8	510.3	528.9
1000	179.1	283.6	341.2	401.9	484.5	511.4	318.8	448.0	509.9	604.1	647.2	663.3

3.4.6 Linhas de possibilidade udométrica

Comparação entre estimativas de máximos anuais de precipitação definidas com base em diferentes períodos de aquisição de registros

A generalidade da informação udométrica pressupõe o período de aquisição de registos de 24 h, com início às 9:00 h (período das 9:00 às 9:00 h). Contudo, a literatura da especialidade refere que a consideração de intervalos de aquisição de valores distintos daquele período conduz a registos, designadamente, de precipitações máximas anuais, superiores aos referentes a tal período. Dado que apenas no posto do Funchal-Observatório se possuem registos de precipitações sub diárias só aí foi possível proceder à constituição e à análise de amostras de precipitações não necessariamente referidas ao período das 9:00 às 9:00 h. Para tal posto, obtiveram-se, assim, as estimativas das precipitações máximas anuais (em ano hidrológico) para diferentes durações e períodos de retorno tendo por base registos até ao ano de 2009/2010, inclusive, de máximos anuais referidos, por um lado, ao período das 9:00 às 9:00 h e, por outro lado, a qualquer período, embora com início à hora certa.

A Figura 24 contém quatro gráficos que traduzem as relações entre estimativas de precipitações máximas anuais obtidas de amostras constituídas a partir da consideração de

diferentes intervalos de tempo de aquisição de valores. Nos gráficos do lado esquerdo tais relações estão expressas em termos absolutos e, nos gráficos do lado direito, em termos adimensionais, por divisão pelas estimativas obtidas com base em amostras constituídas no período das 9:00 às 9:00 h. Os resultados adimensionais foram representados em função do período de retorno.

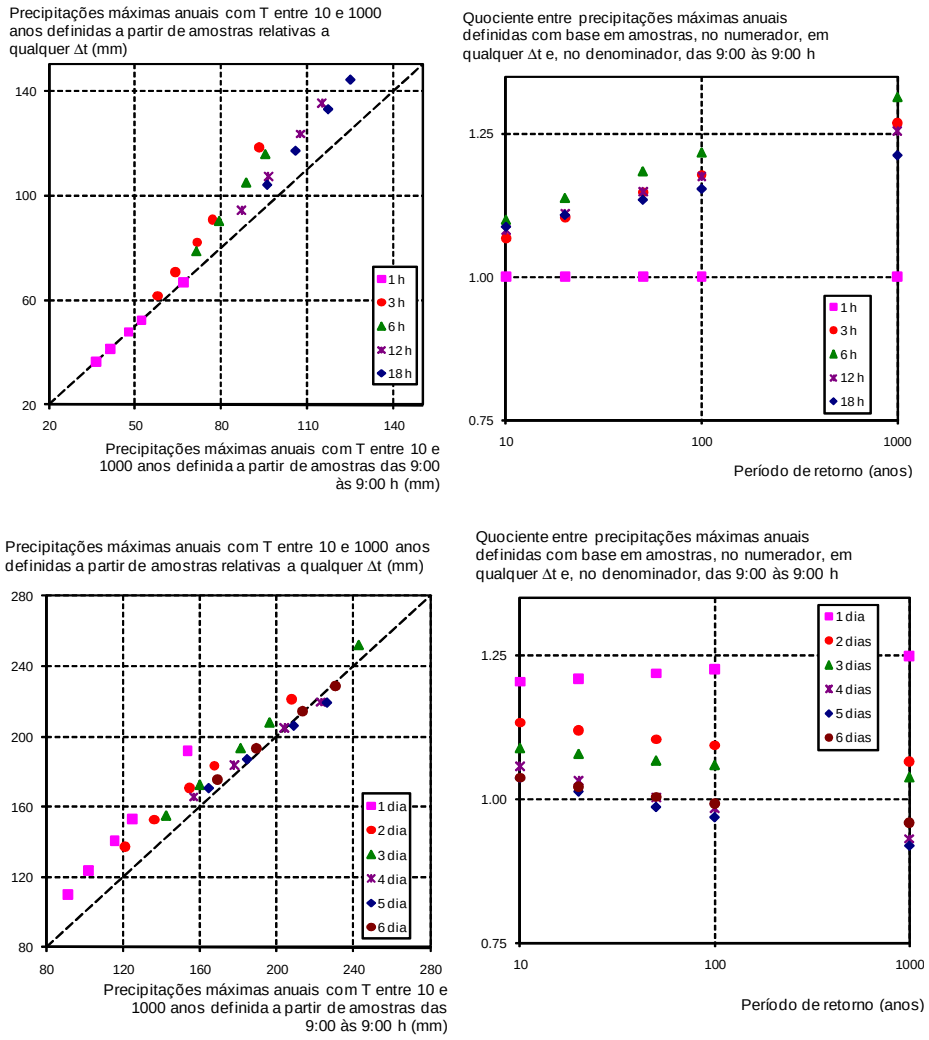

Figura 24 - Comparação entre precipitações máximas anuais com durações entre 1 h e 6 dias e com diferentes períodos de retorno estimadas com base, por um lado, no intervalo de aquisição de informação das 9:00 às 9:00 h e, por outro lado, em qualquer período com início à hora fixa.

Os anteriores elementos suscitam observações pertinentes, algumas das quais terão de ser "vertidas" em critérios de projecto, como oportunamente se retomará. Em termos gerais, concluiu-se que as amostras de máximos anuais não necessariamente obtidas tendo por base o período de amostragem das 9:00 às 9:00 h conduzem mais frequentemente a estimativas mais gravosas, ou seja, mais elevadas das precipitações máximas anuais, especialmente na gama de durações relevantes na análise de cheia na Ilha da Madeira, entre a 1 e as 3 h. A

igualdade entre estimativas de precipitações máximas anuais com a duração de 1 h decorrentes de um tipo ou de outro de amostras resultou de a discretização temporal dos registos utilizados na anterior análise ter sido precisamente de 1 h.

Para atender ao facto de a consideração de períodos de amostragem distintos do período das 9:00 às 9:00 h conduzir a estimativas superiores das precipitações intensas e uma vez que, na quase totalidade das situações de projecto, apenas se disporá de amostras das referidas àquele período haverá que majorar as estimativas que resultam de tais amostras.

Linhas de possibilidade udométrica para durações superiores ao dia

Não obstante as precipitações com durações iguais ou superiores ao dia não intervirem na análise de cheias na Ilha da Madeira, estabeleceram-se as linhas de possibilidade udométrica para tais precipitações com o único objectivo de assim obter informação sobre as características das precipitações intensas na Ilha da Madeira, eventualmente extrapoláveis para as precipitações com durações inferiores ao dia, neste estudo ou noutros que venham a ser realizados em âmbito afim.

As linhas assim obtidas por análise estatística aplicada às amostras de precipitações máximas anuais com durações entre 1 e 4 dias nos vinte postos dispondo de mais de dez anos de registos são representadas na Figura 25, relativa, a título de exemplo, aos períodos de retorno extremos de 10 e de 1000 anos. As equações das anteriores linhas foram obtidas por análise de regressão linear simples no campo das transformadas logarítmicas das precipitações e das correspondentes durações. Nos gráficos do lado esquerdo os eixos das ordenadas têm unidades, sendo que nos do lado direito foram tornados adimensionais por divisão em cada posto da precipitação com a duração d e dado período de retorno, Pd, pela precipitação com a duração de 24 h e com o mesmo período de retorno, P24.

A Figura 25 mostra muito claramente que, para um mesmo período de retorno existe uma muito acentuada dispersão das linhas de possibilidade udométrica nos vinte postos analisados, mesmo quando tais linhas são expressas em termos de precipitações adimensionais. Esta circunstância indica, por sua vez, acentuada variabilidade no regime das precipitações intensas na Ilha da Madeira que, de algum modo, não se coaduna com a extrapolação espacial das estimativas das precipitações intensas relativos a um dado posto udométrico.

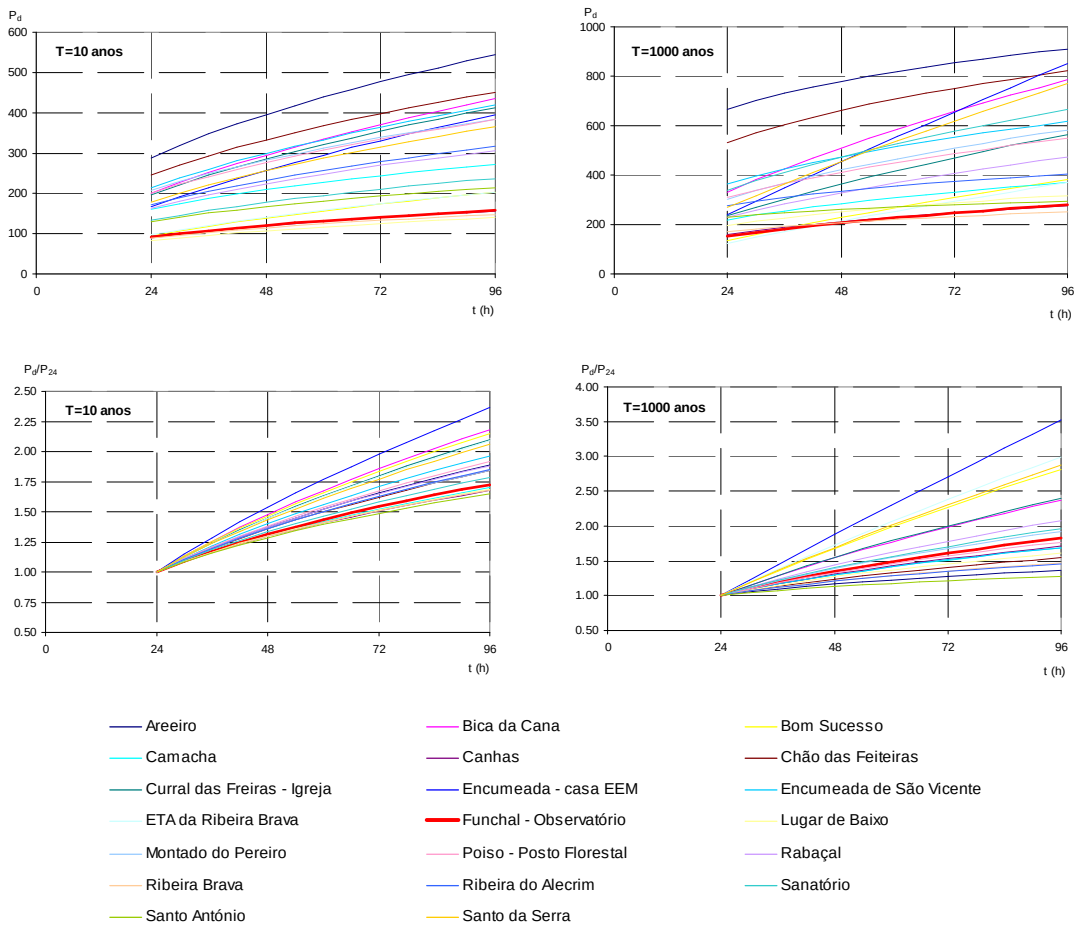

Figura 25 - Períodos de retorno de 10 e de 1000 anos. Linhas de possibilidade udométrica com unidades e com precipitações adimensionais.

Posto do Funchal-Observatório. Linhas de possibilidade udométrica para durações da precipitação inferiores ao dia. Modelo global de precipitações intensas

O estabelecimento de linhas de possibilidade udométrica para durações das precipitações intensas inferiores ao dia utilizou os únicos dados para tanto disponíveis, referentes ao posto do Funchal-Observatório. De modo a extrair desses escassos dados tanta informação quanto possível, designadamente, tendo em vista a sua generalização ao cálculo de precipitações de projecto que não somente naquele posto, ensaiaram-se diferentes hipóteses de estimação dos parâmetros das linhas de possibilidade udométrica, para o que se atendeu também à dimensão das amostras a partir das quais se estimaram as precipitações a fazer intervir no cálculo desses parâmetros.

Os resultados pelos quais se optou são apresentados na Figura 26 que inclui também a representação das linhas de possibilidade udométrica expressas em precipitações adimensionais (linhas adimensionais), bem como um pormenor dessas linhas na gama de durações até às 12 h e no qual se representaram os pontos de resultam directamente da

caracterização efectuada por Faria; Godinho, 1983, para o posto de Santa Catarina/Aeroporto. Importa anotar que o estudo destes dois últimos autores utilizou precipitações máximas anuais em ano civil no período de registos de 15 anos entre 1967 2 1981, sendo que a análise estatística então efectuada aplicou a lei de Gumbel.

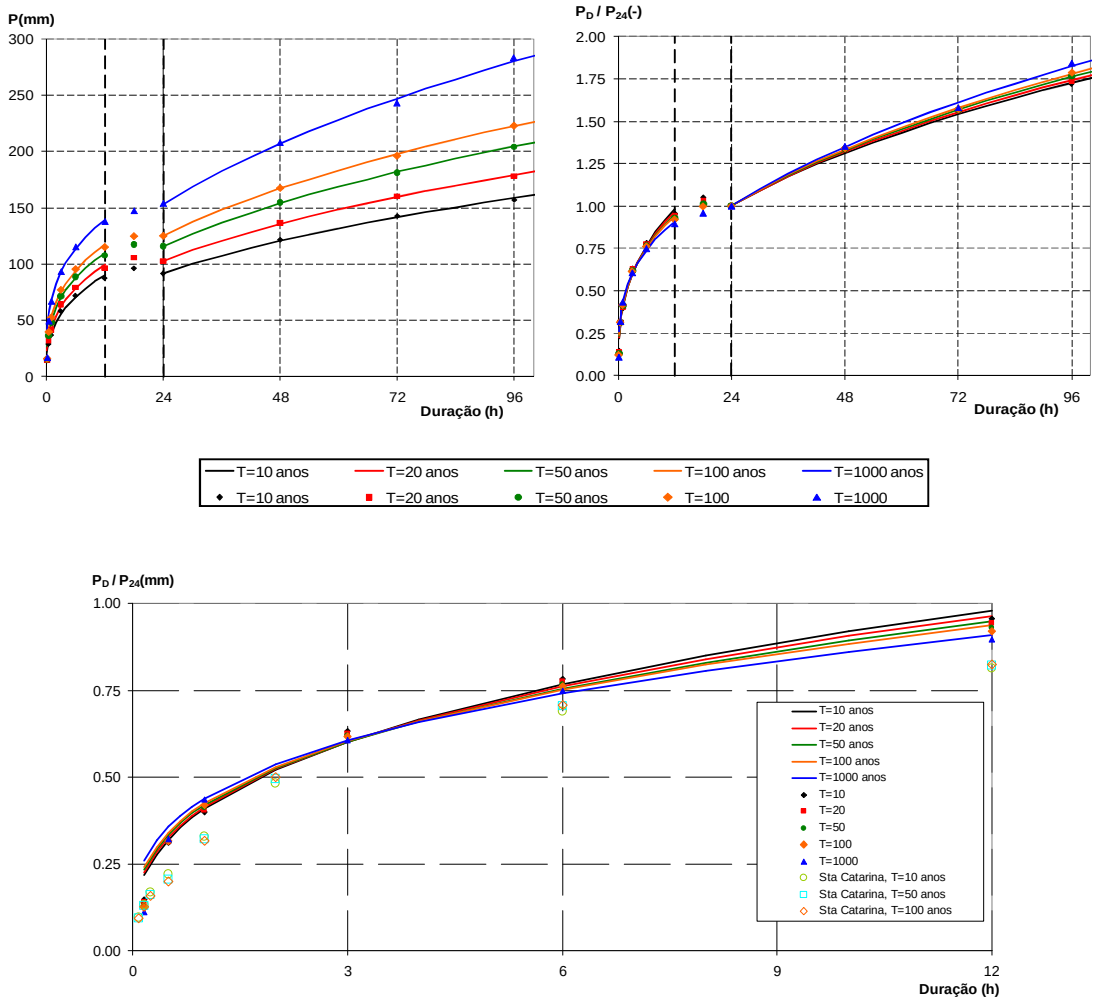

Figura 26 - Posto udométrico do Funchal-Observatório. Linhas de possibilidade udométrica para diferentes períodos de retorno (em cima à esquerda), com precipitações expressas em termos adimensionais (em cima à direita), e pormenor com inclusão dos pontos representativos das precipitações intensas em Santa Catarina/Aeroporto (em baixo ao centro).

A partir da anterior figura podem-se extrair várias conclusões, realçando-se apenas: (i) o facto de as linhas de possibilidade udométrica exibirem dois trechos distintos – um para durações superiores a 24 h e outro para durações inferiores a 12 h – não extrapoláveis entre si, por exprimirem dependências matemáticas distintas entre as precipitações e as respectivas durações; (ii) a muito reduzida diferença entre estimativas de precipitações máximas anuais com durações de 12, 18 e 24 h; (iii) o facto de as precipitações intensas ocorrerem no Funchal

de forma muito concentrada no tempo, sendo que, quase independentemente do período de retorno, as precipitações máximas em 1, 3 e em 6 h representam cerca de 40, 60 e 75% da respectiva precipitação diária; (iv) e, especialmente, a facto de os resultados apresentados em Faria; Godinho, 1983, largamente utilizados na análise de cheias na Ilha da Madeira, sugerirem precipitações intensas com durações inferiores ao dia menores do que as precipitações que, para essas durações, decorrem da análise dos registos do posto do Funchal-Observatório.

Com efeito, os coeficientes de repartição das precipitações diárias referentes a este último posto são maiores do que os que se deduzem de Faria; Godinho, 1983, para o posto de Santa Catarina/Aeroporto, admitindo-se ainda que as precipitações obtidas por aplicação daqueles primeiros coeficientes devam ser majoradas, em conformidade com os resultados da Figura 24, para atender ao facto de as mais elevadas precipitações não ocorrerem necessariamente no período de aquisição de registos das 9:00 às 9:00 h. A designação de coeficiente de repartição foi introduzida para simplificar o texto, entendendo-se por tal o quociente entre duas precipitações com o mesmo período de retorno, uma, em numerador com duração inferior a 24 h e outra, em denominador, com a duração de 24 h.

Na tentativa de "verter" o estudo efectuado numa recomendação de cálculo de precipitações intensas a fazer intervir na análise de cheias em bacias hidrográficas da Ilha da Madeira e até que se disponha de informação udométrica adicional que permita reformular/completar tal estudo, propõe-se que, para uma dada secção da rede hidrográfica onde se pretenda estimar caudais ou hidrogramas de cheia para um dado período de retorno, T: (i) se proceda à identificação dos postos udométricos com influência em tal bacia; (ii) com base na análise estatística aplicada às amostras de precipitações máximas anuais com a duração de 24 h, registadas no período das 9:00 às 9:00 h, disponíveis nesses postos, se estime a precipitação na bacia hidrográfica com o período de retorno T e com a duração de 24 h; (iii) e que se "reparta" essa precipitação para a duração pretendida mediante utilização dos coeficientes de repartição obtidos para o posto do Funchal-Observatório que, para o efeito, são sistematizados no Quadro 11, a par com as precipitações que lhes deram origem. A análise de cheias deverá compreender ainda uma análise de sensibilidade que pondere, por um lado, a majoração da precipitação assim obtida por aplicação dos resultados da Figura 24, e, por um lado, o cálculo de tal precipitação baseado em Faria; Godinho, 1983.

Quadro 12 – Posto do Funchal-Observatório. Quocientes entre precipitações máximas anuais com durações inferiores a 24 h (no numerador) e de 24 h (no denominador) para diferentes períodos de retorno.

Estimativas das precipitações máximas anuais com a duração d, P_d							
T (anos)	Duração da precipitação, d						
	10 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
10	13.5	28.4	36.4	57.7	71.5	87.2	91.3
20	14.2	32.0	41.4	64.0	79.3	96.5	102.3
50	15.0	36.4	47.8	71.6	88.7	107.5	115.7
100	15.5	39.5	52.3	77.0	95.3	115.1	125.1
1000	16.9	49.3	66.8	93.3	115.2	137.8	153.7

Quociente entre estimativas de precipitações máximas anuais com as durações d e 24 h, Pd/P24							
T (anos)	Duração da precipitação, d						
	10 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
10	0.147	0.311	0.398	0.632	0.784	0.955	1.000
20	0.139	0.313	0.405	0.626	0.775	0.943	1.000
50	0.130	0.315	0.413	0.619	0.767	0.929	1.000
100	0.124	0.316	0.419	0.615	0.762	0.920	1.000
1000	0.110	0.321	0.435	0.607	0.750	0.896	1.000

3.5 PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAL SÓLIDO

3.5.1 Introdução

O material sólido que aflui à rede hidrográfica e que é transportado pelo escoamento fluvial tem origem em processos sedimentológicos que actuam no espaço interfluvial das bacias hidrográficas e que dependem de diversos mecanismos associados à ocorrência e ao escoamento de água.

A interacção das diferentes variáveis e factores, os comportamentos hidrológicos, a morfologia do terreno, os usos e ocupação dos solos e, de forma integrada, os mecanismos globais dos processos apresentam uma elevada complexidade.

Estes processos correspondem ao encadeamento e sucessão temporal de mecanismos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, em que a água é o principal agente. Neste processo erosivo (ou erosão hídrica, no sentido lato) pode-se distinguir as seguintes fases:

- meteorização das rochas superficiais;
- desagregação do solo e das rochas superficiais;
- destacamento das partículas superficiais, pelos agentes erosivos (erosão, em sentido restrito), que inclui a remobilização dos sedimentos produzidos por movimentos de massa, pela precipitação e escoamento;
- transporte dos sedimentos erodidos (no espaço interfluvial e rede de drenagem);
- deposição de sedimentos (na rede de drenagem ou em meio receptor);
- consolidação de sedimentos (em meio receptor final).

Num sentido mais restrito é possível distinguir os seguintes tipos de erosão do espaço interfluvial como principais origens do material sólido:

- erosão distribuída provocada por escoamento distribuído em encostas e bacias de recepção;
- erosão localizada resultante de escoamento concentrado que provoca sulcos, ravinas ou incisão de canais incipientes;
- mobilização de sedimentos provenientes de movimentos de vertente ou de massa por escoamento distribuído ou concentrado.

Os sedimentos erodidos são transportados pelo escoamento sobre as encostas ou na rede de drenagem, criando fluxos concentrados ou torrentes de escoamento que podem ser classificados consoante a capacidade de transporte em:

- torrentes de erosão;
- torrentes de transporte, ou em equilíbrio;
- torrentes de deposição.

O primeiro tipo de escoamento está associado a mecanismos em que a capacidade de transporte do escoamento é superior à alimentação, resultando incisão do sulco ou leito, com erosão regressiva a montante, e o último, na situação inversa, com a agradação dos sulcos ou leitos e com a criação de zonas de deposição ou cones de dejecção, a jusante.

O transporte de sedimentos na rede de drenagem é composto por diversas fases e componentes, de que se destacam as seguintes:

- alimentação de sedimentos à rede de drenagem;
- incorporação dos sedimentos afluentes, às linhas de água, no fluxo de escoamento;
- destacamento de sedimentos do fundo e margens dos leitos;
- transporte de sedimentos;
- deposição de sedimentos.

As diferentes componentes apresentam apreciável variação nos cursos de água, no perfil longitudinal, nas secções transversais, em função das condições hidráulicas do escoamento, variando no tempo e em função da gama de fracções granulométricas presente.

Relativamente aos processos de destacamento e de transporte de sedimentos, em que a capacidade hidráulica de transporte é superior à alimentação de sedimentos, os efeitos são manifestados pela existência de erosões generalizadas e/ou localizadas.

As erosões generalizadas e/ou localizadas podem apresentar as seguintes características:

- incisão de leitos;

- alvercamento de terraços e de depósitos aluvionares;
- desmoronamentos de margens e da base de encostas;
- erosões localizadas em obstáculos, nos leitos ou salientes das margens.

Os processos sedimentológicos, que ocorrem nos cursos de água e que integram as afluências provenientes das bacias hidrográficas, englobam, como se referiu, fases de erosão, transporte, deposição. Do seu balanço global, com incidência selectiva nas diferentes fracções granulométricas presentes no leito, resulta a quantidade de material sedimentar, ou produção de sedimentos, no final das bacias hidrográficas, que corresponde à quantidade total de sedimentos depositados ou lançados no meio receptor final, o oceano Atlântico.

3.5.2 Erosão distribuída

Entende-se por erosão (em sentido restrito) a desagregação e o transporte de material sólido - sedimentos – com origem nos solos e rochas da litosfera, para além de uma dada fronteira. A erosão espacialmente distribuída no espaço interfluvial, que não está associada a escoamentos concentrados, designa-se por erosão distribuída ou laminar, e por ser habitualmente quantificada em volume ou peso por unidade de área e para uma certa duração, designa-se, também, por erosão específica.

A modelação e a estimativa da erosão distribuída ou perda sedimentos nos solos e rochas do espaço interfluvial dependem de múltiplos e variados factores. Pedagogicamente é habitual considerar o modelo da Equação Universal da Perda de Solo - EUPS (Universal Soil Loss Equation - USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1965, para descrever os principais factores intervenientes. Com as actualizações entretanto sugeridas em 1978 e outras adaptações introduzidas pelo formalismo da Equação Universal da Perda de Solo Revista-EUPSR (Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE.

Na RUSLE cada parâmetro do processo erosivo é traduzido por um factor; do produto dos factores obtém-se a estimativa de perda de solo. Estes factores compreendem: parâmetros climáticos e hidrológicos que constituem as componentes activas do processo erosivo; elementos relativos à vulnerabilidade dos solos e rochas da superfície, perante a acção dos agentes erosivos; e, parâmetros relativos ao meio, que traduzem o efeito de amplificação ou atenuação dos processos devido a características morfológicas dos terrenos e ao uso e ocupação dos solos.

O cálculo do factor de erosividade da precipitação é relativamente complexo e carece de registos udográficos de grande precisão. O valor da erosividade, para uma dada duração, corresponde à soma dos valores de erosividade EI_{30}, para todas as chuvadas que ocorrem

durante esse período. A duração habitual para os períodos analisados é de um ano. O valor do índice EI_{30}, para cada acontecimento pluvioso, é obtido pelo produto da energia cinética total da precipitação pela máxima intensidade da precipitação com a duração de 30 minutos.

O factor de erodibilidade do solo exprime-se em valor de perda de solo por unidade de erosividade da precipitação, num talhão de encosta em condições padrão. É contabilizado em peso por unidade de factor de erosividade.

O factor de comprimento de encosta correspondente à relação entre os comprimentos da encosta e do talhão de referência. O factor de declive da encosta correspondente à relação entre os declives da encosta e do talhão de referência. Estes factores são habitualmente calculados em conjunto.

O factor do coberto vegetal é a relação entre a perda de solo para o coberto estabelecido e o valor para a situação de alqueive.

O factor de prática agrícola é o valor correspondente à relação entre as práticas agrícolas e de uso do solo e as das condições de referência.

3.5.3 Movimentos de vertente

Existe um número significativo de classificações de movimentos de vertente na literatura, resultando numa diversidade de classificações, que tem por base diferentes factores para a caracterização dos fenómenos.

As classificações mais simples recorrem a apenas um critério de classificação. As classificações mais complexas utilizam, normalmente, um factor discriminante principal para estabelecer os grandes tipos de movimentos, e factores secundários para introduzir subdivisões dentro das categorias iniciais (Zêzere, 2000).

Adopta-se no presente estudo a classificação dos movimentos de vertente proposta pela Unesco, no documento "*Landslide glossary - IGS - Unesco Working Party for World Landslide Inventory*, 1993", cujas designações são descritas a seguir:

- Queda (“*fall*”) - Queda livre de rochas ou solos de um talude ou escarpa com ausência ou muito reduzida superfície de deslizamento. Pode ocorrer em combinação com outros movimentos como a saltação ou o rolamento (*rolling*).
- Tombamento (“*topple*”) - Rotação de uma massa de solo ou rocha a partir de um ponto ou eixo situado abaixo do centro de gravidade da massa afectada.

- Escorregamento ou deslizamento ("slide") - Movimento num talude de solo ou rocha ao longo de uma superfície de rotura ou de zonas relativamente estreitas, alvo de intensa deformação tangencial.
- Expansão lateral ("*lateral spread*") - Extensão de massas coesivas do solo ou rocha combinada com subsidência geral. Não aplicável a zona em estudo.
- Fluxos ("*flows*") - Movimentos espacialmente contínuos onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e frequentemente não preservadas. A distribuição na massa deslocada assemelha-se a um fluído viscoso.
- Movimentos complexos e compósitos - Casos em que é possível individualizar mais do que um tipo de movimento, numa sequência temporal nítida ou que exibem, pelo menos, dois mecanismos em simultâneo, em diferentes sectores da massa deslocada (movimento "compósito").

Os movimentos complexos ou compósitos encontram-se sobretudo entre os deslizamentos rotacionais que poderão ter também uma componente translaccional. No âmbito do presente estudo não utilizaremos o termo compósito ou complexo como elemento diferenciador, classificando os movimentos de vertente de acordo com a tipologia de movimento mais significativa.

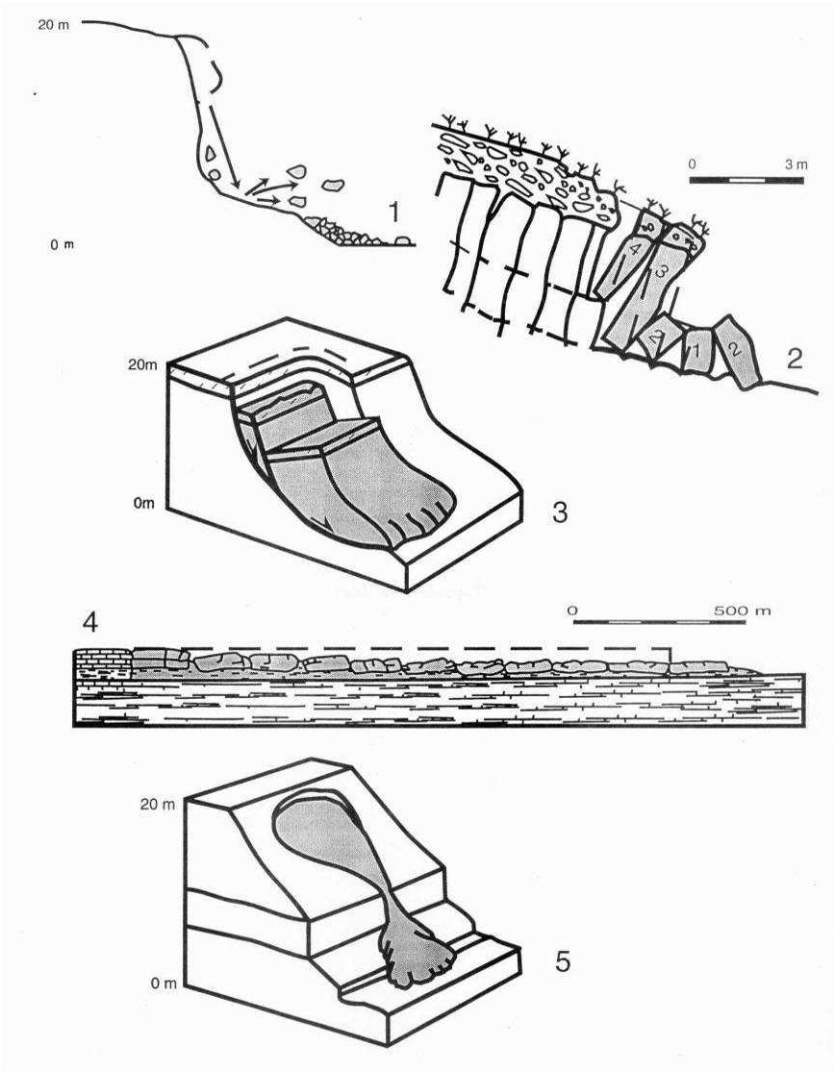

Figura 27 - Tipos de movimentos de vertente: 1- Queda; 2- Tombamento; 3 – Escorregamento; 4– Expansão lateral; 5 – Fluxo (IGS, 1993).

3.5.4 Fluxos mistos com carga sólida significativa

O fenómeno objecto do presente estudo abrange a ocorrência de escoamento com fase líquida (água) e fase sólida (detritos ou sedimentos). Estes escoamentos bifásicos têm elevadas concentrações de material sólido com elevado potencial geomórfico e serão doravante designados de *aluviões*. Incluem-se nesta categoria um elevado número de escoamentos, entre os quais os escorregamentos de encostas, os *debris flows* (escoamento de material granular saturado) e os escoamentos fluviais estratificados no regime superior (*sheet-flows*) que podem resultar de causas naturais ou antrópicas, por exemplo a ruptura de uma barragem ou escombreira. Para além da natureza bifásica e das elevadas concentrações de material sólido, estes escoamentos caracterizam-se por dependerem da gravidade, por apresentarem reduzida espessura e por gerarem elevadas tensões de corte. Uma última característica

comum é o facto de as características micro-mecânicas do material granular serem determinantes para a definição das equações constitutivas da mistura em movimento.

A reologia das aluviões podem ser classificadas em função das tensões que desenvolvem no seu seio, essencialmente determinadas pelas características geométricas e mecânicas das partículas que conformam o material granular sólido, pelos parâmetros que descrevem o fluido, pela concentração de material sólido e proporção de cada fracção granulométrica e por factores externos como o declive do leito e o campo gravítico.

Aluviões com reologia do tipo Bingham terão uma tensão de cedência e predominância de tensões viscosas e macro-viscosas (Takahashi, 2003); aluviões com reologia dilatante poderão ser do tipo inercial-colisional com predominância de tensões colisionais (Jenkins & Richman 1988, Ferreira 2005), do tipo inercial-turbulento ou do tipo quasi-estático.

O modelo conceptual no qual se baseiam os modelos de simulação usados neste trabalho foi desenvolvido para escoamentos estratificados, com uma camada de transporte caracterizada por uma preponderância de tensões do tipo colisional e turbulenta. É também aplicável a escoamentos do tipo *debris-flow*, isto é, a escoamentos de densas misturas de material granular e água, em que a camada de transporte ocupa quase toda a profundidade do escoamento. Assumindo a preponderância de tensões colisionais, as equações de conservação e as equações constitutivas do modelo conceptual foram deduzidas a partir da teoria cinética de Chapman-Enskog para os gases densos (Chapman & Cowling 1970). No caso de partículas regulares, aproximadamente esféricas e apenas ligeiramente inelásticas, a teoria cinética requer apenas pequenas modificações na dedução das leis de conservação 2DV da massa, da quantidade de movimento e da energia associada às flutuações das partículas e na derivação das equações constitutivas, as quais incorporarão o grau de agitação das partículas, os coeficientes de condutividade e de viscosidade e a taxa de dissipação de energia associada à flutuação das partículas. A inclusão de outros modelos reológicos nomeadamente dos efeitos friccionais, macro-viscosos e das interacções viscosas fluido-grão é conseguida através do envolvimento de teorias *ad hoc* (Ferreira 2005, p. 249).

4 CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO DE 20/2/2010

4.1 INTRODUÇÃO

Conforme já foi referido, a precipitação constitui um factor crítico muito relevante no processo de desencadeamento ou formação de aluviões.

O evento de 20/2/2010 ocorreu na sequência de um prolongado período chuvoso na ilha da Madeira. Em 22 de Dezembro e em 2 de Fevereiro tinham já ocorrido aluviões, respectivamente nos concelhos de S. Vicente e de Santana (ribeira do Faial), mas com muito menores consequências das que ocorreram em 20/2/2010, quando a situação meteorológica provocou uma aluvião excepcional que atingiu com intensidade significativa alguns concelhos da vertente Sul da ilha, em particular os concelhos do Funchal e da Ribeira Brava.

No presente capítulo apresentam-se os valores de precipitação registados nos postos de monitorização da região e procede-se à sua análise, considerando diferentes intervalos de tempo:

- Outubro a Fevereiro de 2010
- Dia 20 de Fevereiro de 2010
- Intervalos de tempo subdiários do dia 20 de Fevereiro de 2010

Descreve-se ainda a evolução da precipitação durante o dia 20 de Fevereiro de 2010.

4.2 SITUAÇÃO METEOROLÓGICA

4.2.1 Breve enquadramento das condições gerais da circulação atmosférica no Atlântico Norte no Inverno de 2009/2010

Na área portuguesa, o Inverno de 2009/2010 foi marcado, sob o ponto de vista climático, pela grande dominância de condições de circulação atmosférica de larga escala associadas ao padrão geral da fase negativa da Oscilação do Atlântico Norte (NAO). Com efeito, os valores do índice NAO mantiveram-se, quase sempre, negativos de Outubro de 2009 a Março de 2010, tendo os meses de Dezembro e de Fevereiro registado uma persistência quase absoluta destas condições, como se ilustra na Figura 28. Confirmando as correlações conhecidas (Trigo *et al* 2002; Rodrigo e Trigo, 2007) entre o índice NAO e as anomalias de precipitação invernal na Europa Ocidental, este predomínio esmagador de índice NAO negativo reflectiu-se no carácter muito chuvoso do Inverno 2009/2010 em Portugal, tanto na sua parte continental, como nos seus arquipélagos atlânticos. A situação meteorológica sinóptica de 20 de Fevereiro de 2010 integrou-se, deste modo, neste contexto geral das condições de circulação atmosférica, tendo

estado associada à passagem de uma depressão frontal muito activa, cuja trajectória atingiu directamente a ilha da Madeira.

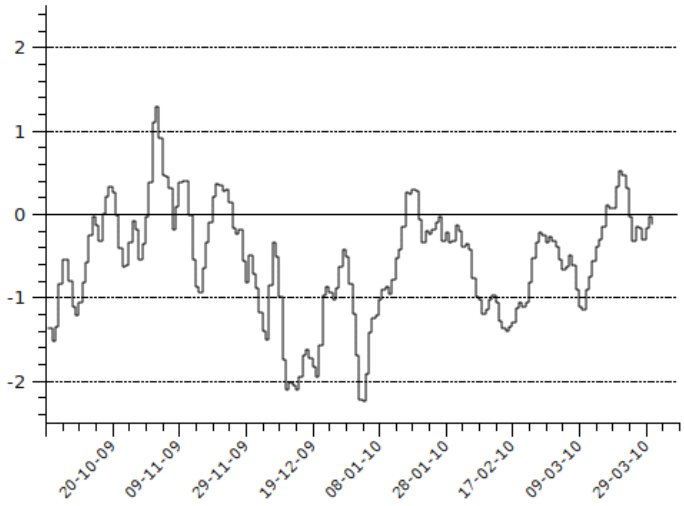

Figura 28 - Evolução diária do índice da Oscilação do Atlântico Norte (http://www.cgd.ucar.edu)

4.2.2 O contexto sinóptico da tempestade

Alguns aspectos da circulação atmosférica de 20 de Fevereiro de 2010 no Atlântico Norte apresentam-se ilustrados na Figura 29, onde se representam os campos de *altitude do geopotencial dos 500 hPa* (2-a), do *vento aos 300 hPa* (2-b) e de *pressão ao nível do mar* (2-c), respeitantes às 0h00 daquele dia.

Em altitude, o padrão de circulação dos Ventos de Oeste sobre o Atlântico Norte (Figura 29.a) corresponde a um bloqueio, de tipo difluente, diferenciando-se uma célula anticiclónica sobre a Gronelândia meridional, e, mais para sul, uma grande célula ciclónica, envolvendo dois núcleos depressionários, um situado na Terra Nova e um outro a noroeste dos Açores. Com esta configuração de bloqueio na circulação atmosférica de altitude, um ramo da corrente de oeste estabeleceu-se para sul dos 40˚ de latitude, como pode observar na figura 2-b, onde é patente a presença de um fluxo zonal às latitudes do arquipélago da Madeira. Esta disposição geral dos sistemas de circulação atmosférica condicionou a dinâmica e a trajectória das perturbações sobre o Atlântico, permitindo que estas pudessem atingir latitudes mais meridionais, afectando a faixa de latitudes entre os 40 e 30˚N. Assim, na Figura 29-b é patente a presença de uma corrente de jacto ao nível dos 300 hPa a oeste da Madeira, aspecto que terá sido importante para dirigir a trajectória da depressão na direcção da área da ilha, justamente sobre a qual o fluxo zonal apresenta uma divergência, um factor que favorece a ciclogénese e o incremento das ascensões verticais, desencadeando forte convecção na atmosfera.

À superfície (Figura 29-c e Figura 29-d), a progressão do núcleo depressionário, formado na área dos Açores, deu-se de oeste para este, e o seu sistema frontal associado começou a afectar a ilha da Madeira na noite de 19 para 20 de Fevereiro. Nesse período, a depressão intensificou-se e o seu cavamento foi responsável pelo estabelecimento da circulação ciclónica na área madeirense, com ventos fortes de sudoeste. Durante a madrugada e manhã do dia 20 de Fevereiro deu-se a passagem da perturbação frontal, cujos sistemas nebulosos atravessaram o arquipélago, predominantemente, de sudoeste para nordeste. A análise de imagens de satélite (aqui não mostradas) revelou que várias destas massas de nuvens convectivas se formaram muito próximo da ilha ou adquiriram maior desenvolvimento sobre ela. O atravessamento da ilha pela frente fria desta perturbação só se concluiu durante a tarde do dia 20, pelo que a passagem completa da tempestade decorreu num período com duração de cerca de 15 horas.

Alguns aspectos que permitem compreender a actividade notável desta depressão frontal podem ser deduzidos da análise das sondagens aerológicas realizadas no Funchal (12:00 UTC). Na Figura 30 compara-se a estrutura vertical da atmosfera observada neste local nos dias 19 e 20 de Fevereiro, evolução que testemunha as modificações associadas à advecção da massa de ar instável responsável pela tempestade. Ao meio-dia do dia que antecedeu o aluvião (19.02) observavam-se condições anticiclónicas no Funchal, com tempo estável, seco e relativamente quente, atendendo à época do ano. Com a aproximação da depressão frontal que se deu na noite seguinte, a área do Funchal sofreu a advecção de uma massa de ar quente, como se documenta na Figura 30-c, e excepcionalmente húmida, tal como o demonstra a evolução do perfil vertical da razão de mistura (Figura 30-b). Com efeito, em especial aos níveis inferiores da troposfera, é evidente a chegada de uma massa de ar quente (notar a subida acentuada dos valores de temperatura potencial equivalente) e contendo um elevadíssimo teor de humidade, de tal forma que o valor total de água precipitável aumentou, neste intervalo de tempo de 24 horas, de 13,4 mm para 37 mm(!). Esta enorme disponibilidade de vapor de água e as condições de instabilidade termodinâmica justificam a ocorrência de forte convecção, na origem da abundância e intensidade da chuva produzida pelos sistemas nebulosos de grande desenvolvimento vertical.

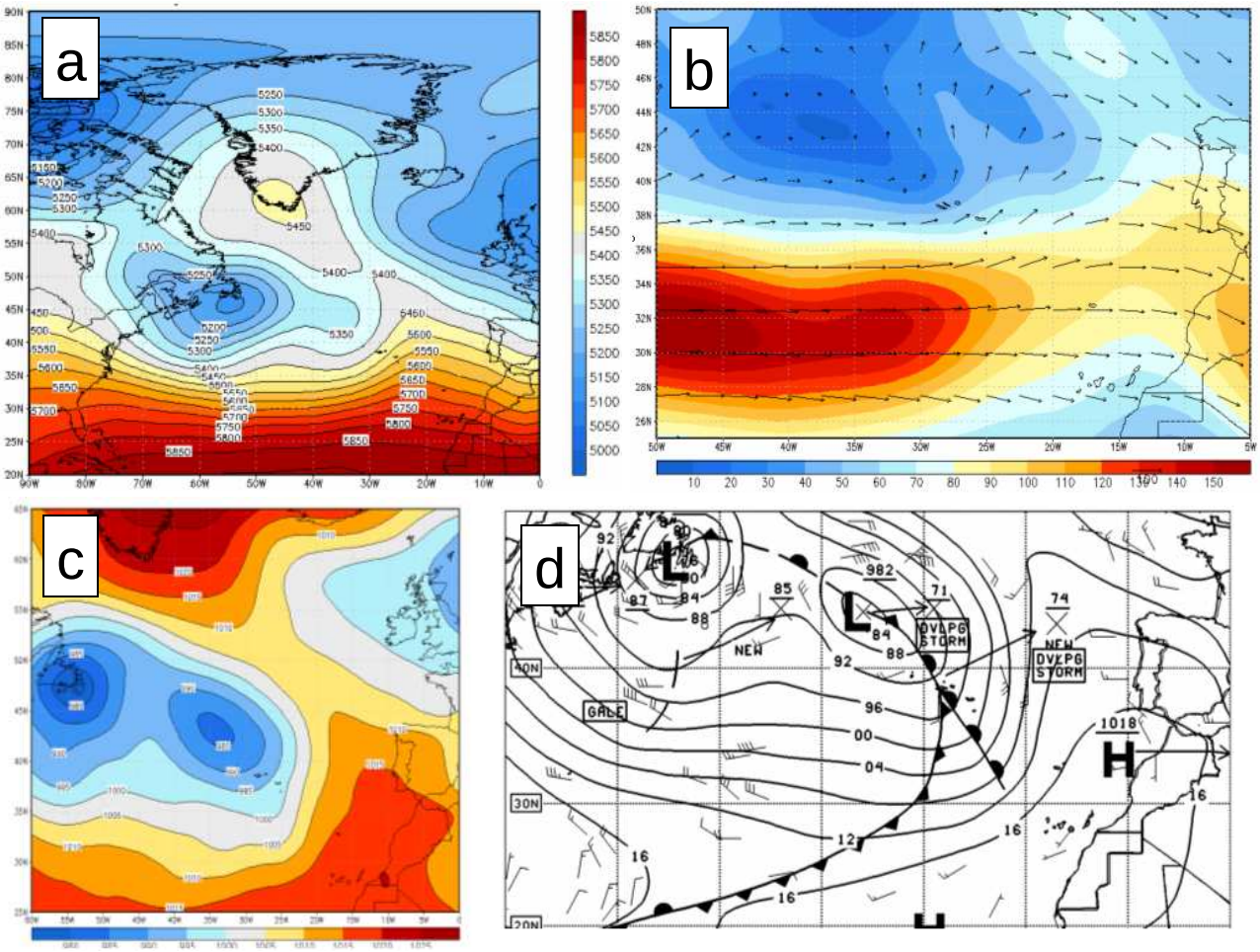

Figura 29 - Aspectos da situação sinóptica do dia 20.02.2010 (0:00 UTC): a- altitudes da superfície isobárica de 500 hPa, reanálises-2) do National Center for Environmental Prediction (NCEP); b – campo de vento aos 300 hPA, reanálises-2 NCEP; c - Pressão ao nível médio do mar, reanálises-2 NCEP d – carta sinóptica de superfície. Fontes: http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/ e http://archive.atmos.colostate.edu

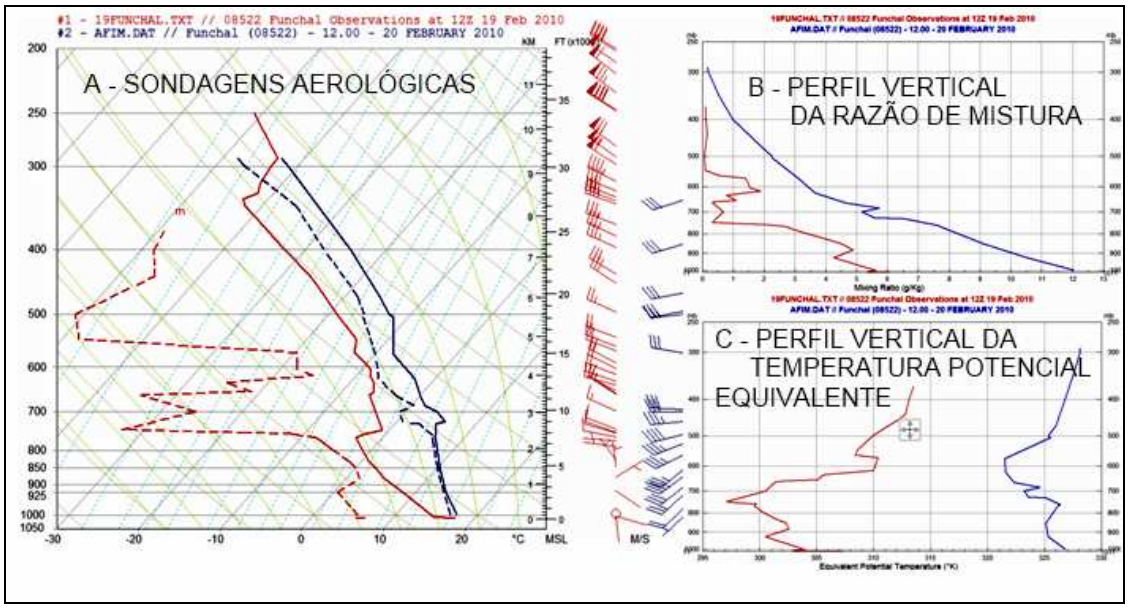

Figura 30 - Aspectos da evolução da estrutura vertical da atmosfera, no Funchal, entre os dias 19 e 20 de Fevereiro de 2010 (12:00 UTC): A – sondagens aerológicas; B – perfil vertical da razão de mistura (g/Kg); C – perfil vertical da temperatura potencial equivalente (˚K). A vermelho indicam-se as os valores das diferentes variáveis no dia 19.02.2010 e a azul os do dia 20.02.2010.

4.3 ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO

4.3.1 Precipitação acumulada de Outubro de 2009 a Fevereiro de 2010

A análise da variação inter-anual da precipitação acumulada de Outubro a Fevereiro nos anos hidrológicos de 2004-2005 a 2009-2010 revela o grau de excepcionalidade do inverno de 2009/10. Esta análise foi realizada, fundamentalmente, com base nalguns postos da rede meteorológica do LREC (Figura 31). Verifica-se que a precipitação acumulada em 31 de Dezembro e 28 de Fevereiro do último ano hidrológico foi quase sempre mais elevada do que nos anos anteriores, com excepção da Fajã do Penedo.

Em todos os postos udográficos considerados a precipitação acumulada de Outubro a Fevereiro de 2009-2010 foi sempre superior a 1000 mm, sendo o valor mais baixo medido no posto *LREC* (1084,2 mm) e o mais alto no posto *Areeiro-LREC* (4054,4 mm). No topo da montanha (posto *Areeiro-LREC*) choveu mais do dobro das ocorrências do *posto Trapiche* a uma cota intermédia da vertente sul.

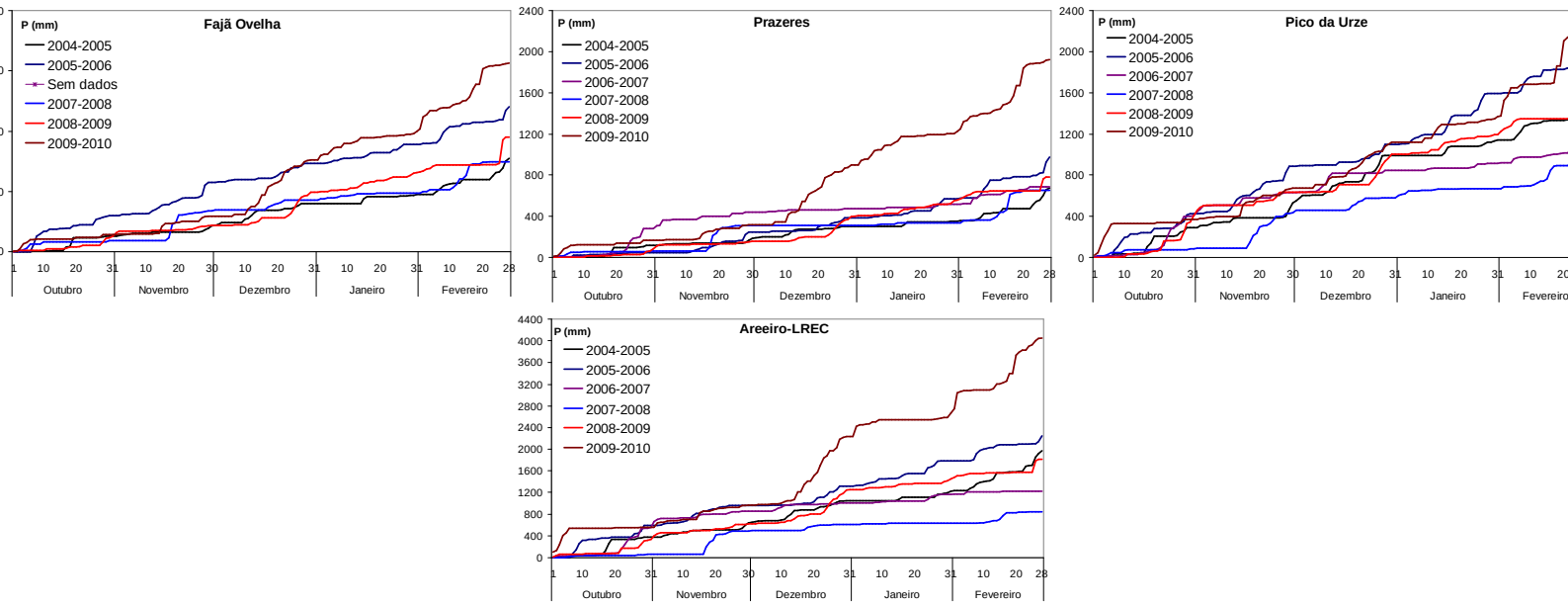

Figura 31 - Precipitação acumulada entre Outubro e Fevereiro em vários postos

4.3.2 Precipitação diária em 20 de Fevereiro de 2010

No mês de Fevereiro de 2010 registaram-se valores significativos de precipitação diária, que não se limitaram ao dia 20 (Quadro 13). Os totais diários dos dias 2, 18 e 20 de Fevereiro foram, com frequência, superiores a 100 mm e a precipitação dos três dias mais chuvosos de Fevereiro de 2010 correspondeu, em média a 60% da precipitação mensal. Nalguns postos verifica-se mesmo que mais de metade da precipitação mensal ocorreu em apenas dois dias, como no caso dos postos *Curral das Freiras* (53%), *Trapiche* (56%), *LREC* (51%), *PEF* (57%), *São Gonçalo* (62%) e *Camacha* (63%) (Quadro 13)

Nalguns postos o máximo diário não ocorreu no dia 20. No posto *São Gonçalo* o máximo diário do mês de Fevereiro foi 208 mm e ocorreu no dia 2, tendo a precipitação do dia 20 atingindo os 187,2 mm. No posto *Curral das Freiras* o máximo diário de 390 mm ocorreu no dia 2, o segundo máximo diário na ordem dos 196 mm aconteceu no dia 18. No dia 20 de Fevereiro os 153,2 mm correspondem ao terceiro máximo diário do mês de Fevereiro.

Quadro 13 - Características da precipitação (mm) no mês de Fevereiro de 2010

Posto udográfico	Altitude (m)	Precipitação Fev.2010	Máximos diários					N.º dias P >= 100 mm
			1º Máximo	Dia	2º Máximo	Dia	A	
Prazeres	632	695,6	163,8	20	105,4	18	39%	2
Massapez	300	561,2	147,2	20	72,8	2	39%	1
P. de Fora	750	877,6	206,8	20	143,4	18	40%	3

Pico da Urze	1365	818,2	242,2	20	163,4	18	50%	3
Trompica	1188	880,2	240,8	20	179,4	2	48%	3
C.das Freiras	800	1104,6	390,0	2	196,4	18	53%	3
Trapiche	590	872,4	340,2	20	144,4	2	56%	2
LREC	260	457,4	139,6	20	95,4	2	51%	1
Areeiro-LREC	1590	1386,0	333,8	20	310,3	2	46%	3
PEF	1300	1055,8	332,4	20	266,6	2	57%	2
São Gonçalo	220	638,8	208,0	2	187,2	20	62%	2
Camacha	675	958,4	351,0	20	248,4	2	63%	2
A – Peso dos dois máximos diários face ao total mensal								

No dia 20 de Fevereiro os totais diários foram superiores a 300 mm nos seguintes postos: *Trapiche* (340,2 mm), *PEF* (332,4 mm), *Areeiro-LREC* (333,8 mm) *e Camacha* (351 mm). A seguir a estes, os totais diários mais altos ocorreram no posto *Pico da Urze* (242,2 mm) e no *posto Trompica* (240,8 mm). O total diário mais baixo do dia 20 de Fevereiro foi de 139,6 mm no posto *LREC*.

A Figura 32 apresenta o mapa da precipitação diária do dia 20 Fevereiro de 2010, medida das 0:00 às 24:00. A superfície de precipitação foi obtida a partir de 35 postos das redes de udógrafos do LREC e da IGA por *krigagem* (Soares, 2006). As observações são ponderadas em função da sua distância à localização do ponto a estimar, através dum processo de estimativa ou interpolação espacial de médias ponderadas. O valor da distância utilizado no processo de ponderação é baseado no cálculo da distância estatística.

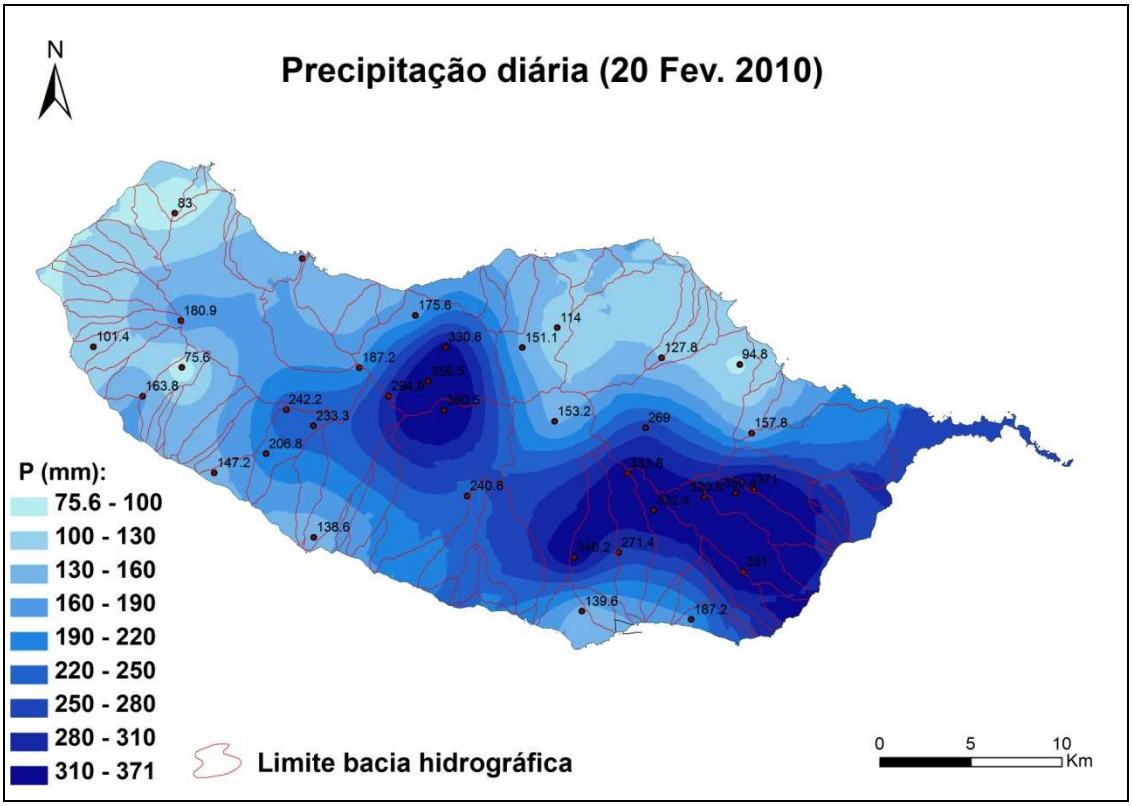

Figura 32 - Distribuição da precipitação diária de 20 Fevereiro de 2010 na ilha da Madeira (0 – 0 horas)

A quantidade de precipitação do dia 20 de Fevereiro de 2010 foi significativamente elevada, variando entre 270 e 370 mm em duas regiões da Ilha. Na parte oeste, numa mancha com o eixo maior no sentido norte-sul que abrange parte do planalto do Paul da Serra, a Encumeada e as serras adjacentes que formam as cabeceiras das ribeiras de São Vicente (para norte) e da ribeira Brava (para sul). Na parte este da ilha, numa mancha alongada no sentido este-oeste que abrange as serras do Funchal e de Santa Cruz acima dos 500/600 metros de altitude.

4.3.3 Evolução da precipitação ao longo do dia 20 de Fevereiro de 2010

O evento pluvioso do dia 20 de Fevereiro inicia-se 5h00 da madrugada, acentua-se a partir das 8h00 e mantem uma instensidade elevada até às 13h00. Perde intensidade a partir desta hora e termina por volta das 17h00. O período onde a precipitação foi mais intensa ocorreu em regra entre as 9h00 e as 12h00.

Os valores de precipitação registados denotam uma acentuada variabilidade espacial em áreas muito próximas. Na região do Funchal, por exemplo, as quantidades horárias no posto *Trapiche* corresponderam com frequência a mais do dobro daquelas verificadas no posto *LREC*, localizado apenas a três quilómetros do anterior. Embora os máximos horários tenham ocorrido à mesma hora nos dois postos, entre as 9h00 e as 10h00, o posto *LREC* registou menos de metade (42,2 mm) do máximo do posto *Trapiche* (88,4 mm).

Nas primeiras horas da manhã do dia 20 (8h00-11h00) ocorrem contrastes pluviométricos bem marcados entre a vertente sul e a vertente norte da ilha (Figura 33). Na própria vertente sul a variação espacial da precipitação mostra um padrão de diminuição da precipitação com altitude, principalmente no sector superior da vertente (8h00-9h00). Durante esta hora a chuva foi mais forte no sector inferior da vertente, com quantidades na ordem dos 35 mm, ao passo que no topo da montanha os níveis de água precipitada foram mais baixos, na ordem dos 25 mm (Figura 33).

Nas duas horas seguintes a precipitação torna-se mais intensa na cintura intermédia dos concelhos do Funchal e Santa Cruz, entre os 500 e os 1000 metros de altitude, com níveis de precipitação a atingir os 60 a 80 mm. Entre as 11h00 e as 12h00, a chuva permanece forte, entre 50 e 70 mm, nas terras do Poiso, Camacha e Santo da Serra, e em simultâneo, forma-se um núcleo de precipitação forte (na ordem dos 50 a 65 mm) nas cabeceiras da ribeira Brava e ribeira de São Vicente (Figura 33).

Em suma, a chuva começou por ser, entre as 9h00 e as 11h00, muito forte na referida cintura intermédia da parte este da Ilha, no Funchal e em Santa Cruz, tornando-se nas duas horas seguintes também muito forte na parte oeste, nos concelhos da ribeira Brava e Ponta do Sol, assim como no topo da montanha. Entre as 12h00 e as 13h00 chovia mais na cordilheira central, entre a Encumeada, passando pelo Pico do Areeiro, Poiso, Camacha, até o Santo da Serra (concelhos do Funchal e Santa Cruz).

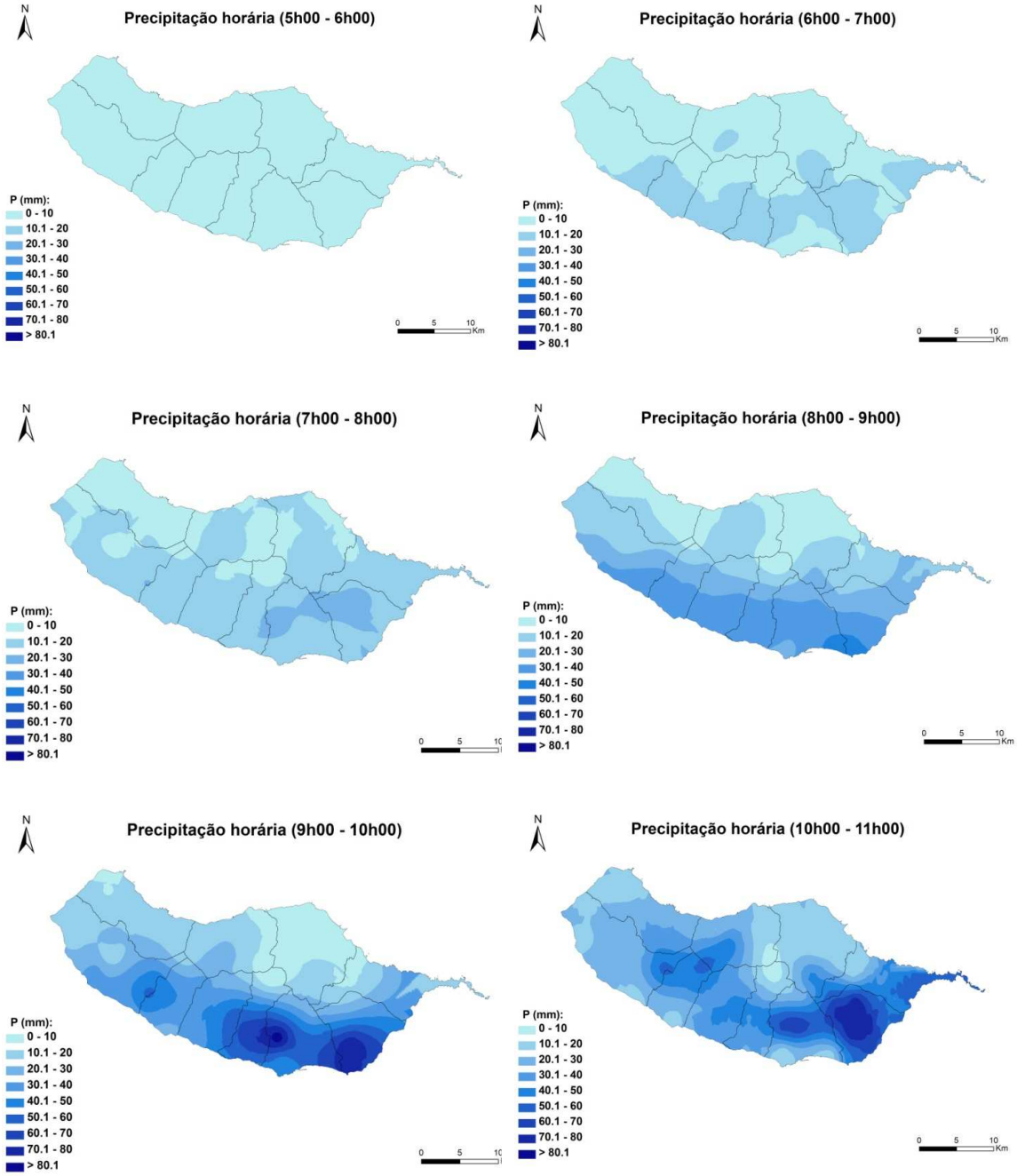

Figura 33 - Precipitação horária a 20 de Fevereiro de 2010 (5h00-11h00). Hora UTC

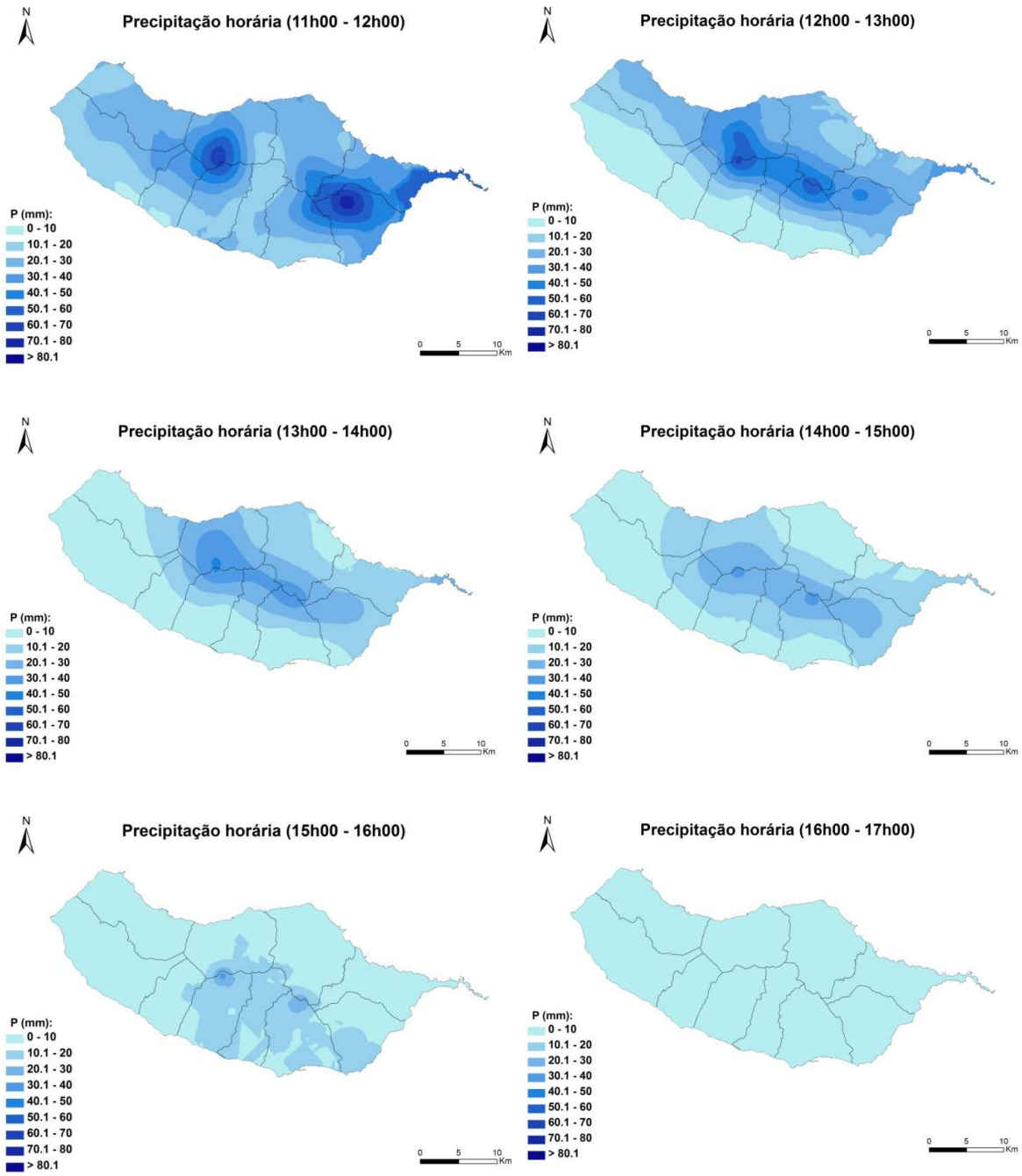

Figura 34 - Precipitação horária a 20 de Fevereiro de 2010 (11h00 – 17h00). Hora UTC

O Quadro 14 apresenta o número consecutivo de horas com precipitação horária igual ou superior a 10 mm e o número consecutivo de horas com precipitação igual ou superior a 30 mm. O maior número de horas consecutivas com precipitação horária superior a 10 mm aconteceu nos postos *Areeiro-LREC*, *Areeiro-IGA e Camacha*. Em contraste, no posto *Curral das Freiras-LREC* e *Santo da Serra* este limiar foi ultrapassado apenas durante 3 horas e 4 horas consecutivas, respectivamente. Nos restantes postos ocorreram valores acima de 10 mm durante cinco ou mais horas consecutivas.

Quadro 14 - Características da precipitação horária a 20 Fevereiro de 2010

Postos udográficos	Precipitação horária superior a 10 mm			Precipitação horária superior a 30 mm		
	n.º horas	total	%Pdia	n.º horas	total	%Pdia
Achada da Madeira (IGA)	8	126,3	84	0	0,0	0
Alegria (LREC)	6	216,2	80	2	127,4	47
Areeiro (IGA)	10	317,8	91	2	152,8	44
Areeiro (IGA) udog	9	240,4	-	1	55,5	-
Areeiro-LREC (LREC)	10	296,6	89	5	195,4	59
B.Cana (IGA) udog	8	168,2	-	1	40,3	-
B.Cana (IGA) autom	8	243,5	83	2	105,1	36
C.Freiras ETA (IGA)	8	242,2	-	3	136,3	-
Camacha (LREC)	10	323,8	92	3	194,2	55
Ch.Feiteiras (IGA)	9	256,3	-	3	138,1	-
Ch.Louros (IGA)	8	249,8	-	3	153,0	-
Curral das Freiras (LREC)	3	99,6	65	2	77,8	51
Encumeada (IGA)	9	314,9	87	6	268,1	74
LREC (LREC)	5	102,0	73	1	42,2	30
Massapez (LREC)	5	117,0	79	2	71,8	49
Meia Serra (V.Amb)	9	289,4	90	3	162,6	51
Ovil (IGA)	9	318,8	91	3	189,6	54
PEF (LREC)	9	291,0	88	5	203,4	61
Pico da Urze (LREC)	7	199,4	82	3	134,0	55
Pinheiro de Fora	6	168,8	82	3	120,6	58
Poiso (IGA)	7	258,9	-	4	193,6	-
Prazeres (LREC)	5	126,4	77	2	64,2	39
Rib.Alecrim (IGA)	6	182,0	-	3	124,6	-
S.Gonçalo (LREC)	5	147,2	79	2	111,2	59
S.Serra (IGA)	4	133,9	-	1	63,9	-
Trapiche (IGA)	5	124,7		1	36,2	-
Trapiche (LREC)	6	266,6	78	3	194,4	57
Trompica (LREC)	6	180,4	75	3	130,4	54

No posto *Areeiro-LREC* a precipitação horária foi sempre superior a 10 mm entre as 6h00 e as 16h00, totalizando nestas 10 horas 296,6 mm. Em metade destas horas (10h00-15h00), a precipitação horária foi superior a 30 mm. O máximo horário de 59,8 mm aconteceu entre as 11h00 e as 12h00, tendo ocorrido na hora seguinte o segundo pico horário (37 mm). Das 7h00 às 10h00 salienta-se o carácter contínuo e concentrado da precipitação: 24,4 mm na primeira hora, 22,4 mm na segunda e na terceira hora respectivamente. Ou seja, se nas primeiras três horas da manhã a média da precipitação horária foi de 23 mm, nas cinco horas seguintes a média aumentou para 39 mm. Nas seis horas consecutivas mais chuvosas de 20 de Fevereiro a média da precipitação horária foi de 36,3 mm.

O posto *Areeiro-IGA-Automático* registou entre as 6h00 e as 16h00 317,8 mm, com valores horários sempre superiores a 10 mm. O máximo horário (em janela fixa) foi 122,6 mm e ocorreu entre as 11h00 e as 12h00. Este valor levanta algumas suspeitas porque distancia-se do valor registado no posto do LREC e do udógrafo da IGA que registaram máximo horário (em janela fixa) de 59,8 mm e 55,5 mm, respectivamente.

O udografo da IGA no *Areeiro* registou 6 horas consecutivas, entre as 10h00 e as 16h00, com valores acima de 20 mm, entre as quais duas horas não consecutivas acima de 40 mm.

No posto *Camacha*, por dez horas consecutivas, entre as 6h00 e as 16h00 a precipitação horária foi superior a 10 mm, perfazendo um total de 323,8 mm. Em três destas horas, das 8h00 às 11h00, a a precipitação horária foi superior a 30 mm. Salientam-se os picos horário de 79,8 mm das 9h00 às 10h00 e 77 mm na hora seguinte. A chuva mantém-se forte após as 11h00, ocorrendo 29, 4 mm até às 12h00 e 20 mm na hora seguinte. Das 13h00 às 14h00 a precipitação diminui (12,2 mm), mas aumenta substancialmente nas duas horas seguintes: 20 mm e 17,4 mm respectivamente.

O posto da *Encumeada* da IGA registou 6 horas consecutivas com valores horários sempre acima de 30 mm, incluindo 3 horas consecutivas com valores acima de 40 mm. Nessas 3 horas ocorreram 2 horas consecutivas, entre as 11h00 e as 13h00, em que os valores horários ultrapassaram os 60 mm e totalizaram 124,8 mm.

Nos postos de *Ovi*l e *Meia Serra* entre as 10h00 e as 12h00 ocorreram 2 horas consecutivas com valores horários acima de 60 mm, totalizando respectivamente 146,1 mm e 128,4 mm.

No posto *Trapiche* entre as 6h00 e as 12h00 choveu 266,6 mm, com valores horários sempre superiores a 10 mm. Por duas horas consecutivas choveu mais de 50 mm: entre as 8h00 e as 9h00 registou-se o máximo horário de 88,4 mm, tendo ocorrido na hora seguinte um total de 62,4 mm. O terceiro pico horário de 43,6 mm ocorreu das 7h00 às 8h00. Durante a tarde verificaram-se ainda por duas horas consecutivas (14h00 às 16h00) a precipitação horária na ordem de 14 mm. Nas seis horas mais chuvosas do dia 20 de Fevereiro de 2010 a média da precipitação horária foi de 44,4 mm.

No posto *Pico da Urze*, entre as 6h00 e as 13h00, a precipitação horária foi sempre superior a 10 mm, totalizando 199,4 mm neste intervalo de tempo. Durante três horas consecutivas, das 9h00 às 12h00, a precipitação horária foi superior a 30 mm, sendo o máximo horário de 55,6 mm. Nas seis horas mais chuvosas de 20 de Fevereiro de 2010 a média da precipitação horária foi de 31,5 mm.

Nos postos *Areeiro-LREC* e *PEF* ocorreu o maior número de horas seguidas (5 horas) com precipitação superior a 30 mm. No posto *LREC* a precipitação foi superior a 30 mm apenas em uma hora. Nos restantes postos a com precipitação horária superior a 30 mm aconteceu durante duas ou três horas consecutivas (Quadro 14).

No período de chuva intensa do dia 20 de Fevereiro de 2010 foram registados vários eventos consecutivos de com precipitação em 10 minutos superior a 5 mm (Quadro 15). Regra geral os máximos em 10 minutos coincidem com a hora em que ocorreu o máximo horário.

Quadro 15 - Valores de precipitação em 10 min

Posto	Máximo de precipitação em 10 min	Duração aproximada do intervalo com valores de precipitação em 10 min superiores a 5 mm
Alegria	19,2 mm	3h20min
Areeiro (IGA) Autom	47,3 mm	1h50min
Areeiro-LREC	13,6 mm	4h00min
B.Cana (IGA)	12,6 mm	2h00min
Camacha	24,6 mm	2h50min
Curral das Freiras	9,0 mm	2h10min
Encumeada (IGA)	14,0 mm	4h00min
Massapez	9,2 mm	1h50min
Ovil	19,1 mm	2h50min
Pico da Urze	11,6 mm	3h00min
Pinheiro de Fora	9,4 mm	2h20min
Prazeres	9,6 mm	1h30min
São Gonçalo	16,6 mm	1h50min
Trapiche	20,0 mm	3h30min
Trompica	11,2 mm	2h20min

4.3.4 Máximos de precipitação para intervalos subdiários

O Quadro 16 apresenta os valores máximos de precipitação para os períodos de 10, 30 minutos e ainda 1, 3, 6, 12 e 24 horas dependendo do intervalo de monitorização de cada estação. Os valores máximos apresentados para períodos superiores a hora dizem respeito a janelas móveis com a duração indicada, sendo superiores aos valores de precipitação que ocorreram em intervalos fixos com início aos zero minutos de cada hora. Para tal, afectaram-se os valores observados em postos com um intervalo de monitorização de uma hora por um coeficiente que reproduz o ratio entre os valores medidos entre janelas móveis e janelas fixas (1,14, 1,01 e 1,00, respectivamente para 1, 3 e 6 horas).

A Figura 35 ilustra de forma gráfica alguns destes valores, apresentando os valores da intensidade máxima de precipitação em função da duração para vários postos, agrupados por zonas da ilha.

Quadro 16 - Máximos de precipitação para intervalos subdiários

Posto	10 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Achada da madeira – autom	-	-	28	66	108	146	151
Alegria (ETA)	19	53	88	160	217	263	272
Areeiro – IGA	-	-	63	106	195	263	279
Areeiro - IGA –autom	47	102	140	177	262	334	352
Areeiro - IM (Achada Grande) – EMA II	15	-	79	-	272	372	387
Areeiro (Achada Grande) – LREC	14	39	65	139	224	315	338
Bica da Cana - IGA – autom	13	36	66	137	211	278	295
Bica da Cana - IGA – udog	-	-	46	92	142	185	196
Bica da Cana – LREC	-	-	21	51	84	123	138
Camacha	25	67	114	194	264	339	352
Chão das Feiteiras – IGA	-	-	67	139	198	284	297
Chão dos Louros	-	-	76	155	222	278	299
Curral das Freiras (LREC)	9	26	48	103	118	142	159
Curral das Freiras (ETA)	-	-	66	138	205	273	284
Encumeada – IGA autom	14	39	74	167	268	339	364
Estanquinhos	8	23	44	102	155	176	187
Funchal – Lido	6	17	28	46	62	76	79
Funchal – Observatório	11	31	51	101	112	138	144
LREC (São Martinho)	11	31	52	104	148	185	191
LREC (São Martinho) (EMA)	-	-	21	51	84	123	138
Lugar de Baixo (IM)	7	-	39	-	90	94	95
Machico – autom	-	-	57	107	136	164	165
Meia Serra – LREC	16	44	84	163	238	313	321
Ovil	19	52	100	190	265	343	350
Parque Ecológico Funchal	-	-	60	143	230	319	333
Pico da Urze (Jungle Rain)	12	31	56	135	193	237	242
Pico das Pedras (Posto Florestal)	6	6	10	17	86	123	128
Pico Verde (Calheta)	-	-	17	39	55	67	76
Pinheiro de Fora	9	28	53	122	169	196	207
Poiso (Posto Florestal)	-	-	85	161	237	296	307
Ponta do Sol	-	24	42	80	115	135	139
Porto Moniz	-	-	25	50	67	79	83
Prazeres	10	21	34	95	136	157	164
Ribeira do Alecrim	-	-	62	126	182	229	240
Rosário	-	-	75	160	254	-	-
Santo da Serra	-	-	73	116	158	206	211
São Gonçalo	17	43	66	127	157	181	187
Trapiche – LREC	20	53	99	194	267	327	341
Trapiche (Santo António) – udog – IGA	-	-	41	88	130	156	161
Trompica (Posto Florestal)	11	31	60	131	180	229	243

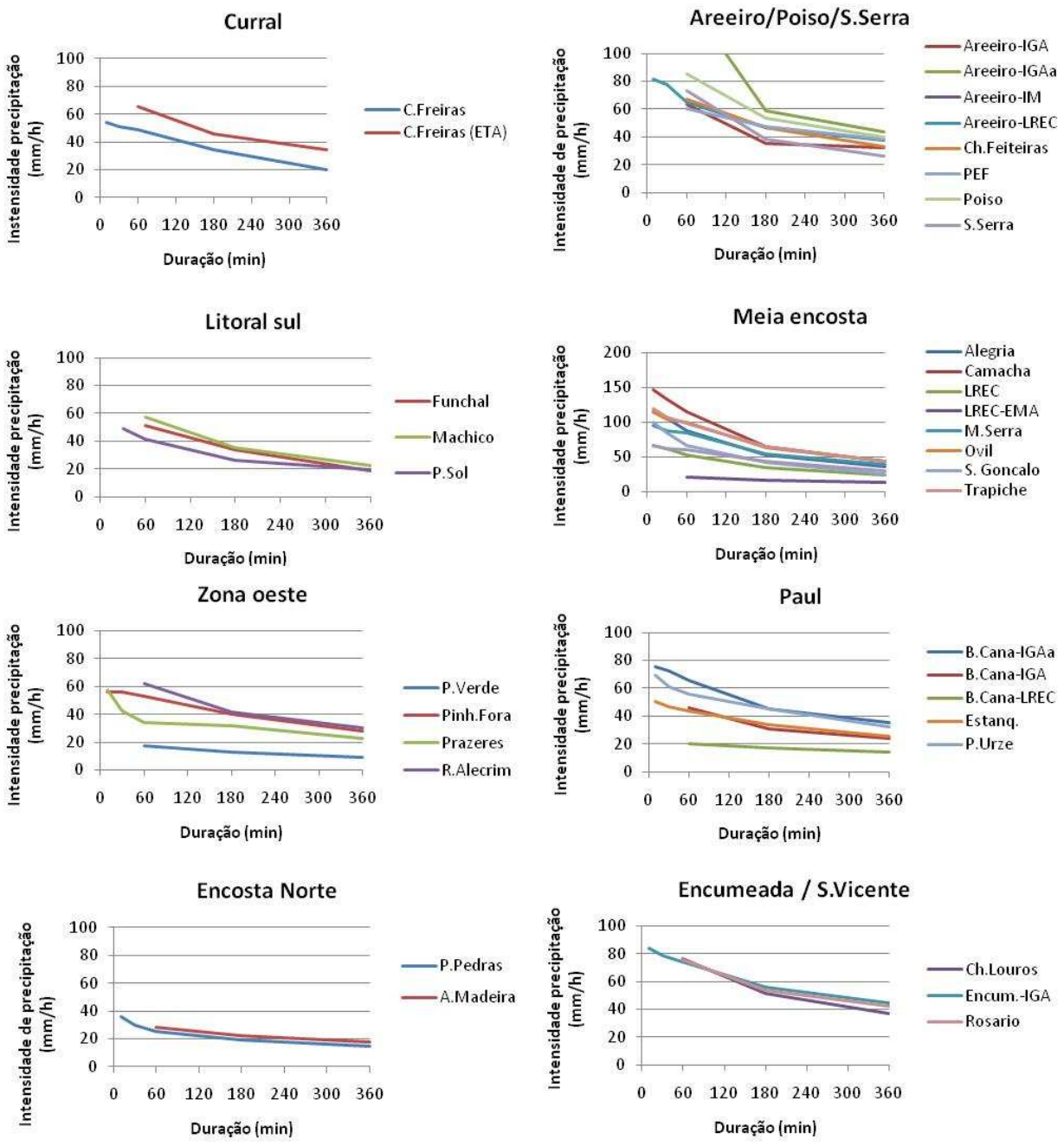

Figura 35 - Intensidade máxima de precipitação em função da duração para várias zonas de ilha.

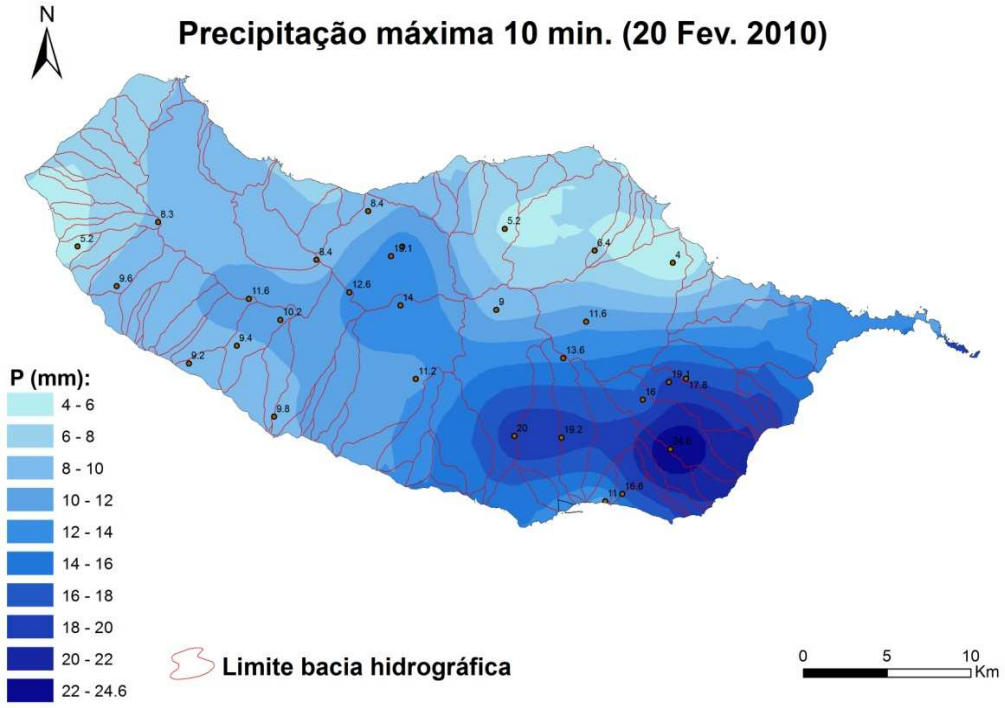

Figura 36 - Precipitação máxima acumulada em 10 minutos no dia 20 de Fevereiro.

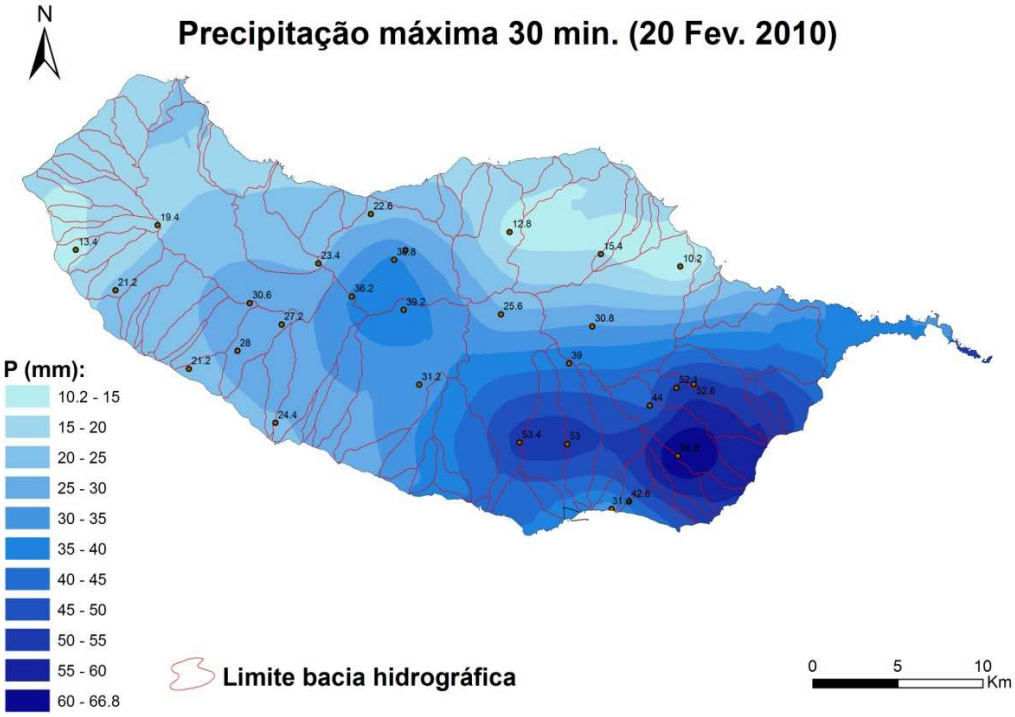

Figura 37 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 30 minutos, no dia 20 de Fevereiro.

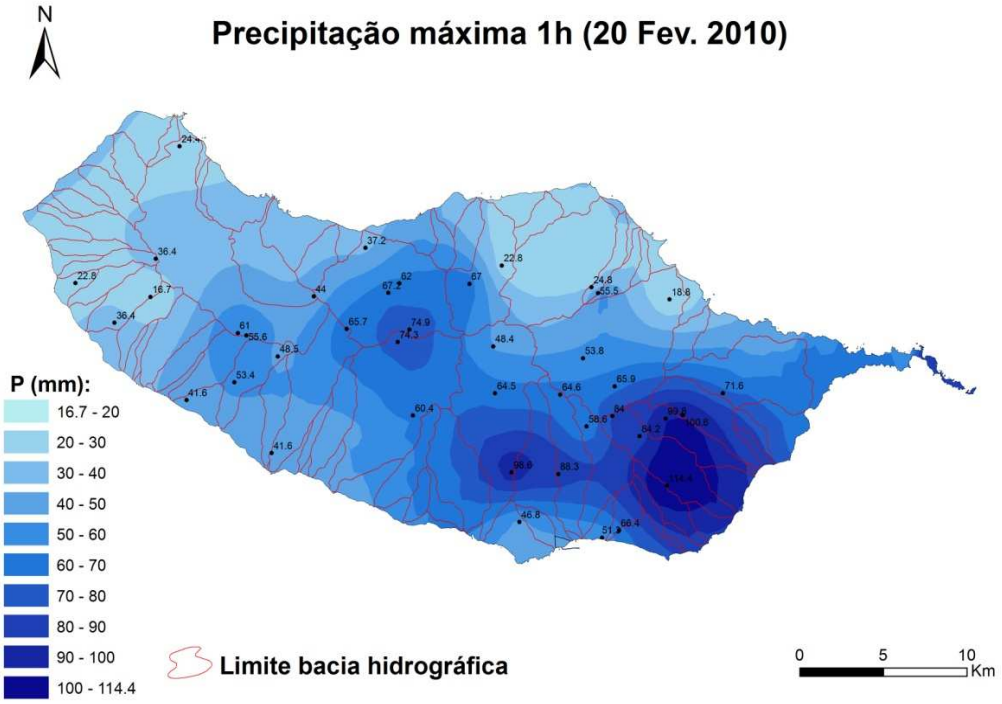

Figura 38 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 1 hora, no dia 20 de Fevereiro.

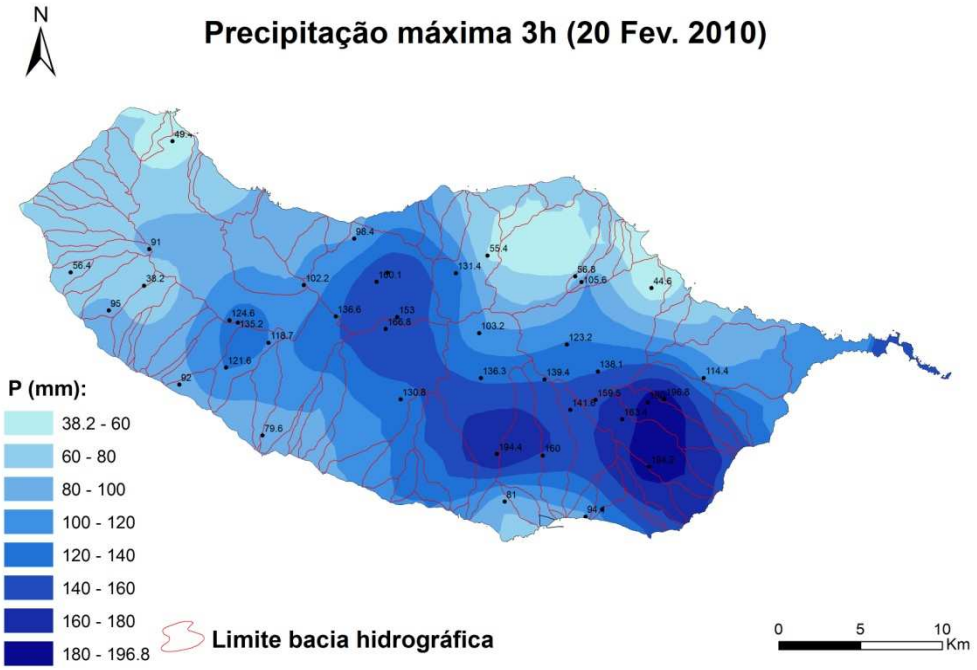

Figura 39 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 3 horas, no dia 20 de Fevereiro.

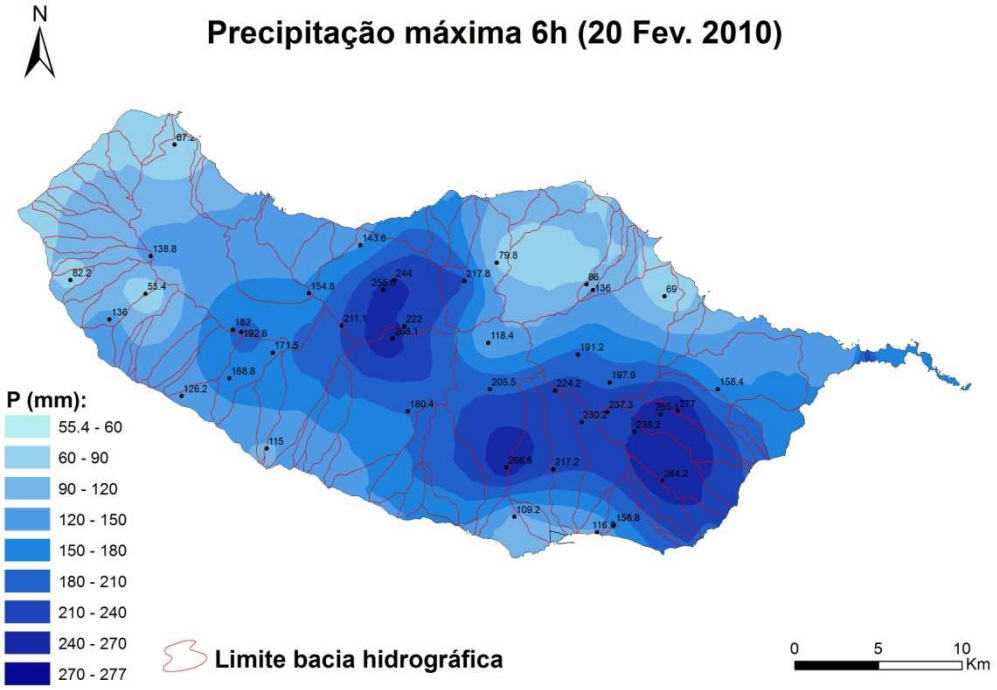

Figura 40 - Precipitação máxima acumulada num intervalo de tempo de 6 horas, no dia 20 de Fevereiro.

4.3.5 Grau de excepcionalidade do evento de precipitação de Fevereiro de 2010

A partir dos registos diários de precipitação foi possível avaliar as precipitações que tiveram lugar no dia 20 de Fevereiro de 2010, bem como as acumuladas em dias antecedentes a essa data, em oito dos postos, nomeadamente nos postos da rede do IGA do Areeiro, Bica da Cana, Chão das Feiteiras, ETA da Ribeira Brava, Lugar de Baixo, Poiso – Posto Florestal, Ribeira do Alecrim e Santo da Serra. Dado que a informação disponível corresponde a registos diários de precipitação referentes ao período de 24 h compreendido entre as 9:00h de um dia e as 9:00 h do dia seguinte, as precipitações excepcionais que tiveram lugar no dia 20 de Fevereiro de 2010 distribuem-se pelos registos atribuídos aos dias 20 e 21 desse mês.

Adicionalmente, a informação referente ao posto do Funchal – Observatório, permitiu avaliar, para durações compreendidas entre 10 minutos e 6 dias, as precipitações máximas registadas no posto em intervalos de tempo contínuos com aquelas durações e compreendendo o acontecimento pluvioso do dia 20 de Fevereiro.

Mediante inversão da lei de Pearson III com parâmetros estimados com base na amostra a que se refere cada um dos máximos de precipitação anteriormente mencionados atribuiu-se a tal máximo uma probabilidade de não-excedência, bem como o correspondente período de retorno.

Os resultados obtidos estão sistematizados no Quadro 17 quando referentes a precipitações avaliadas a partir de registos diários e no Quadro 18 para o posto do Funchal – Observatório (registos sub-diários). As características estatísticas das amostras indicadas nos quadros precedentes coincidem com as anteriormente explicitadas no Item 3.4.4.

Os períodos de retorno calculados no Quadro 17 permitem concluir que, com excepção dos postos da Ribeira do Alecrim para durações superiores a 2 dias e do Poiso para a duração de 1 dia, as precipitações registadas entre 1 e 6 dias não foram particularmente excepcionais, havendo, contudo, algumas ocorrências com período de retorno superior a 20 anos. Contudo, no caso dos dois postos referidos, a precipitações foram nitidamente extraordinárias.

Relativamente ao posto da Ribeira do Alecrim, que indica um período de retorno crescente com o aumento da duração da precipitação até cinco dias, circunstância pouco provável no domínio das precipitações intensas, julga-se que enfermará de erro nos dados de base. Anota-se também que é de estranhar o período de retorno referente à precipitação com a duração de um dia no posto do Poiso, face aos períodos de retorno para os postos vizinhos do Areeiro e do Santo da Serra.

Os resultados do Quadro 18 sugerem que no posto Funchal – Observatório o acontecimento pluvioso de 20 de Fevereiro pode consubstanciar, para algumas durações de precipitação, uma situação excepcional, associada a uma probabilidade de ocorrência baixa, equivalente a condições de projecto baseadas num período de retorno de 100 anos.

Importa notar que a análise dos períodos em que ocorreram as precipitações máximas em 3, 6, 12 e 18 horas no posto do Funchal-Observatório sugere que a discretização temporal das precipitações diárias entre as 9:00 de um dia e as 9:00 h do dia seguinte poderá “mascarar” a magnitude do evento, já que, nesse posto, o evento do dia 20 de Fevereiro ocorreu, essencialmente, em 12 horas, designadamente entre as 5:00 h e as 17:00 h.

Quadro 17 - Análise da excepcionalidade das precipitações com durações de 24, 48, 72, 96, 120 e 144 horas, finalizando às 9:00 h do dia 21 de Fevereiro de 2010.

Posto	Duração (dias)	Dimensão da amostra	Amostra de precipitações máximas anuais			Precipitações máximas anuais					Fevereiro de 2010		
			Média (mm)	Desvio--padrão (mm)	Coef. assimetria (-)	T=10 anos (mm)	T=20 anos (mm)	T=50 anos (mm)	T=100 anos (mm)	T=1000 anos (mm)	Dia, hora de início-dia, hora de fim	Precipitação (mm)	T (anos)
Areeiro	1	53	187.4	79.2	2.177	287.1	343.5	420.3	480.0	687.7	20, 9:00-21,9:00	257.6	6.9
	2		267.3	99.1	1.104	399.4	454.4	523.5	574.2	736.6	19,9:00-21,9:00	309.6	3.6
	3		315.8	119.2	0.882	474.8	536.5	612.8	667.7	840.4	18,9:00-21,9:00	361.4	3.3
	4		363.5	134.7	0.836	543.1	611.8	696.3	757.0	946.8	17,9:00-21,9:00	458.4	4.6
	5		399.7	148.3	0.754	597.2	670.7	760.5	824.6	1023.4	16,9:00-21,9:00	468.0	3.5
	6		426.1	159.8	0.684	638.6	715.9	809.6	876.2	1081.2	15,9:00-21,9:00	475.4	2.9
Bica da Cana	1	43	141.5	40.8	0.671	195.7	215.3	239.1	256.0	307.8	20, 9:00-21,9:00	150.4	2.7
	2		209.1	73.7	1.296	307.2	350.4	405.6	446.5	579.9	19,9:00-21,9:00	195.4	2.0
	3		249.8	91.5	1.099	371.9	422.5	486.3	533.0	682.6	18,9:00-21,9:00	250.4	2.4
	4		290.2	102.3	0.713	426.3	476.3	537.1	580.4	714.0	17,9:00-21,9:00	330.8	3.2
	5		319.8	110.2	0.659	466.3	519.1	583.0	628.4	767.6	16,9:00-21,9:00	342.4	2.6
	6		345.8	123.8	0.736	510.6	571.6	646.0	699.1	863.2	15,9:00-21,9:00	366.4	2.6
Chão das Feiteiras	1	13	158.2	62.8	1.778	239.9	281.2	336.0	377.8	519.1	20, 9:00-21,9:00	241.6	10.3
	2		234.5	84.8	1.520	346.4	399.0	467.4	518.8	689.5	19,9:00-21,9:00	326.2	7.7
	3		275.1	94.8	1.408	400.7	457.9	531.6	586.6	767.7	18,9:00-21,9:00	429.4	14.1
	4		306.0	100.3	1.156	439.7	496.2	567.5	620.0	788.9	17,9:00-21,9:00	514.8	25.3
	5		325.6	106.4	0.875	467.5	522.4	590.2	639.1	792.5	16,9:00-21,9:00	521.8	19.8
	6		359.5	118.6	0.438	515.8	568.1	630.0	673.1	801.9	15,9:00-21,9:00	526.4	11.4
ETA da Ribeira Brava	1	10	72.7	18.7	-0.320	95.9	101.6	107.8	111.7	122.1	20, 9:00-21,9:00	24.0	1.0
	2		101.0	32.9	0.482	144.4	159.2	176.7	189.0	225.8	19,9:00-21,9:00	166.0	28.2
	3		124.3	39.6	0.461	176.5	194.1	215.0	229.6	273.3	18,9:00-21,9:00	191.4	17.9
	4		136.2	47.1	1.409	198.7	227.1	263.8	291.2	381.3	17,9:00-21,9:00	264.4	50.7
	5		148.2	55.7	1.745	220.8	257.2	305.4	342.0	465.5	16,9:00-21,9:00	271.4	26.2
	6		156.9	63.0	1.973	237.7	280.8	338.8	383.4	536.5	15,9:00-21,9:00	280.9	20.0
Lugar de Baixo	1	56	53.2	22.7	1.940	82.4	97.9	118.6	134.5	189.0	20, 9:00-21,9:00	38.1	1.4
	2		72.1	29.9	2.400	108.9	131.0	161.5	185.5	270.2	19,9:00-21,9:00	96.4	6.7
	3		82.1	33.7	2.236	124.2	148.4	181.5	207.4	297.5	18,9:00-21,9:00	100.2	4.9
	4		92.2	36.5	1.723	139.8	163.5	194.8	218.6	298.7	17,9:00-21,9:00	160.0	18.0
	5		100.4	37.8	1.293	150.7	172.8	201.1	222.1	290.4	16,9:00-21,9:00	167.4	16.8
	6		105.7	38.4	1.193	156.9	178.8	206.5	226.9	293.0	15,9:00-21,9:00	176.4	18.5
Poiso (Posto Florestal)	1	37	142.5	40.5	0.506	196.0	214.4	236.3	251.6	297.8	20, 9:00-21,9:00	266.2	200.5
	2		205.3	63.0	0.539	288.7	317.6	352.2	376.4	449.9	19,9:00-21,9:00	312.8	17.7
	3		238.5	71.7	0.165	331.5	359.6	391.9	413.9	477.0	18,9:00-21,9:00	344.6	13.6
	4		270.3	83.1	0.056	377.3	408.3	443.5	467.0	533.8	17,9:00-21,9:00	442.0	48.0
	5		302.6	105.2	1.188	442.9	502.7	578.5	634.3	814.6	16,9:00-21,9:00	448.8	10.7
	6		321.4	105.8	0.957	462.7	518.8	588.5	639.1	799.1	15,9:00-21,9:00	452.4	8.9
Ribeira do Alecrim	1	14	131.3	30.1	1.503	171.0	189.5	213.6	231.7	291.7	20, 9:00-21,9:00	191.0	21.1
	2		182.7	37.0	0.078	230.4	244.4	260.3	270.9	301.2	19,9:00-21,9:00	249.4	26.3
	3		218.8	50.1	0.134	283.8	303.2	325.4	340.4	383.4	18,9:00-21,9:00	345.2	126.4
	4		244.1	53.5	0.120	313.2	333.8	357.3	373.2	418.6	17,9:00-21,9:00	407.6	549.0
	5		264.9	54.8	-0.211	333.8	351.6	371.2	383.9	418.0	16,9:00-21,9:00	417.8	983.0
	6		283.7	60.1	0.022	360.9	383.0	407.9	424.6	471.4	15,9:00-21,9:00	445.6	263.3
Santo da Serra	1	53	123.1	39.9	0.257	175.2	191.5	210.5	223.5	261.3	20, 9:00-21,9:00	191.0	19.5
	2		174.5	67.0	0.840	263.9	298.1	340.2	370.5	465.2	19,9:00-21,9:00	213.4	4.0
	3		203.2	84.9	1.514	315.2	367.8	436.1	487.4	657.7	18,9:00-21,9:00	264.0	5.2
	4		232.6	96.5	1.332	360.8	417.9	491.1	545.4	723.2	17,9:00-21,9:00	290.6	4.5
	5		252.9	107.0	1.142	395.6	455.6	531.4	587.1	766.2	16,9:00-21,9:00	291.4	3.3
	6		271.7	111.9	0.939	421.0	480.0	553.2	606.2	773.6	15,9:00-21,9:00	293.0	2.7

Quadro 18 - Funchal – Observatório. Excepcionalidade do acontecimento pluvioso de 20 de Fevereiro.

Posto	Duração	Dimensão da amostra	Amostra de precipitações máximas anuais			Precipitações máximas anuais					Fevereiro de 2010		
			Média (mm)	Desvio--padrão (mm)	Coef. assimetria (-)	T=10 anos (mm)	T=20 anos (mm)	T=50 anos (mm)	T=100 anos (mm)	T=1000 anos (mm)	Dia, hora de início-dia, hora de fim	Precipitação (mm)	T (anos)
Funchal- Observatório	10 minutos	14	10.5	2.4	-0.275	13.5	14.2	15.0	15.5	16.9	20, 9:20-20, 9:30	11.0	2.3
	30 minutos		18.9	7.2	0.784	28.4	32.0	36.4	39.5	49.3	20 , 8:40-20, 9:10	31.4	17.7
	1 hora	29	23.5	9.6	0.941	36.4	41.4	47.8	52.3	66.8	20, 9:00-20, 10:00	51.2	84
	3 horas		39.9	13.4	0.600	57.7	64.0	71.6	77.0	93.3	20, 8:00-20, 11:00	91.3	748
	6 horas		48.9	17.0	0.544	71.5	79.3	88.7	95.3	115.2	20, 6:00-20, 12:00	116.7	1198
	12 horas		58.8	21.5	0.396	87.2	96.5	107.5	115.1	137.8	20, 5:00-20, 17:00	140.6	1365
	18 horas		64.0	24.5	0.215	95.9	105.7	117.1	124.8	147.3	20, 1:00-20 , 19:00	146.8	945
	1 dia	71	59.9	23.6	0.595	91.3	102.3	115.7	125.1	153.7	20, 00:00-21, 00:00	146.9	566
	2 dias		80.1	30.9	0.704	121.3	136.3	154.6	167.7	207.8	20, 03:00-22, 03:00	152.2	44
	3 dias		94.1	36.4	0.677	142.4	160.0	181.3	196.4	242.9	17, 20:00-20, 20:00	168.8	29
	4 dias		103.5	40.0	0.941	156.9	178.0	204.2	223.2	283.1	17, 08:00-21, 08:00	199.9	43
	5 dias		110.6	40.4	0.744	164.4	184.4	208.8	226.1	280.0	17, 09:00-22, 09:00	204.2	42
	6 dias		115.4	40.6	0.711	169.4	189.3	213.4	230.6	283.6	16, 18:00-22, 18:00	217.8	60

4.4 ANÁLISE DOS ESCOAMENTOS LÍQUIDOS

A Figura 41 apresenta a localização das secções em linhas de água para as quais se estimaram valores de caudal de ponta do evento de 20/2/2010.

O tempo de concentração de cada uma destas secções foi estimado com base no comprimento do percurso de escoamento do limite da bacia hidrográfica até a cada secção, assumindo-se diferentes valores da velocidade de escoamento consoante a dimensão do curso de água. O Quadro 19 apresenta as estimativas do tempo de concentração para as secções finais das principais bacias hidrográficas, assumindo diferentes hipóteses de velocidade de escoamento para a rede hidrográfica que drena mais de 1 km^2 (V_{rh}) e para as encostas e linhas de água de menor dimensão. São também apresentadas as estimativas calculadas de acordo com a fórmula de Temez e fórmula de Kirpich. Tendo em conta os resultados da simulação hidráulica optou-se por adoptar os valores que assumem uma velocidade escoamento média nos principais cursos de água igual a 4 m/s e uma velocidade de escoamento média ao longo das encostas e nos cursos de água de menor dimensão de 1 m/s.

Quadro 19 - Estimativa do tempo de concentração (horas) para as diferentes bacias hidrográficas

Bacia hidrográfica	Área (km^2)	Tempo de concentração (horas)				
		V_{rh} = 1,0 m/s V_e = 0,3 m/s	V_{rh} = 4,0 m/s V_e = 1,0 m/s	V_{rh} = 6,0 m/s V_e = 1,0 m/s	Temez	Kirpich
João Gomes	11,4	4,3	1,1	0,9	2,4	0,8
Sta Luzia	15,6	4,3	1,2	0,9	2,7	0,9
São João	14,7	4,2	1,1	0,8	2,6	0,9
R.Brava	40,9	5,1	1,4	1,1	3,3	1,2
Tabua	8,8	4,6	1,3	1,1	1,8	0,6

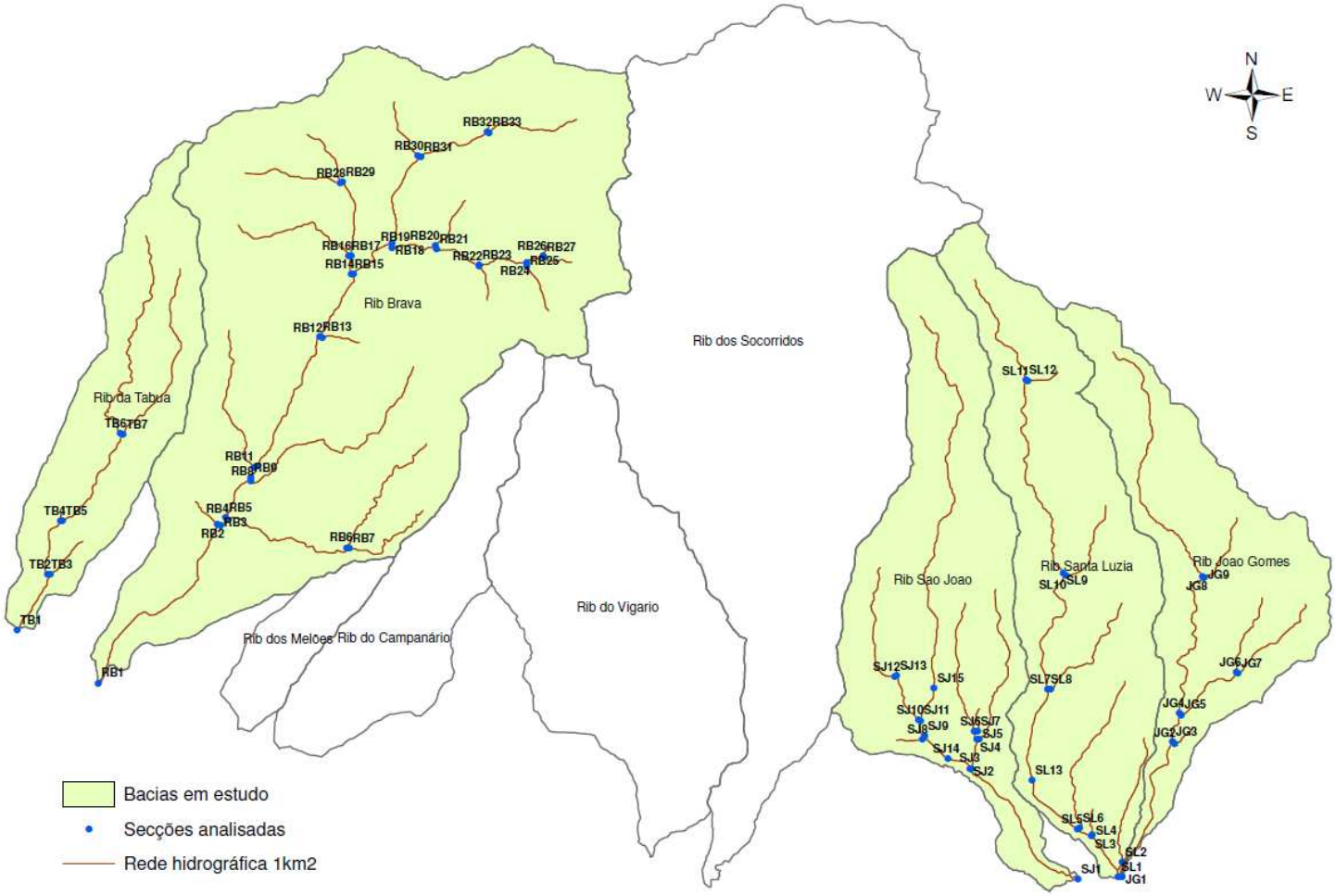

Figura 41 - Localização e identificação das secções analisadas no presente estudo.

A partir dos valores do tempo de concentração e das superfícies de precipitação estimadas para diferentes intervalos de tempo é possível estimar os valores máximos de caudal líquido que ocorreram durante o evento de 20/2/2010 em diversas secções das ribeiras em estudo.

O evento de 20/2/2010 ocorreu na sequência de um inverno muito húmido e de um mês de Fevereiro em que a precipitação foi significativa e persistente no tempo. Pode-se assim assumir que durante o evento de 20/2/2010 o solo se encontrava completamente saturado, e consequentemente com uma muito reduzida capacidade de infiltração.

Nestas circunstâncias, o valor do caudal de ponta em cada secção pode ser estimado pelo produto da área da bacia hidrográfica com o valor da intensidade máxima de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração. Ao não multiplicar o resultado deste produto por um factor agravamento do caudal de ponta (Hipólito et al, 2006), em regra da ordem dos 1,1 a 1,2, assume-se a infiltração de uma pequena parte da quantidade de água precipitada.

O valor da intensidade máxima de precipitação para uma duração igual ao tempo de concentração foi estimado a partir da análise das superfícies de precipitação apresentadas no Capítulo 3. Por uma questão de simplificação assumiram-se os valores indicados nos quadros seguintes. Os quadros também apresentam as estimativas de caudal de ponta de cheia para as secções identificadas na Figura 32.

A título de comparação, regista-se que o caudal de ponta, estimado para a secção terminal da ribeira de Santa Luzia, correspondente à precipitação de 29 de Outurbo de 1993 foi da ordem de 235 m^3/s, considerado como equivalente ao caudal correspondendo a um período de retorno de 50 anos (estudo elaborado pela Hidrotécnica Portuguesa para a Secretaria Regional do Equipamento Social e Ambiente em 1994). De acordo com o referido estudo, o caudal de ponta estimado para o evento de 20/2/2010 na zona terminal da ribeira de Santa Luzia (303 m^3/s) corresponderia a um período de retorno de cerca de 100 anos.

Tendo em conta o Quadro 21, o actual estudo também aponta para esta ordem de grandeza.

Quadro 20 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções de João Gomes.

Secção	Área da bacia hidrográfica (km2)	Distância ao início da rede hidrográfica de 1 km2 (m)	Distância à cabeceira (m)	Tempo de concentração (h)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Caudal de ponta (m3/s)
JG1	11,4	9768	11448	1,1	74	234
JG2	0,6	385	2896	0,7	84	14
JG3	10,1	7391	8992	1,0	79	220
JG4	6,6	6920	8488	0,9	78	143
JG5	3,3	2786	4532	0,7	83	75
JG6	1,1	1305	2881	0,5	96	29
JG7	1,6	1608	3300	0,6	95	42
JG8	3,9	4219	5744	0,7	77	82
JG9	1,2	1127	3490	0,7	86	28

Quadro 21 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da RIbeira de Santa Luzia

Secção	Área da bacia hidrográfica (km2)	Distância ao início da rede hidrográfica de 1 km2 (m)	Distância à cabeceira (m)	Tempo de concentração (h)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Caudal de ponta (m3/s)
SL1	15,6	10887	12306	1,2	70	303
SL2	1,4	2171	3911	0,6	80	30
SL3	13,5	10123	11539	1,1	71	266
SL4	0,6	458	2425	0,6	92	16
SL5	11,4	9879	11283	1,1	71	226
SL6	2,0	2597	4600	0,7	77	43
SL7	1,3	1980	3264	0,5	78	29
SL8	8,9	7404	8664	0,9	74	183
SL9	5,6	5260	6461	0,7	101	158
SL10	1,7	1396	3250	0,6	81	38
SL11	1,0	546	2117	0,5	90	24
SL12	1,6	1857	2980	0,4	88	40
SL13	10,9	8814	10190	1,0	73	221

Quadro 22 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da Ribeira de São João.

Secção	Área da bacia hidrográfica (km2)	Distância ao início da rede hidrográfica de 1 km2 (m)	Distância à cabeceira (m)	Tempo de concentração (h)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Caudal de ponta (m3/s)
SJ1	14,7	10928	12140,8	1,1	75	305
SJ2	9,7	8028	9511,9	1,0	77	208
SJ3	3,6	3008	4957,2	0,8	89	88
SJ4	1,7	2226	3926,6	0,6	95	46
SJ5	0,0	2558	3062,7	0,3	100	0
SJ6	1,1	2102	3794,2	0,6	81	25
SJ7	0,6	422	2309,5	0,6	94	15
SJ8	0,8	450	1995,1	0,5	103	24
SJ9	8,4	7173	8608,0	0,9	78	182
SJ10	2,6	2759	4652,3	0,7	98	70
SJ11	5,7	6803	8317,2	0,9	76	120
SJ12	1,8	1947	3809,8	0,7	88	43
SJ13	0,6	120	2090,2	0,6	110	18
SJ14	9,4	7604	9106,4	0,9	81	211
SJ15	5,4	6286	7758,5	0,8	85	128

Quadro 23 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da Ribeira Brava.

Secção	Área da bacia hidrográfica (km2)	Distância ao início da rede hidrográfica de 1 km2 (m)	Distância à cabeceira (m)	Tempo de concentração (h)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Caudal de ponta (m3/s)
RB1	40,9	12806	14468	1,4	58	663
RB2	0,7	514	1856	0,4	75	15
RB3	36,5	9561	11087	1,1	62	633
RB4	4,3	4475	6709	0,9	61	72
RB5	32,2	9421	10926	1,1	63	565
RB6	1,7	2329	4481	0,8	66	30
RB7	1,1	1645	3710	0,7	69	22
RB8	2,9	2978	5079	0,8	65	52
RB9	28,4	8635	10155	1,0	64	508
RB10	2,3	2391	3655	0,5	73	46
RB11	26,0	8436	9938	1,0	65	471
RB12	0,6	634	1985	0,4	74	13
RB13	23,0	6176	7568	0,8	67	426
RB14	15,5	5076	6401	0,7	69	296
RB15	5,7	3007	4359	0,6	68	108
RB16	2,2	2085	3545	0,6	73	44
RB17	3,4	2700	4073	0,6	74	69
RB18	7,9	4245	5522	0,6	72	159
RB19	7,2	3048	4196	0,5	67	134
RB20	1,2	886	2254	0,4	74	25
RB21	4,9	2308	3445	0,5	74	101
RB22	0,8	577	1549	0,3	75	17
RB23	3,6	1570	2697	0,4	75	74
RB24	1,9	758	1900	0,4	76	40
RB25	1,1	820	1796	0,3	76	24
RB26	0,5	192	1396	0,3	73	11
RB27	1,2	472	1605	0,3	75	26
RB28	1,7	1495	2820	0,5	72	33
RB29	1,2	950	2327	0,4	69	23
RB30	1,8	991	2131	0,4	73	36
RB31	4,9	2661	3960	0,5	74	100
RB32	0,5	98	1650	0,4	72	10
RB33	3,0	1437	2745	0,5	75	63

Quadro 24 - Estimativas dos valores de caudal de ponta para as secções da Ribeira da Tabua

Secção	Área da bacia hidrográfica (km2)	Distância ao início da rede hidrográfica de 1 km2 (m)	Distância à cabeceira (m)	Tempo de concentração (h)	Intensidade de precipitação (mm/h)	Caudal de ponta (m3/s)
TB1	8,8	6589	9538,8	1,3	53	130
TB2	0,8	726	2624,6	0,6	72	15
TB3	7,5	5555	8488,2	1,2	55	114
TB4	6,3	130	1682,7	0,4	78	137
TB5	1,5	4608	7538,1	1,1	56	23
TB6	2,3	3785	5761,6	0,8	65	42
TB7	2,6	2943	4535,9	0,6	69	49

4.5 EROSÃO DISTRIBUIDA

Para análise e estimativa da erosão hídrica distribuída nas bacias hidrográficas da ilha da Madeira que são objecto do presente estudo e, em particular, para a caracterização e quantificação dos valores associados ao evento ocorrido no dia 20 de Fevereiro de 2010, procedeu-se ao diagnóstico das condições em que o fenómeno ocorreu, tendo-se considerado as condições de uso do solo e cenários dominantes nos processos e mecanismos responsáveis pela erosão hídrica.

Foi aplicada a metodologia da Equação Universal da Perda de Solo - EUPS (Universal Soil Loss Equation - USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1965, com as actualizações entretanto sugeridas em 1978 e outras adaptações introduzidas pelo formalismo da Equação Universal da Perda de Solo Revista- EUPSR (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE). Na equação, que traduz este modelo, cada parâmetro do processo erosivo é traduzido por um factor. Do produto dos factores obtém-se a estimativa de perda de solo.

Erosividade da precipitação

O cálculo do factor de erosividade é relativamente complexo e carece de registos udográficos de grande precisão. O valor da erosividade, para uma dada duração, corresponde à soma dos valores de erosividade EI_{30}, para todas as chuvadas que ocorrem durante esse período. A duração habitual para os períodos analisados é de um ano. Só são considerados os acontecimentos pluviométricos superiores a 12,5 mm em que não existam intervalos de mais de seis horas sem precipitação, a não ser que pelo menos 6,5 mm ocorram em 15 minutos (Wischmeier e Smith, 1978)

O valor do índice EI_{30}, correspondente a cada acontecimento pluvioso, é obtido pelo produto da energia cinética total da precipitação pela máxima intensidade da precipitação com a duração de 30 minutos. É expresso em $MJ \cdot mm \cdot h^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$.

Foi avaliada a erosividade correspondente ao fenómeno erosivo do dia 20 de Fevereiro de 2010 para o posto do Funchal (IM). Para o cálculo dispôs-se de registos de precipitação recolhidos em intervalos de 10 minutos. De acordo com a metodologia, a chuvada erosiva foi iniciada no dia 20 de Fevereiro às 03:00 h e terminou às 23:10 h, desse mesmo dia. A este acontecimento correspondeu uma precipitação de cerca de 147 (mm) com uma intensidade média em 30 minutos, $I_{30} \cong 62{,}8\ mm \cdot h^{-1}$.

Na Figura 42 encontra-se representado o Hietograma da precipitação (Wischemeier) para o dia 20 de Fevereiro. Na Figura 43 encontra-se representado o gráfico da erosividade da precipitação (Wischemeier) para o dia 20 de Fevereiro.

A erosividade da precipitação para o dia 20 de Fevereiro foi calculada de acordo com a metodologia de Wischemeier, tendo-se obtido o valor R = 2 145 MJ. $mm \cdot h^{-1} . \cdot ha^{-1}$.

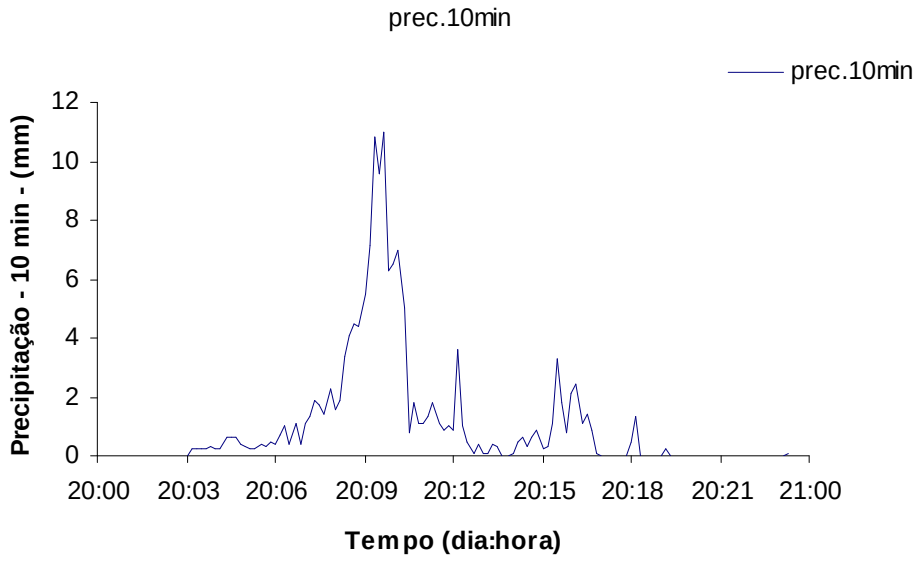

Figura 42 - Hietograma da precipitação (Wischemeier) para o dia 20 de Fevereiro

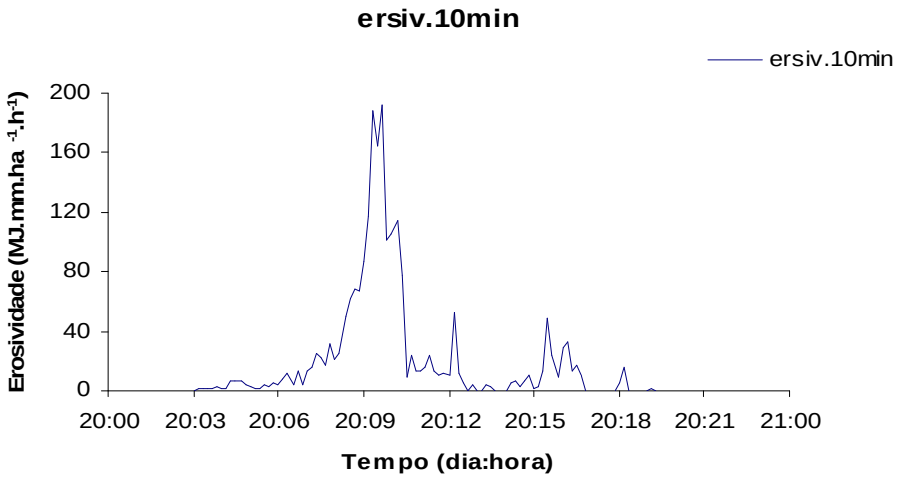

Figura 43 - Erosividade da precipitação (Wischemeier) para o dia 20 de Fevereiro

Não foi ainda possível apurar com rigor o valor da erosividade média da precipitação para a zona abrangida pelos estudos. No entanto, baseado em estudos anteriores efectuados para a ilha da Madeira e noutros valores disponíveis para Portugal, com correlações estabelecidas entre a entre a erosividade média da precipitação e o Índice de Fournier modificado foi adoptado o valor médio R = 3000 MJ mm·h^{-1}·ha^{-1}·ano^{-1}.

Erodibilidade dos solos

O factor de erodibilidade do solo (K) exprime-se em valor de perda de solo por unidade de erosividade da precipitação, num talhão com 9% de declive e 22,13 m de comprimento, em cama de sementeira, mobilizado paralelamente ao maior declive. É estimado em peso por unidade de erosividade (t·h·MJ^{-1}·mm^{-1}·ano^{-1}).

A erodibilidade do solo é função de um conjunto de caracteríticas do solo que foram obtidas pela análise das unidades dos solos identificados na Carta de Solos da Ilha da Madeira (DRA-RAM, 1992).

O cálculo dos factores de erodibilidade do solo é complexo, mas os valores calculados permitem a adopção de uma ordem de grandeza, tendo sido adoptado o valor médio de K = 0,02 t. h . MJ^{-1}. mm^{-1}, para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal.

Factor fisiográfico

O factor de comprimento de encosta (L), correspondente à relação entre os comprimentos da encosta e do talhão de referência (valor adimensional). O factor de declive da encosta (S),

correspondente à relação entre os declives da encosta e do talhão de referência. Os factores de comprimento e de declive são habitualmente calculados em conjunto.

Foi considerada a metodologia prevista na versão revista da EUPS (EUPSR), tanto para os comprimentos como para os declives das encostas. Em termos médios e para esta fase do estudo foi adoptado, para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal, o comprimento médio das encostas $\lambda e \approx 150$ m, e o declive médio $i \approx 25\%$, de que resultou o valor LS = 15,0.

Factor de cultura e de uso e factor de prática agrícola

O factor do coberto vegetal (C) é a relação entre a perda de solo para o coberto estabelecido e o valor para a situação de alqueive (valor adimensional). O factor de prática agrícola (P) é o valor correspondente à relação entre as práticas agrícolas realizadas e as das condições de referência (valor adimensional).

Atendendo à complexidade de usos agrícola, florestal e ocupação urbana adoptaram-se, respectivamente, para o ano médio e para o dia 20 de Fevereiro os valores CP = 0,05 e CP = 0,08.

Estimativas de valores de erosão

O valor da perda de solo resulta do produto dos factores anteriormente referidos. No relatório pormenorizado, a apresentar oportunamente, cada um dos factores será calculado de acordo com a metodologia proposta no modelo de Wischmeier e será elaborada a uma carta da sua distribuição espacial.

Com base nas estimativas dos parâmetros acima referidos, foram estimados os valores de erosão, respectivamente, em período médio e para o dia 20 de Fevereiro:

- Em ano médio - $E \approx 45{,}0 \cdot ton \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$, ou 2600 $m^3\ km^{-2}\ ano^{-1}$.
- No dia 20 de Fevereiro de 2010 - $E \approx 65{,}0\ ton \cdot ha^{-1}$, ou 3750 $m^3\ km^{-2}$.

Quantificação da Produção de sedimentos

A produção de sedimentos corresponde a uma parcela da erosão específica que atinge uma dada secção da rede de drenagem. O coeficiente a aplicar à erosão específica para a determinação da produção de sedimentos designa-se *coeficiente de produção de sedimentos* (C_{Ps}), como tradução do termo da literatura anglo-saxónica, sediment delivery ratio.

O valor da produção de sedimentos é função da morfologia das encostas, dos vales e da rede de drenagem. Alguma parte dos sedimentos erodidos pode não chegar a atingir a rede de drenagem, ficando depositada nos sopés das encostas.

Foi usada a equação generalizada de Roehl para determinação dos coeficientes de produção de sedimentos. A aplicação da equação de Roehl é efectuada para secções notáveis da bacia ou da rede hidrográfica em que se pretende visualizar aspectos da distribuição espacial dos processos. Para tal, proceder-se-á estudo e caracterização geomorfológica e uma hierarquização fluvial prévia e à determinação dos valores dos principais parâmetros geomorfométricos pertinentes às diferentes ordens das sub-bacias hidrográficas, nos pontos notáveis ou secções de referência assinaladas.

Para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal foram estimados os valores do coeficiente de produção de sedimentos. As três principais bacias do concelho do Funchal têm uma área agregada de aproximadamente 40 km^2. Os valores do coeficiente adoptados foram, respectivamente, em período médio e para o dia 20 de Fevereiro, $C_{Ps} = 0,9$ e $C_{Ps} = 1,0$.

Deste modo, para as bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal foram estimados os volumes de sedimentos produzidos, respectivamente, em período médio e para o dia 20 de Fevereiro, que se indicam seguidamente:

- Em ano médio - $V_s \approx 71\,000\ m^3.\ ano^{-1}$.
- No dia 20 de Fevereiro de 2010 - $V_s \approx 110\,000\ m^3$.

Precisão das estimativas da erosão

Importa salientar que, face à complexidade dos processos erosivos e aos erros e incertezas associados à quantificação de cada um dos seus parâmetros e factores, é necessário considerar um apreciável intervalo de confiança em torno das estimativas apresentadas.

Na bibliografia são citados diversos intervalos de confiança, que se situam na generalidade dos casos entre, aproximadamente, $\pm$ 20 a 50 %, mas que podem atingir valores mais elevados.

Considera-se que, no estudo apresentado, a estimativa do valor da erosividade da precipitação para o dia 20 de Fevereiro tem associado um intervalo de confiança de valor reduzido, ou seja menor incerteza, apesar de ter sido apenas apurada para o posto do Funchal. No que respeita a erodibilidade não foram calculados valores para certas unidades de solo. As outras estimativas efectuadas tem associados intervalos de confiança de valor mais elevado.

A concluir refira-se que o tratamento desta informação em sistema de informação geográfica permitirá obter distribuições espaciais dos parâmetros da erosão e estabelecer cartas de erosão.

4.6 SUSCEPTIBILIDADE DAS VERTENTES À INSTABILIZAÇÃO

A predominância dos deslizamentos translacionais superficiais nas vertentes prende-se com o facto de os deslizamentos envolverem sobretudo as camadas mais superficiais constituídas por solos pouco evoluídos e de espessura reduzida, cuja formação é condicionada pelas condições geográficas e litológicas locais. Para além de solo orgânico, os depósitos superficiais de encosta contêm uma fracção grosseira significativa, constituída por blocos de dimensões variáveis, podendo atingir as dezenas de centímetros, igualmente dependente daquelas condições. No caso em que as cicatrizes dos deslizamentos mais profundos atingem o maciço rochoso do substrato, geralmente tufos com intercalações ou inclusões de rochas lávicas, aqueles encontram-se húmidos e/ou amolecidos, destacando-se sob a forma de placas quando expostos à superfície.

A natureza permeável das camadas mais superficiais, limitadas inferiormente pelo substrato rochoso relativamente impermeável, condiciona fortemente o comportamento geomecânico dos materiais e a localização sub-superficial de níveis de água (aquíferos suspensos). Com efeito, observou-se a existência de escoamentos de água na interface substrato-depósitos de cobertura em algumas das cicatrizes de deslizamentos inspeccionadas, embora grande parte das observações já tenham sido efectuadas na época seca. Nos períodos de maior pluviosidade o nível freático deverá atingir facilmente a superfície do terreno.

O enraizamento do coberto vegetal, também genericamente pouco evoluído, mas que localmente pode incluir árvores de grande porte, está limitado aos níveis superiores das camadas superficiais. Em alguns locais, os deslizamentos localizam-se em áreas mais arborizadas pelo facto de as árvores terem sido arrancadas, produzindo arraste de terras e blocos. Esta situação deverá estar dependente não só da saturação dos solos e do enraizamento superficial das árvores, mais também da ocorrência de ventos muito fortes.

Para a caracterização das camadas superficiais foi preconizado um programa de reconhecimento constituído por ensaios de campo e ensaios laboratoriais conduzidos pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil e pelo Instituto Superior Técnico. Este plano de

ensaios tinha por objectivo determinar as propriedades físicas e hidromecânicas dos solos constituintes das camadas superficiais.

Os trabalhos de campo incluíram a realização de ensaios expeditos para determinação do peso volúmico e do teor em água e permitiram ainda a colheita quer de amostras remexidas, quer de amostras "intactas" para ensaios laboratoriais. Os ensaios de campo indicaram claramente a presença de solos de baixo peso volúmico (ou seja, elevada porosidade) com teor em água ou grau de saturação elevados.

Os ensaios de laboratório de caracterização física contemplaram a realizaram de análises granulométricas, a determinação do teor em matéria orgânica, da densidade das partículas e dos limites de consistência, bem como a determinação do peso volúmico e do teor em água em amostras "intactas". Estes ensaios indicaram a presença de materiais com uma percentagem significativa de finos (silte ou argila) e de matéria orgânica e permitiram confirmar a sua elevada porosidade.

Os ensaios de caracterização hidráulica e mecânica consistiram fundamentalmente na medição da curva de retenção para avaliar a relação entre o teor em água (ou o grau de saturação) e a sucção e na realização de ensaios de corte directo e de corte anelar para determinar as características de resistência dos solos quer em condições saturadas, quer em condições não saturadas com o teor em água natural. Estes ensaios permitiram avaliar as características de permeabilidade e mostraram a elevada influência da sucção na resistência dos solos.

As camadas superficiais das vertentes no seu estado natural poderão apresentar alguma coesão aparente não desprezável devido à sucção e à presença de raízes ou de outro material orgânico fibroso. Os valores da resistência medida nestes casos são compatíveis com as inclinações elevadas destes taludes naturais.

Com base nos parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios e recorrendo ao programa de cálculo Code Bright foi possível simular numericamente casos representativos dos taludes que sofreram instabilidade tendo em conta o clima, ou seja, a precipitação, e a respectiva infiltração nos taludes para reproduzir a evolução do grau de saturação e a alteração das condições de escoamento hidráulico e das características mecânicas dos materiais.

Num estudo inicial foram analisadas as inclinações de 30º e de 45º, pois correspondem ao intervalo de inclinações em que se registaram maiores deslizamentos. Para os solos foram adoptadas as características correspondentes a dois cenários: Caso 1 – solo siltoso ou silto-

arenoso pouco permeável, semelhante a um solo residual vulcânico (depósitos de cobertura); e Caso 2 – solo granular com elevada permeabilidade (depósitos de vertente). O modelo considerou que estes solos tinham a espessura de 4 m e que estavam assentes num substrato rochoso, situação definida com base nos dados de observação já mencionados. Apesar de existirem medidas em várias estações meteorológicas, usaram-se apenas os registos da estação do Areeiro visto esta estar localizada numa das áreas onde se verificaram maiores casos de instabilidade. Para cada caso consideraram-se dados de precipitação diária desde o dia 1 de Outubro de 2009 até ao dia 24 de Fevereiro de 2010. Foi necessário considerar dados relativos aos meses anteriores aos do evento de 20 de Fevereiro de 2010 para conseguir reproduzir de forma mais realista as condições hidráulicas (teor em água, grau de saturação e sucção) do solo.

Dos resultados do estudo é possível tirar algumas conclusões que permitem explicar o fenómeno de instabilidade dos taludes observado no dia 20 de Fevereiro de 2010.

Verificou-se que o solo menos permeável (Caso 1) apresenta caudal percolado baixo para as duas inclinações. Nos períodos de maior pluviosidade o caudal percolado nas camadas superiores é superior ao percolado nas camadas inferiores. Tal explica-se pela dificuldade de infiltração de água. Como consequências, poderá haver diminuição das tensões efectivas nas camadas superiores, de onde podem resultar deslizamentos pouco profundos. Para a inclinação de 30º as pressões intersticiais são negativas durante todo o período estudado (Figura 44). No dia do evento as pressões anularam-se à superfície, o que corresponde à saturação.

Para os solos muito permeáveis (Caso 2), para as duas inclinações estudadas pode-se admitir que se estabelece um escoamento subterrâneo com velocidade baixa, ainda que superior à que se verifica nos solos menos permeáveis. O escoamento dá-se numa maior espessura de solo devido à sua elevada permeabilidade gerando assim forças de percolação desfavoráveis. Verifica-se a existência de sucções em períodos estacionários, que passam rapidamente a pressões intersticiais positivas durante as maiores chuvadas (Figura 45). Esta transição corresponde a uma diminuição brusca das tensões efectivas e, portanto, à redução também brusca da resistência ao corte. Possivelmente estes factores explicam os deslizamentos observados no dia do evento neste tipo de materiais.

O grau de saturação é bastante elevado nos dois solos considerados e para as duas inclinações estudadas mesmo sem existirem períodos de precipitação excepcional. Quando é atingida a

saturação completa, os valores máximos das pressões intersticiais ocorrem no dia do evento para os dois casos, o que indica uma maior redução das tensões efectivas e logo da resistência ao corte. Conclui-se assim que, para as inclinações de 30º e 45º e para o clima do Areeiro, estão criadas condições para que ocorra instabilidade em taludes dos dois tipos de solos.

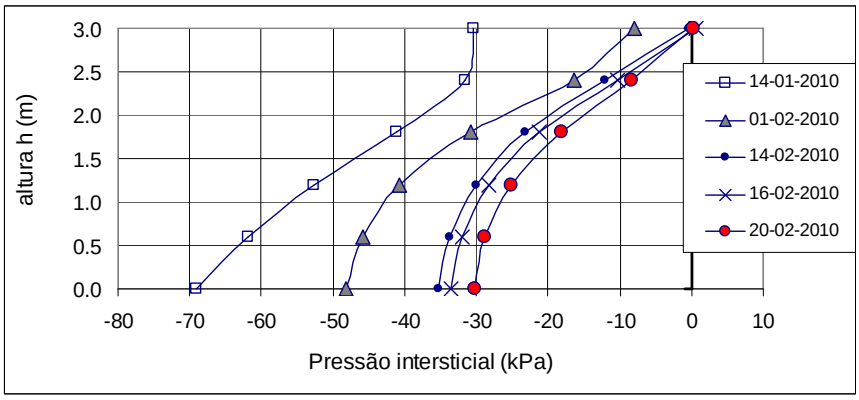

Figura 44 - Evolução em profundidade da pressão intersticial em alguns dias relevantes para solos menos permeáveis (Caso 1) (valores positivos: pressão intersticial; valores negativos: sucção)

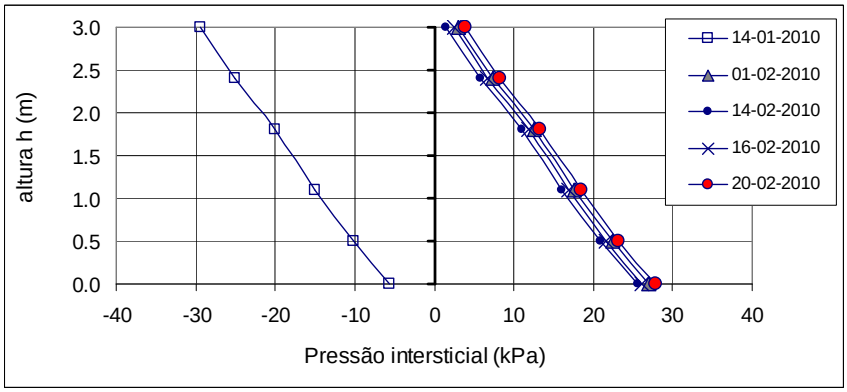

Figura 45 - Evolução em profundidade da pressão intersticial em alguns dias relevantes para solos muito permeáveis (Caso 2) (valores positivos: pressão intersticial; valores negativos: sucção).

4.7 INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO

A análise que se apresenta baseia-se no cruzamento entre os deslizamentos cartografados através de análise de imagens de detecção remota e a carta COS 2007 da Ilha da Madeira.

Diversos trabalhos publicados atribuem a alguns dos tipos de coberto que ocorrem na Madeira, nomeadamente pinhais, eucaliptais e acáciais, um aumento do risco de incêndio, uma pouca capacidade de retenção de água, devido à ocorrência de solos hidrofóbicos ou mesmo à pouca resistência do sistema radicular (que facilitam processos de solifluxão). Com vista ao estudo de avaliação do risco de aluviões na ilha da Madeira e à identificação de medidas que visem a prevenção e protecção para a mitigação do risco realizou-se o seguinte conjunto de tarefas: i) Avaliação do comportamento de diferentes tipos de coberto vegetal, durante episódios de pluviosidade; ii) Verificação através de ortofotomapas da situação anterior e posterior a 20 de Fevereiro, identificação dos tipos de vegetação em zonas de deslizamento; iii) Apresentação de propostas de revegetação para os diferentes tipos de situações identificadas.

Para cumprir os objectivos estabelecidos para o presente estudo, utilizaram-se as seguintes ferramentas de análise: foto-interpretação, com base em ortofotomapas; delimitação de deslizamentos em ARCGIS; carta de Ocupação de Solos (2007); trabalho de campo pontual.

A análise de resultados realizou-se através da avaliação da situação anterior a 20 de Fevereiro, em termos de vegetação afectada pela ocorrência de movimentos de massa de tipo solifluxivo.

Além do levantamento das condições fisionómico-estruturais, foi avaliado o grau de cobertura e a caracterização do tipo de comunidade com base na(s) espécie(s) dominante(s).

A análise do uso do solo associado aos locais onde ocorreram movimentos de massa permite salientar o predomínio de formações herbáceas nas áreas mais afectadas. Nos dois sectores em análise (Ribeira Brava - Ribeira Brava e Ribeira da Tabua; Funchal – Ribeira de S. João, Ribeira de Santa Luzia, Ribeira de João Gomes), estas condições da vegetação predominam nos sectores superiores das bacias hidrográficas (cabeceiras), estando determinadas por diversos factores de perturbação, e.g. pastoreio e fogo.

A comprovar esta situação está o facto de, nas bacias hidrográficas das ribeiras de São João, Santa Luzia e João Gomes (sector Funchal), os eventos identificados em áreas dominadas por formações herbáceas se localizarem a altitudes superiores aos 1000 metros. De uma forma

geral, estas áreas estiveram associadas ao pastoreio e encontram-se revestidas por comunidades herbáceas, correspondendo a uma situação de recuperação após perturbação recente.

A floresta de exóticas surge seguidamente como o tipo de uso em que se registou maior número de eventos. Destacam-se as florestas de pinheiro bravo, dominadas por exóticas invasoras e florestas de eucalipto. No caso do sector do Funchal, o valor mais elevado de movimentos de massa ocorreu em florestas de exóticas, dominadas por espécies exóticas invasoras, nomeadamente acácias, seguido por florestas de eucalipto.

Em termos de formações arbustivas, abertas ou fechadas, ambas apresentam idênticos valores em termos de ocorrências. No entanto, esta equidade não se mantém quando é feita uma análise separada dos dois sectores. No caso do sector da Ribeira Brava verifica-se um predomínio de ocorrências em formações arbustivas fechadas, salientando-se a forte representatividade de giestal nestas bacias onde se concentram grande parte das cicatrizes de arranque dos movimentos de massa. Ainda que sejam detectados eventos em áreas dominadas por formações arbustivas fechadas nativas (urzais), estes estão associados a transporte em talvegues de pequenas linhas de água, as quais funcionaram activamente como linhas de descarga, o número de cicatrizes de arranque em urzal é muito reduzido, estando associadas à presença de fortes rupturas de declive, pela construção de estradas.

Em termos de áreas de arranque, os eventos identificados em giestal apresentam cicatrizes profundas, havendo a remoção dos horizontes superficiais do solo. Em urzal, apenas se verifica o arranque de pequenas fracções do solo, mantendo-se muitas vezes os arbustos in situ. Assim, além do elevado número de cicatrizes de arranque em giestal, estes fornecem maior quantidade de material. Já no caso do sector do Funchal, apesar de as formações arbustivas fechadas apresentarem, em termos de área ocupada, valores francamente superiores (15%) às formações arbustivas abertas (5%), a maior parte dos eventos ocorreu nestas últimas (19,3%). De destacar que os giestais assumem uma importância relativamente mais baixa, comparativamente ao sector da Ribeira Brava, sendo as formações arbustivas fechadas dominadas por urzais, nomeadamente na Ribeira de Santa Luzia e Ribeira de João Gomes. Este facto remete para a menor probabilidade de ocorrência de movimentos de massa em urzais, onde se identificam apenas marcas de transporte ao longo dos talvegues, estando as cicatrizes de arranque instaladas em sectores dominados por formações herbáceas.

Com um baixo número de ocorrências encontra-se a floresta natural. Verifica-se que os eventos ocorrem em formações abertas, coincidindo normalmente com situações de margem ou clareiras. Na verdade, os fragmentos de floresta natural são exíguos e apresentam elevado grau de perturbação, o que limita a sua eficácia na protecção ao solo. Em fragmentos melhor conservados, e em conformidade com os resultados obtidos em campo, a floresta natural apresenta atributos que favorecem a estabilidade das vertentes, nomeadamente devido à densidade e estrutura do enraizamento. Nalgumas situações a presença de vegetação natural funcionou como barreira, favorecendo mesmo a retenção de material sólido quando o movimento de massa é canalizado para o interior do fragmento.

Da análise efectuada pode concluir-se que existe uma correlação inequívoca entre tipos de vegetação e riscos de movimento de massa. Desta forma, propõem-se algumas acções ou medidas urgentes no âmbito da vegetação que visam a prevenção e protecção no contexto da mitigação do risco de aluviões.

4.8 MOVIMENTOS DE VERTENTE

4.8.1 Introdução

No âmbito do presente estudo, a inventariação e o mapeamento dos deslizamentos de terras ocorridos nas vertentes das principais bacias dos Concelhos do Funchal e da Ribeira Brava em 20 de Fevereiro e a avaliação do volume de material sólido produzido foram obtidos recorrendo ao processamento digital de imagens de satélite de muito elevada resolução espacial que, quando conjugadas com modelos geográficos do terreno e informação de campo, é uma forma eficaz e rápida de inventariar deslizamentos de terras em áreas de grandes dimensões (Hapke, 2005; Danneals et al, 2007).

4.8.2 Informação de base

A informação de base utilizada na inventariação dos movimentos de vertente por processamento de imagem foi a seguinte:

- Imagens multiespectrais Geoeye-1 (R-G-B-NIR de 2 m/pixel de resolução espacial e PAN de 0.5 m/pixel de resolução espacial) recolhidas antes (21 e 29 de Julho de 2009) e após o acidente (23 e 28 de Fevereiro de 2010).
- Ortofotomapas, fornecidos pela DRIGOT, com datas anteriores (2007) e posteriores ao acidente (em construção na Municípia), ambos com sistema de coordenadas cartográficas UTM (zona 28N) Datum BASE SE - Porto Santo 1995:

    - Ortofotomapas com data anterior ao acidente produzidos à escala 1:5000, com uma resolução geométrica de 0.4m e o Erro Médio Quadrático (EMQ) é de 0.53m em planimetria.
    - Ortofotomapas com data posterior ao acidente à escala 1:5000, com uma resolução geométrica de 0.4 metros. É expectável que tenham precisão melhor a 0.75m
- Modelos digitais de terreno, fornecidos pela DRIGOT, com datas anteriores e posteriores ao acidente (ainda em construção na Municípia). Todos os ficheiros MDT usados estão sob o sistema de coordenadas UTM – Fuso 28 N, Datum BaseSE Porto Santo 1995
    - MDT anterior ao acidente obtido por aerofotogrametria de voo de 2007. A escala de produção é de 1:5000, com resolução final 10 metros dos ficheiros MDT – GRID. Estes ficheiros têm precisão melhor a um metro.
    - MDT anterior ao acidente obtido por tecnologia LIDAR (Li ght D etection A nd R anging) de 2009 à escala 1:2000. A resolução é de um ponto por m², sendo a resolução final do MDT - GRID de 4m.
    - MDT posterior ao acidente obtido por aerofotogrametria de voo de 2010. A escala de produção é de 1:5000, com resolução final de 10 metros para ficheiros MDT – GRID. É expectável que estes ficheiros tenham precisão melhor a 1 metro.
- Carta geológica (escala 1:80000) do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) de 2009 em formato *Shape File*.
- Carta de ocupação do solo de 2007 (COSRAM_2007). Escala 1:10000, com resolução de 0.25ha de área mínima cartográfica e com cinco níveis de classificação (compatível com os três níveis de classificação da CORINE Land Cover).
- Dados de Campo:
    - Identificação no campo de deslizamentos ocorridos a 20 de Fevereiro (DGFlorestas, Consugal, UMa, ...).
    - Delimitação detalhada dos limites e alturas de alguns deslizamentos com DGPS, laser... (UMa, grupos de Geologia do IST).
    - Levantamentos topográficos executados pela DRIGOT nas áreas de deslizamento com pontos cotados e respectivas fotografias.
    - Fotografias de deslizamentos.

As imagens GeoEye-1 obtidas para as zonas de interesse no Funchal e na Ribeira Brava correspondem às datas e áreas cobertas listadas em seguida:

- Funchal
    - 28 de Fevereiro de 2010, cobrindo 49 km^2 da zona de interesse;
    - 23 de Fevereiro de 2010, cobrindo 52 km^2 da zona de interesse;
    - 29 de Julho de 2009, cobrindo 49 km^2 da zona de interesse;
    - 21 de Julho de 2009, cobrindo 49 km^2 da zona de interesse.
- Ribeira Brava
    - 23 de Fevereiro de 2010, cobrindo 49 km^2 da zona de interesse;
    - 28 de Fevereiro de 2010, cobrindo 67 km^2 da zona de interesse;
    - 28 de Fevereiro de 2010, cobrindo 49 km^2 da zona de interesse;
    - 29 de Julho de 2009, cobrindo 64 km^2 da zona de interesse;
    - 21 de Julho de 2009, cobrindo 64 km2 da zona de interesse.

Todas as imagens GeoEye-1 adquiridas têm as seguintes especificações:

- 5 bandas radiométricas: vermelho (R), verde (G), azul (B), infravermelho próximo (NIR) e pancromática (PAN)
- resolução no plano 0.5 metros (banda pancromática) e 2.0 metros para as restantes bandas
- imagem radiometricamente corrigida para irregularidades e ruído do sensor (mas efeitos atmosféricos não corrigidos)
- imagem rectificada para coordenadas cartográficas (projecção UTM, Datum NAD83), com base no modelo de câmara do sensor (disponibilizado em formato RPC – "rational polynomial coefficient"), sem recurso a DEM (i.e. não-ortorrectificada). É especificada uma precisão de georreferenciação de cinco metros na direcção do nadir, excluindo efeitos de terreno.
- imagem em formato Geo-Tiff, banda dinâmica de 8-bit.
- O ângulo de aquisição das imagens variou entre 60 e 75 graus com a horizontal.

4.8.3 Metodologia

Na Figura 47 apresenta-se de forma esquemática a metodologia utilizada para a inventariação dos deslizamentos de vertente e cálculo dos volumes de material produzido. O procedimento iniciou-se com uma fase de pré-processamento que consistiu no co-registo, ortorrectificação e fusão das imagens. Ainda nesta fase de pré-processamento procedeu-se à avaliação das zonas com cobertura atmosférica (nuvens) e pouco iluminadas (ensombradas), pois é impossível

classificar qualquer tipo de ocupação em imagens com cobertura atmosférica e é extremamente difícil em zonas pouco iluminadas.

A identificação dos deslizamentos foi efectuada a partir da classificação das bacias do Funchal e da Ribeira Brava com um método automático a partir da informação multi-espectral das imagens de satélite GeoEye-1. A Figura 46 apresenta um exemplo de uma Imagem obtida no dia 28 de Fevereiro de 2010 onde é possível identificar movimentos de vertente na Ribeira de S. João, em resultado do evento de 20 de Fevereiro de 2010. A localização desta zona é marcada pelo rectângulo a vermelho.

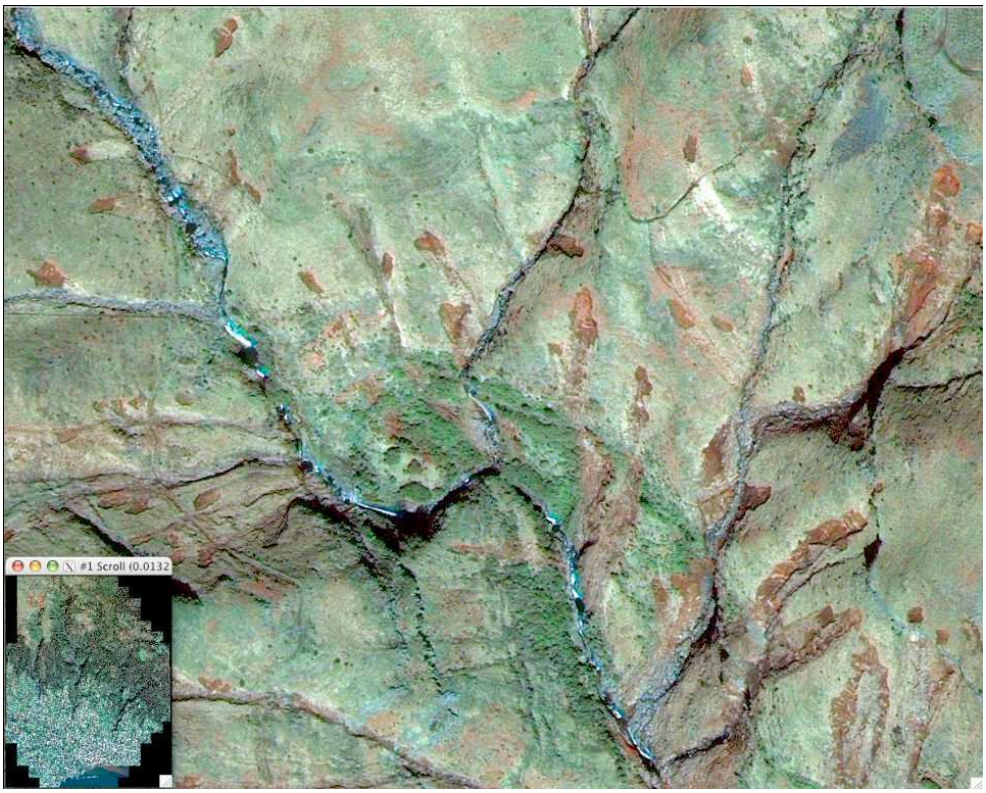

Figura 46: Imagem obtida pelo satélite Geoeye-1, no dia 28 de Fevereiro de 2010.

A abordagem escolhida recaiu no classificador de máxima verosimilhança que é um método de classificação assistida. Na fase de treino, houve uma definição prévia das classes de ocupação do solo existentes na região de estudo e na extracção de informação relativa às suas características espectrais nas imagens de satélite em pequenas zonas consideradas representativas de cada classe nas regiões de estudo. A fase de teste consistiu na classificação automática de toda a região de estudo, com base na informação espectral extraída e processada na fase de treino. Para este estudo foram definidas 12 classes de ocupação do solo.

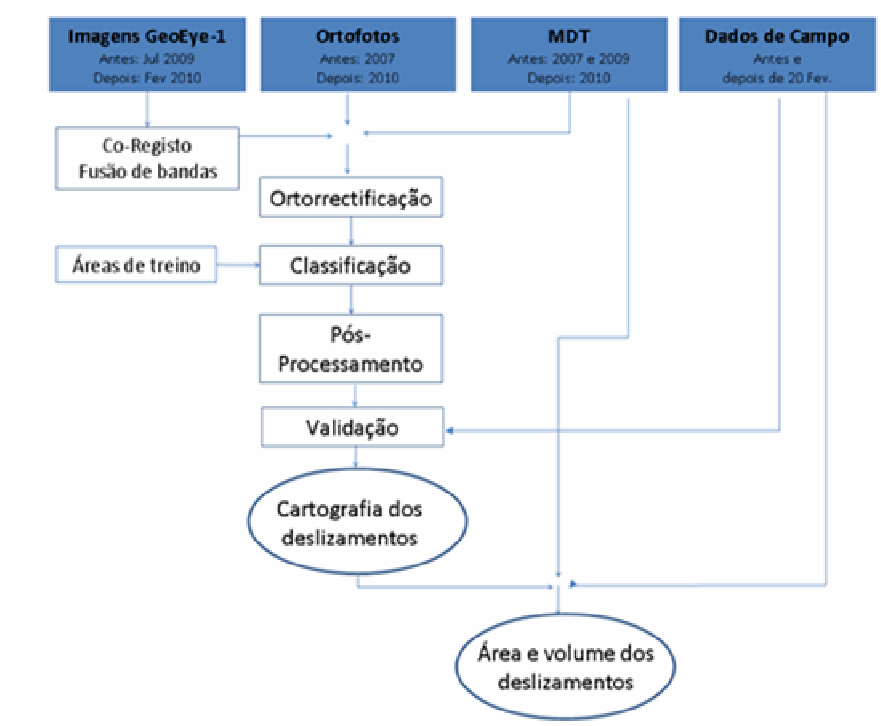

Figura 47 - Esquema da metodologia utilizada para efectuar a cartografia dos deslizamentos e estimação das respectivas áreas e volumes.

À fase de classificação automática assistida seguiu-se o pós-processamento pericial dos resultados por inspecção visual. Cada polígono classificado como cicatriz de um deslizamento através do processo de classificação automática foi inspeccionado, editado e reclassificado pelo perito, por comparação com o observado nas imagens detecção remota anteriores e posteriores ao acidente, nos ortofotomapas de 2007 e nos ortofotomapas de 2010 disponibilizados até à data. Os polígonos foram agrupados pelo perito nas 3 classes descritas no Quadro 25.

Quadro 25 – Classificação pericial dos polígonos das cicatrizes das bacias do Funchal

Classes	Descrição
1	Cicatrizes novas (não são visíveis nos ortofotomapas antigos), bem demarcadas com profundidade aparente, perceptível através de zonas de sombra.
2	Cicatrizes antigas em que a totalidade da seu contorno já existia nos ortofotomapas antigos. Algumas indiciam reactivação recente.
3	Cicatrizes novas, com profundidade pouco marcada nas imagens (sem mostrar zonas de sombra). A maioria aparenta ser mais superficial do que as da classe 1.

A avaliação dos volumes de material produzido pelos deslizamentos foi obtida à custa do produto da área dos polígonos por uma espessura média estimada. Este procedimento, implementado no ArcGIS, obtém-se utilizando a intersecção das *layers* de cicatrizes e de sub-bacias para quantificação da área de cicatrizes por sub-bacia.

4.8.4 Estimação dos volumes de sedimentos produzidos

Após o pré-processamento das imagens procedeu-se à avaliação das áreas ocultas das imagens quer devido à cobertura de nuvens quer por corresponderem a zonas de sombra. No Quadro 26 apresentam-se as áreas ocultas das imagens utilizadas na classificação.

Quadro 26 - Estimativa das áreas ocultas por nuvens e sombras nas imagens Geoeye utilizadas na classificação

Bacia	**Área bacia**	**Área nuvens**		**Área de sombra**		**Área total oculta**	
	(m^2)	(m^2)	(%)	(m^2)	(%)	(m^2)	(%)
São João	14665100	140563	1.0%	474972	3.2%	615535	4.2%
Santa Luzia	15621800	232453	1.5%	768983	4.9%	1001437	6.4%
João Gomes	11414700	11972	0.1%	109632	1.0%	121604	1.1%
Total Bacias do Funchal	41701600	384988	0.9%	1353587	3.2%	1738575	4.2%
Tabua	8798900	276958	3.1%	40709	0.5%	317667	3.6%
Ribeira Brava	40924900	4875559	11.9%	4463298	10.9%	9338857	22.8%
Total Bacias da Ribeira Brava	49723800	5152517	10.4%	4504007	9.1%	9656524	19.4%

As bacias com vertentes de declives mais acentuados são aquelas que apresentam maior proporção de áreas ensombradas. Há ainda a salientar que para além da área oculta das imagens utilizadas na classificação dos deslizamentos das bacias da Ribeira Brava ser quase 20% da área total, toda a imagem apresenta alguma nebulosidade, facto que condicionou fortemente os resultados da classificação.

Procedeu-se em seguida à fase de classificação das imagens separadamente em cada uma das áreas: Funchal e Ribeira Brava com o objectivo de identificar os deslizamentos originados no evento de 20 de Fevereiro. A título ilustrativo, apresenta-se na Figura 48 o resultado da classificação numa zona das bacias do Funchal. Os polígonos a vermelho representam os limites de deslizamentos.

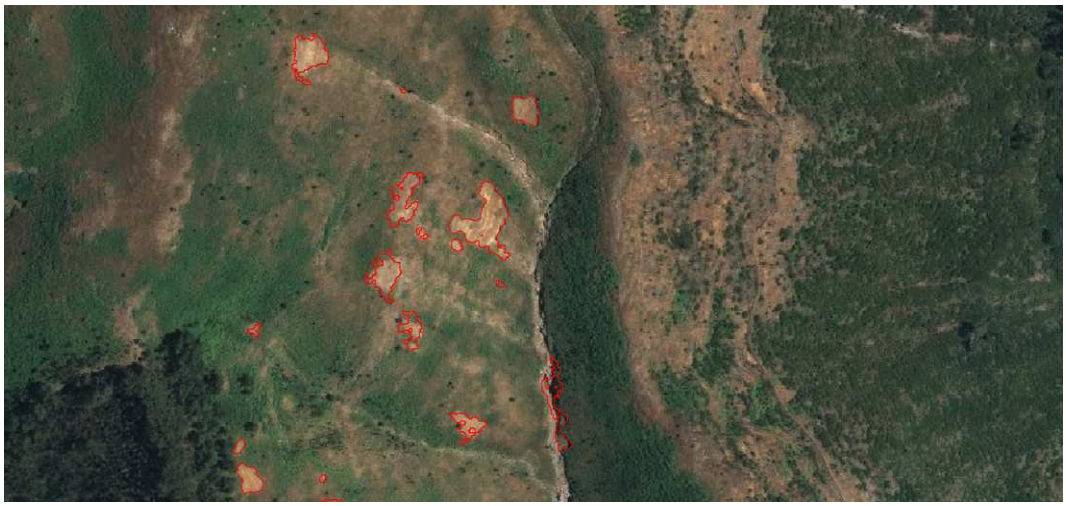

Figura 48 – Cartografia dos deslizamentos identificados numa zona do Funchal (Exemplo).

Após a fase de classificação procedeu-se à validação dos resultados, ou seja dos polígonos de delimitação das cicatrizes dos deslizamentos. Neste caso, os resultados obtidos foram confrontados com os dados de campo recolhidos pelo Serviço Regional das Florestas, pela equipa de geologia do projecto e pelos levantamentos topográficos relizados pela DRIGOT.

No Quadro 27 e no Quadro 28 apresentam-se os resultados de validação da classificação baseada no reconhecimento realizado pelos serviços florestais, que mostram um elevado grau de sucesso na identificação das cicatrizes[xxv]. No Funchal, os resultados são bons, com números de deslizamentos não identificados inferiores a 5%.

Quadro 27 - Resultados da validação quantitativa do conjunto das bacias do Funchal

Bacias Do Funchal	Nº total de deslizamentos identificados	Nº total de amostras de campo	% de deslizamentos visitados	Deslizamentos correctamente classificados		Deslizamentos não identificados	
				Nº	%	Nº	%
João Gomes	708	21	3.0	20	95.2	1	4.8
Santa Luzia	1039	29	2.8	28	96.6	1	3.4
São João	1544	73	4.7	70	95.9	3	4.1
Total	3291	123	3.7	118	95.9	5	4.1

[xxv] Em rigor, os valores referidos nos quadros como sendo de deslizamentos identificados não devem ser entendidos na habitual acepção geológica do termo, mas como o número de polígonos identificados pelo procedimento de classificação das imagens de satélite. Um deslizamento é constituído por um ou mais polígonos.

Os resultados obtidos na Ribeira Brava são piores, principalmente no que respeita a deslizamentos não identificados, com proporções a variarem entre 13 e 20%. É de realçar no entanto que a amostra de validação é muito pequena. Espera-se que os resultados possam melhorar com a utilização da totalidade dos ortofotomapas de 2010.

Quadro 28 - Resultados da validação quantitativa do conjunto das bacias da Ribeira Brava

Bacias	Nº total de deslizamentos identificados	Nº total de amostras de campo	% de deslizamentos visitados	Deslizamentos correctamente classificados		Deslizamentos não identificados	
				Nº	%	Nº	%
Ribeira Brava	4583	95	2.1	76	80.0	19	20.0
Tabua	591	15	2.5	13	86.7	2	13.3
Total	5174	110	2.1	89	80.9	21	19.1

Para avaliação dos volumes de material produzido pelos deslizamentos de vertente, tomaram-se dois valores de espessura média das cicatrizes: 0.6 m e 1.5 m. Estes valores foram indicados como limites do intervalo de espessuras médias mais habituais em visitas de campo. Este intervalo é consistente com o das espessuras médias calculadas em 30 deslizamentos, cujos histogramas são apresentados na Figura 49 e na Figura 50, onde foram realizados levantamentos topográficos pela DRIGOT e pela equipa de geologia do projecto.

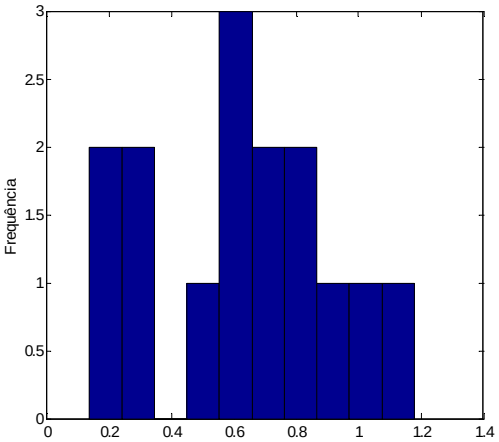

Figura 49 - Histograma da espessura média dos deslizamentos levantados (Funchal)

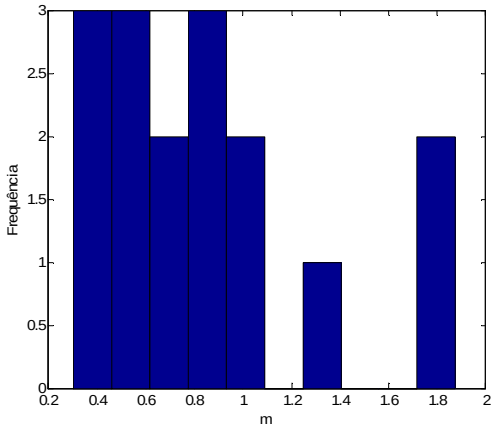

Figura 50 - Histograma da espessura média dos deslizamentos levantados (Ribeira Brava)

Optou-se por calcular os volumes de material produzido pelas cicatrizes das classes 1 e 3. Efectuou-se ainda outro cálculo, mais conservador, que inclui também a classe 2, constituída

por cicatrizes antigas, que aparentam frequentemente ter sido reactivadas. Os resultados obtidos para as bacias do Funchal, apresentados no Quadro 29, evidenciam uma elevada incerteza nos volumes estimados, devido ao intervalo de espessuras utilizado e à inclusão da classe 2.

Quadro 29 – Volumes produzidos nas bacias do Funchal

Classes	Área (m2)	Vol. Min (m^3) (Área*0,6 m)	Vol. Max (m^3) (Área*1,5m)
Classe 1	151661	90997	227492
Classe 2	108300	64980	162450
Classe 3	100946	60568	151419
Total	360907	216544	541361

Uma parte significativa do volume sólido transportado pelas ribeiras do concelho do Funchal deposita-se na parte terminal das mesmas e nas ruas do centro da cidade. A outra parte, incluindo a fracção muito fina de sedimentos, foi transportada para o oceano. De acordo com os dados fornecidos ao Grupo de Estudo, o volume do aterro constituído junto ao cais do Funchal com o material sólido depositado na cidade na sequência do evento de 20/2/2010 tem o valor de cerca de 140000 m^3. A juntar a este volume pode ainda considerar-se cerca de 100000 m^3 de volume dragado na zona portuária. Mesmo considerando que alguns detritos removidos tenham sido transportados para outro local, admite-se que um volume total não inferior a 250000 m^3 de material sólido tenha sido depositado na zona da cidade do Funchal[xxvi], sem contar com o volume de material fino que foi transportado em suspensão pelas correntes marítimas: a respectiva pluma é bem visível em fotografias satélite (Figura 51).

[xxvi]Uma estimativa muito sumária do volume total de material sólido depositado nas áreas marginais das ribeiras na área do Funchal e nos respectivos leitos, efectuada pelos alunos da UMa aponta para um valor de 530.000 m^3. Este valor foi estimado com base em dados de campo e análise de fotografias.

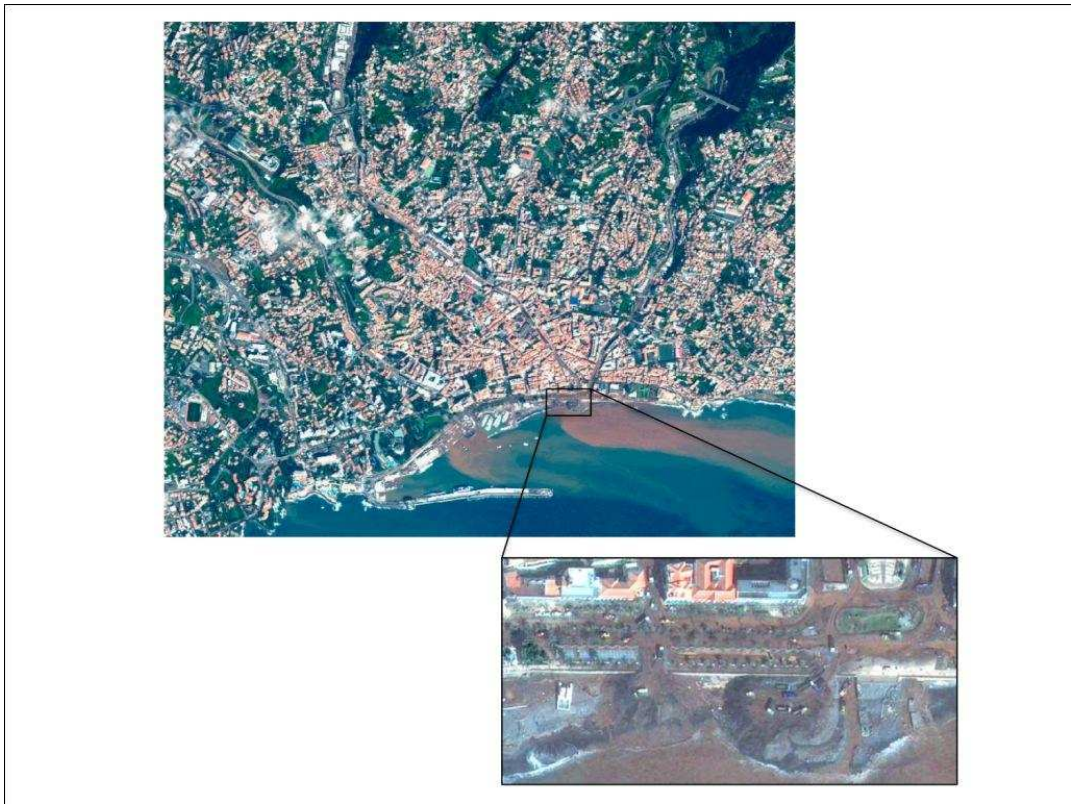

Figura 51 - Vista da Baía do Funchal obtida a partir do satélite Geoeye-1, no dia 23 de Fevereiro de 2010.

Na Figura 52 e na Figura 53 apresentam-se os mapas com as áreas estimadas por sub-bacia, para o conjunto dos deslizamentos das classes 1 e 3 e para o conjunto dos deslizamentos das classes 1,2 e 3 cujos valores se encontram no Quadro 30 e no Quadro 31, respectivamente.

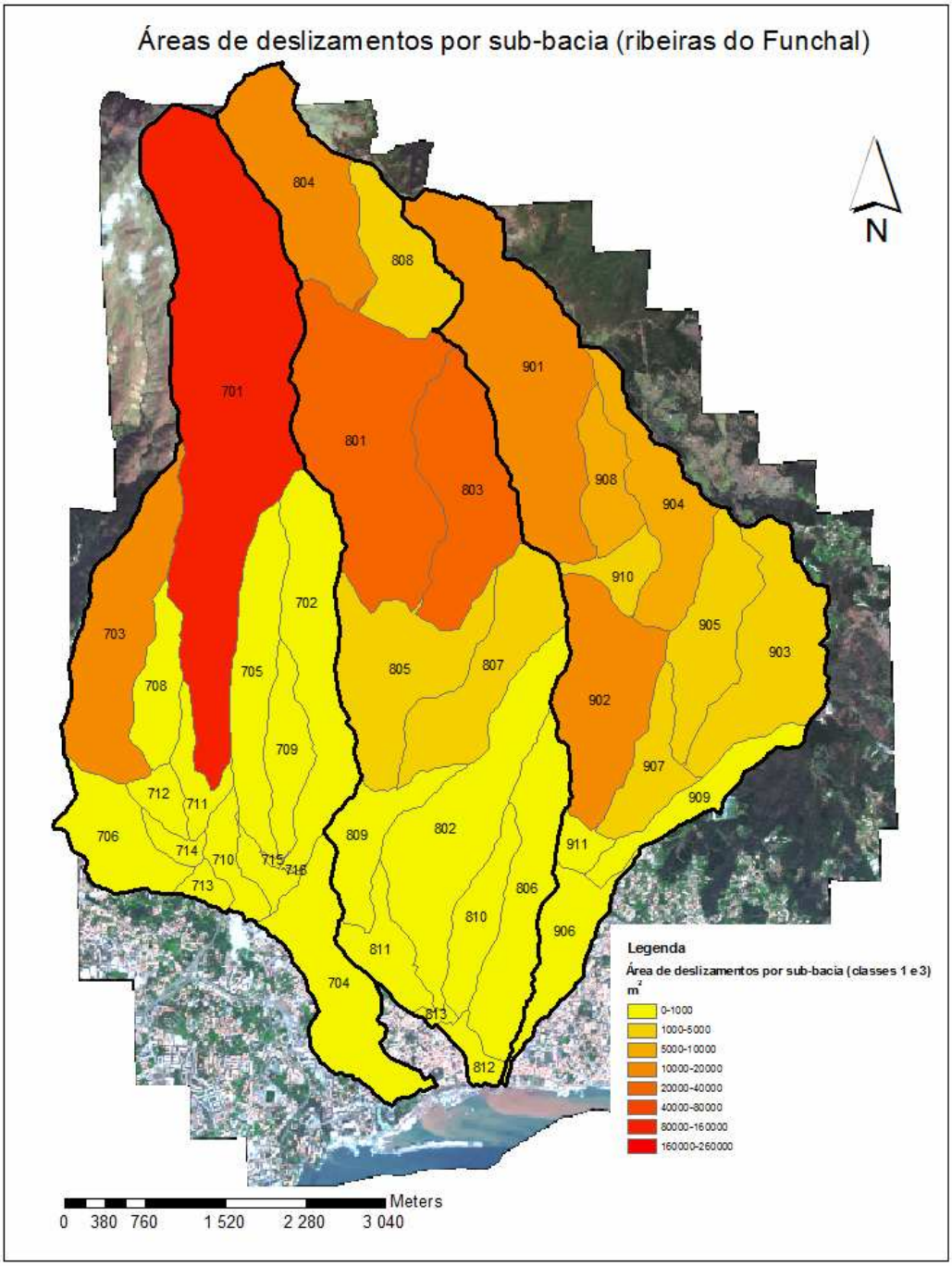

Figura 52 – Áreas de deslizamentos por sub-bacia do Funchal (classes 1 e 3)

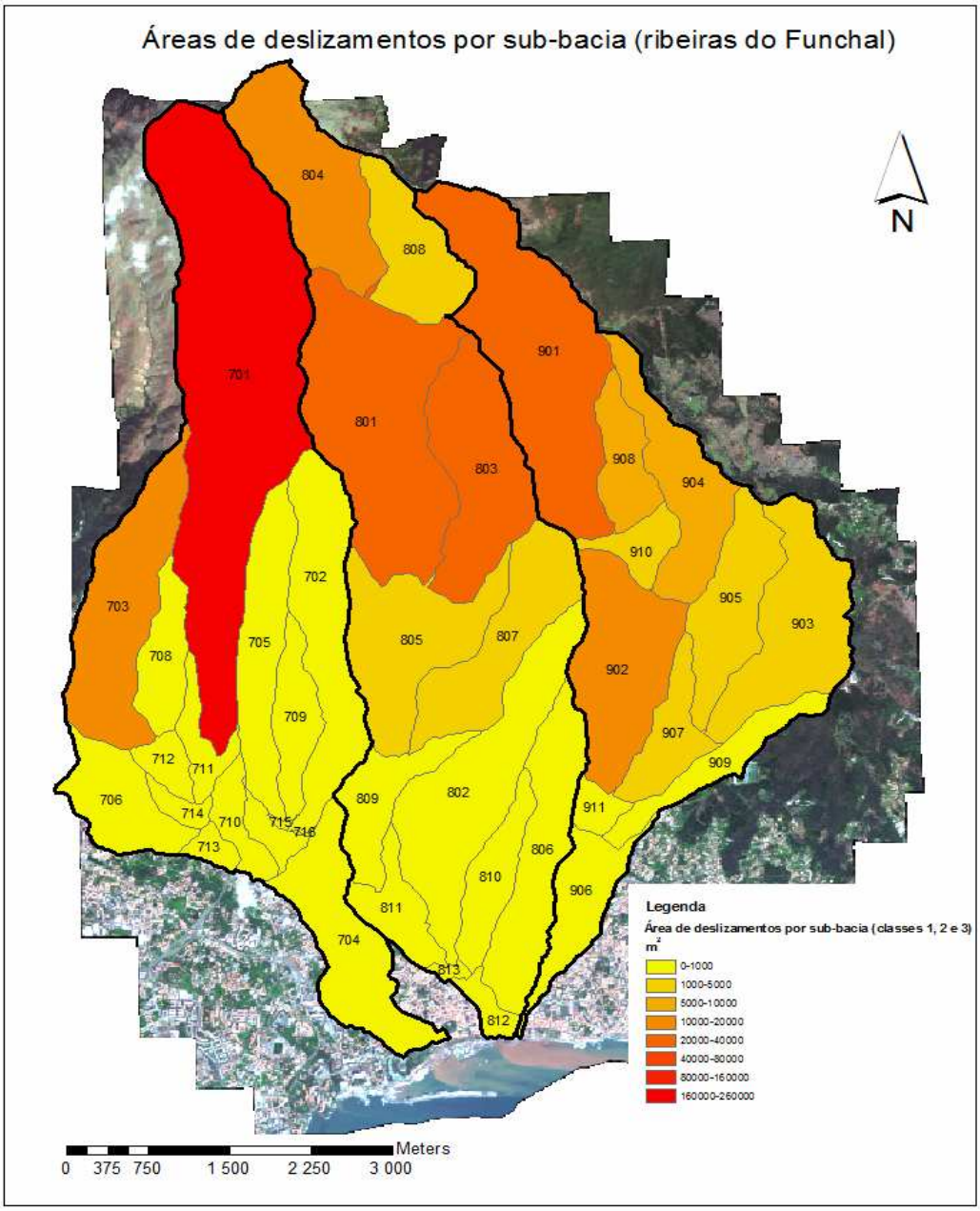

Figura 53 - Áreas de deslizamentos por sub-bacia do Funchal (classes 1, 2 e 3)

Quadro 30 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia do Funchal (classes 1-3)

Ref	Bacia	Área da sub-bacia (m^2)	Área de deslizamentos (m^2)	Volume mínimo (m^3)	Volume máximo (m^3)
701	Rib São João	5383193	103330	61998	154996
702	Rib São João	1824383	337	202	506
703	Rib São João	1755791	15517	9310	23275
704	Rib São João	1394146	0	0	0
705	Rib São João	1130970	299	179	448
706	Rib São João	831482	0	0	0
708	Rib São João	576878	759	455	1139
709	Rib São João	573909	643	386	964
710	Rib São João	331322	0	0	0
711	Rib São João	320412	0	0	0
712	Rib São João	233891	0	0	0
713	Rib São João	142662	0	0	0
714	Rib São João	141789	0	0	0
715	Rib São João	16466	0	0	0
716	Rib São João	6611	0	0	0
801	Rib Santa Luzia	2996715	25467	15280	38201
802	Rib Santa Luzia	1993848	663	398	995
803	Rib Santa Luzia	1670144	34279	20568	51419
804	Rib Santa Luzia	1648884	10864	6518	16296
805	Rib Santa Luzia	1577551	3498	2099	5247
806	Rib Santa Luzia	1367391	540	324	809
807	Rib Santa Luzia	1348233	2920	1752	4380
808	Rib Santa Luzia	971909	2232	1339	3348
809	Rib Santa Luzia	698458	46	28	69
810	Rib Santa Luzia	604900	0	0	0
811	Rib Santa Luzia	510772	0	0	0
812	Rib Santa Luzia	182410	0	0	0
813	Rib Santa Luzia	49271	0	0	0
901	Rib João Gomes	2924226	13841	8305	20761
902	Rib João Gomes	1615440	10668	6401	16002
903	Rib João Gomes	1596772	2783	1670	4175
904	Rib João Gomes	1166514	8421	5053	12632
905	Rib João Gomes	1074091	2382	1429	3572
906	Rib João Gomes	728448	0	0	0
907	Rib João Gomes	601858	1444	866	2165
908	Rib João Gomes	590844	7359	4415	11038
909	Rib João Gomes	581466	152	91	228
910	Rib João Gomes	341772	4164	2499	6246
911	Rib João Gomes	193821	0	0	0

Quadro 31 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia do Funchal (classes 1, 2 e 3)

Ref	Bacia	Área da sub-bacia (m^2)	Área de deslizamentos (m^2)	Volume mínimo (m^3)	Volume máximo (m^3)
701	Rib São João	5383193	192481	115489	288722
702	Rib São João	1824383	337	202	506
703	Rib São João	1755791	15551	9330	23326
704	Rib São João	1394146	0	0	0
705	Rib São João	1130970	299	179	448
706	Rib São João	831482	0	0	0
708	Rib São João	576878	759	455	1139
709	Rib São João	573909	762	457	1143
710	Rib São João	331322	0	0	0
711	Rib São João	320412	0	0	0
712	Rib São João	233891	0	0	0
713	Rib São João	142662	0	0	0
714	Rib São João	141789	0	0	0
715	Rib São João	16466	0	0	0
716	Rib São João	6611	0	0	0
801	Rib Santa Luzia	2996715	26472	15883	39708
802	Rib Santa Luzia	1993848	663	398	995
803	Rib Santa Luzia	1670144	34960	20976	52439
804	Rib Santa Luzia	1648884	19511	11707	29267
805	Rib Santa Luzia	1577551	3498	2099	5247
806	Rib Santa Luzia	1367391	539	324	809
807	Rib Santa Luzia	1348233	2920	1752	4380
808	Rib Santa Luzia	971909	2799	1680	4199
809	Rib Santa Luzia	698458	46	28	69
810	Rib Santa Luzia	604900	0	0	0
811	Rib Santa Luzia	510772	0	0	0
812	Rib Santa Luzia	182410	0	0	0
813	Rib Santa Luzia	49271	0	0	0
901	Rib João Gomes	2924226	21675	13005	32513
902	Rib João Gomes	1615440	10668	6401	16002
903	Rib João Gomes	1596772	2783	1670	4175
904	Rib João Gomes	1166514	8595	5157	12892
905	Rib João Gomes	1074091	2438	1463	3658
906	Rib João Gomes	728448	0	0	0
907	Rib João Gomes	601858	1443	866	2165
908	Rib João Gomes	590844	7392	4435	11088
909	Rib João Gomes	581466	152	91	228
910	Rib João Gomes	341772	4164	2499	6246
911	Rib João Gomes	193821	0	0	0

No caso da estimação dos volumes de material sólido produzido nas vertentes das bacias da Ribeira Brava, foi feito um cálculo análogo ao realizado para as bacias do Funchal.

Quadro 32: Volumes produzidos nas bacias da Ribeira Brava

Classes	Área (m^2)	Vol. mín (m^3) (Área*0.6m)	Vol. máx (m^3) (Área*1.5m)
Classe 1	292236	175342	438354
Classe 2	10345	6207	15518
Classe 3	385009	231005	577514
Total	687590	412554	1031385

Os resultados, apresentados no Quadro 32, evidenciam claramente a grande incerteza que afecta a estimação dos volumes produzidos, pelas razões já referidas para o Funchal acrescidas da menor qualidade das imagens de satélite.

Na Figura 54 e na Figura 55 apresenta-se os mapas com as áreas estimadas por sub-bacia, para o conjunto dos deslizamentos das classes 1 e 3 e para o conjunto dos deslizamentos das classes 1,2 e 3 cujos valores se encontram no Quadro 31 e no Quadro 34 respectivamente.

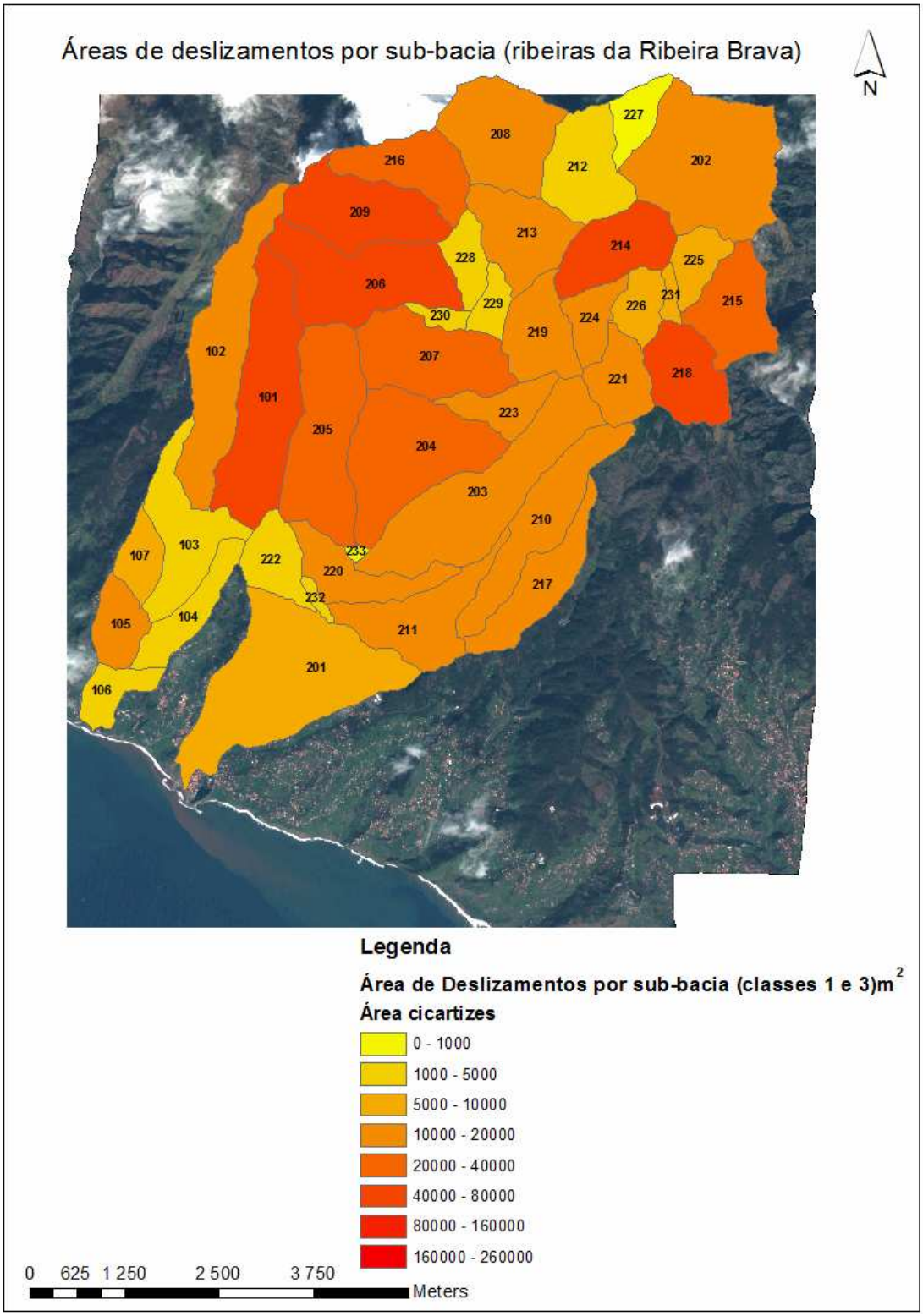

Figura 54 - Áreas de deslizamentos por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1 e 3)

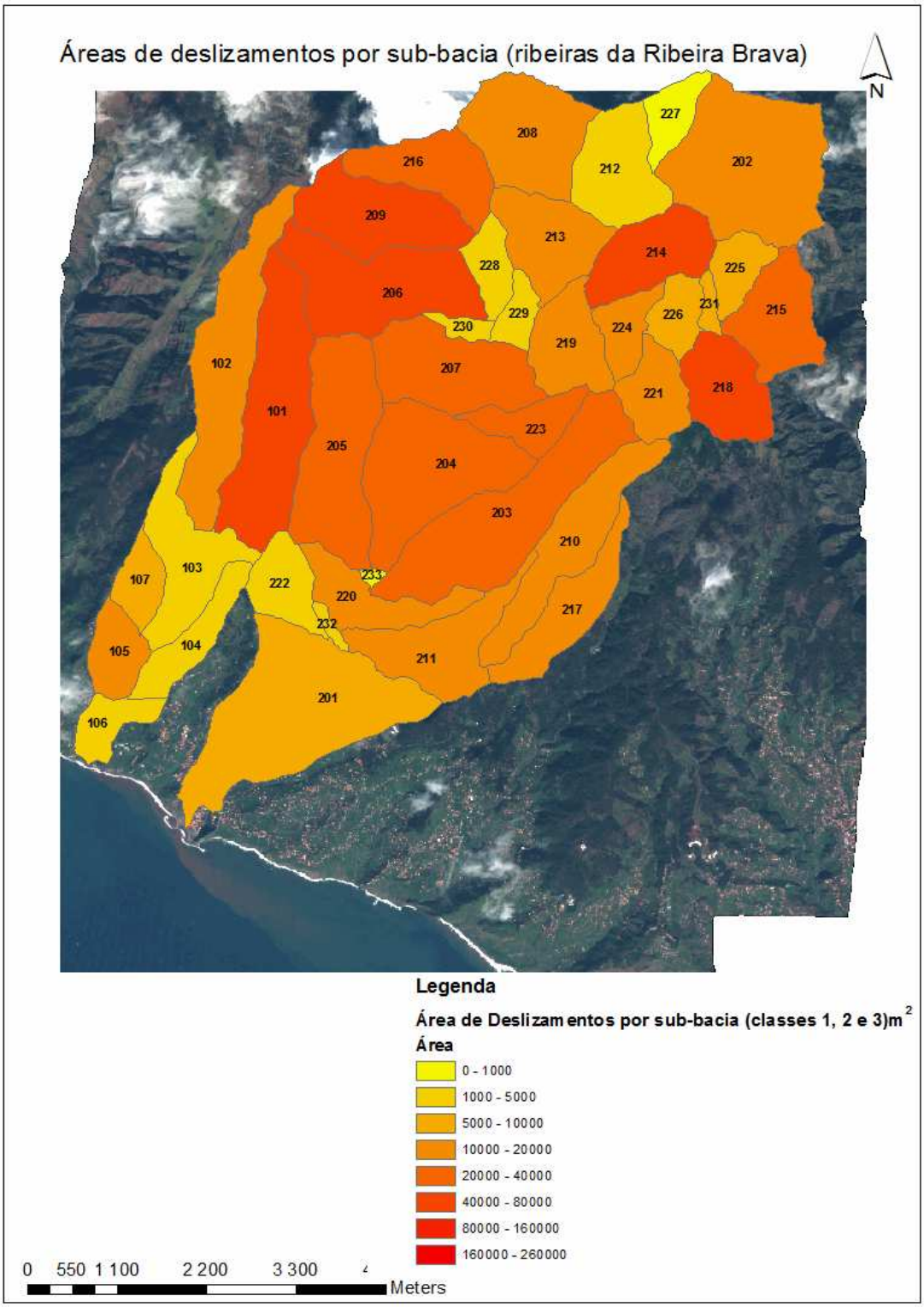

Figura 55 - Áreas de deslizamentos por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1, 2 e3)

Quadro 33 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1-3)

Ref	Bacia	Área da sub-bacia (m^2)	Área de deslizamentos (m^2)	Volume mínimo (m^3)	Volume máximo (m^3)
101	Rib da Tabua	2568700	62468	37481	93702
102	Rib da Tabua	2323600	13924	8354	20886
103	Rib da Tabua	1456300	4718	2831	7076
104	Rib da Tabua	767100	3243	1946	4865
105	Rib da Tabua	651600	10888	6533	16332
106	Rib da Tabua	518900	1318	791	1976
107	Rib da Tabua	512700	7263	4358	10895
201	Rib Brava	3643700	5627	3376	8440
202	Rib Brava	3042700	10410	6246	15615
203	Rib Brava	2859800	19808	11885	29711
204	Rib Brava	2424100	26041	15624	39061
205	Rib Brava	2299400	20397	12238	30595
206	Rib Brava	2176800	63051	37831	94577
207	Rib Brava	1785500	31080	18648	46620
208	Rib Brava	1778200	15991	9595	23986
209	Rib Brava	1658200	50518	30311	75778
210	Rib Brava	1653500	11462	6877	17192
211	Rib Brava	1454600	14927	8956	22391
212	Rib Brava	1336700	4452	2671	6678
213	Rib Brava	1278700	13250	7950	19875
214	Rib Brava	1231300	58146	34888	87219
215	Rib Brava	1231300	29400	17640	44099
216	Rib Brava	1188100	28966	17379	43449
217	Rib Brava	1143100	12934	7761	19401
218	Rib Brava	1134400	51482	30889	77224
219	Rib Brava	1035200	14301	8580	21451
220	Rib Brava	976400	12665	7599	18997
221	Rib Brava	787700	10777	6466	16166
222	Rib Brava	737900	3893	2336	5840
223	Rib Brava	640100	19251	11550	28876
224	Rib Brava	553700	13986	8392	20980
225	Rib Brava	537400	8381	5029	12572
226	Rib Brava	519000	8156	4893	12234
227	Rib Brava	510400	157	94	235
228	Rib Brava	505000	3189	1913	4783
229	Rib Brava	346800	2359	1416	3539
230	Rib Brava	177800	1176	705	1763
231	Rib Brava	140000	5786	3472	8680
232	Rib Brava	92800	1104	662	1656
233	Rib Brava	44600	0	0	0

Quadro 34 – Volumes de deslizamentos estimados por sub-bacia da Ribeira Brava (classes 1, 2 e3)

Ref	Bacia	Área da sub-bacia (m^2)	Área de deslizamentos (m^2)	Volume mínimo (m^3)	Volume máximo (m^3)
101	Rib da Tabua	2568700	62468	37481	93702
102	Rib da Tabua	2323600	15584	9351	23376
103	Rib da Tabua	1456300	4718	2831	7076
104	Rib da Tabua	767100	3243	1946	4865
105	Rib da Tabua	651600	10888	6533	16332
106	Rib da Tabua	518900	1318	791	1976
107	Rib da Tabua	512700	7434	4461	11152
201	Rib Brava	3643700	5627	3376	8440
202	Rib Brava	3042700	10410	6246	15615
203	Rib Brava	2859800	20147	12088	30220
204	Rib Brava	2424100	26041	15624	39061
205	Rib Brava	2299400	20397	12238	30595
206	Rib Brava	2176800	64170	38502	96255
207	Rib Brava	1785500	31168	18701	46752
208	Rib Brava	1778200	15991	9595	23986
209	Rib Brava	1658200	50673	30404	76010
210	Rib Brava	1653500	11496	6898	17244
211	Rib Brava	1454600	15053	9032	22580
212	Rib Brava	1336700	4452	2671	6678
213	Rib Brava	1278700	13250	7950	19875
214	Rib Brava	1231300	59327	35596	88990
215	Rib Brava	1231300	30330	18198	45495
216	Rib Brava	1188100	30534	18321	45802
217	Rib Brava	1143100	13108	7865	19662
218	Rib Brava	1134400	51638	30983	77457
219	Rib Brava	1035200	14301	8580	21451
220	Rib Brava	976400	12665	7599	18997
221	Rib Brava	787700	10777	6466	16166
222	Rib Brava	737900	3893	2336	5840
223	Rib Brava	640100	20960	12576	31439
224	Rib Brava	553700	13986	8392	20980
225	Rib Brava	537400	8381	5029	12572
226	Rib Brava	519000	9089	5454	13634
227	Rib Brava	510400	157	94	235
228	Rib Brava	505000	3189	1913	4783
229	Rib Brava	346800	2359	1416	3539
230	Rib Brava	177800	1176	705	1763
231	Rib Brava	140000	5786	3472	8680
232	Rib Brava	92800	1104	662	1656
233	Rib Brava	44600	0	0	0

4.8.5 Análise espacial da distribuição dos deslizamentos

Com o objetivo de contribuir para a caracterização dos deslizamentos que ocorreram a 20 e Fevereiro, cruzou-se a respectiva cartografia com as cartas representativas de alguns factores potencialmente condicionantes: cartas de precipitação, carta de solos, carta de ocupação do solo (COS2007), carta de declives e carta de vias de comunicação.

Caracterização dos deslizamentos em função da classe de ocupação do solo

A distribuição de área deslizada e/ou número de deslizamentos pelas grandes classes de ocupação é semelhante nas duas áreas analisadas (Figura 56 e Figura 57), com grande maioria dos deslizamentos a ocorrerem dentro da classe de Florestas e Meios Naturais e Semi-Naturais. No entanto quando se analisa a afectação de cada classe de ocupação por deslizamentos os resultados apresentam-se diferentes para as duas áreas: no Funchal a classe de ocupação mais afectada é a das Florestas com cerca de 35% e apenas 2% da área agrícola sofreu deslizamentos (Figura 58); na Ribeira Brava cerca de 13% da classe Agrícola foi sujeita a deslizamentos enquanto apenas 6% da classe Florestal foi afectada (Figura 59), apesar de ser claramente dominante nesta área.

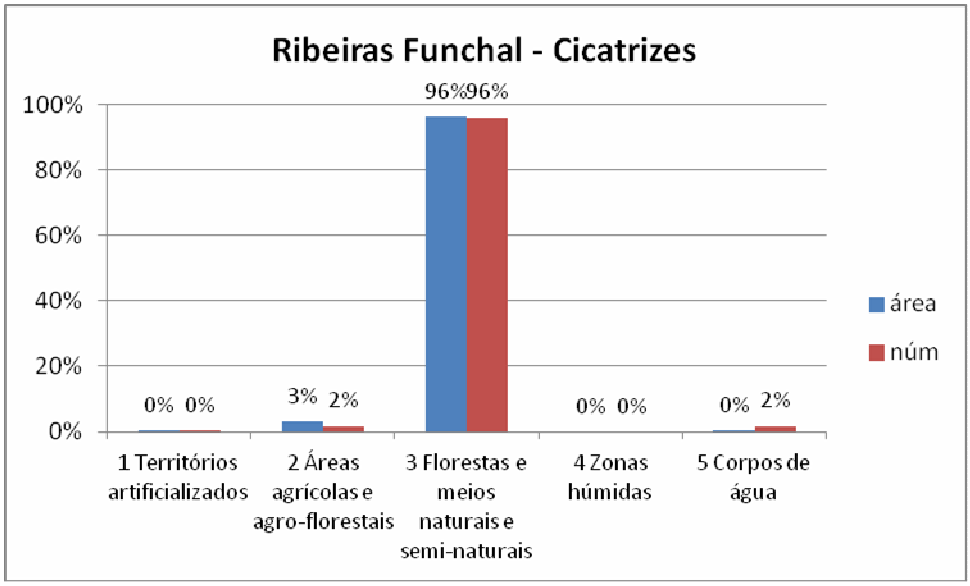

Figura 56 – Distribuição da área de deslizamentos por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

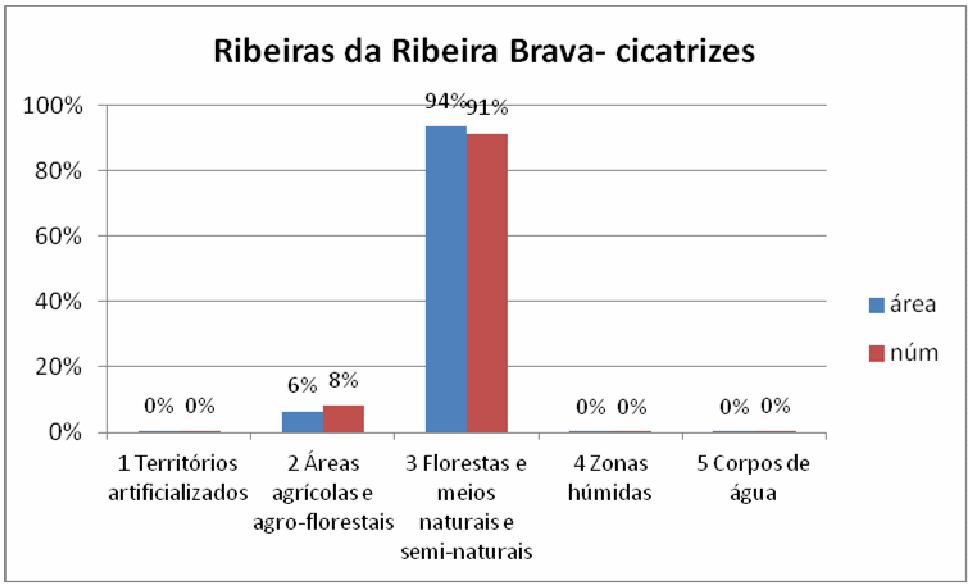

Figura 57 – Distribuição da área e número de deslizamentos por classes de ocupação (COS2007, nível1) nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

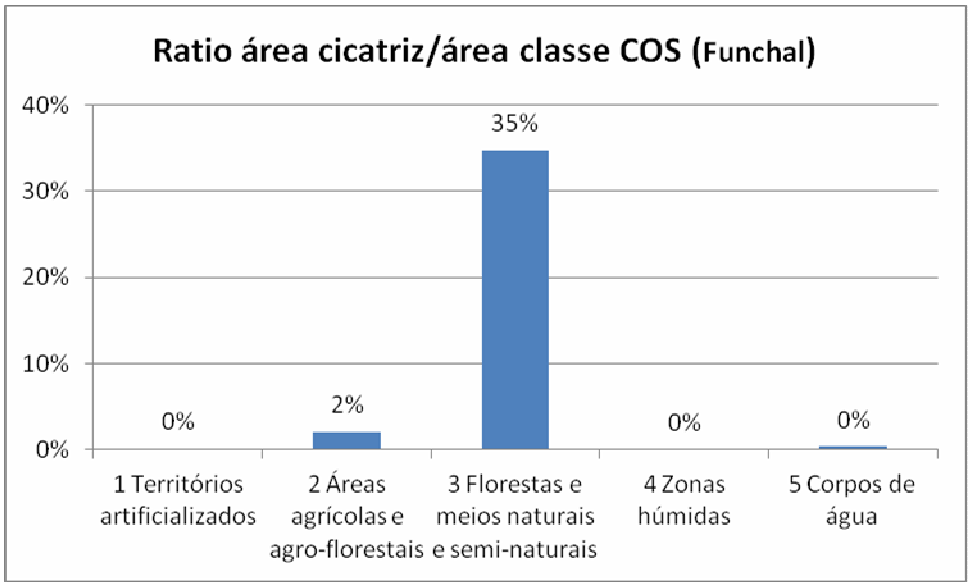

Figura 58 – Proporção de área de cada classe de ocupação (COS2007, nível1) afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

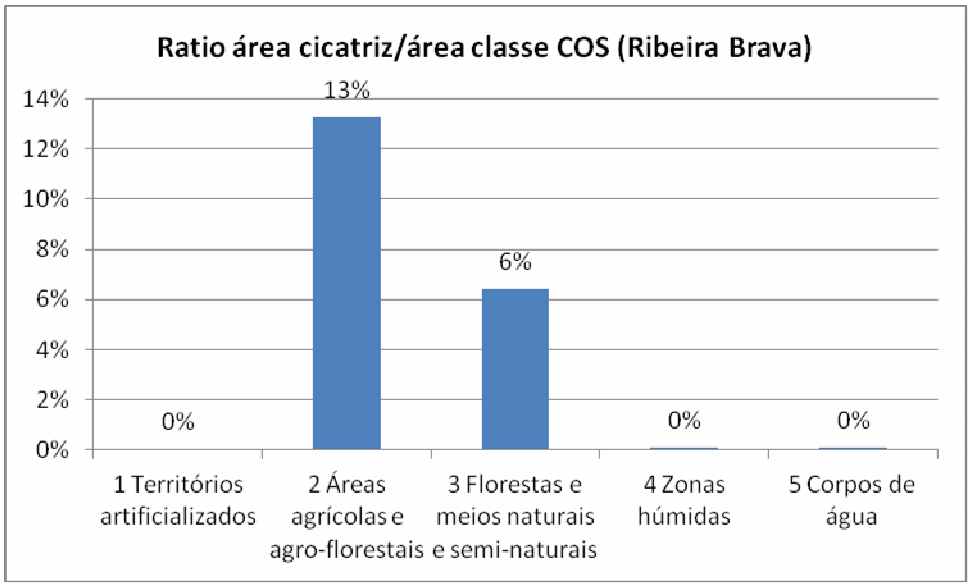

Figura 59 – Proporção de área de cada classe de ocupação (COS2007, nível1) afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

Para melhor interpretação dos resultados apresentam-se nas Figura 60 e Figura 61 a ordenaçãos das classes de ocupação de nível 5 com uma área superior a 10 hectares dentro da área de estudo, com maiores afectações relativas, nunca inferiores a 0.6% da área da classe e com um número de cicatrizes superior ou igual a 10. As classes mais afectadas proporcionalmente na área da Ribeira Brava são as Áreas Ardidas (3.3.4.1.1), as Pastagens Permanentes (2.3.1.1.1) e os Matos Pouco Densos (3.2.2.2.1); note-se no entanto a fraca expressividade no território das duas primeiras com cerca de 27 e 28 hectares na área; estas classes são mesmo inexistentes na área do Funchal. Na área do Funchal a classe de ocupação com maior afectação relativa foi a Vegetação Herbácea (3.2.1.1.1), seguida da classe de Florestas Abertas de Outras Resinosas (3.2.4.3.3) e de Culturas Temporárias de Regadio (2.1.2.1.1). Genericamente, pode-se concluir que as classes com maior afectação são aquelas cujo coberto vegetal é total ou parcialmente desprovido de árvores. As classes de ocupação incluídas nas classe 3.1 Florestas (COS, nível 2), florestas mais densas e com árvores, aparecem 5º lugar de relevância na área do Funchal com a Floresta de Espécies Invasoras (3.1.1.1.6) e em 7º na Ribeira Brava Ribeira Brava com as Florestas de Pinheiro (3.1.2.1.1); refira-se que na área da Ribeira Brava esta classe de ocupação (3.1 Florestas) é dominada pela Floresta Natural da Madeira (3.1.1.2.8), enquanto no Funchal existe uma repartição da floresta por Eucalipto (3.1.1.1.5), Espécies Invasoras (3.1.1.1.6) Pinheiro Bravo (3.1.2.1.1) e Outras Resinosas (3.1.2.1.3). Salienta-se o facto de apesar da Floresta Natural da Madeira (3.1.1.2.8) ocupar

cerca de 36% da área da Ribeira Brava, esta classe tem uma proporção de área afectada muito baixa de cerca de 0.04%.

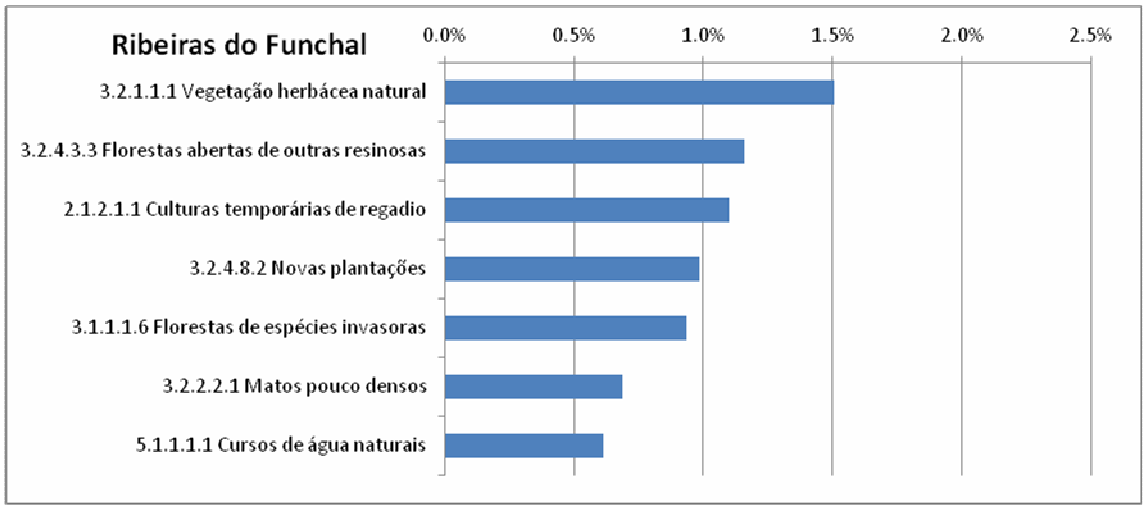

Figura 60 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por proporção de área afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

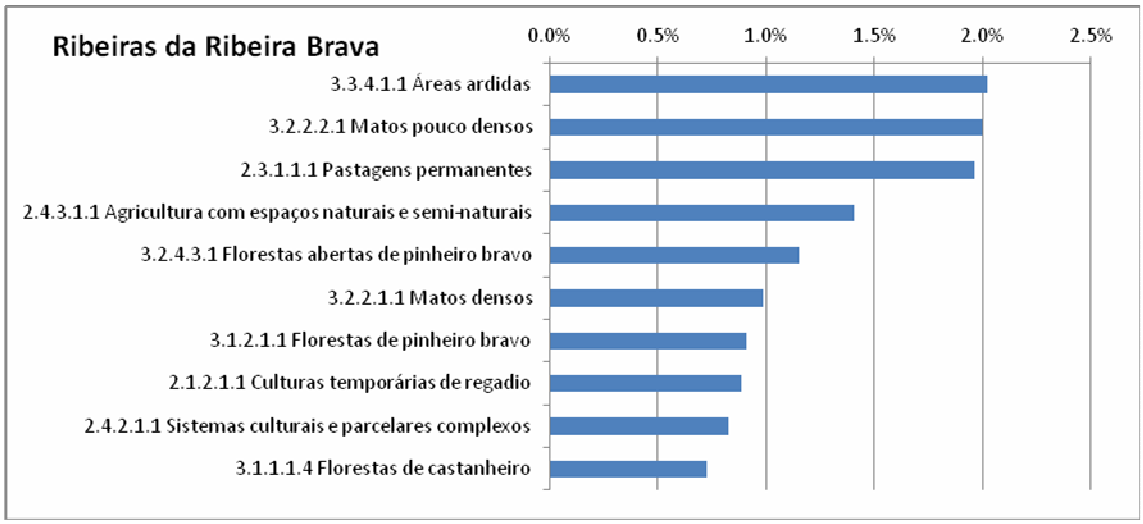

Figura 61 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por proporção de área afectada por deslizamentos nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

A análise da densidade de cicatrizes por cada classe de ocupação (Figura 62 e Figura 63) permite-nos concluir que no geral as classes de ocupação florestal com menor densidade de árvores têm uma maior densidade de ocorrência de cicatrizes, e quando densidades elevadas aparecem nas classes de Florestas (3.1) estas não se reflectem em área de material sólido mobilizado (Figura 60 e Figura 61).

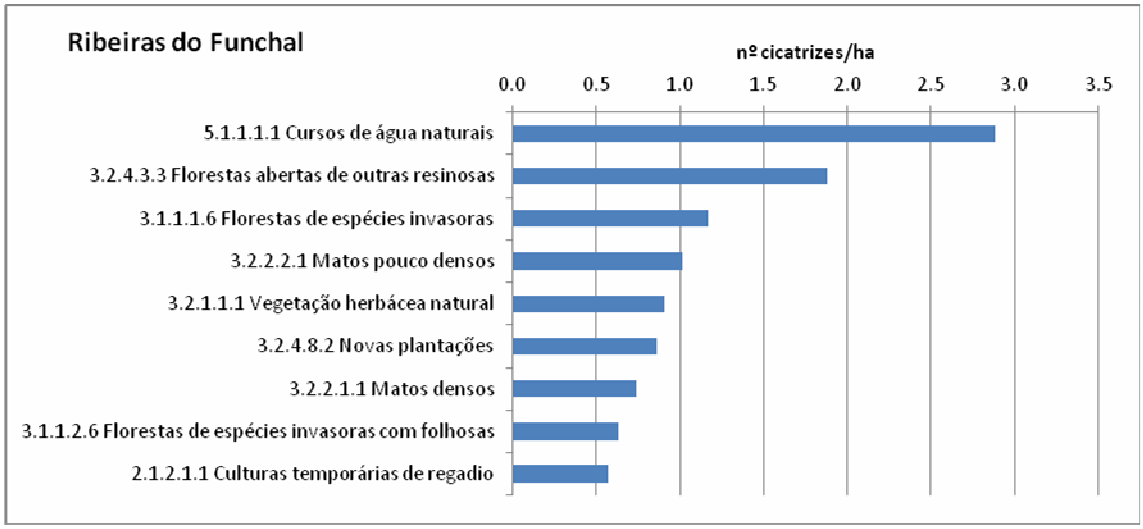

Figura 62 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

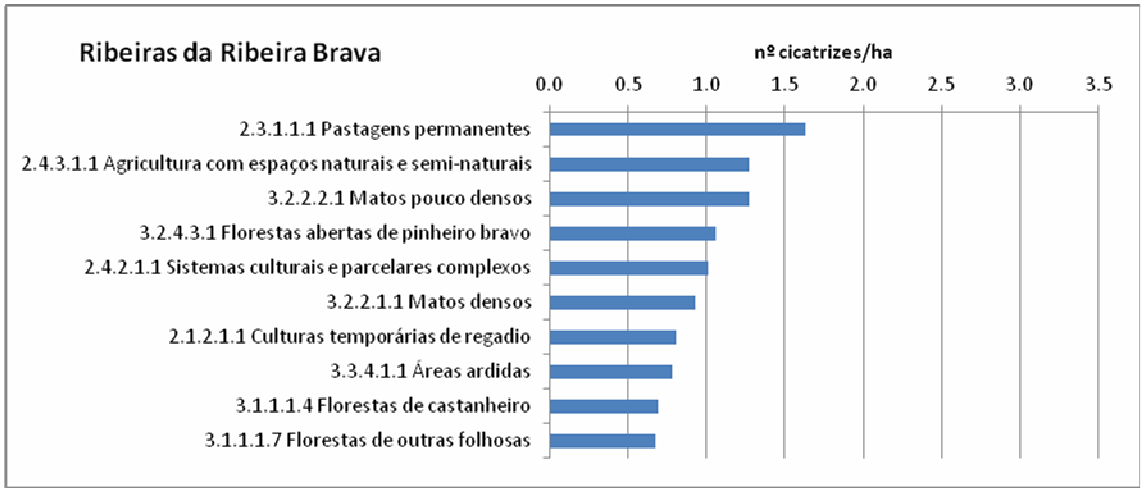

Figura 63 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

Dado que se verificou que a maioria do material sólido mobilizado foi proveniente de um pequeno número de cicactrizes de grande dimensão, superiores a 80 m^2, apresentam-se de seguida as 5 classes de ocupação com maior densidade de cicatrizes de grande dimensão na Figura 64 e Figura 65.

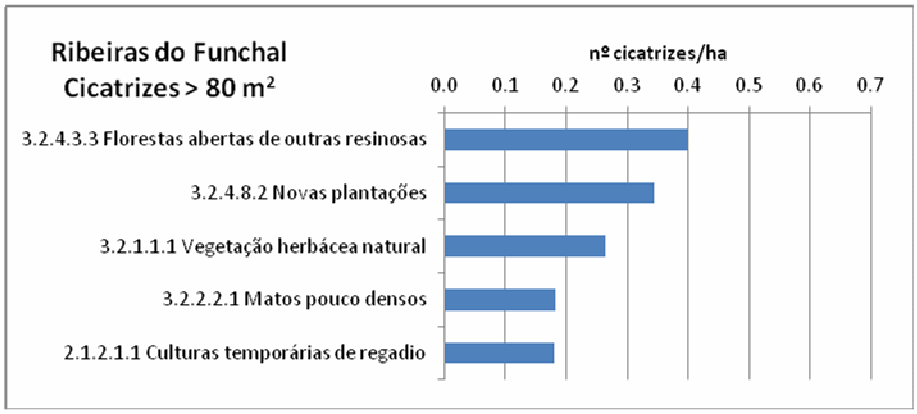

Figura 64 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes com cicatrizes superiores a 80 m^2 nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

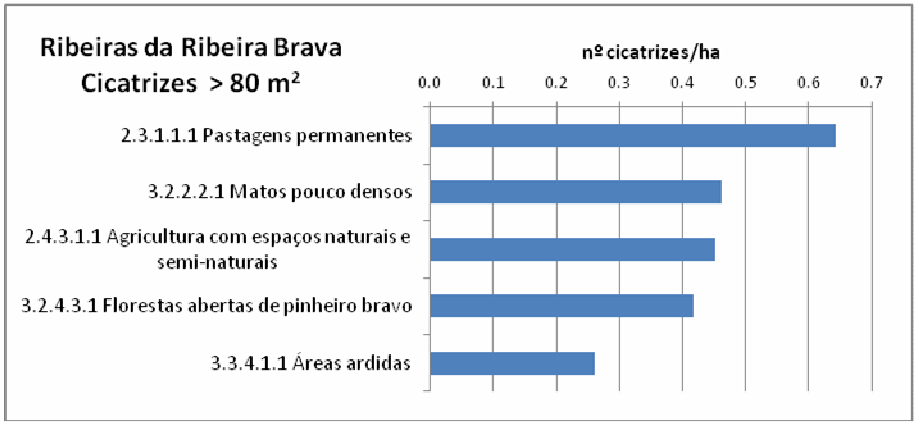

Figura 65 – Ranking das classes de ocupação (COS2007, nível5) por densidade de cicatrizes com cicatrizes superiores a 80 m^2 nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava.

Note-se que as análises anteriores não têm em consideração a localização espacial das classes de ocupação. Dado que a mobilização do material sólido está intrinsecamente relacionado com a ocorrência de precipitações intensas e declives acentuados entre outros factores, a análise da susceptibilidade de cada classe de ocupação deverá ser analisada com maior detalhe dentro da área em que ocorreram as condições mais favoráveis aos deslizamentos.

Caracterização dos deslizamentos em função dos declives

A área da Ribeira Brava tem genericamente declives mais acentuados do que a área do Funchal (Figura 66). Este facto poderá explicar parcialmente o facto de apesar do conjunto da bacias hidrográficas da Ribeira Brava ter uma área apenas 20% superior à das bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal, a área afectada por deslizamentos ser quase o dobro.

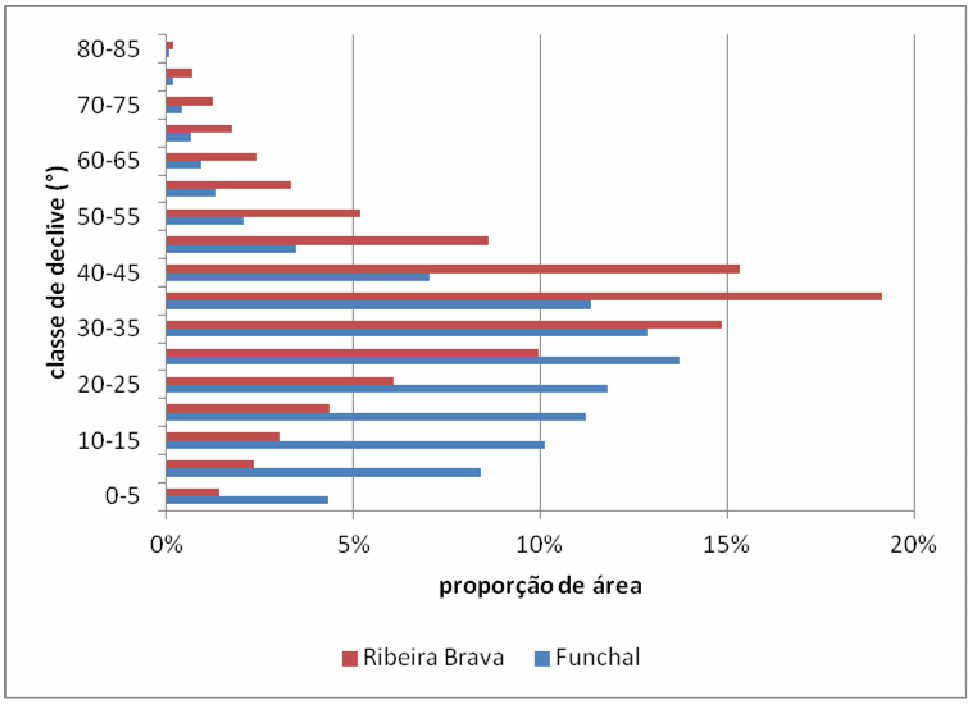

Figura 66 – Distribuição das áreas por classe de declive nas bacias hidrográficas

Nas Figura 67 e Figura 68 apresenta-se a distribuição da área de deslizamentos e total por áreas de estudo. A sua análise revela que para a área do Funchal a maioria dos deslizamentos ocorreu em declives entre 25° e 40°, enquanto na área da Ribeira Brava os deslizamentos ocorreram essencialmente entre os 30° e 45°.

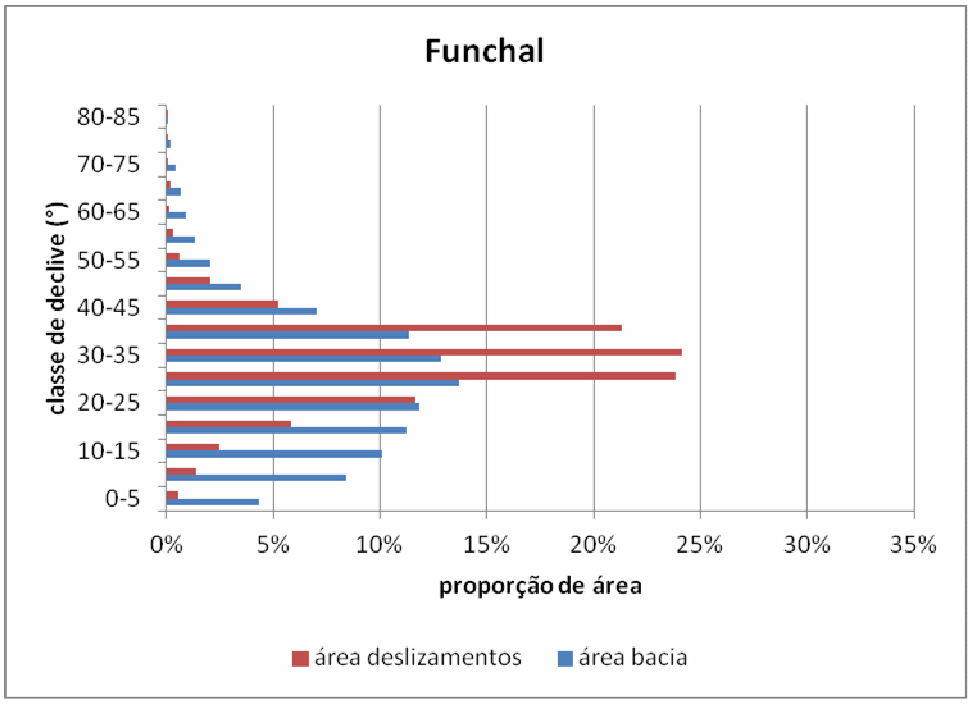

Figura 67 – Distribuição das áreas por classe de declive nas bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal.

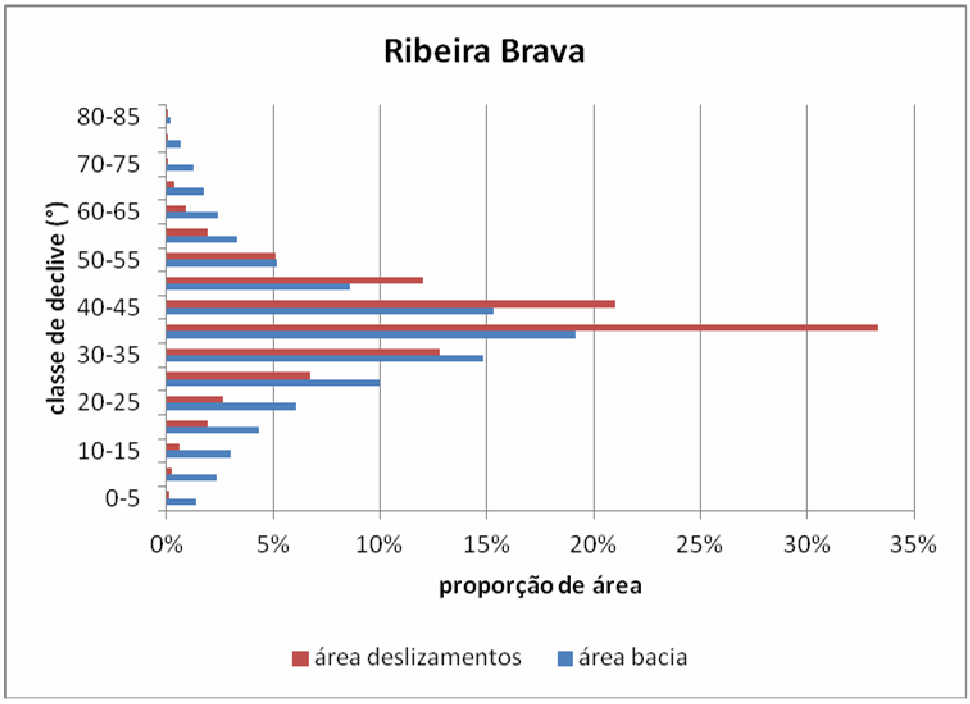

Figura 68 – Distribuição das áreas por classe de declive nas bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava.

Caracterização dos deslizamentos em função da rede viária

Apesar da baixa densidade da rede viária nas áreas de estudo (Figura 69 e Figura 71), existe uma proporção considerável de deslizamentos nas envolventes dos eixos de via (Figura 70 e Figura 72). Note-se que a rede viária utilizada não inclui estradas florestais, e por essa razão esta estimativa pode estar bastante sobrestimada, dado que as classes de ocupação florestal e agrícola foram as que se apresentaram mais susceptíveis a deslizamentos.

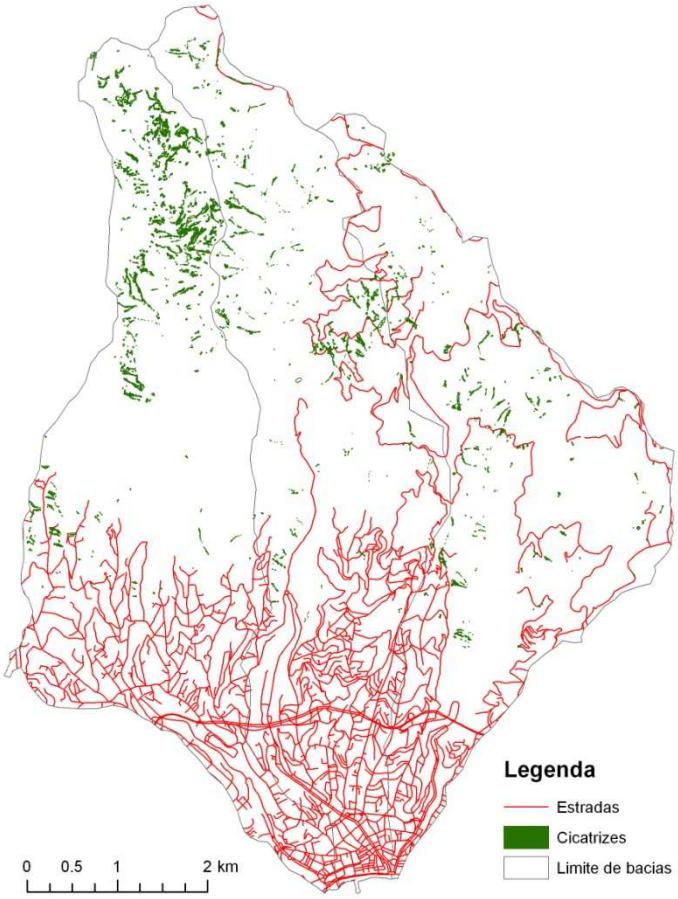

Figura 69 – Mapa da rede viária e deslizamentos nas Bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

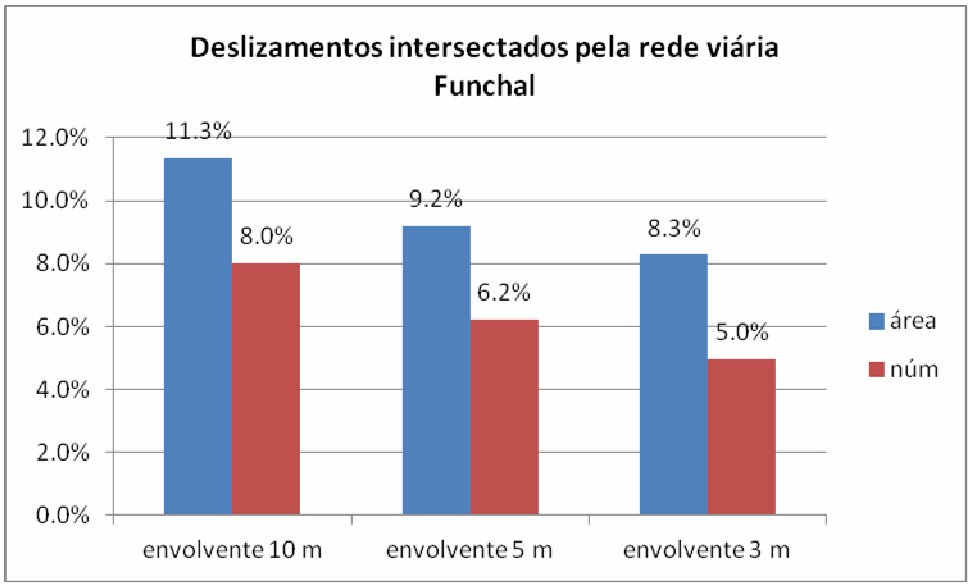

Figura 70 – Proporção em área e número de deslizamentos na envolvente da rede viária nas Bacias hidrográficas das ribeiras do Funchal

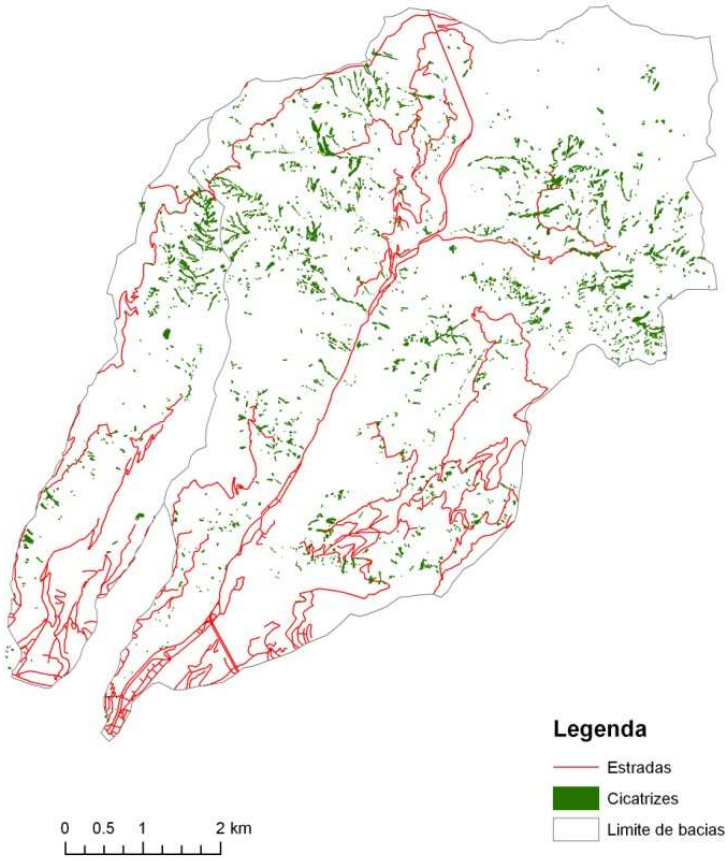

Figura 71 – Mapa da rede viária e deslizamentos nas Bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

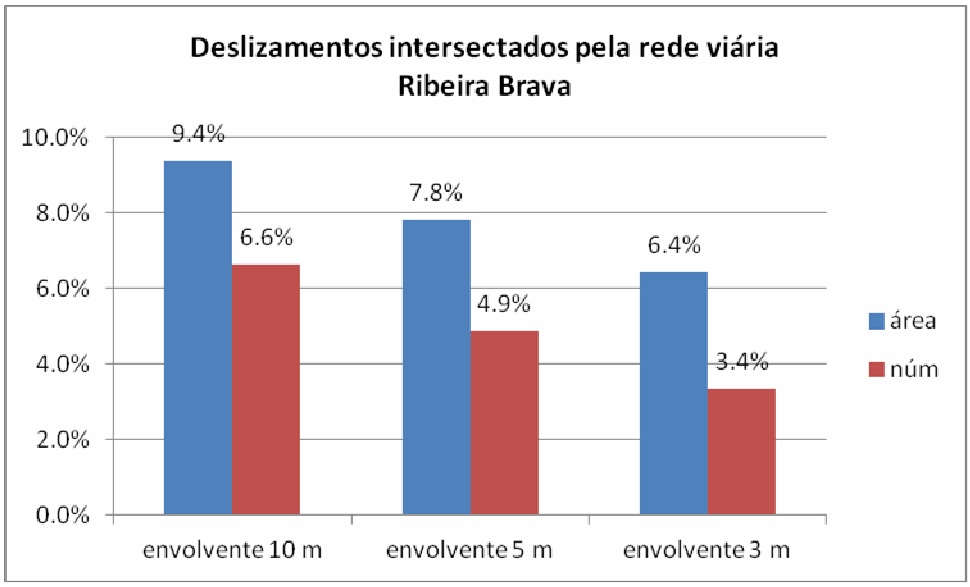

Figura 72 – Proporção em área e número de deslizamentos na envolvente da rede viária nas Bacias hidrográficas das ribeiras da Ribeira Brava

Caracterização dos deslizamentos em função do tipo de solo

Cruzando os mapas de tipo de solo com os deslizamentos, observáveis nas Figura 73 e Figura 74, verifica-se que a maior área afectada por deslizamentos coincide com os tipos de solo predominantes nos dois concelhos (Figura 75). Conclusão semelhante pode ser retirada da análise da Figura 76.

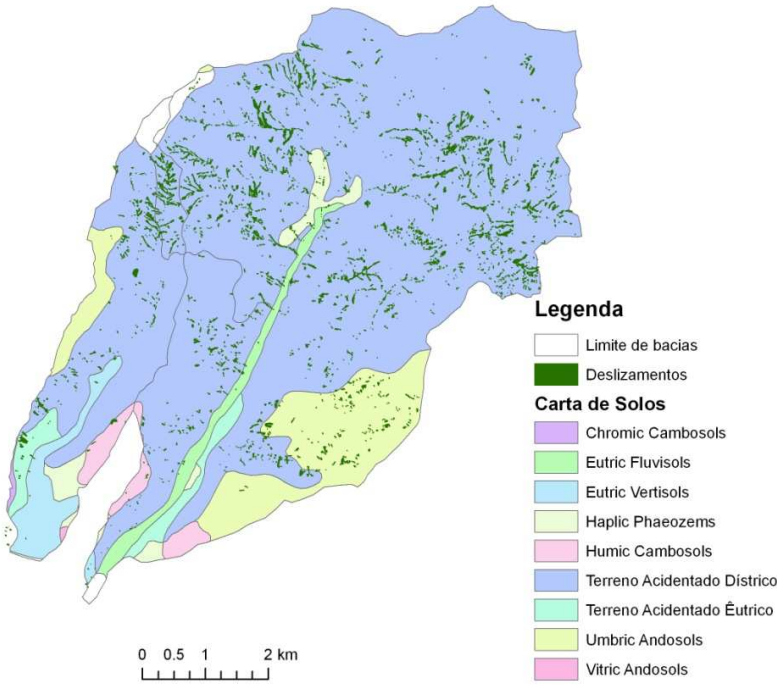

Figura 73 - Mapa dos tipos de solo e de deslizamentos nas bacias hidrográficas da Ribeira Brava

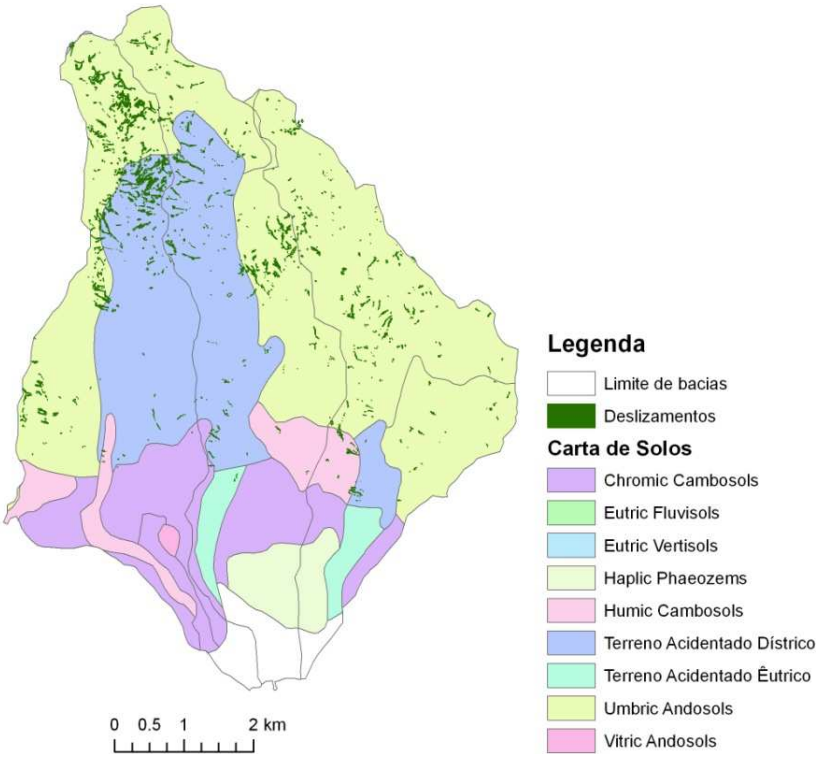

Figura 74 - Mapa dos tipos de solo e de deslizamentos nas bacias hidrográficas do Funchal

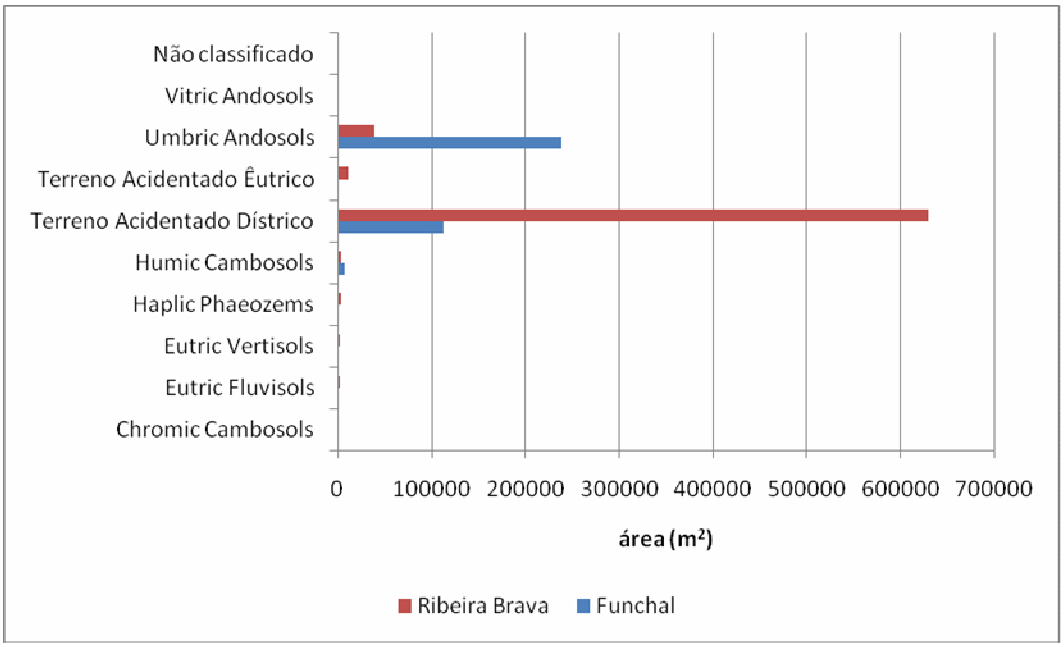

Figura 75 – Área total das cicatrizes de deslizamento por tipo de solo para as bacias hidrográficas dos concelhos do Funchal e da Ribeira Brava.

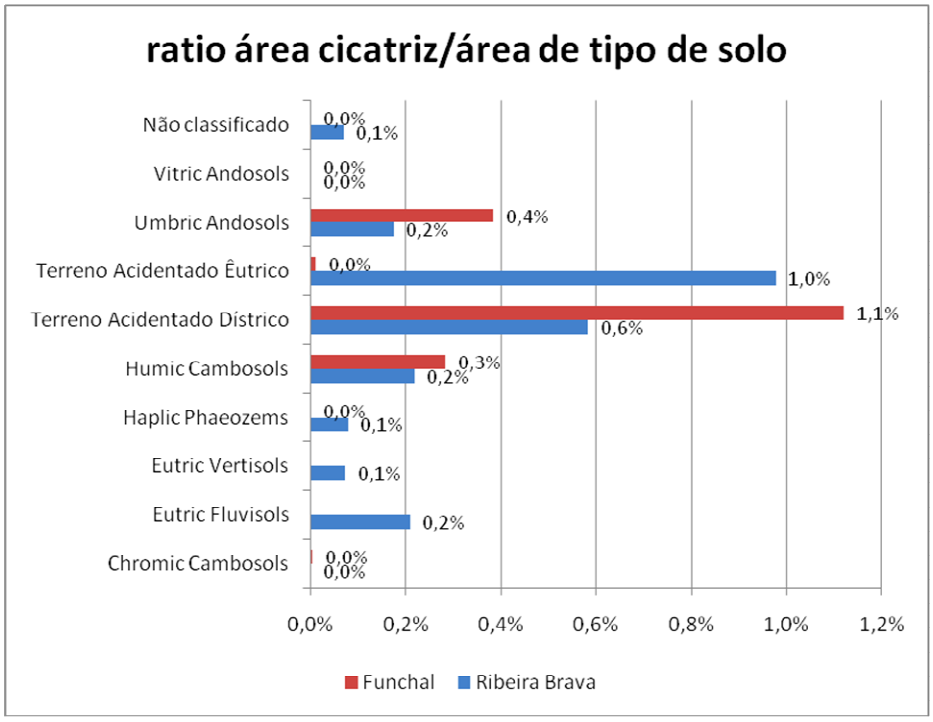

Figura 76 – Razão entre a área de cicatrizes de deslizamentos e as áreas do tipo de solo para a região do Funchal e da Ribeira Brava.

Caracterização dos deslizamentos em função da pluviometria

Com o objectivo de relacionar os deslizamentos com os valores da precipitação estimou-se pelo método de krigagem ordinária o número de horas com precipitação superior a determinados limiares. Na Figura 77 e na Figura 78 apresenta-se a cartografia para precipitações superiores a 10 mm e 30 mm, respectivamente. As figuras sugerem que há uma correlação entre a área afectada por deslizamentos e a área onde ocorreram precipitações superiores a 30 mm num período superior a 3 horas.

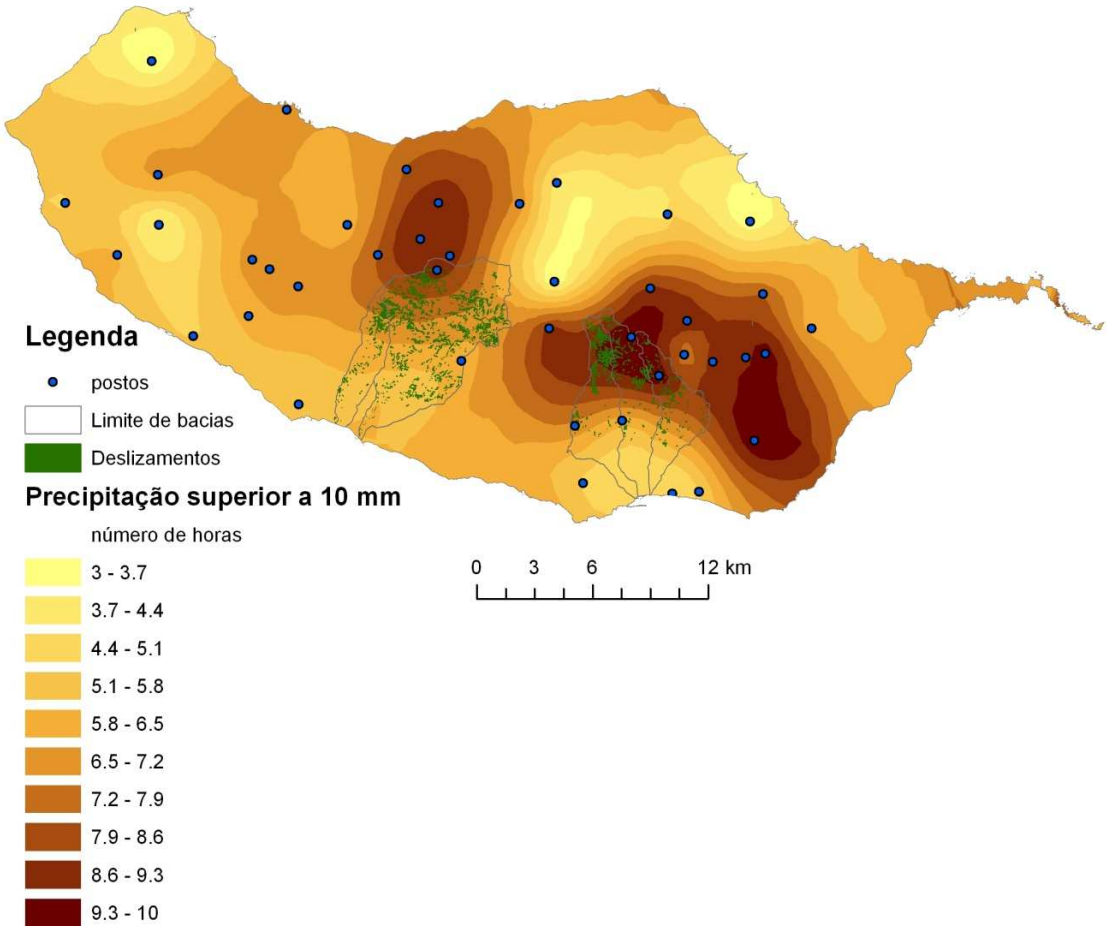

Figura 77 – Nº de horas com precipitação superior a 10mm.

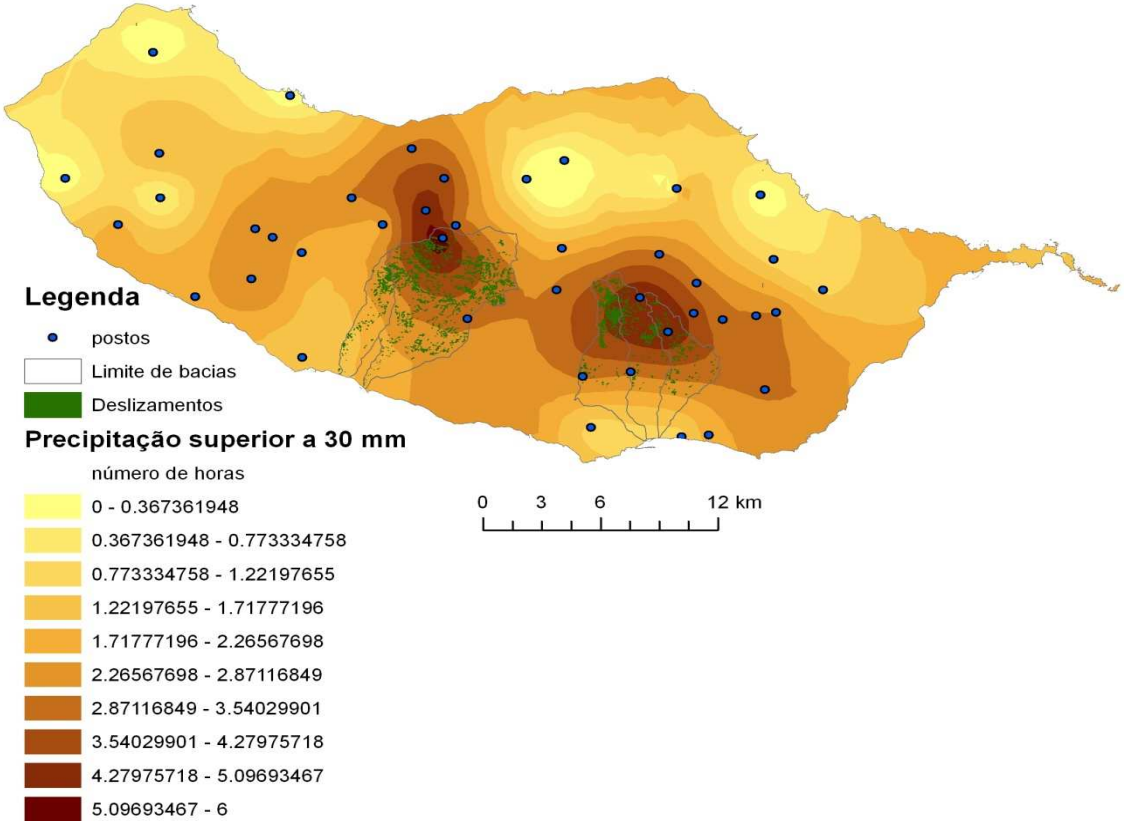

Figura 78 – Nº de horas com precipitação superior a 30mm.

4.9 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMETRICA

Na região abrangida pelas cabeceiras há que distinguir dois tipos de depósitos, cujos movimentos podem contribuir com material sólido para as aluviões: os depósitos de cobertura resultantes da meteorização das rochas subjacentes e os depósitos de vertente. Ambos os depósitos são facilmente desmontáveis com meios mecânicos correntes.

Os primeiros são constituídos essencialmente por solos com pequenos fragmentos de rocha dispersos e algumas raízes. Têm geralmente cor acastanhada e espessura compreendida entre cerca de 1 a 3 m. Conforme atrás referido, foram colhidas amostras para a realização de análises granulométricas cujos resultados se apresentam no Quadro 35. Como se pode verificar, são essencialmente materiais grosseiros com uma elevada percentagem de finos (siltes e argilas), em geral, entre 30 e 50%. O comportamento hidromecânico destes materiais é condicionado fundamentalmente pela sua matriz silto-argilosa.

Quadro 35 - Fracções granulométricas dos depósitos de cobertura

Local	Fracções granulométricas*			% Matéria Orgânica**
	% Finos	% Areia	% Cascalho	
Trapiche/ Sto. António	68	20	12	14.6
Cabeceira 1/Sta Luzia	26	12	62	31.2
Cabeceira 2/Sta Luzia	16	36	48	12.1
Parque Ecológico	43	13	44	25.6
Ameixieira/Ribeira Brava	49	23	28	30.7
Fajã da Égua 1/Ribeira Brava	31	27	42	28.8
Fajã da Égua 2/Ribeira Brava	32	44	24	18.5
Serra da Tabua	43	15	42	31
Tabua	46	21	33	6.6
* fracções granulométricas segundo a norma ASTM D2487-00 ** determinação do teor em matéria orgânica segundo a norma ASTM D2974-07a				

Os depósitos de vertente são muito heterogéneos, constituídos por fragmentos e blocos de rochas diversas, com predomínio dos basaltos e de dimensões variáveis, desde blocos que podem atingir 2 m de diâmetro, até pequenos fragmentos angulosos ou sub-rolados, envolvidos por uma matriz argilo-silto-arenosa, exibindo cor castanho-avermelhada escura. A sua espessura é muito variável, podendo ocorrer entre 1 m e mais de uma dezena de metros. Quando expostos directamente a agentes fortemente erosivos, como é o caso das ocorrências de aluviões, são facilmente erodidos, observando-se o alargamento significativo dos leitos das ribeiras e concomitante aumento de volume de material sólido transportado.

Os trabalhos realizados nos leitos das ribeiras, cujo objectivo principal era proporcionar a realização de uma classificação granulométrica automática dos materiais aí depositados (depósitos aluvionares não remexidos após o evento de 20/2/2010), envolveram: i) reconhecimento local, medições e levantamento fotográfico do leito e das encostas das ribeiras; ii) caracterização geral dos actuais depósitos com base na sua origem e nas suas estruturas de deposição; iii) medição de blocos e de algumas distâncias de referência. Infelizmente, a impossibilidade de efectuar voos de muito baixa altitude, que permitiriam identificar os blocos e efectuar o tratamento geomático da granulometria, não foi tecnicamente possível.

Apesar das limitações referidas, o trabalho desenvolvido permitiu efectuar uma análise granulométrica de base quantitativa para os grandes blocos (com dimensões sensivelmente superiores a 1 metro), válida para os troços analisados. Na Figura 79 localizam-se os troços

estudados (ribeira S. João/Sto. António, ribeira de Sta Luzia e ribeira Brava, na ligação à ribeira do Pico). Um troço da Ribeira das Mijas Velhas foi avaliado apenas qualitativamente.

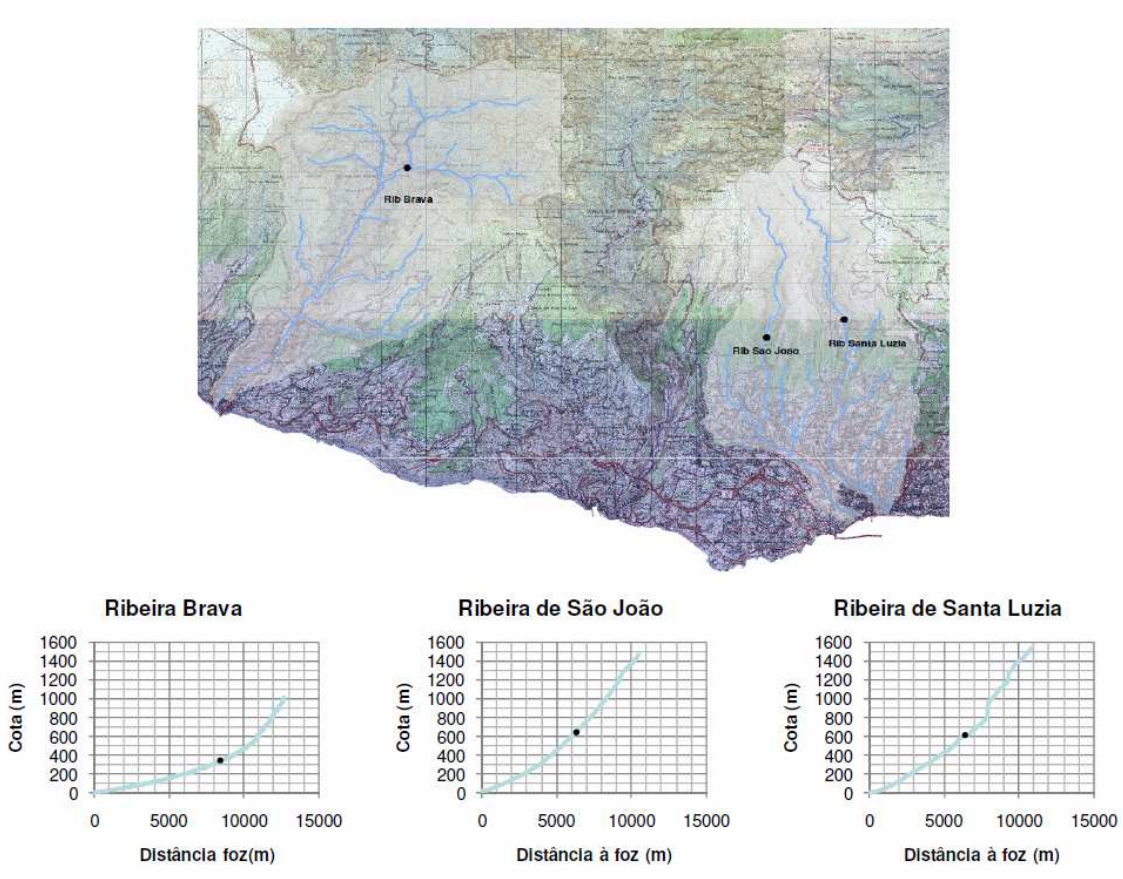

Figura 79 - Localização dos troços onde foram realizadas medições de granulometria.

O reconhecimento local, com recurso ao levantamento fotográfico e a medições directas, permitiu identificar os vários mecanismos de erosão e deposição nas margens e no leito desses troços das ribeiras e, serviu também para estimar a composição granulométrica dos blocos nesses troços. A análise efectuada, apesar de abranger áreas muito restritas do leito das ribeiras, permitiu reconhecer alguns mecanismos envolvidos no transporte de grandes quantidades de material sólido, como foi o caso do evento em estudo. Nos troços analisados, um perfil de deposição pós-evento típico inclui material granular de dimensões médias a finas (camada rolante de referência que serviu para estabelecer um diâmetro equivalente no modelo de escoamento bifásico), que suporta os blocos de grandes dimensões, podendo existir ainda uma cobertura mais fina sobre os blocos, constituída por cascalho e areias (Figura 80).

Figura 80 - Aspecto geral dos materiais depositados no leito da ribeira de São João/Santo António. Medição de blocos de basalto que ocupam a parte superior do leito (esquerda). Depósito de cascalho e areia, constituindo um nível de referência na parte superior do leito – escala 1 metro (direita).

Os resultados obtidos para as granulometrias dos grandes blocos dos depósitos presentes nos leitos das ribeiras, correspondem a uma caracterização granulométrica truncada pois está ausente toda a informação relativa ao material com dimensões inferiores (Figura 81).

Para a obtenção dos resultados apresentados (Figura 81), o comprimento (na direcção de maior alongamento) e a largura (perpendicularmente ao alongamento) foram medidos segundo projecção em planta. Nos gráficos à esquerda, além da projecção das dimensões dos blocos, indicam-se as rectas correspondentes aos valores da razão Comprimento/Largura (C/L) = 1 (tendência equidimensional) e C/L = valor médio do subconjunto de blocos analisado (valores em torno de 1,50). Nos gráficos à direita apresentam-se os histogramas e as curvas cumulativas relativos ao comprimento, apenas da fracção em análise, para cada um dos troços das ribeiras.

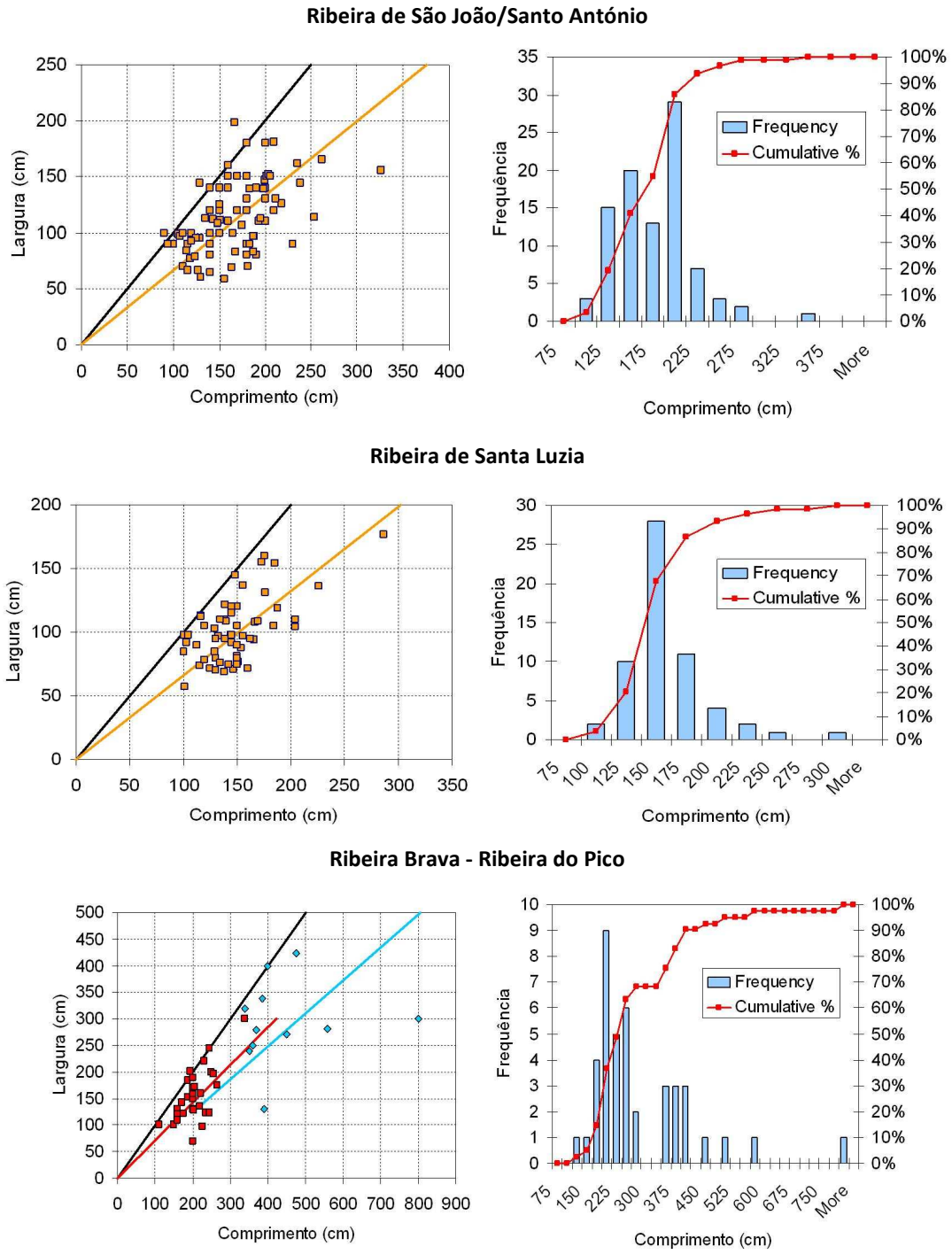

Figura 81 - Parâmetros geométricos de blocos (> ≈1 m de comprimento) não remexidos, depositados em segmentos dos leitos das ribeiras de São João, Santa Luzia e ribeira Brava/Pico.

Os maiores blocos da Ribeira Brava – Ribeira do Pico (identificados com cor azul no gráfico da Figura 81) são constituídos por materiais piroclásticos, podendo atingir 8 m de comprimento.

Estes blocos são provenientes das encostas ou resultam do destacamento do substrato na região do leito. Apesar da grande dimensão, alguns dos blocos já se encontram subarredondados, devido à sua fraca resistência mecânica ao desgaste. Alguns blocos, inicialmente de grandes dimensões, fracturaram por impacto dando origem a fragmentos de dimensões muito mais reduzidas. A predominância de materiais piroclásticos nesta ribeira e a existência de blocos de dimensões muito elevadas está em concordância com a litologia predominante das encostas e os seus elevados declives. Em oposição, os blocos de rochas lávicas são muito mais compactos e resistentes à erosão e ao transporte; o seu calibre é contudo muito inferior, estando limitado à partida pela fraca espessura dos níveis lávicos e pela disjunção em bloco associada.

De um modo geral, observa-se uma predominância de blocos basálticos sobre os blocos de materiais piroclásticos.

4.10 ESCOAMENTO SÓLIDO (ALUVIÕES)

4.10.1 Enquadramento

Simulou-se o escoamento da mistura de água e material granular (a aluvião) em condições idealizadas mas próximas das que ocorreram na madrugada e manhã do dia 20 de Fevereiro de 2010. Procurou-se caracterizar e quantificar o aluvião, identificando as zonas em que se regista maior tendência para a deposição generalizada, doravante "*zonas críticas*". A simulação é feita para a Ribeira de São João.

Enumeram-se, de seguida, os principais condicionantes e hipóteses simplificativas.

Caracterização morfológica da linha de água

Os elementos de base de altimetria e geometria do vale, na forma de perfis longitudinais e secções transversais, foram determinados com base num modelo digital de terreno com resolução de 8 m. Considerando que o leito da ribeira tem uma largura, na zona urbana, entre 9 e 15 m, esta resolução é insuficiente para o desenho das secções transversais, especialmente quanto à determinação da altura dos muros de contenção lateral e quanto à identificação da localização e altura dos travessões. O traçado inicial das secções de cálculo foi corrigido com base em observações no local.

Material sólido

A simulação foi levada a cabo com estimativas dos diâmetros significativos obtidas nos trabalhos preliminares e por observação no local. Os volumes de material sólido decorrentes da instabilização das encostas durante episódios de precipitação intensa correspondem a estimativas preliminares.

Modelo matemático

O modelo conceptual compreende as seguintes hipóteses:

i. a mistura de água e material granular é considerada como um fluido homogéneo no seio do qual se estabelecem tensões granulares isotrópicas;

ii. o comportamento reológico da mistura de água e material granular é expresso por equações de fecho parametrizadas em função das propriedades do fluido (densidade e viscosidade) e do material granular (densidade, coeficiente de restituição), das propriedades da mistura (granulometria, difusividade e viscosidade granulares), da aceleração do campo gravítico e do escoamento;

iii. a granulometria do material sólido transportado é expressa por um único diâmetro representativo, i.e. o transporte de misturas granulométrias não é explicitamente considerado;

iv. o diâmetro representativo determina, em grande medida, o comportamento reológico da mistura; assume-se que o valor mais indicado corresponde à classe modal da distribuição granulométrica do material do leito local; como consequência dos dois pontos anteriores, o modelo não prevê a segregação longitudinal do material granular transportado e a sua reologia pode variar longitudinalmente mas não no tempo;

v. o modelo contempla escoamentos estratificados (*sheet flow*) ou homogéneos de frente abrupta (*debris-flow*), como se ilustra na Figura 82; no primeiro caso existe transporte sólido de material grosseiro junto ao fundo, por arrastamento (o peso do material granular é, em última análise, descarregado no leito), nas condições de homogeneidade e isotropia anteriormente descritas; a camada superior do escoamento é composta por água limpa ou por uma mistura de água e sedimentos finos, transportados em suspensão (o seu peso é suportado por fluxos verticais turbulentos de quantidade de movimento); no segundo caso a mistura de água e sedimentos, nas condições de homogeneidade e isotropia anteriormente citadas, forma um escoamento que interage limitadamente com o fundo (ou puramente erosional ou puramente deposicional); em

ambos os casos o modelo ignora o comportamento dinâmico do material mais grosseiro, nomeadamente o facto de ser transportado ao longo de grandes distâncias, sendo que, no caso do *debris-flow*, serão transportados na frente de onda (Figura 82).

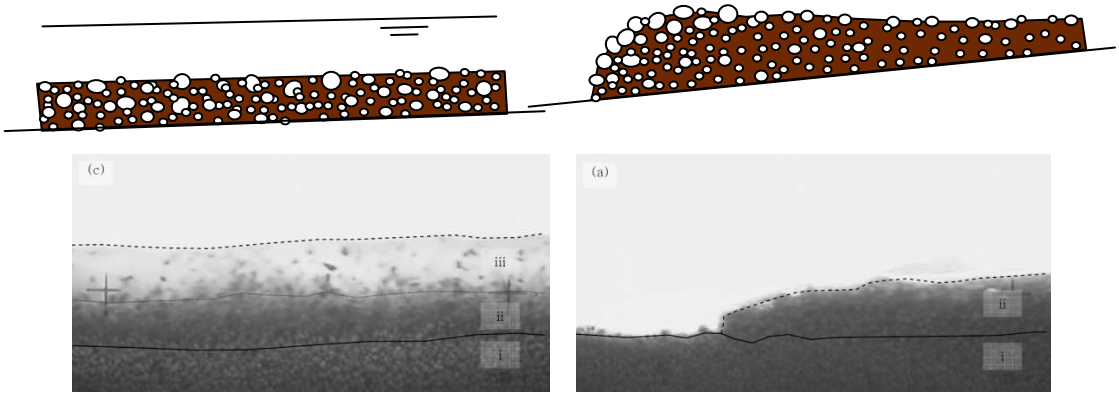

Figura 82 - Tipos de aluviões susceptíveis de serem modelados. Esquerda: *sheet-flow* (escoamento estratificado); direita: *debris-flow* (escoamento de frente abrupta). O transporte selectivo e a segregação vertical, registada no *debris-flow*, são fenómenos não susceptíveis de serem simulados com o modelo utilizado.

4.10.2 Identificação do tipo de aluviões e dados de base

Com base nos elementos recolhidos nas visitas de campo estimou-se que o material sólido afluente à ribeira de São João, devida a episódios de instabilização dos depósitos das encostas é essencialmente fino contendo uma percentagem de material grosseiro ($d > 5$ mm) de cerca de 15%[xxvii]. Para efeitos de quantificação da resistência ao escoamento e da caracterização da reologia da mistura quando em escoamento do tipo *debris-flow* (Figura 83), considerou-se que o diâmetro representativo do material granular proveniente dos depósitos das encostas é $d = 0.15$ m, aproximadamente o d_{90} do material dos depósitos de cobertura das encostas.

Para efeitos de cálculo, nomeadamente da resistência ao escoamento, concentrações de equilíbrio e espessura da camada de transporte, para a modelação de escoamentos estratificados (Figura 83), considerou-se que o diâmetro representativo do material granular do leito é $d = 0.25$ m. Este valor, mais elevado que o que caracteriza o *debris-flow*, justifica-se pelo facto de ser mais grosseiro o material em repouso nas linhas de água e que veio a ser mobilizado durante o evento do dia 20 de Fevereiro.

[xxvii] A granulometria dos depósitos foi actualizada, após a realização da simulação. Os resultados constam do Quadro 31. A diferença entre 15% e 12% não é significativa.

Os caudais de água resultantes da precipitação ocorrida no dia 20 de Fevereiro constam do Quadro 22. Na Figura 83 apresentam-se os caudais efectivamente calculados pelo modelo hidrológico ao longo da linha de água e os caudais usados no modelo hidrodinâmico.

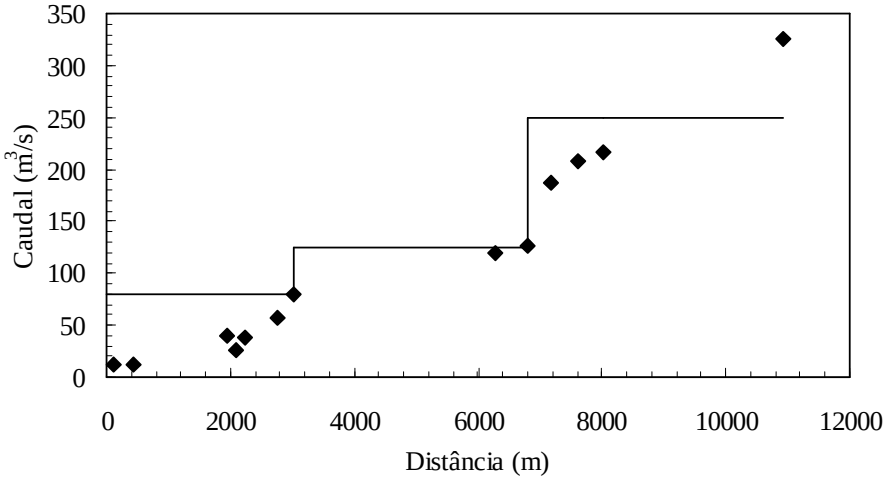

Figura 83 - Caudais estimados pelo modelo hidrológico (pontos) e caudais usados na simulação numérica (linhas).

Com base nas estimativas preliminares quanto à produção de material sólido nas encostas, englobando os volumes produzidos nas classes 1 e 3 (Quadro 30), estimativa de volumes máximos), obteve-se a produção de material sólido resultante de episódios de instabilização das camadas superficiais das encostas. Dos volumes instabilizados, reteve-se apenas a parcela de sedimentos grosseiros (ou não-finos), susceptível se ser transportado por arrastamento num escoamento estratificado. Considerou-se que a percentagem de finos seria cerca de 63% [xxviii]. Os volumes de material grosseiro obtidos mostram-se no Quadro 36.

[xxviii] Os resultados da caracterização granulométrica foram actualizados depois de realizada a simulação. Os valores correctos encontram-se no Quadro 35. A diferença entre os 68% efectivamente registados e os 62% considerados pode considerar-se pouco relevante.

Quadro 36 - Volumes de material sólido resultantes de episódios de instabilização das camadas superficiais das encostas[xxix].

Volume (m^3)	Distância à nascente (m)
24600	2577
22000	6922
3500	8080

Nas zonas mais a montante da ribeira é possível a combinação de caudais de água e produção de sedimentos produza escoamentos de detritos (*debris-flows*) plenamente desenvolvidos, i.e. escoamentos não estratificados sem uma camada superior de fluido (Figura 83). Procedeu-se à simulação de um escoamento de detritos gerado nos 2000 m iniciais da Ribeira de São João. Neste trecho, o caudal de água é inferior a 50 m^3/s (ver Figura 83). De acordo com a produção de sedimentos quantificada na Quadro 36 nos 2500 m iniciais da ribeira, procedeu-se à simulação do escoamento de um volume de 24600 m^3 de material granular com o espaço intersticial saturado de água e sedimentos finos, perfazendo um volume total de 34440 m^3. Admite-se que este material granular provém de episódios de instabilização da encosta na sequência de um episódio de precipitação intensa. A reologia é, de acordo as considerações tecidas na secção 4.6, essencialmente dilatante. Os resultados, em termos de caudais e alturas do escoamento, apresentam-se na Figura 84.

[xxix] Os volumes introduzidos em x = 8080 m foram revistos depois da realização da simulação; o valor revisto é de cerca de 800 m^3. Os valores dos volumes introduzidos em x = 2577 m e em x = 6922 m não sofreram alterações. O valor do erro total é cerca de 5%, que se considera pequeno face à incerteza associada às medições dos volumes instabilizados e à incerteza inerente à simulação matemática.

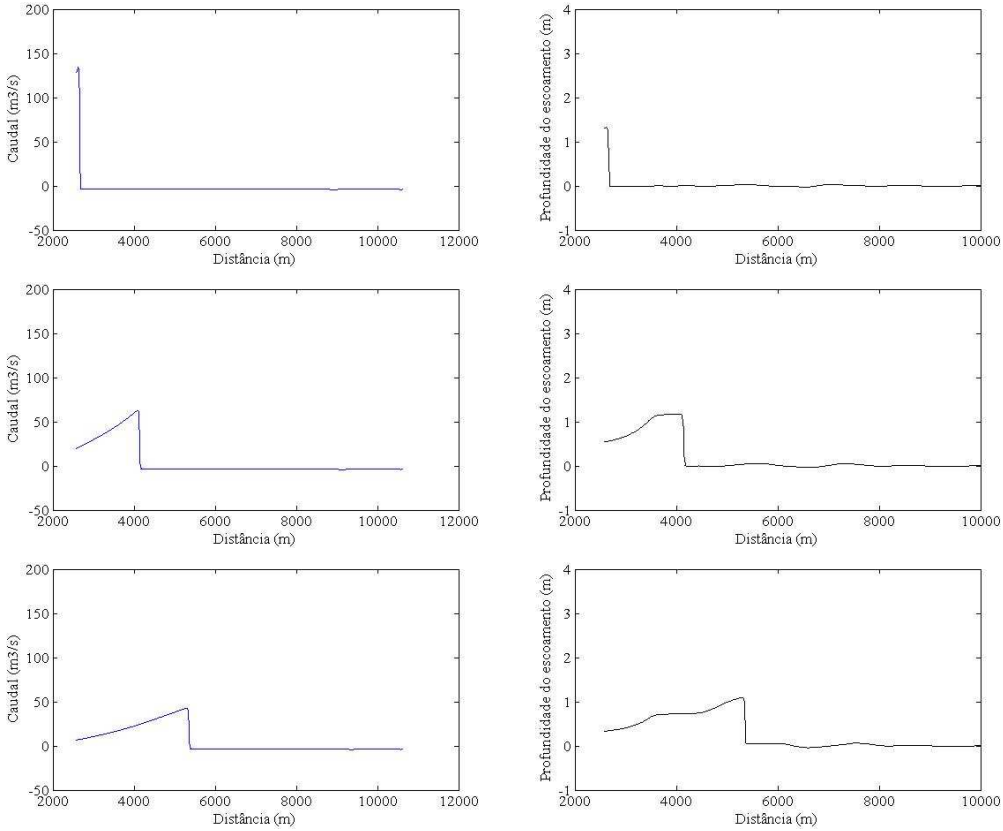

Figura 84 - Resultados da simulação de um escoamento de detritos plenamente desenvolvido ao longo da ribeira de São João. Coluna esquerda: caudais; coluna direita: profundidades. Resultados entre t = 0 min e t = 16,6 min com intervalos de 8,3 min.

Os resultados da simulação mostram uma frente de onda abrupta, típica de escoamentos de detritos plenamente desenvolvidos, que se propaga para jusante com uma velocidade média de 2,6 m/s. O caudal líquido associado à frente de onda deste escoamento, estimado como 40% do caudal total, é menor que o caudal de água (ver Figura 83) a partir de x = 3000 m, aproximadamente. Assim, propõe-se que a jusante de x = 3000 m se considere a aluvião na Ribeira de São João como um aluvião estratificado ("*sheet flow*") em que a fase líquida é um escoamento de lamas turbulento.

O modelo reológico a usar seria essencialmente inercial com reologia essencialmente dilatante na camada de transporte, mas com interacção viscosa entre o material granular e o fluido, e tensões turbulentas dominantes no fluido. O diâmetro representativo do material granular transportado por arrastamento junto ao fundo é 0,25 m. A densidade submersa considerada, atendendo a que o material sólido provém de rochas magmáticas com alguma porosidade, é

1,4, ligeiramente menor que a da areia de quartzo. Apresentam-se, se seguida, os resultados da simulação numérica.

4.10.3 Apresentação e discussão dos resultados da simulação do escoamento estratificado

Procede-se a uma simulação numérica assumindo um regime variável simplificado entre t = 0 e t = 90 min. Ao longo dos 90 min de simulação, entraram no trecho modelado os volumes de material sólido constante no Quadro 36. Adicionalmente, associado a cada descontinuidade nos valores do caudal líquido, fez-se entrar no trecho de cálculo um caudal sólido igual a 20% do valor dessa descontinuidade (ver Figura 83).

O caudal sólido máximo calculado foi aproximadamente 40 m^3/s em x = 9100 m.

O comportamento morfológico do leito da ribeira de São João mostra-se na Figura 85 em termos da variação da cota do fundo em relação ao fundo inicial. Verifica-se que há zonas que, consistentemente, estão sujeitas a deposição generalizada e zonas predominantemente sujeitas a erosão. Nestas últimas destacam-se as zonas das confluências; considerando que estas confluências são idealizadas, não se procurou relacionar o comportamento simulado com o observado no dia 20 de Fevereiro. Em geral, o trecho a montante do Funchal está sujeito a erosão generalizada antes e durante o período em que os caudais são máximos.

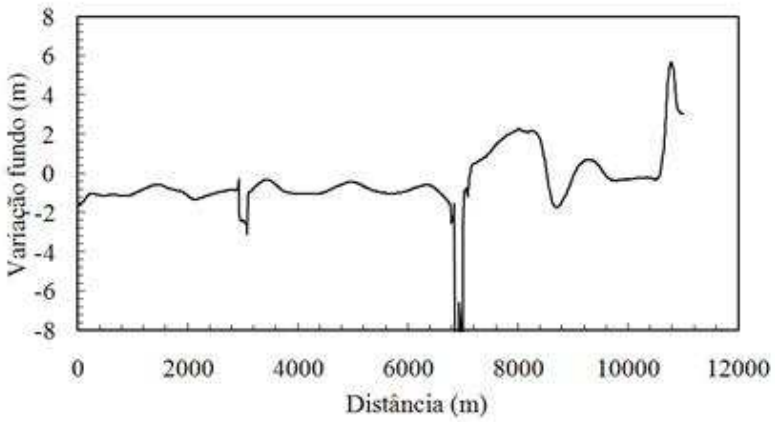

Figura 85 - Variação das cotas do fundo (t = 90 min)

Nos trechos regularizados a jusante de x = 7000 m verifica-se haver zonas de deposição generalizada. Considerando que o escoamento se processa em regime superior de transporte ($F_r > 0{,}8$) durante quase todo o período de simulação (exceptuam-se os instantes finais e iniciais), a deposição ocorre devido à existência de estreitamentos que, em regime rápido,

forçam o aumento local da altura do escoamento, diminuição da velocidade e consequente perda da capacidade de transporte sólido. O material sólido tende a acumular-se localmente e a montante do estreitamento. Na ausência destas singularidades de traçado, a tendência neste trecho seria erosional, justificada pelos declives elevados. Identificam-se dois pontos em que a largura da ribeira se reduz devido à existência de passagens superiores ou imposições urbanísticas. O ponto mais a montante ocorre a, aproximadamente, x = 8500 m e pode estar associado à zona de deposição generalizada simulada entre x = 7000 e x = 8500 m. Deverá averiguar-se se houve transbordamento da ribeira neste trecho (ver Figura 86).

Figura 86 - Exemplos de secções em que ocorre diminuição da largura da ribeira.

A zona em que se registou maior tendência para deposição corresponde ao trecho final da ribeira. Nesta zona, sobrepõe-se os efeitos do gradiente adverso de pressões que ocorre associado ao ressalto hidráulico que medeia o escoamento da ribeira e o nível das águas do mar e a perda de capacidade de transporte devido à redução do declive do fundo. A altura de deposição simulada é de cerca de 6 m, insuficiente para justificar o material sólido que se depositou fora do leito da ribeira. No entanto, deve ter-se em conta que, no trecho final da ribeira o escoamento não se terá processado em superfície livre uma vez que a ribeira estava coberta na sequência de obras na rede viária. Este efeito não foi considerado na simulação

numérica. O trecho em pressão apresentaria menor capacidade de transporte, justificado um aumento da deposição registada neste trecho.

As alturas do escoamento podem ser observadas na Figura 87. Registam-se alturas mais elevadas no final do período em que se escoam os caudais máximos uma vez que a granulometria do fundo e do material transportado é mais grosseira. Os valores simulados da variação da cota do fundo e a da altura do escoamento em t = 60 min indicam que haveria galgamento dos leito em x = 8500 m e a partir de x = 10500 m. Nestes trechos, a ribeira não teria capacidade de vazão para os caudais sólidos e líquidos.

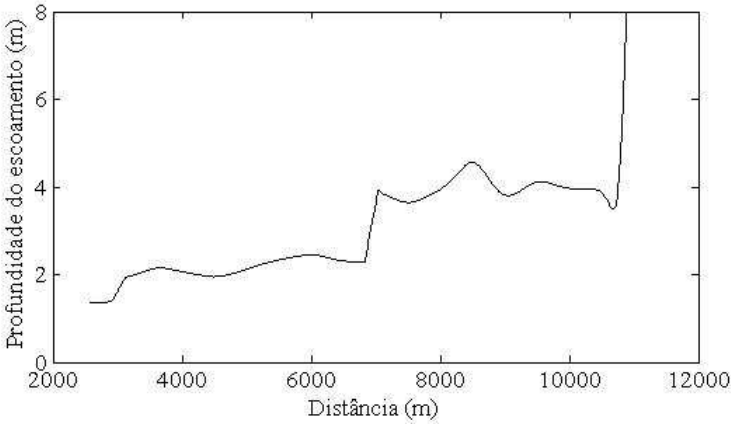

Figura 87 - Alturas do escoamento (t = 60 min).

Em resumo, pode concluir-se que em x = 8500, e x = 10500 o galgamento seria inevitável devido à grande acumulação de sedimentos. No trecho final a influência conjunta do gradiente adverso de pressões, da influência do nível das águas do mar e da entrada do escoamento em pressão promoveram a deposição de grandes quantidades de material sólido em cerca de 60 min. Sem aquele último efeito, os resultados da simulação mostram uma altura de depósitos de cerca de 6 m.

Após de 30 min de simulação, registava-se um balanço negativo de cerca de (-)13000 m^3 ao longo de todo o trecho modelado. Todavia, a jusante de x = 7000 m, o balanço era positivo e igual a cerca de 7500 m^3.

Após de 60 min de simulação, no final do período de caudais máximos, registava-se um balanço negativo de cerca de (-)32000 m^3 ao longo de todo o trecho modelado. A jusante de x = 7000 m, o balanço era positivo e igual a cerca de 26000 m^3.

Após de 90 min de simulação, registava-se um balanço negativo de cerca de (-)20000 m^3 ao longo de todo o trecho modelado. A jusante de x = 7000 m, o balanço era positivo e igual a

cerca de 46500 m^3. Este resultado revela o balanço global do trecho modelado da ribeira de São João é negativo. Terão sido transportados para o mar o somatório dos volumes entrados no trecho (cerca de 50100 + 76500 m^3) e dos volumes erodidos o trecho (20000 m^3). No Funchal, provenientes da ribeira de São João, segunda os resultados da simulação, teriam sido acumulados 46500 m^3 de material sólido, essencialmente no leito confinado da ribeira.

4.11 Sintese dos resultados

O Quadro 37 apresenta uma síntese das estimativas de volumes de material sólido.

Quadro 37 – Sintese das estimativas de volumes de material sólido

Estimativas para o evento de 20/2/2010	**Ribeira de João Gomes**	**Ribeira de Santa Luzia**	**Ribeira de São João**	**Ribeira Brava**	**Ribeira da Tabua**
Área da bacia (km^2)	11,4	15,6	14,7	40,9	8,8
Caudal líquido de ponta na foz (m^3/s)	234	303	305	663	130
Área dos deslizamentos (m^2)	59.310	91.408	210.189	581.635	105.653
Volume proveniente de deslizamentos de vertente (m^3)	De 35.587 a 88.967	De 54.847 a 137.113	De 126.112 a 315.284	De 349.982 a 872.472	De 63.694 a 158.479
Volume proveniente da erosão distribuída (m^3)	110.000			Não avaliado	Não avaliado
Balanço do volume erodido do leito da ribeira (m^3)	Não avaliado	Não avaliado	20.000	Não avaliado	Não avaliado

5 AVALIAÇÃO DO RISCO E MEDIDAS DE PROTECÇÃO

5.1 ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL E PRESSUPOSTOS

A avaliação do risco associado a um determinado perigo ou a um processo que constitua uma potencial ameaça pressupõe a definição do âmbito territorial e a identificação do problema e do sistema-alvo objecto de atenção. No caso em estudo estes pressupostos estão bem definidos:

- Âmbito territorial: as cinco bacias seleccionadas para análise, mas com o objectivo de extrapolação da análise para todo o território da ilha da Madeira;
- Identificação do problema: ocorrência de cheias rápidas (enxurradas), designadas por aluviões e caracterizadas por escoamentos bifásicos ou mistos (líquidos e sólidos), com concentrações muito elevadas de material sólido, incluindo blocos de grandes dimensões, e com grande poder destrutivo;
- Sistema-alvo: a principal preocupação incide na protecção de pessoas (ocupação humana) e de bens incluindo habitações e infra-estruturas e serviços estratégicos bem como os danos indirectos associados ao comércio e indústria da Região.

A identificação do problema, considerado um perigo objectivo, justifica-se não só pela ocorrência do evento 20/2/2010 mas, também, pelos antecedentes históricos registados na ilha da Madeira e pelo conjunto de factores peculiares resultantes das características meteorológicas, geomórficas e topográficas de região. A análise efectuada e as medidas propostas podem ser generalizadas a outras zonas da ilha da Madeira com as devidas adaptações. Fenómenos idênticos ou semelhantes, frequentemente designados por “debris flows”, têm vindo a ser objecto de análises do risco em diferentes partes do mundo (e.g. Fuchs et al., 2008; Campus et al., 2007 e Glade, Anderson e Crozier, 2005).

Como quadro conceptual de avaliação do risco adopta-se o modelo básico (e.g. Varnes et al., 1984) o qual compreende a integração de três grupos de factores, a saber:

- P - Perigosidade do evento ou do processo em consideração, o qual é caracterizado pela probabilidade ou frequência de ocorrência de cenários com determinadas características ou intensidades;

- E - Exposição de bens ou valores ao impacto do processo perigoso em consideração e que se encontram em zonas de propagação desse processo;
- V - Vulnerabilidade dos bens expostos que caracteriza a susceptibilidade dos mesmos ao impacto do processo ou o grau de dano ou de perda resultante.

A gestão do risco público tem por finalidade executar actividades coordenadas de forma a controlar ou diminuir (mitigar) o risco existente e torná-lo admissível ou tolerável. Estas actividades materializam-se em medidas de mitigação que actuam de forma indirecta ou directa nos grupos de factores referidos.

5.2 CARACTERIZAÇÃO E APRECIAÇÃO DO RISCO POTENCIAL

Atendendo à complexidade dos processos que estão na origem do fenómeno em causa e à carência de dados sistemáticos correspondentes aos diferentes componentes associados não é possível uma avaliação fiável do período de retorno ou da probabilidade de ocorrência das aluviões com intensidade semelhante ou superior à do evento de 20/02/2010. As ocorrências registadas no passado (SRA/INAG, 2003), em diferentes zonas da ilha da Madeira, permitem, contudo, considerar como valor aproximado de referência um período de ocorrência aproximado de cerca de 5 a 10 anos, consoante consideração ou não de ocorrências de aluviões em diferentes zonas da ilha e com diferentes intensidades.

A ausência de séries de dados consistentes, correspondentes aos diferentes factores que influenciam o processo de causa-efeito associado às aluviões e às respectivas intensidades, dificulta a determinação rigorosa de probabilidades de ocorrência, nas respectivas dimensões temporal e espacial, de aluviões com elevados graus de perigosidade. Ou seja, a caracterização probabilística da execepcionalidade ou da variabilidade aleatória dos eventos sob uma forma agregada não é ainda possível de um modo satisfatório.

No caso do evento de 20/02/2010, a desagregação do acontecimento nos respectivos componentes principais, em particular a formação de escoamentos a partir da precipitação, só permite obter uma caracterização incompleta do grau de excepcionalidade do acontecimento. Com efeito, não obstante o esforço na recolha de elementos referentes ao ocorrido, não é possível caracterizar probabilisticamente a conjugação dos principais factores que contribuiram para o processo de formação das aluviões que ocorreram em cada uma das bacias: os elementos associados a um evento complexo isolado não permitem a caracterização

estatística do mesmo. A aplicação de metodologias inovadoras para estimação de probabilidades de deslizamentos deve ser estudada (e.g. Chung e Fabbi, 2004).

Salienta-se que, mesmo no caso da precipitação (um componente fundamental do processo) em que existem dados correspondentes a diversos postos de monitorização, não é possível uma caracterização probabilística satisfatória do padrão de intensidade global do evento associado a cada bacia. Com efeito, o enquadramento probabilístico das chuvadas com duração sub-diária, fundamentais para a caracterização das condições de escoamento a considerar no dimensionamento de estruturas hidráulicas, só é possível com as séries do posto do IM Funchal – Observatório. Este facto limita consideravelmente a caracterização da componente probabilística de uma análise do risco e a definição de critérios probabilísticos para o projecto de obras hidráulicas.

A gravidade das consequências da ocorrência de aluviões depende de diversos factores nomeadamente da intensidade do fenómeno, da zona afectada, das características de ocupação nas áreas de propagação das aluviões e ,ainda, de alguns factores adicionais como o período temporal (hora, de dia ou de noite) e o dia de semana da ocorrência.

Enquanto o evento de 22 de Dezembro de 2009 não provocou danos de registo, o evento em análise atingiu zonas críticas de exposição e de vulnerabilidade. Com efeito, a cidade capital da Região foi fortemente atingida bem como zonas populacionais, vias de comunicação e sistemas de abastecimento nos vales das ribeiras da Ribeira Brava e Tabua.

Nas bacias abrangidas, os danos correspondem aos diversos potenciais modos de impacto das aluviões, a saber:

- Impacto directo do fluxo de água e sólidos em construções;
- Instabilidade de vertentes com deslizamentos de massa e o deslocamento de construções, nomeadamente habitações e de levadas;
- Arrastamento de pessoas e viaturas em vias de comunicação interceptadas pelos inesperados escoamentos de água e sólidos;
- Transbordamento de leitos provocando inundações e deposição de elevados volumes de material sólido em zonas marginais;
- Destruição de trechos de sistemas de transporte (e.g. estradas, canais, condutas de água, linhas de energia eléctrica…).

Para além dos danos humanos e sociais e dos danos materiais resultantes do impacto directo dos fluxos de água e sólidos, há ainda a considerar os impactos pessoais e económicos

indirectos. Salienta-se, a título de exemplo, o impacto negativo nas actividades económicas associadas ao comércio e ao turismo resultante das inundações e da deposição intensa de material sólido numa vasta área do centro da cidade do Funchal. Há ainda a considerar os efeitos subjectivos ou psicológicos, nos operadores e agentes turísticos e em potenciais visitantes, das imagens e das notícias, transmitidas à escala global, relativas a este tipo de acontecimento.

No caso do evento de 20 de Fevereiro de 2010, há a registar cerca de meia centena de vítimas mortais [xxx], algumas centenas de deslocados e um valor estimado em 1080 milhões de euros para recuperação dos danos materiais directos (ii)[xxxi].

Salienta-se a variabilidade potencial das consequências associadas a este tipo de fenómeno. No caso da ocorrência em análise, alguns factores específicos (dia da semana e hora, aviso e organização da protecção civil) propiciaram, possivelmente, uma atenuação nos valores das perdas ocorridas. Em outras circunstâncias, presume-se que eventos nas mesmas zonas e com intensidade semelhante ao acontecimento que ocorreu possam provocar danos ou perdas mais elevadas.

Atendendo às características topográficas muito adversas da ilha da Madeira, é frequente a ocupação de zonas potencialmente perigosas, por habitações ou por instalações para actividades económicas. Nesta conformidade, a exposição acrescida ao impacto directo de aluviões e fenómenos associados, como os deslizamentos de vertentes, conduz a um acréscimo significativo do risco associado a este tipo de fenómeno natural.

Atendendo a estes factores, associados à gravidade das consequências potenciais, à propensão para o desencadeamento do fenómeno, confirmada pela frequência de ocorrência no passado, pode concluir-se que o risco de aluviões na ilha da Madeira é significativo e justifica a considerações de medidas mitigadoras no contexto de um quadro de planeamento e de gestão do risco eficiente.

5.3 MEDIDAS MITIGADORAS DO RISCO

Conforme foi referido anteriormente, a constatação da frequência e intensidade deste tipo de fenómeno, nomeadamente à luz do evento 20/02/2010, justifica que se implementem, medidas articuladas tendentes a diminuir o risco público associado à ocorrência de aluviões.

[xxx] Informação do Serviço Regional da Protecção Civil da Madeira, em Julho 2010.
[xxxi] Relatório da Comissão Paritária Mista (2010).

Atendendo ao sistema-alvo referido em 5.1 e, em particular, à necessidade de protecção da zona da cidade do Funchal, as medidas prioritárias subordinam-se a um princípio estratégico fundamental: diminuir a perigosidade das aluviões e diminuir a exposição e a vulnerabilidade de pessoas e bens potencialmente sujeitos ao impacto de fluxos de água e sólidos.

Atendendo à natureza complexa da génese e desenvolvimento do fenómeno, é difícil seleccionar medidas eficazes (a curto prazo) de prevenção dos fenómenos ou seja, acções que conduzam rapidamente à redução significativa da frequência de ocorrência de aluviões intensas. Estas medidas deveriam actuar nos factores físicos que desencadeam a instabilização de material sólido das bacias e a formação de escoamentos com elevados caudais líquidos e sólidos (e.g. estabilização de vertentes com um coberto vegetal adequada). Este tipo de medidas tenderá a ter efeitos a médio e longo prazos.

Assim, tendo em conta o objectivo e o princípio estratégico enunciados, a maioria das medidas de mitigação do risco a desenvolver estarão directamente associadas à protecção de pessoas e bens em zonas críticas de ocupação especialmente vulneráveis. Deste ponto de vista, as medidas a desenvolver podem ser consideradas, na generalidade, como medidas de protecção contra as potenciais aluviões.

As medidas de protecção podem ser do tipo estrutural quando são constituídas por intervenções que incluam a implementação de sistemas de protecção especiais (naturais ou artificiais) com incidência nos processos de iniciação, transporte ou deposição do material sólido mais perigoso. Estas soluções atenuam a perigosidade dos escoamentos mistos nas zonas sensíveis que urge proteger diminuindo o valor expectável dos danos ou das consequências.

Outras medidas de protecção são do tipo não-estrutural, ou passivas, atendendo a que não interferem directamente com o processo físico das aluviões mas alteram a distribuição espacial dos bens, eliminando ou condicionando a exposição excessiva ou perigo, ou diminuiem a vulnerabilidade dos cidadãos e das instituições, através de um sistema de aviso adequado e da informação e do conhecimento do risco e, eventualmente, da transferência deste através de seguros apropriados.

Atendendo que não é possível eliminar completamente o risco, é de todo aconselhável promover um conjunto de medidas de protecção subordinadas a princípios integradores e orientadores, tendo em conta as características intrínsecas do processo físico das aluviões, os condicionamentos físicos e sociais da ilha da Madeira e a organização de acções adequadas de

gestão integrada do risco em cada bacia ou região hidrográfica. Deste modo, pretende-se não só atenuar o risco através da diminuição da perigosidade local do evento, nas áreas sensíveis, como, também promover a prática da decisão informada pelo risco, nas situações em que a segurança das pessoas e a economia da Região estejam em causa, em resultado da possibilidade de ocorrência de aluviões.

Conforme já foi salientado, o território da ilha da Madeira condiciona fortemente a gestão dos riscos naturais, em particular no que respeita a disponibilidade de áreas de ocupação. Nesta conformidade é previsível que a sociedade conviva mais naturalmente com a exposição a diversos riscos associados a factores de ordem geomorfológica, geológica e climática. Este facto afecta a percepção pública do risco e a mobilização continuada para a protecção e tem efeitos no planeamento e nas decisões associadas à ocupação do solo, em zonas sensíveis ou potencialmente perigosas, são, assim, condicionadas pela pressão do desenvolvimento social e pelo risco de aluviões.

Este tipo de decisões, envolvendo um eventual incremento de exposição e de vulnerabilidade de pessoas e bens e exigindo a implementação de medidas de protecção ou de atenuação compensatórias, estará condicionado a análises de custo/benefício. A eficácia destas análises pressupõe a aceitação de critérios de tolerabilidade ou de admissibilidade respeitantes a riscos públicos e, sempre que possível, à participação pública ou das partes interessadas.

No caso de decisões relacionadas com o dimensionamento de estruturas físicas de protecção, envolvendo as engenharia hidráulica e estrutural, há que definir critérios de dimensionamento apropriados tendo em conta os conhecimentos disponíveis, nomeadamente os adquiridos com o evento de Fevereiro em análise, e a referida relação custos/benefícios, sendo os benefícios os correspondentes à atenuação estimada do risco.

Em Portugal, não está estruturado o conceito de risco socialmente aceitável, ou tolerável, como instrumento de apoio à decisão. Este conceito pretende introduzir um critério de apreciação que tenha em conta a probabilidade e os danos numa decisão associada a um risco público. Alguns critérios de apreciação internacionais contemplam, ainda, um conceito complementar: o princípio ALARP ("As Low as Reasonable Possible"), o qual corresponde à faixa de situações de risco cuja avaliação coloca entre o socialmente aceitável e não aceitável. A aceitação destas situações só se justifica quando é possível demonstrar que é socialmente desproporcionado o esforço de redução do risco face ao resultado final. No caso do território da ilha da Madeira, estes conceitos deveriam ser progressivamente discutidos e adaptados às

condições locais e implementados em paralelo com a formação e a informação esclarecida sobre os riscos em causa.

O desenvolvimento de instrumentos de apoio à decisão e à informação pública sobre o risco de cheias e inundações é muito importante. A transposição da Directiva nº2007/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2007, para a ordem jurídica interna de Portugal, permitirá o reforço do quadro legal no que respeita os instrumentos referentes à avaliação, gestão e mitigação de riscos. A adequada adaptação da legislação nacional à Região Autónoma da Madeira reveste-se de maior relevância atendendo às características particulares das cheias e das bacias hidrográficas da ilha da Madeira.

Para enquadrar o planeamento de acções, sustentar convenientemente as decisões e contribuir para uma informação adequada ao público, recomenda-se o aprofundamento da avaliação e análise do risco em diferentes bacias hidrográficas da ilha da Madeira por forma a permitir um melhor conhecimento da distribuição espacial da exposição e das vulnerabilidades associadas ao risco de aluviões.

6 PRINCIPIOS ORIENTADORES DE PROTECÇÃO CONTRA ALUVIÕES

Em resultado dos trabalhos efectuados, no âmbito do presente estudo, e da análise das condições específicas que envolvem o risco de ocorrência de aluviões na ilha da Madeira, foi elaborado um conjunto de princípios orientadores como contribuição para o enquadramento dos projectos de implementação de medidas de protecção. Estes princípios são agrupados e caracterizados em seis tipos de acção:

I. Retenção do material sólido
II. Controlo do transporte de material sólido (detritos)
III. Atenuação da vulnerabilidade das áreas expostas
IV. Controlo da exposição ao risco
V. Previsão e aviso – Sistema estruturado de previsão
VI. Formação e informação ao público.

Atendendo à severidade potencial do fenómeno, torna-se imperioso proceder à selecção e implementação de medidas de protecção que tenham em consideração estes princípios de uma forma planeada e sustentável. A monitorização do respectivo desempenho permitirá ajustamentos e eventuais melhorias.

I - Retenção de material sólido

1 - Considerações gerais

Atendendo à natureza geológica e geomorfológica específica do território da ilha da Madeira, uma parte significativa da área das bacias hidrográficas das ribeiras é potenciadora de uma elevada produção de fluxos de materiais sólidos, os quais constituem o componente mais perigoso das aluviões que podem ocorrer na ilha. Esta produção é desencadeada pela acção da precipitação e da consequente ocorrência de escoamentos líquidos que mobilizam grandes quantidades de material sólido. A produção dos fluxos de material sólido resulta de diferentes processos, a saber: erosão distribuída nas encostas, movimentos de massa, erosões localizadas ou ravinamentos e erosões nos fundos e margens dos leitos das ribeiras.

Neste quadro, diminuir o volume total de material sólido deslocado nas referidas condições constitui um princípio prioritário de gestão do risco e de protecção contra os efeitos das aluviões. Para a prossecução deste objectivo devem ser promovidas intervenções nas áreas

das cabeceiras, nas encostas e nos leitos de ribeiras, envolvendo os seguintes exemplos de tipos de medidas:

- Promoção de um coberto vegetal adequado, em áreas que se revelem carenciadas, para potenciar uma melhor estabilização de taludes face a situações de elevada intensidade de precipitação e saturação no solo;
- Utilização de técnicas de bio-engenharia através da introdução de espécies vegetais seleccionadas, ao longo de pequenas linhas de água ou de ravinas, que sejam resilientes a escoamentos intensos e susceptíveis de atenuar a capacidade erosiva dos mesmos;
- Implementação de sistemas de drenagem eficazes, em zonas críticas de encostas, de forma a evitar concentrações locais de escoamentos superficiais, propiciadoras de ravinamentos ou de movimentos de massa;
- Modelação do terreno para estabilização preventiva de encostas ou manutenção activa de zonas com terraços já existentes, no caso de ser possível e justificável;
- Consolidação de trechos dos leitos das ribeiras com maior declive (zonas de montante) e maior susceptibilidade de produção significativa de fluxos de material sólido através da estabilização do leito por estruturas transversais (diques ou degraus) e da protecção localizada de depósitos marginais por estruturas longitudinais.
- Controlo e análise cuidada da colocação de aterros atendendo que estes podem constituir, com relativa facilidade, fontes de material sólido mobilizáveis. De acordo com o local, os aterros devem ser adequadamente protegidos de modo a evitar essa possibilidade.

2 - Coberto vegetal e estabilização de encostas

No que se refere às medidas específicas envolvendo o coberto vegetal, em áreas que se justifique, salientam-se os seguintes aspectos gerais a ter em conta relacionados com a estabilização de encostas:

- Retirada de pressões actuantes sobre a vegetação, nomeadamente o controlo de espécies exóticas (com um comportamento invasor) e do pastoreio;
- Reflorestação com utilização espécies resistentes a fenómenos de precipitação e escoamento superficial intenso e com capacidade para proteger o solo, nomeadamente

recursos nativos e/ou endémicos que respeitem os padrões de diversidade local (e.g. por cada vale) ou o modelo preditivo de gestação potencial da ilha da Madeira, proposto por Capelo et al. (2004)[xxxii].

No controlo de espécies exóticas com comportamento invasor, salientam-se os seguintes exemplos:

- *Acacia mearnsii* De Wild. (Acácia, Mimosa) – Esta espécie invasora apresenta-se como facilitadora de processos de solifluxão devido a pouca resistência do sistema radicular. Está ainda comprovado o aumento concomitante do risco de incêndio o consequente aumento da hidrofobicidade do solo.
- *Cytisus scoparius* (Giesta das Vassouras) – A expansão recente da espécie pode estar relacionada com a história recente de incêndios, alteração do regime de pastoreio; abandono agrícola e os resultados do trabalho de campo realizado sugerem uma forte correlação entre a presença destas comunidades monoespecíficas e a ocorrência de movimentos de massa no evento de 20/2/2010.

No controlo de espécies exóticas sem comportamento invasor, embora alguns autores associem os povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. e *Pinus pinaster* Aiton a um incremento da hidrofobicidade do solo e consequente aumento da escorrência superficial e erosão, os resultados preliminares não permitem realizar o estudo de correlação entre estes povoamentos florestais e a ocorrência de movimentos de massa.

As actividades de controlo de invasoras e retirada de exóticas devem ser monitorizadas e acompanhadas por programas de intervenção específicos.

A retirada do gado caprino e ovino que constitui um factor muito positivo no âmbito da problemática em causa, deve ser seguida pela retirada do gado bovino das zonas afectas ao pastoreio livre, instaladas nos sectores de maior altitude nas cabeceiras de algumas bacias hidrográficas. Com efeito, verifica-se que as zonas de cabeceira onde ainda subsiste o pastoreio por gado bovino apresentam-se totalmente desprovidas de vegetação arbustiva e arbórea.

No caso da reflorestação, seguindo o modelo de coberto vegetal, sugerem-se os seguintes procedimentos:

- Nas zonas de cabeceiras utilizar como espécies os fanerófitos dominantes da primeira etapa de substituição de cada série de vegetação. São áreas prioritárias desta intervenção as margens de topos aplanados e sectores vizinhos a rupturas de declive.
- Nas linhas de água secundárias recuperar as galerias riparias através da utilização da espécie dominante *Salix canariensis*, por meio de propagação vegetativa e massiva. Esta espécie funciona como barreira natural nos cursos de água, permitindo a retenção de material sólido, tal como comprovado em linhas de água afectadas nas áreas em estudo. São áreas prioritárias os sectores intermédio e terminal das linhas de água principais como complemento de possíveis barreiras artificiais.

3 - Acções de reflorestação

A ilha da Madeira foi objecto de significativas acções de reflorestação e de protecção ambiental. Não obstante as opiniões que, de uma forma persistente, conceituados autores manifestaram nas últimas décadas, a influência do tipo de coberto vegetal nas condições de estabilidade de encostas vulneráveis a movimentos de massa sob a acção de precipitações intensas é, ainda, matéria controversa a nível internacional, em particular no que concerne ao arvoredo de grande porte. Salienta-se, em particular, que este tipo de vegetação possui uma elevada capacidade destrutiva e de obstrução quando transportado por uma cheia. As conclusões definitivas correspondentes a cada região só poderão ser obtidas a longo prazo, após uma monitorização sistemática do comportamento diferenciado dos distintos tipos de vegetação em diferentes condições de terreno, solo e clima. O estudo de protecção contra as aluviões poderá, no entanto, proporcionar a oportunidade para reavaliar a opção por certas espécies vegetais em determinadas condições de terreno.

Os recentes incêndios que ocorreram no verão de 2010 atingiram áreas significativas das bacias do Funchal. A respectiva reflorestação deverá ter em conta o risco das aluviões proporcionando uma prevenção mais eficaz no futuro.

II - Controlo do transporte de material sólido

1 - Considerações gerais

O fluxo de material sólido (caudal sólido), de diferentes dimensões, associado ao caudal líquido, é uma característica marcante do fenómeno designado por aluvião. Esta perigosa

característica constitui um factor crítico na gestão do risco de aluviões e na protecção contra os respectivos efeitos.

Neste quadro, a criação e a eventual manutenção de condições de escoamento que promovam a deposição do material sólido em locais adequados, a montante de zonas sensíveis ou críticas, deve ser um objectivo fundamental das intervenções a realizar. O cumprimento deste objectivo exige uma análise de conjunto do funcionamento de toda a rede hidrográfica e a manutenção de secções transversais e de declives que propiciem condições de escoamento e de transporte sólido adequados aos objectivos estabelecidos para cada trecho da ribeira. A possibilidade de definição de zonas de deposição natural e de zonas complementares de transporte do material sólido deve ser equacionada.

A interceptação e a retenção do maior volume possível de material sólido em movimento, a montante das zonas críticas de ocupação, permitem a mitigação do risco associado a aluviões e a atenuação da gravidade do impacto dos escoamentos nas zonas expostas a este perigo, nomeadamente zonas urbanas.

2 - Estruturas de retenção

A implementação de sistemas ou estruturas transversais de intercepção e retenção (temporária) de material sólido com maiores dimensões deve assim ser considerada como uma medida prioritária para a protecção, a curto prazo de zonas críticas expostas ao perigo. Para esta medida ser eficaz, a concepção e dimensionamento das estruturas deve assegurar a passagem do escoamento líquido e de sólidos com menor dimensão, enquanto os blocos com maior potencialidade destrutiva ficam retidos. Para manter a eficácia de protecção deste tipo de estruturas torna-se necessário garantir que o material retido é removido para que a capacidade de retenção se mantenha disponível, o que exige a existência de condições de acesso aos locais de implantação destas infra-estruturas e de sustentabilidade económica da exploração respectiva.

Tendo em conta as características do escoamento, líquido e sólido, e a localização da estrutura de retenção, devem ser considerados dois tipos de estruturas:

- Estruturas “leves”, eventualmente do tipo “rede”, em linhas de água secundárias ou ravinas com uma pequena bacia hidrográfica e com um pequeno volume potencial de material a reter.

- Estruturas concentradas ou “paredes”, de maior porte, a localizar em secções estratégicas das ribeiras, com características topográficas adequadas que propiciem a desaceleração e paragem de parte do escoamento sólido, e a retenção de um volume relativamente apreciável de material sólido com dimensões maiores, por forma a constituírem barreiras eficazes na atenuação, para jusante, da perigosidade (poder destrutivo) dos escoamentos de grande intensidade.

As estruturas concentradas devem ser barreiras eficazes na protecção contra eventos excepcionais e, simultaneamente, garantir a passagem de escoamentos líquidos e do material sólido em períodos normais, de forma a minimizar os impactes ambientais a jusante.

O número e as dimensões destes dois tipos de estruturas dependem das características da ribeira e da respectiva análise custo-eficácia, em função do volume e da dimensão mínima dos sólidos que devam ser retidos. A necessidade de acesso para permitir a limpeza do material retido é um dos principais condicionalismos na configuração e dimensionamento de um programa de implementação de estruturas de retenção de sedimentos.

A solução técnica a adoptar deve garantir um elevado nível de segurança estrutural e hidráulica e ter em conta o comportamento erosivo e a capacidade de transporte do escoamento para jusante de cada estrutura bem como o eventual impacto na flora e na fauna. Atendendo aos diferentes condicionamentos estruturais, hidráulicos, operacionais e ambientais a que devem obedecer, estas estruturas de retenção constituem obras hidráulicas relativamente complexas. O processo de selecção das soluções definitivas terá de incluir uma avaliação de custos/benefícios (redução do risco).

III - Atenuação da vulnerabilidade das áreas expostas

1 - Considerações gerais

Algumas áreas sensíveis estão localizadas em trechos de ribeira, directamente expostos ao perigo das aluviões. É o caso frequente das zonas terminais onde se localizam populações em zonas urbanas concentradas e consolidadas, actividades industriais e comerciais e infra-estruturas estratégicas (e.g. a área da cidade do Funchal localizada nas margens dos trechos terminais das ribeiras de S. João, Santa Luzia e de João Gomes). A mitigação dos potenciais danos ou das consequências em bens localizados nessas zonas (atenuação das respectivas vulnerabilidades), relativamente à ocorrência de aluviões, exige a implementação de um conjunto integrado de medidas associadas à gestão do risco, sem esquecer a possibilidade de

atenuação das perdas económicas por transferência do risco através de seguros adequados em que se justifique ou seja possível.

2 – Protecção de Zonas Urbanas

As medidas de protecção directa das pessoas e bens nestas zonas urbanas consolidadas baseam-se em estruturas longitudinais (muros), dimensionadas de forma a conterem escoamentos excepcionais de referência (a definir) e de acordo com a aplicação de um critério de dimensionamento e de tolerabilidade socialmente aceitável. As características dos leitos canalizados devem obedecer a determinados requisitos hidráulicos, nomeadamente os seguintes:

- Controlar a tendência de paragem progressiva de material sólido por redução do declive do fundo ou por gradual diminuição da velocidade do escoamento líquido, nomeadamente na zona imediatamente a montante da foz. A deposição de material diminui drasticamente a secção líquida disponível e propicia o galgamento dos muros e a inundação descontrolada das margens.
- Evitar obstruções estruturais ou "singularidades", incluindo a cobertura por lajes, que, localmente, possam vir a constituir entraves significativos aos escoamentos líquidos e sólidos. Os possíveis efeitos de mudança de direcção (curvas) ou de largura devem ser devidamente considerados na fixação da cota dos muros laterais e de zonas marginais de segurança.

Deve-se ainda proceder à reavaliação das condições de vazão de secções críticas de trechos de ribeiras já canalizados, tendo em conta os conhecimentos adquiridos com o evento de 20/2/2010 (condições de referência), o que pode exigir medidas excepcionais de intervenção nas zonas marginais que se revelem necessárias, nomeadamente i) a remoção de obstruções aos fluxos líquidos e sólidos ii) a avaliação das condições de estabilidade e de segurança dos muros e respectivas fundações nos trechos canalizados mais antigos como é o caso na zona central da cidade do Funchal e iii) e avaliação das condições de drenagem pluvial das zonas urbanas, nomeadamente no centro da cidade do Funchal, tendo em conta as chuvadas intensas e o material sólido arrastado.

A canalização de trechos de ribeira deve ser precedida por uma análise dos impactos a jusante dessa intervenção. De um modo geral, deve ser aplicada com cautela, na medida que pode conduzir a uma percepção de segurança ilusória, salvo se essa intervenção obedecer a critérios de "zonamento" e de ocupação da zona "protegida" adequados.

3 - Protecção de habitações e instalações dispersas

A protecção e o controlo da vulnerabilidade de bens isolados (habitações ou instalações relativamente dispersas) devem seguir critérios explícitos e consistentes, a saber:

- Remoção de habitações isoladas que tenham sofrido danos graves no evento de referência de 20/2/2010 ou que estejam em zona de inundação e de impacto previsível com elevado risco, nomeadamente no leito da ribeira.
- Desvio do escoamento ou melhoria local das respectivas condições junto de infra-estruturas em risco, de modo a assegurar a passagem do escoamento sem extravasamento nem a deposição de material.
- Protecção de conjuntos de habitações constituindo núcleos significativos e de instalações estratégicas comerciais, em áreas de risco, por muros de protecção adequadamente dimensionados, caso se justifique a permanência dessa exposição.
- Colocação de estruturas de retenção "leves" ou de desvio de sólidos para a protecção contra o impacto directo em habitações ou em instalações estratégicas, insusceptíveis de serem removidas, caso se justifique.

4 - Instabilizações geotécnicas

Existem também muitas situações em que habitações isoladas ou conjuntos de habitações estão construídos em encostas com um elevado perigo de movimentos de massa que podem ser desencadeados por eventos de precipitação e escoamento superficial. Não obstante estas situações poderem estar associadas a fenómenos hidrológicos, o respectivo risco é, predominantemente, geotécnico pois pode não resultar de um impacto directo de escoamentos em ravinas ou em ribeiras. Nestes casos, as medidas de defesa ou protecção prioritárias[xxxiii] podem ser do seguinte tipo:

- Consolidação ou estabilização de taludes e implementação de sistemas de drenagem eficazes, nos casos em que se justifique.
- Selecção de um coberto vegetal estabilizador mais propício, caso se justifique.
- Remoção de habitações que se encontrem em condições de risco intoleráveis, nomeadamente após o evento de 20/2/2010.

[xxxiii] A Câmara Municipal do Funchal desencadeou estudos de avaliação do risco de estabilidade de encostas com habitações e a elaboração de uma carta de riscos (e.g. Cenorgeo, 2010).

- Controlo de novas construções, em sede dos planos de desenvolvimento municipais ou de ordenamento do território, tendo em conta os riscos geotécnicos de movimentos de massa.

5 - Vias de comunicação

As vias de comunicação rodoviárias são infra-estruturas particularmente vulneráveis aos efeitos dos escoamentos bifásicos de água e sólidos, nomeadamente quando submetidas ao respectivo impacto nas obras de arte mais antigas (pontes) ou quando os respectivos traçados interceptam sucessivas linhas de água secundárias ou ravinas e se desenvolvam ao longo de encostas ou taludes com elevada susceptibilidade de movimentos de massa. Nestas condições, os utentes destas infra-estruturas ficam particularmente vulneráveis sendo o risco de perda de vidas muito elevado.

A mitigação das vulnerabilidades nas vias rodoviárias localizadas em zonas sensíveis ou de perigo agravado de aluviões deve compreender medidas específicas, nomeadamente as dos seguintes tipos:

- Nos atravessamentos ou na ocupação de zonas marginais críticas de ribeiras, a cota da rasante da via rodoviária deve ser fixada tendo em conta as cotas máximas previsíveis dos escoamentos de referência.
- As vias rodoviárias construídas em aterro ao longo de zonas marginais críticas deverão ter os taludes protegidos tendo em conta a capacidade erosiva do escoamento para a situação de referência.
- As secções hidráulicas de passagem sob as vias devem ter uma capacidade de vazão adequada, consistente com o critério de excepcionalidade adoptado e com as características específicas dos escoamentos mistos, líquidos e sólidos, e prever disposições que tendam a evitar a acumulação de material sólido e a total obstrução das referidas passagens.
- Em trechos com maior risco de deslizamento nos taludes marginais devem ser previstas barreiras de retenção ou de desvio, localizadas ou contínuas.
- Em trechos localizados em zonas críticas do leito das ribeiras poder-se-á justificar a consideração da adopção de uma solução estrutural em pilares, em substituição de aterros, por forma a evitar o risco de erosão, a atenuar a perturbação no escoamento e a eliminar obstruções nas passagens hidráulicas. Se os pilares forem fundados em aluvião ou coluvião, deverão ser estudadas medidas de protecção contra erosões localizadas.

Tendo por base uma análise do risco e das vulnerabilidades dos utentes deve ser ponderada a implementação de um sistema automático de aviso e interrupção da circulação nas extremidades de trechos de vias rodoviárias sensíveis durante períodos de crise.

6 - Critérios de dimensionamento hidráulico

Um adequado dimensionamento hidráulico das obras de engenharia em zonas de risco pressupõe a aplicação de critérios de cálculo ajustados ao tipo de escoamento associado a aluviões (escoamentos mistos ou bifásicos) e ao nível de excepcionalidade adoptado para o dimensionamento. O primeiro aspecto é muito relevante atendendo a que o escoamento gerado pela associação do caudal líquido com um caudal sólido que corresponde a uma elevada concentração em volume, que pode ultrapassar os 50%, e com uma larga gama de dimensões de sedimentos, incluindo grandes blocos, tem um comportamento hidráulico muito diferente do correspondente aos escoamentos totalmente líquidos, exigindo por isso secções de vazão maiores e outras condicionantes específicas.

O segundo aspecto está relacionado com o critério de risco probabilístico a adoptar e está associado ao facto da intensidade das aluviões depender de diversos factores, nomeadamente das características de precipitação e do estado dos solos em períodos antecedentes. Nesta conformidade, recomenda-se que o dimensionamento hidráulico se baseie nos seguintes pressupostos, até que novos conhecimentos sobre este fenómeno estejam operacionais:

- Condições de referência do evento de 20/2/2010:
    - Precipitações, caudais e volumes conhecidos ou estimados associadas ao evento de 20/2/2010 (condições de referência 20/2/2010);
    - Extrapolação ou adaptação racional das condições de 20/2/2010 para condições mais exigentes ou para aplicação em diferentes zonas da ilha da Madeira.
- Critério probabilístico:
    - A análise estatística das precipitações em postos com registos longos é a forma possível de aplicar uma base probabilística ao processo de formação de aluviões. Admitindo uma forte correlação entre a precipitação e os restantes componentes do processo, e tendo em conta a análise do grau de excepcionalidade do evento de 20/2/2010, considera-se que o período de retorno de referência para caracterizar cenários de dimensionamento hidráulico com a intensidade desse evento não deve ser inferior a 100 anos para o caso de protecção de pessoas e de bens estratégicos.

- O grau de gravidade das potenciais consequências, resultantes da excedência das condições de projecto, poderá motivar um aumento ou uma diminuição do período de retorno o que deverá ser devidamente justificado.
- No sentido de ser possível melhorar a caracterização probabílistica das precipitações e dos escoamentos líquidos, considera-se ser muito importante promover estudos específicos, com base na informação existente e na monitoriazação futura, que permitam desenvolver metodologias neste domínio para apoio aos projectistas e melhoria da segurança pública.

IV - Controlo da exposição ao risco

1 - Considerações gerais

A exposição constitui uma dos factores críticos na avaliação do risco e o respectivo controlo pode ser uma das formas de intervenção ou de mitigação mais relevantes. Com efeito, a diminuição da exposição de bens ao impacto directo de escoamentos e (ou) de movimentos de massa, através de medidas passivas de prevenção, reduz os danos potenciais associadas a hipotéticos eventos futuros.

O controlo da exposição aos riscos implica a possibilidade de locais alternativos para a ocupação humana e para a localização de actividades económicas, sociais ou culturais. Em regiões muito montanhosas e de relevo muito agreste, como é o caso da ilha da Madeira, os condicionamentos a uma ocupação racional do território, tendo em conta todos os riscos existentes, são muito significativos: por um lado as encostas de elevado declive apresentam riscos geotécnicos de movimentos e de queda de blocos; por outro a ocupação de vales muito estreitos, sem planícies de cheia, acarreta um risco significativo de inundações e de escoamentos intensos. A ocupação de cones de dejecção, em particular na parte terminal das ribeiras, é uma resposta histórica a este dilema.

O apoio aos processos de decisão que envolvem este tipo de risco pressupões o aprofundamento da avaliação e análise do risco nas diferentes bacias por forma a ser possível conhecer a distribuição espacial das vulnerabilidades associadas ao risco de aluviões.

No entanto, não deve deixar de ser considerada pelos organismos competentes, a análise da viabilidade de implementação de medidas de protecção dos seguintes tipos:

- Elaboração e aplicação de cartas de zonamentos da vulnerabilidade e do risco, em particular nas áreas em desenvolvimento ou de expansão urbanística, de forma a indicar

o grau de exposição às diferentes fontes de perigo (e.g. instabilidade de vertentes ou inundação) e orientar o tipo de ocupação do território de acordo com critérios adequados. Estas cartas devem preconizar a interdição total de construção de habitações em determinadas zonas críticas.

- Definição de critérios de ocupação de zonas perigosas tendo em conta o conceito de risco tolerável máximo o que pressupõe, nos casos em que uma maior redução do risco não seja socialmente justificável ou suportável, a aceitação condicionada de determinados tipos de ocupação desde que não se agrave o risco para jusante;
- Deslocação de infra-estruturas e bens sensíveis que violem os critérios acima referidos e que não possam ser protegidas a um custo razoável.

A implementação contínua e disciplinada deste tipo de medidas assegurará a não ocupação permanente ou a ocupação condicionada de áreas com elevado perigo, garantindo, dessa forma, uma redução de danos ou perdas potenciais.

Uma outra forma complementar de minimização da exposição, na previsão da ocorrência de um evento (aluvião ou cheia), é a implementação de sistemas completmentares de previsão e aviso que possibilitem a evacuação em tempo útil de zonas críticas expostas ao perigo. Estes sistemas poderão, no caso de serem eficazes, diminuir a vulnerabilidade dos cidadãos expostos ao perigo.

2 - Instrumentos de planeamento

A Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, recentemente transposta para a legislação portuguesa, impõe a elaboração de alguns instrumentos de planeamento, em particular de algumas medidas passivas conducentes a um controlo mais eficaz de exposição ao risco de inundações:

- Avaliação preliminar dos riscos de inundações para cada região hidrográfica (até 22/12/2011) e identificação das zonas em que existem riscos potenciais significativos de inundação;
- Elaboração de cartas de zonas inundáveis e de cartas de risco de inundações, de acordo com diferentes cenários de probabilidade e intensidade de cheias caracterizando a ocupação, a exposição e os potenciais danos (até 22/12/2013);
- Elaboração de planos de gestão dos riscos de inundações, para as zonas identificadas, com medidas para a redução das potenciais consequências, incluindo sistemas de

previsão e de alerta precoce, tendo em conta as características de cada bacia hidrográfica (até 22/12/2015).

As medidas não estruturais de mitigação do risco ou de defesa contra os aluviões inserem-se facilmente na filosofia da Directiva podendo esta ser um suporte adequado para a implementação gradual das medidas em zonas identificadas como críticas na ilha da Madeira. Impõe-se, contudo, um criterioso trabalho de adaptação dos procedimentos normativos às características das bacias hidrográficas da ilha da Madeira e ao tipo de cheias (aluviões) e de cursos de água no território.

V - Previsão e aviso – Sistema estruturado de previsão

Conforme já foi referido, o sistema de previsão e aviso ou alerta precoce é um importante instrumento da gestão do risco. Este sistema permite a mobilização antecipada das autoridades competentes e agentes da protecção civil e a preparação de avisos à população no caso de se justificar. No caso de ocorrência de um evento excepcional, o aviso antecipado às populações potencialmente em risco permite que estas sejam evacuadas temporariamente das áreas em exposição e que sejam activados os dispositivos especiais de protecção civil que propiciam uma menor vulnerabilidade das populações ao impacto directo das enxurradas. Actualmente já existe um sistema de aviso meteorológico na ilha da Madeira em ligação com os serviçoes de protecção civil. O desafio é estudar uma forma de eventualmente, melhorar a eficácia do sistema.

Contudo, as características específicas das bacias hidrográficas na ilha da Madeira condicionam a eficácia dos sistemas de aviso:

- Os tempos de concentração e de resposta hidráulica relativamente pequenos (da ordem de uma hora) podem dificultar uma reacção eficaz e em tempo útil, no caso de cheias com elevada perigosidade resultantes de eventos meteorológicos significativos.
- A incerteza no processo de desencadeamento ou formação de aluviões intensos e na previsão da distribuição espacial do fenómeno pelas bacias da ilha pode deteriorar a fiabilidade do sistema e pôr em causa a respectiva eficácia.
- A dificuldade, face às incertezas referidas anteriormente, em definir um comportamento preventivo eficaz das populações ou um padrão de resposta, face à previsão de um evento meteorológico, mais ou menos excepcional, atendendo aos diferentes modos de

perigos associados que podem vir a ser caracterizados: movimentos de encostas e quedas de pedras, enxurradas, inundações violentas, agitação marítima e vento forte.

Tendo por base a experiência internacional em zonas onde ocorrem fenómenos semelhantes, o conhecimento técnico-científico adequado para enquadrar um sistema de monitorização de aluviões exige três pressupostos, a saber:

- monitorização e recolha de informação sobre o comportamento de cada bacia e das características do material sólido mobilizado e respectivos fluxos;
- caracterização e tratamento consistente da informação de forma a poder estabelecer correlações fiáveis entre as características das precipitações antecedentes e durante um evento e a possibilidade de ocorrência ou não de deslizamentos ou de mobilização de material sólido no leitos das ribeiras (critérios ou indicadores de desencadeamento de aluviões);
- desenvolvimento e calibração de modelos de simulação do comportamento das bacias: precipitação – escoamentos líquidos e sólidos, incluindo a previsão de caudais e de cotas máximas dos escoamentos em secções críticas.

O estudo da previsão e análise das aluviões é significativamente mais complexo que o correspondente às cheias envolvendo só escoamentos líquidos ou com relativamente pequenas concentrações de material sólido, para os quais existe um conhecimento relativamente completo. Escoamentos com grande concentração de sólidos de grandes dimensões e com velocidades muito elevadas são potencialmente muito violentos e possuem características dinâmicas específicas que dependem de diversos parâmetros empíricos específicos de cada região.

A modelação computacional destes escoamentos está ainda numa fase pioneira. Não obstante o acervo de conhecimentos técnicos e empíricos sobre “torrentes” de tipo semelhante aos da Madeira ser já relevante a nível internacional, o avanço dos conhecimentos científicos neste domínio é ainda relativamente recente e está no início. A recolha de informação e o estabelecimento de relações empíricas conducentes a indicadores de perigo e a um critério fiável de desencadeamento, em resposta a um evento meteorológico, carece da acumulação metódica de dados e de uma análise especializada integrada por uma estrutura específica apropriada à ilha da Madeira.

A implementação de um sistema eficaz de previsão e aviso precoce mais avançado pressupõe a implementação de um sistema integrado de monitorização e de investigação para recolha e

análise dos dados relevantes para o estudo do fenómeno das aluviões. No cumprimento deste objectivo destacam-se as seguintes medidas:

- Consolidação e racionalização dos esforços de monitorização da precipitação na ilha da Madeira de modo melhorar a cobertura da rede de udógrafos, sem sobreposições injustificadas, e a assegurar o acesso rápido a informação fidedigna. Este objectivo pode ser alcançado atribuindo a competência da coordenação da monitorização a uma única instituição regional ou melhorando a coordenação e os canais de comunicação e de partilha de informação entre as instituições que actualmente detêm as redes de monitorização de precipitação: IM, LREC e IGA;
- Instrumentação adequada, compreendendo sensores ultrasónicos de nível, geofones e câmaras em vídeo, em pelo menos, uma das bacias hidrográficas, de modo a melhorar os conhecimentos técnicos e científicos e sustentar novos procedimentos de previsão e protecção que deveriam ser progressivamente implementados em toda a ilha da Madeira. Salienta-se a importância da recolha de informação sobre a génese do escoamentos e do transporte de material sólido, os valores de velocidade e de caudal líquido e sólido, o comportamento de barreiras ou barragens de retenção, a evolução de leitos e os volumes de material sólido transportado.
- Estudo da eficácia e utilidade de um sistema complementar de previsão e aviso precoce de aluviões suportado por diferentes instrumentos de monitorização e previsão da precipitação: udógrafos, radares meteorológicos, e modelos de previsão meteorológica;
- Promoção de parcerias de investigação entre instituições regionais e nacionais de modo a potenciar o investimento realizado em monitorização obtendo ganhos efectivos de conhecimento sobre o fenómeno das aluviões e, sobretudo, na capacidade de controlo do seu risco, nomeadamente através da sua previsão precoce.

O avanço estruturado dos conhecimentos permitirá aperfeiçoar progressivamente um sistema de aviso precoce eficiente e enquadrar com critérios mais sólidos as intervenções preventivas do sistema regional de protecção civil, em particular, a comunicação ao público em caso de crise, e as intervenções associadas à gestão de crises reais.

VI - Formação e Informação ao público

A protecção de pessoas e bens materiais contra os efeitos de aluviões, com ocorrência e intensidade incertas, deve ser um objectivo da Sociedade pelo que as responsabilidades devem ser repartidas com os cidadãos e, em particular, com aqueles que estão expostos aos riscos do fenómeno.

A partilha das responsabilidades, para ser eficiente, exige dos técnicos de organismos públicos ou privados e dos cidadãos em geral, uma formação básica adequada à compreensão e do domínio dos processos associados à ocorrência de aluviões e à respectiva prevenção.

Esta formação deve abranger diferentes níveis ou escalões do ensino na RAM de forma a capacitar os serviços envolvidos em actividades no âmbito de uma gestão do risco e os cidadãos, que podem vir a estar expostos ao perigo, a enfrentarem as situações de crise e a compreenderem e apoiarem as medidas de protecção que venham a ser propostas e implementadas.

Os instrumentos de planeamento, nomeadamente os que suportam decisões relativamente à ocupação de áreas ou locais com elevado risco, devem constituir fontes de informação e divulgação eficazes que proporcionem aos cidadãos um esclarecimento tanto quanto possível convincente do nível de perigo associado. A afixação de painéis ou cartazes a colocar em áreas mais perigosas poderá complementar esse tipo de informação.

Através de formação continuada e de uma informação clara e compreensível, a percepção pública relativa ao risco de aluviões poderá constituir um factor de protecção positivo. Uma melhor formação e informação possibilitarão uma participação pública mais eficaz em decisões, nomeadamente na interiorização dos níveis de toleravéis dos riscos e da segurança. A promoção de campanhas de informação bem estruturadas poderá constituir um instrumento eficaz na evolução da referida percepção e proporcionar uma melhor aceitação e das medidas de protecção antes da ocorrência dos eventos excepcionais.

A formação e a informação sobre o risco constituem, assim, suportes de uma educação para a cidadania que poderá robustecer o rigor e o bom senso na aplicação de medidas de protecção.

7 CONCLUSÕES

O estudo realizado no âmbito do Protocolo estabelecido entre a SRES, o IST, a UMa e o LREC permitiu a prossecução dos seguintes objectivos gerais:

- Aprofundamento do conhecimento científico e técnico relativo aos processos de minimização do desenvolvimento do fenómeno designado por aluviões o qual constitui um risco significativo na ilha da Madeira conforme foi bem evidenciado no dia 20 de Fevereiro de 2010;
- Caracterização do referido evento de 20/2 com base na recolha e análise de dados disponíveis e da utilização de tecnologia de detecção remota;
- Elaboração de princípios orientadores que possibilitem o enquadramento adequado das acções de mitigação do risco promovidas pela SERS, para protecção contra aluviões, e de outras actividades no âmbito da gestão do risco associado ao fenómeno em causa;
- Prestação de apoio científico aos responsáveis técnicos pela concepção e projecto de obras especias de protecção a realizar nas bacias das ribeiras mais afectadas pelo evento de 20/2, através da transferência de conhecimentos e informações.

O estudo efectuado evidencia e confirma a elevada susceptibilidade da ilha da Madeira à ocorrência do fenómeno das aluviões, a complexidade dos processos que lhe estão associados e os factores adversos, naturais e sociais, que condicionam a gestão deste risco público.

A análise, no âmbito do estudo, dos elementos disponíveis permitiu concluir que a precipitação no dia 20 de Fevereiro de 2010, no período crítico do evento, registada no posto do IM Funchal – Observatório, correspondeu a um período de retorno da ordem de 80 a 100 anos, para a duração de uma hora e a um período de retorno superior, da ordem de 1000 anos, para a duração de 6 a 12 horas. Atendendo à limitação nos dados disponíveis nos restantes postos de monitorização, não é possível obter os períodos de retorno associados às precipitações sub-diárias registadas nos diferentes postos da zona onde ocorreram as aluviões intensas. Contudo, face à análise do referido posto da cidade do Funchal é razoável concluir que o evento hidrológico que esteve associado às aluviões de 20 de Fevereiro de 2010 teve as características de um evento com o período de retorno da ordem dos 100 anos. Para poder

melhorar a caracterização do evento, a análise dos dados existentes deve prosseguir e, se possível, deve ser aprofundada.

Para ter uma eficácia adequada, a gestão do risco de aluviões deverá integrar diversos tipos de medidas e de instrumentos, nomeadamente medidas estruturais que conduzam, de uma forma economicamente sustentável, a uma atenuação da produção e a uma retenção significativa, a montante de zonas sensíveis ou vulneráveis, da fracção mais perigosa do material sólido das enxurradas. Deverá integrar, também, medidas não estruturais, incluindo instrumentos de apoio ao planeamento e ordenamento, que permitam controlar a ocupação e a exposição de pessoas e bens das aluviões (cartas e zonamentos dos riscos), e acções de formação e de informação do público que conduzam a uma melhor percepção do risco e a uma participação do público, como parte interessada, em processos de decisão envolvendo o risco e a protecção contra aluviões.

As medidas estruturais mais significativas deverão ter em conta a avaliação de risco/benefícios (redução do risco) e a mitigação de eventuais impactos ambientais.

Uma melhoria significativa no sistema de previsão e aviso precoce exigirá não só a utilização de novas tecnologias ou equipamento avançado de detecção precoce mas, também, um sistema integrado que permita a recolha, análise e interpretação continuada e consistente de dados relativos aos parâmetros intervenientes e que contribua para a calibração eficaz do referido sistema.

Este sistema regional de previsão e protecção contra aluviões deverá, assim, integrar acções de investigação e monitorização de modo a possibilitar a definição de indicadores de previsão e de alarme calibrados para as condições locais da ilha da Madeira.

O estudo desenvolvido possibilitou uma parceria científica e o trabalho conjunto de uma vasta equipa pluridisciplinar que identificou e caracterizou, de uma forma alargada, os problemas envolvidos no fenómeno das aluviões e iniciou actividades de investigação, desenvolvimento e apoio técnico inéditas a nível nacional.

Lisboa, 29 de Outubro de 2010

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, U., Tavares, A. O. e Rodrigues D. (2008). Processos de Perigosidade natural no Município de Câmara de Lobos – Madeira. Contributo para a Gestão do Risco e da Emergência. Território, Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, Nº15 pp. 53 – 71.

Abreu, U. (2007). Riscos naturais no ordenamento do Território: Aplicação ao Município de Câmara de Lobos – Construção de um sistema de gestão ambiental em ambiente de SIG's. Tese de Mestrado em Geociências, Universidade de Coimbra, 209 p.

Andrade, E. C. (1982). 80 anos de Actividade de Correcção Torrencial – Hidráulica Florestal (1901 – 1980), Ministério da Agricultura, Comércio e Pescas, Direcção – Geral das Florestas, 106 p.

ASTM D 2974 – 00 (2000). Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM D4318. (1996). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM D-4404-84 (2004). Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM D5333-96 (1996). Standard Test Methods for Measurement of Collapse Potential of Soils. American Society for Testing and Materials, ASTM.

Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity – Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. Geog. Ann. A62, pp 23 - 27

Capelo, J., Menezes de Sequeira, M., Jardim, R. & Costa, J.C. (2004) Guia da Excursão geobotânica dos V Encontros Alfa 2004 à ilha da Madeira. In Capelo, J., A paisagem vegetal da Ilha da Madeira. *Quercetea*, 6, 5-45

Carvalho, A.M. Galopim de; Brandão, J.M. (1991). Geologia do Arquipélago da Madeira. Publicação do Museu Nacional de História Natural, 170 p.

Casale, R. e Margottini (1999). Floods and Landslides. Integrated Risk Assessment. Springer, 373 p.

Cenorgeo (2010). Estudo de caracterização das zonas de risco (Encostas da Eira do Serrado/Três Paus, Trapiche/Curral Velho, Estada do Laranjal de Santo António e Estrada da Alegria em São Roque). Relatório efectuado para a Câmara Municipal do Funchal, Cenorgeo.

CHAPMAN, S. & COWLING, T. G. (1970). *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*, 3rd Edn. Cambridge University Press.

Danneels G, Pirard, E & Havenith, H-B (2007) - Automatic landslide detection from remote sensing images using supervised classification methods. In: *2007 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM,* 3014-3017.

DRA-RAM, 1992, *Carta de Solos da Ilha da Madeira*, Direcção Regional de Agricultura, Secretaria Regional de Economia, R. A. da Madeira.

Faria, J.M.R; Godinho, S.F., 1983, *O clima de Portugal, Fascículo XXIX*, "Intensidade, duração e frequência da precipitação no arquipélago da Madeira", Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

Ferreira, R.M.L. 2005. River Morphodynamics and sediment transport: Conceptual model and solutions. Ph.D. thesis, Instituto Superior Tecnico, T.U., Lisbon.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley and Sons, New York.

Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31, pp. 521-532.

Fuchs, S., Kaitna, R., Scheidl, C. e Hubl, J.(2008). The Application of the Risk Concept to Debris Flow Hazards. Geomechanik and Tunnelbam 1, Heftz, pp 120 – 129.

Glade, T., Anderson, M. e Crozier, M.J. (2005). Landslide Hazard and Risk. Wiley 802 p.

Hapke CJ (2005) - Estimation of regional material yield from coastal landslides based on historical digital terrain modeling. *Earth Surf. Process. Landforms* **30**: 679–697

Hipólito J.R., E. G. Santos, M.M. Portela, 2006, Contribuição para o estabelecimento de um factor de majoração para a fórmula racional, *8º Congresso da Água*, APRH.

JENKINS, J. T. & RICHMAN, M. W. (1988) Plane simple shear of smooth inelastic circular disks: the anisotropy of the second moment in the dilute and dense limits. *J. Fluid Mech.* **192**, 313-328.

LNEG (2009). Carta geológica simplificada da Ilha da Madeira à escala 1:80.000. Coordenação de M. Luísa Ribeiro. Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Direcção Regional do Comércio, Industria e Energia. Projecto co-financiado pela Região Autónoma da Madeira.

Lopes S S (2003) O Risco de Aluvião nas Bacias Hidrográficas do Funchal. Relatório do Seminário da licenciatura em Geografia Física e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa.

Lopes S S, Aguiar N (2009a) Caracterização e monitorização da bacia hidrográfica da Madalena. Relatório Técnico DHTE 02, Laboratório Regional de Engenharia Civil.

Lopes S S, Aguiar N (2009b) Caracterização e monitorização da bacia hidrográfica de São Vicente. Relatório Técnico DHTE 03, Laboratório Regional de Engenharia Civil.

Mata, J.M.L. da S. (1996). Petrologia e geoquímica das lavas da ilha da Madeira: implicações para os modelos de evolução do manto terrestre. Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade de Lisboa, 471p.

Mayer, R. (1941). Noções de Hidráulica Fluvial. Direcção Geral dos Serviços Florestais e Agrícolas, 132p.

Mesquita, S., Capelo, J. & Sousa, J. (2004) Bioclimatologia da Ilha da Madeira: abordagem numérica. In Capelo, J., A paisagem vegetal da Ilha da Madeira. *Quercetea*, 6, 47-60.

Pereira, Eduardo C. N. (1939) – *Ilhas de Zarco*. Câmara Municipal do Funchal. Madeira.

Prada, S.L.R., Gaspar M.A., Menezes de Sequeira, M., Nunes A., Figuera C. e Cruz J.V.C (2005). Disponibilidade hídricas da ilha da Madeira. IN. AQUAMAC, Técnicas e Métodos para a Gestão Sustentável da Água na Macaronésia. Instituto Tecnológico de Canárias, p.261-294.

Quintal, Raimundo (1999a) – *"Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX".* Territorium. Revista de Geografia Física aplicada ao Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais. N.º 6, p. 31-48. Minerva. Coimbra.

Ribeiro, (1985) - *A Ilha da Madeira até Meados do século XX. Estudo Geográfico*. Instituto de Cultura e Língua Portuguesa. Lisboa.

Ricardo, R. Pinto; Câmara, E.M. Silva da; Ferreira, M.A. Melo (Coordenação) (1992). Carta dos solos da Ilha da Madeira, Carta de Solos à escala 1:50.000 e Notícia Explicativa. Centro de Estudos de Pedologia (IICT), Instituto Superior de Agronomia (UTL), Centro de Pedologia da

Universidade Técnica de Lisboa, Direcção Regional de Agricultura da Madeira. Governo Regional da Região Autónoma da Madeira, Secretaria Regional de Economia, Direcção Regional de Agricultura. 162 p.

Rodrigo, F.S, Trigo R.M.,.(2007) "Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002". *International Journal of Climatology*, 27: 513-529

Rosa, S.P.P. (1995). Caracterização geológico-geotécnica das formações vulcânicas da Madeira. Carta geotécnica da área situada a Norte do Funchal. Dissertação de Mestrado em Geologia de Engenharia, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 181 p.

Rodrigues D. & Francisco Ayala-Carcedo (2000) Georisks a natural hazard database of historic events in Madeira Island. 25th General Assembly .E.G.S. Nice, p. 286.

Rodrigues D., Ayala- Carcedo F.J. (2003) . Rain induced landslides and debris flows in Madeira Island Portugal. Landslide .News. The Japan Landslide Society, 14-15, 43-45

Rodrigues D. (2005) – Análise de risco de movimentos de vertente e ordenamento do território na Madeira. Aplicação ao caso de Machico. Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade da Madeira.

Silva, J.B., Almeida, F.E. e Gomes, C.S.F. (2010). Aprender com a Natureza. Enxurradas e Inundações na Madeira. Suplemento Mais do Diário de Notícias da Madeira de 28 de Março de 2010.

Stark, C.P., Rossi, M., Peruccacci, S. e Guzzehi, F. (2008). The Rainfaal intensity – duration controlo f shallow landslides and debris flows: na update. Landslides, 5, pp 3 – 17.

Stark, C.P., Rossi, M., Peruccacci, S. e Guzzehi, F. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorology and Atmospheric Physics, 98, pp 239 – 267.

SRA/INAG (2003), Plano Regional de Água da Madeira, Secretaria Regional do Ambiente/Instituto da Água, Funchal.

Takahashi, T. (1991). Debris flow. IAHR Monograph Series. A.A.Balkema/Rotterdam/Brookfield.

Takahashi T. (2007): Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor & Francis, Leiden, 448p.

Trigo R.M., Osborn T.J., Corte-Real J.M. (2002) "The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms". ***Climate Research***, 20, 9-17.

Valente B. (2010). Temporal na Ilha da Madeira. Causas, Consequências e Formas Mitigadoras dos Danos. Ingenium. Ordem dos Engenheiros, II Série, Número 116, Março/ Abril, pp 44 – 47.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**.** Washington: United States Department of Agriculture.

Zbyszewski, G.; Ferreira, O.V.; Medeiros, A.C.; Aires-Barros, L.; Silva, L.C.; Munhá, J.M. e Barriga, F. (1975). Notícia explicativa das folhas A e B (ilha da Madeira) da Carta Geológica de Portugal: 1/50 000. Serviços Geológicos de Portugal.

Zêzere, J.L. (2000). A classificação dos movimentos de vertente: tipologia, actividade e morfologia. Apontamentos de Geografia, série investigação, nº6, C.E.G., Lisboa, 29p.