



Centro de Competência das Ciências Exatas e da Engenharia

**Estudo da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Machico
- Vulnerabilidade de Cheias -**

Vítor Hugo da Costa Barreto

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Paulo Martins

Arguente: Professor Doutor Sérgio António Neves Lousada

Orientadora: Professora Doutora Susana Luísa Rodrigues Nascimento Prada

UMa, setembro de 2013

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Susana Prada, por acreditar no meu valor, pelo incentivo e pela competência demonstrada ao longo da elaboração desta dissertação.

Ao Dr.º Sérgio Lopes, pela oportunidade concedida, transmissão de conceitos e informação, e interesse nesta dissertação desde o seu início.

Ao Doutor Élvio Sousa, pelo seu contributo dado a esta dissertação a nível histórico.

Ao Observatório Meteorológico do Funchal, na pessoa do Doutor Vítor Prior e Dr. Joana Nunes que facultarão os valores de precipitação.

Ao Geógrafo Nuno Aguiar, pelos ensinamentos de ArcGis.

Ao Geógrafo Adalberto Carvalho, pela informação disponibilizada, conceitos de ArcGis e pelo interesse demonstrado.

Aos Amigos, Rúben Gouveia, Duarte Viveiros e Gregório Teixeira, pela amizade de sempre.

Ao meu Pai, António Barreto, pelos valores transmitidos e por me ter inculcado desde pequeno o gosto pela Engenharia Civil.

À minha Mãe, Juvelina da Costa, pelos valores transmitidos, e todo o carinho e amor.

À minha Sogra, Elisabete Serrão, pela dedicação, carinho, amor e incentivo em todas as horas.

Ao meu Sogro, Moisés Serrão, pelo apoio, pela persistência e encorajamento perseverante.

À Mulher da minha vida, Petra Serrão, pelo amor, amizade, paciência, ajuda e compreensão.

A todos as pessoas e entidades, que de uma forma ou outra, contribuíram para o resultado final desta tese.

Obrigado!

RESUMO

Esta dissertação de mestrado intitula-se “Estudo da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Machico – Vulnerabilidade de Cheias”. Os objetivos deste estudo são: o estudo da Bacia Hidrográfica de Machico, catorze sub-bacias e secções de desembocadura destes afluentes para o curso de água principal, várias secções ao longo da linha de água principal, analisar se tais secções comportam os caudais de cálculo, elaboração de uma carta de vulnerabilidade e elaboração de uma lista de possíveis obras de intervenção e medidas a implementar.

O método utilizado consistiu na identificação dos postos de monitorização de precipitação com efeito na bacia, de seguida aplicaram-se estatisticamente as amostras de precipitações máximas anuais com a duração de 1, 2, 3, 4 e 5 dias consecutivos, para que de seguida se estime a precipitação na bacia hidrográfica com o período de retorno e com a duração de 24h. Após determinação da precipitação para vários períodos de retorno, estimou-se o caudal de ponta de cheia através do método racional. Mediram-se as secções em estudo e determinou-se o caudal pela equação de Manning – Strickler nas mesmas. Após tal procedimento, verificaram-se quais as secções que não comportavam tal caudal e por fim elaboraram-se cartas de vulnerabilidade para vários períodos de retorno, quer para as secções de desembocadura de 14 sub-bacias, assim como, para as secções ao longo da ribeira de Machico.

Relativamente aos resultados, foram os esperados, pois existem alguns trechos da ribeira que ainda estão por canalizar, assim como, a existência de passagens pedonais, pontes e passagens hidráulicas, onde há uma diminuição da área de vazão da ribeira de Machico. Assim sendo, tais secções apresentavam uma percentagem de preenchimento através da fórmula criada para o efeito, quociente entre o caudal pelo método racional e o caudal de Manning – Strickler, e multiplicado posteriormente por 100 %.

Em termos numéricos é de constatar que para o período de retorno de 100 anos, seis das 18 secções estudadas da ribeira canalizada não comportam tal caudal líquido acabando por transbordar. Assim sendo, tem-se que 12 secções acabam por comportar tal volume de água, no entanto se juntarmos diferentes materiais tais como, solo, material rochoso e outros, essas secções não comportarão tal matéria líquida.

Em suma, dever-se-á repensar e realizar obras de intervenção nos trechos onde a

ribeira ainda está por canalizar como pontes e passagens pedonais. Dada a existência de um grande desnível na linha de água principal a partir do quarto quilómetro de montante para jusante, terá de haver uma série de intervenções a sul desse desnível de modo a mitigar um possível caudal que poderá advir de acordo com precipitações iguais ou superiores aos do período de retorno estudados. Por fim é importante referir que será de igual forma necessário realizar limpezas periodicamente tanto na ribeira principal como nos afluentes que nesta desaguam.

Palavras-Chave:

Aluvião

Cheias

Vulnerabilidade

Caudal

Período de Retorno

Ribeira de Machico

Bacia Hidrográfica

Sub - Bacias Hidrográficas

ABSTRACT

This Master's Dissertation is entitled "The Study of Machico's River Hydrographic Basin – Flooding Vulnerability". The aims of this essay are: the study of Machico's Hydrographic Basin, fourteen watersheds and these affluent outfalls and its importance to the main watercourse, several sections along the main water stream, analyze if whether such sections behave flows calculation, write a report of vulnerability and finally to elaborate a list of possible construction works for its improvement.

The method which will be used is the identification of monitored areas of rainfall which affect the basin, then we applied statistical samples of annual maximum rainfall with a duration of 1, 2, 3, 4 e 5 consecutive days, for then it is estimated that rainfall in the basin with the return period and the duration of 24 hours. After determination of rainfall for various return periods, we estimated the peak flood flow through the rational method. Sections were measured in the study and determined the flow rate of the Manning equation - Strickler therein. After this procedure, there were sections which did not include such a flow, and finally drew up letters of vulnerability for various return periods, or for sections of the mouth of the 14 sub-basins, as well as for sections along Machico's river.

The results were the expected ones, as in some parts of the river, not yet canalized, as well as, on footpaths, bridge platforms and culverts, where there is a decrease in the flow area of the Machico's river. Thus, these sections showed a percentage of completion by the formula created for this purpose by the ratio between the flow rate of rational method and Manning - Strickler, and subsequently multiplied by 100%.

Numerically, we can assure that for example in the Return Period of 100 years, six out of the 18 sections studied in the river cannot contain the liquid water stream and as a result it will overflow. Only 12 sections are able to contain that amount of volume of water. However, if we join other materials as soil, rock material and others, those sections will not be able to receive that volume of liquid.

Finally is required intervention works in the non-canalized parts of the riverside, as well alternative bridges, footpaths and culverts will have to be reproduced. The existence of a major uneven level in the main water stream line, starting on the Kilometer 4 from upstream to downstream, several work interventions will have to take

place further south from the uneven water level, in order to minimize a possible water stream that might occur accordingly to the next rain precipitation close to the Return Period. Finally it should be noted that it will be equally necessary to perform regular cleanings in both the main river and the tributaries that flow into this. It will also be necessary to make annual cleanings in both the main River Stream as well in its affluent.

Keywords:

Alluvion

Flash-Floods

Vulnerability

Water Stream

Return Period

Machico's Riverside

Basin

Watersheds

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1 - HISTORIAL DAS ALUVIÕES EM MACHICO	3
2 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	6
2.1 - CONCEITO DE BACIA HIDROGRÁFICA	6
2.2 - CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS	7
2.2.1 - Carta Geológica	7
2.2.2 - Carta de Solos.....	9
2.2.3 - Vegetação.....	12
2.3 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	13
2.3.1 - Localização Geográfica.....	13
2.3.2 - Área de Drenagem	16
2.3.3 - Perímetro	16
2.3.4 - Aspectos relacionados com a forma da bacia	16
2.4 - CARACTERÍSTICAS DO RELEVO	18
2.4.1 - Curva Hipsométrica	18
2.4.2 - Curva Hipsométrica Adimensional.....	21
2.4.3 - Perfil Longitudinal.....	22
2.4.4 - Declive médio ou Índice de declive de Roche	24
2.4.5 - Declive 10-85	24
2.4.6 - Índice de Relevo	25
2.5 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DRENAGEM.....	25
2.5.1 - Rede de Drenagem.....	25
2.5.2 - Hierarquização pelo Método de Strahler.....	26

2.5.3 - Razão de bifurcação	28
2.5.4 - Densidade de drenagem (D_d).....	29
2.5.4 - Percurso médio sobre o terreno	29
2.5.5 - Percurso médio sobre o terreno até um curso de água.....	30
2.5.6 - Densidade Hídrica.....	30
2.6 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE MACHICO	30
2.7 - SUB-BACIAS ESTUDADAS INSERIDAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DE MACHICO.....	31
3 - PRECIPITAÇÕES INTENSAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA	33
3.1 - POSTOS UDOMÉTRICOS USADOS NO ESTUDO.....	33
3.2 - ANÁLISE E CONSTITUIÇÃO DA AMOSTRA	37
3.3 - PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS	38
3.4 - ANÁLISE DE TENDÊNCIAS	38
3.5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA	41
3.6 - ANÁLISE QUALITATIVA	45
4. ANÁLISE DE CHEIAS	47
4.1 - PROCEDIMENTO A REALIZAR PARA CÁLCULO DOS CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA	47
4.2 - LINHA DE POSSIBILIDADE UDOMÉTRICA (LPU).....	51
4.3 - TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	51
4.4 - TEMPO DE RESPOSTA	53
4.5 - MÉTODO DE THIESSEN OU DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA	53
4.6 - CAUDAL DE PONTA DE CHEIA PELO MÉTODO RACIONAL	55
4.6.1 - Formulação	55
4.6.2 - Determinação do coeficiente “C”	55
4.6.3 - Intensidade de precipitação	57
4.6.4 - Cálculo do caudal de ponta de cheia pelo método racional	57
4.7 - cálculo de caudais pela equação de Manning-Strickler.....	63
4.7.1 - Cálculo de caudal para as sub-bacias.....	64
4.7.2 - Secções da ribeira de Machico	64

5.1 - DEFINIÇÃO DE VULNERABILIDADE	66
5.2 - RESULTADOS OBTIDOS E COMENTÁRIOS.....	67
5.2.1 - Sub-bacias	68
5.2.2 - Secções da ribeira de Machico	69
5.3 - Mapas de vulnerabilidade	71
CONCLUSÕES E MEDIDAS A IMPLEMENTAR.....	74
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXOS.....	80
Anexo I	81
Anexo II.....	83
Anexo III.....	84
Anexo IV	86
Anexo V.....	90
Anexo VI	95
Anexo VII	96
Anexo VIII.....	98
Anexo IX	100
Anexo X.....	108
Anexo XI	117
Anexo XII	120
Anexo XIII.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desmoronamento da ponte que ligava as freguesias de Machico à do Caniçal, a 3 Novembro de 1956 (Fonte: Perestrellos Photographos)	4
Figura 2. Destruição em consequência da aluvião de 1956 (adaptado de AAVV, 2003)...	5
Figura 3. Bacia Hidrográfica de Machico	6
Figura 4. Carta Geológica da ilha da Madeira adaptada à bacia em estudo (Silveira, Madeira, Ramalho, Fonseca, & Prada, 2010b).....	7
Figura 5. Carta de Solos da Ilha da Madeira adaptada à bacia em estudo (adaptado de Carta de Solos da Ilha da Madeira, 1992)	12
Figura 6. Bacia Hidrográfica inserida no Arquipélago da Madeira.....	13
Figura 7. Bacia Hidrográfica de Machico (Fonte: M Virovets 2007)	14
Figura 8. Vista da parte final da Bacia Hidrográfica e ribeira de Machico (Fonte: RolloMaster 2008)	14
Figura 9. Bacias vizinhas da bacia em estudo	15
Figura 10. Curvas de nível	19
Figura 11. Curva hipsométrica	21
Figura 12. Estado de maturidade de uma Bacia	21
Figura 13. Curva hipsométrica adimensional.....	22
Figura 14. Curso de água principal	23
Figura 15. Perfil longitudinal do curso de água principal da ribeira de Machico	23
Figura 16. Perfis longitudinais das Ribeiras do Funchal (adaptado EARAM 2010).....	24

Figura 17. Exemplo de hierarquização de Strahler.....	27
Figura 18. Rede de hidrográfica da bacia hidrográfica de Machico	28
Figura 19. Sub-bacias em estudo.....	32
Figura 20. Localização dos postos de monitorização da precipitação na zona leste da Madeira	34
Figura 21. Visualização do Posto Florestal de Machico (Fonte: Google Earth 2007)	36
Figura 22. Visualização do Posto (Quinta da Junta) do Santo da Serra (Fonte: Google Earth 2007).....	37
Figura 23. Representação gráfica das precipitações máximas diárias anuais para o Posto Florestal de Machico.....	39
Figura 24. Representação gráfica das precipitações máximas anuais para o posto do Santo da Serra.....	40
Figura 25. Coeficientes de majoração a aplicar às precipitações para diferentes tempos de retorno adaptado de (EARAM, 2010)	49
Figura 26. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 100 anos	50
Figura 27. Ponderação da Bacia Hidrográfica de Machico pelo Método de Thiessen	54
Figura 28. Isolinhas anuais médias: i) Escoamento Subterrâneo e Hipodérmico, ii) Escoamento Superficial, iii) Escoamento Total adaptado (Portela et al., 2002)	56
Figura 29. Sub-bacias afetadas pelos postos de monitorização.....	60
Figura 30. Ajuste de leis para 1 dia consecutivo - Santo da Serra	90
Figura 31. Ajuste de leis para 2 dias consecutivos - Santo da Serra	90
Figura 32. Ajuste de leis para 3 dias consecutivos - Santo da Serra	91

Figura 33. Ajuste de leis para 4 dias consecutivos - Santo da Serra	91
Figura 34. Ajuste de leis para 5 dias consecutivos - Santo da Serra	92
Figura 35. Ajuste de leis para 1 dia consecutivo - PFM	92
Figura 36. Ajuste de leis para 2 dias consecutivos - PFM	93
Figura 37. Ajuste de leis para 3 dias consecutivos - PFM	93
Figura 38. Ajuste de leis para 4 dias consecutivos - PFM	94
Figura 39. Ajuste de leis para 5 dias consecutivos - PFM	94
Figura 40. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 10 anos..	96
Figura 41. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 20 anos	96
Figura 42. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 50 anos	96
Figura 43. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 1000 anos	97
Figura 44. Secções de desembocadura 1 e 2	100
Figura 45. Secções de desembocadura 3 e 4	101
Figura 46. Secções de desembocadura 5 e 6	102
Figura 47. Secções de desembocadura 7 e 8	103
Figura 48. Secção de desembocadura 9	104
Figura 49. Secção de desembocadura 10 e 11	105

Figura 50. Secção de desembocadura 12 e 13.....	106
Figura 51. Secção de desembocadura 14	107
Figura 52. Secções 1 e 2 da ribeira de Machico	108
Figura 53. Secções 3 e 4 da ribeira de Machico	109
Figura 54. Secções 5 e 6 da ribeira de Machico	110
Figura 55. Secções 6b e 6c da ribeira de Machico	111
Figura 56. Secções 7 e 8 da ribeira de Machico	112
Figura 57. Secção 9 da ribeira de Machico	113
Figura 58. Secção 10 da ribeira de Machico	114
Figura 59. Secções 11, 12a e 12b da ribeira de Machico	115
Figura 60. Secções 14a, 14b e 14c da ribeira de Machico	116
Figura 61. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 10 anos.....	124
Figura 62. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 20 anos.....	124
Figura 63. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 50 anos.....	124
Figura 64. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 100 anos.....	124
Figura 65. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 1000 anos.....	124
Figura 66. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 10 anos	124
Figura 67. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 20 anos	124

Figura 68. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 50 anos	124
Figura 69. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 100 anos	124
Figura 70. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 1000 anos	124

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Prejuízos na freguesia de Machico na aluvião de 3 de Novembro de 1956 (adaptado de (Carvalho, 2001)	5
Tabela 2. Contagem dos trechos do exemplo anterior.....	27
Tabela 3. Hierarquização da rede hidrográfica da bacia em estudo pelo Método de Strahler	28
Tabela 4. Resumo das características da Bacia Hidrográfica de Machico.....	31
Tabela 5. Características das estações de monitorização da precipitação (Fonte: (EARAM, 2010) e (SNIRH, 2012)).....	35
Tabela 6. Síntese do Posto Florestal de Machico	38
Tabela 7. Síntese do Posto do Santo da Serra	38
Tabela 8. Períodos de retorno a considerar no dimensionamento de obras hidráulicas (Oliveira, 2010) citando Tonini, 1966	43
Tabela 9. Fatores de probabilidade das leis estatísticas (Naghetini & Portela, 2011).....	44
Tabela 10. Quocientes entre precipitações máximas anuais com durações inferiores a 24 h (numerador) e de 24 h (denominador) para diferentes períodos de retorno para o OMF adaptado de (EARAM, 2010).....	48
Tabela 11. Valores de repartição relativos aos períodos de retorno para o tempo de concentração da bacia hidrográfica.....	50
Tabela 12. Quadro síntese das características das sub-bacias em estudo	58
Tabela 13. Tempo de concentração médio para as sub-bacias em estudo	59
Tabela 14. Caudal das sub-bacias através do cálculo pelo Método Racional para T=100 anos	61

Tabela 15. Áreas dos polígonos que serviram de base para o cálculo do caudal de ponta de cheia pelo método racional	62
Tabela 16. Caudal calculado para as diferentes secções da ribeira de Machico para um período de retorno de 100 anos	63
Tabela 17. Caudais de Manning - Strickler para as secções de desembocadura das sub-bacias.....	64
Tabela 18. Caudais de cálculo pela equação de Manning–Strickler	65
Tabela 19. Classes de Vulnerabilidade de acordo com as áreas vulneráveis - adaptado de (Duarte, Borges, Ramos, Pedro, & Pancada, 2007).....	67
Tabela 20. Percentagem de preenchimento e respetiva indicação da cor respeitante à classe de vulnerabilidade para as secções finais das sub-bacias	72
Tabela 21. Percentagem de preenchimento e respetiva indicação da cor respeitante à classe de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico.....	73
Tabela 22. Dados para definir a curva hipsométrica	81
Tabela 23. Dados para constituição do perfil longitudinal	83
Tabela 24. Anos hidrológicos dos postos monitorizados.....	84
Tabela 25. Precipitações máximas anuais para o posto florestal de Machico para cinco dias consecutivos	86
Tabela 26. Precipitações máximas anuais para o Santo da Serra para cinco dias consecutivos	87
Tabela 27. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 10 anos	98
Tabela 28. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 20 anos	98
Tabela 29. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 50 anos	99

Tabela 30. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 1000 anos	99
Tabela 31. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 10 anos	117
Tabela 32. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 20 anos	117
Tabela 33. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 50 anos	118
Tabela 34. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 100 anos	118
Tabela 35. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 1000 anos	119
Tabela 36. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 10 anos	120
Tabela 37. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 20 anos	120
Tabela 38. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 50 anos	121
Tabela 39. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 100 anos	121
Tabela 40. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 1000 anos.....	122

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1. Índice de compacidade de Gravelius	17
Equação 2. Fator de forma	17
Equação 3. Índice de alongamento	18
Equação 4. Altitude média	20
Equação 5. Altura média	20
Equação 6. Declive médio do curso de água principal	24
Equação 7. Índice de declive de Roche.....	24
Equação 8. Declive 10 - 85%	25
Equação 9. Índice de relevo	25
Equação 10. Razão de bifurcação	29
Equação 11. Densidade de drenagem	29
Equação 12. Percurso médio sobre o terreno	29
Equação 13. Percurso médio sobre o terreno até um curso de água.....	30
Equação 14. Densidade hídrica	30
Equação 15. Probabilidade de não - excedência.....	42
Equação 16. Período de retorno.....	43
Equação 17. Cálculo do fator de probabilidade para a lei estatística de Galton	44
Equação 18. Cálculo da precipitação para as leis de Gumbel e Pearson III	45
Equação 19. Determinar a precipitação pela linha de possibilidade udométrica	51

Equação 20. Tempo de concentração através da formulação de Giandotti.....	52
Equação 21. Tempo de concentração através da formulação de Kirpich	52
Equação 22. Tempo de concentração através da formulação de Téméz.....	52
Equação 23. Tempo de resposta	53
Equação 24. Caudal de ponta de cheia pelo método racional	55
Equação 25. Caudal por Manning - Strickler	63
Equação 26. Coeficiente de rugosidade equivalente	64
Equação 27. Cálculo da percentagem de preenchimento da secção	67

LISTA DE ACRÓNIMOS

UMa – Universidade da Madeira

RAM – Região Autónoma da Madeira

CMM – Câmara Municipal de Machico

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

IGEOE – Instituto Geográfico Português

BHM – Bacia Hidrográfica de Machico

AAVV – Autores Vários

CVS – Complexo Vulcânico Superior

CVM – Complexo Vulcânico Intermédio

VR – Vertisols

CM – Cambisols

TR – Terreno Rochoso

AN – Andosols

PH – Phaeozems

FL – Fluvisols

MDT – Modelo Digital do Terreno

EARAM – Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira

WMO – World Meteorological Organization

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

PFM – Posto Florestal de Machico

SS – Santo António da Serra

OMF – Observatório Meteorológico do Funchal

GPS - Global Positioning System

LPU – Linha de Possibilidade Udométrica

T – Período de Retorno

Q – Caudal

INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO GERAL

A ilha da Madeira é vulnerável a precipitações excepcionais que se manifestam em episódios de duração espaçadas com danos compensados no tempo. A duração média da sequência das chuvadas é de três a quatro dias. (Marzol et al., 2006)

“Em particular, o estudo da frequência da ocorrência de precipitação com determinadas intensidades (quantidade/duração) é da maior importância do ponto de vista económico em vários domínios de atividade, como por exemplo, em estudos sobre a erosão do solo, planeamento de estudos hidráulicos, etc (Faria & Godinho, 198, pp.8).

Antes de qualquer relato histórico das aluviões, será necessário ter-se uma ideia, uma perspetiva do que é uma aluvião. Quais as especificidades meteorológicas que produzem uma aluvião? Quais as características da mesma? Como se processa um evento deste tipo?

Uma aluvião na ilha da Madeira define-se como uma cheia rápida e violenta com elevado transporte de carga sólida.

Uma aluvião tem início com o aparecimento de uma nuvem do tipo *cúmulo-nimbo*. Trata-se de uma nuvem densa que atinge grandes altitudes e a esta está-lhe associada acontecimentos extremos como raios ou grandes chuvas. Este tipo de nuvem descarrega todo o seu conteúdo sobre uma área restrita como por exemplo uma bacia hidrográfica, originando grandes caudais (Quintal, 1999).

As características presentes numa aluvião são: grande velocidade, capacidade de transporte, capacidade de provocar deslizamentos de terra, trata-se de eventos extremamente perigosos. Assim sendo, um evento desta natureza começa com grandes volumes de precipitação espaçados num intervalo de tempo muito longo, de seguida são gerados fortes caudais capazes de transportar grandes volumes de lamas, material rochoso, troncos de árvores e outro tipo de material sólido.

Acontece que, com estes enormes caudais, ao mínimo estreitar de secção ou obstrução do leito da ribeira são capazes de retomar o seu escoamento fora desta, possuindo deste modo, a capacidade de provocar grandes estragos.

“Em situação de cheia rápida, é nos sectores terminais das bacias hidrográficas que vamos encontrar as situações mais problemáticas, dado o menor declive da linha de água. O problema torna-se muito mais grave, quando as intensas precipitações ocorridas coincidem com a preia-mar, verificando-se assim um efeito

“tampão” na desembocadura dos cursos de água, o que obviamente vai provocar o transbordo dos mesmos.” (Lopes, 2003, pp.109).

Em função das aluviões que ocorreram no Arquipélago da Madeira, particularmente na freguesia de Machico, e face a todos os estragos que estas provocaram, nomeadamente perdas humanas, animais e materiais, tornou-se imperioso a realização desta dissertação com o intuito de estudar a bacia hidrográfica e a ribeira e Machico.

Assim, será importante perceber quais as secções da ribeira canalizada que estão vulneráveis à ocorrência deste tipo de fenómeno. Para isso será relevante o estudo geomorfológico da bacia hidrográfica. Por fim, e face aos resultados obtidos serão apresentadas diversas medidas a implementar de modo a diminuir os danos causados anteriormente.

1 - HISTORIAL DAS ALUVIÕES EM MACHICO

Desde o século XV, inverno do ano 1467, que existem registos das aluviões, mas desde a génese da ilha que tais torrentes acontecem, até porque a sua morfologia remete-nos para tal justificação. Tais fenómenos provocaram inúmeros prejuízos, bem como a morte de centenas de pessoas, como foi o caso das aluviões de 1724, 1803, 1901, 1956.

Assim, importa referir algumas das aluviões significativas na história da freguesia de Machico de acordo com (Ribeiro, 2001):

- 9 de Novembro de 1678 ocorreu uma aluvião sem grandes prejuízos;
- 18 de Novembro de 1724, morreram 26 pessoas e 80 habitações foram destruídas;
- 9 de Outubro de 1803, presume-se que esta foi a aluvião mais devastadora na ilha da Madeira conforme relatos históricos, após três dias consecutivos a chover sem parar, ocorreu uma aluvião em que foram vitimadas 14 pessoas e bens pessoais. A igreja e as ruas ficaram inundadas até à altura de aproximadamente 2m. Nesta aluvião ocorreu o abatimento da ponte bem como parte da muralha da ribeira;
- 26 de Outubro de 1815 (em que a precipitação ocorreu durante aproximadamente 15h, conforme relatos), foi derrubada a muralha que defendia a vila (na extensão de 13 braças (aproximadamente 24m) e na grossura de 14 palmos (aproximadamente 3m). A obra de recuperação da muralha iniciou-se em 1816 e prolongou-se até ao ano de 1823. Cerca de 1464 pés de comprimento (446,23m aproximadamente), 22 pés de altura (cerca de 6,71m) e 7 pés de espessura (2,13m aproximadamente) da muralha foram reconstruídos;
- 22 de Fevereiro de 1853 houve precipitação elevada durante meia hora (com intensidade desconhecida);
- No ano de 1861, na noite de 1 para 2 de Novembro, a intensidade de precipitação foi bastante (mas não registada quantitativamente), fazendo com que a ribeira crescesse de uma tal maneira que a população ficara apavorada;
- 30 de Novembro de 1901, uma enchente derrubou e arrastou várias pontes, entre elas: a da Ribeira Grande, Moinho da Serra, a que ligava os sítios do

Piquinho ao do Paraíso e ainda a ponte que ligava as freguesias de Machico à do Caniçal, denominada “Ponte Nova”. No mesmo dia uma quebrada na localidade da Ribeira de Machico soterrou uma casa vitimando 9 pessoas;

- 13 de Março de 1904, uma grande enchente arrastou uma ponte provisória e pôs em perigo a ponte metálica que ainda estava em construção;
- 18 de Novembro de 1905, chuvas torrenciais destruíram parte da muralha da ribeira, causando inundações no sítio da Banda d’Além;
- 5 e 6 de Março de 1921 caíram grandes chuvas que com o subir das águas, culminaram, em alguns pontos, com a inundação por completo do 1.º andar de várias habitações;
- Em meados do mês de Janeiro do ano de 1953, o nível das águas quase que tocava na ponte da vila e uma pessoa desapareceu na Ribeira Seca, acredita-se que tenha sido levada pelas águas;
- 3 de Novembro de 1956 uma aluvião destruiu a ponte de ligação entre Machico e Caniçal, visualizada na Figura 1. Registaram-se 3 mortos e outros tantos feridos.



Figura 1. Desmoronamento da ponte que ligava as freguesias de Machico à do Caniçal, a 3 Novembro de 1956 (Fonte: Perestrellos Photographos)

Segue-se a Figura 2 que ilustra bem o terrífico dia que se passou a 3 de Novembro de 1956.

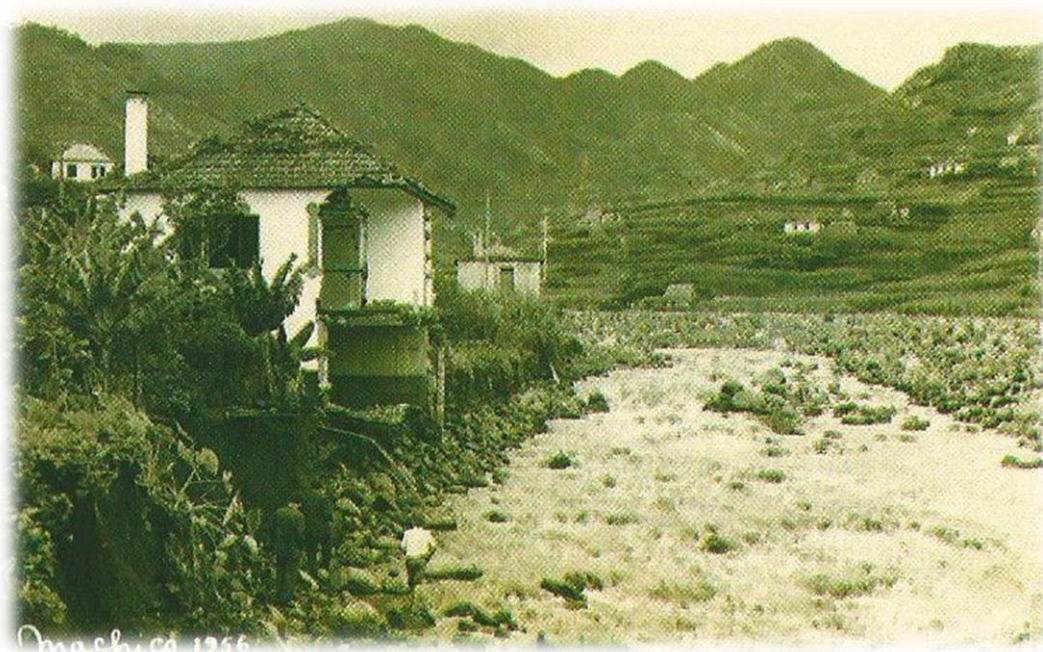


Figura 2. Destruição em consequência da aluvião de 1956 (adaptado de AAVV, 2003)

Na Tabela 1 registam-se os prejuízos ocorridos na freguesia de Machico, em propriedades agrícolas e infraestruturas em consequência da aluvião de 3 de Novembro de 1956, como se visualizam nas imagens anteriores.

Tabela 1. Prejuízos na freguesia de Machico na aluvião de 3 de Novembro de 1956 (adaptado de (Carvalho, 2001)

Freguesia	Nº de prédios	Área atingida (m ²)	Prejuízos totais (escudos)
Machico	1 076	247 491	5 142 065\$30

“A história da Madeira está muito ligada às ribeiras e às torrentes que nelas correm. Grandes inundações, designadas por aluviões, provocaram, ao longo dos tempos, em alguns pontos da ilha, pelos enormes caudais e materiais carreados, muitas mortes de pessoas e animais e grandes destruições de bens materiais...” (Prada, 2000, pp. 86).

2 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

2.1 - CONCEITO DE BACIA HIDROGRÁFICA

Uma bacia hidrográfica consiste numa área projetada horizontalmente delimitada por uma linha de cumeeira e onde toda a precipitação ocorrida, precipitação não interceptada e não infiltrada, é capaz de gerar escoamento superficial e onde a sua rede de drenagem irá transportar todo o escoamento superficial precipitado até ao curso de água principal (rio de menor dimensão), irá responsabilizar-se por encaminhá-la até o oceano e onde a ribeira de Machico será objeto de estudo. Apresenta-se a bacia hidrográfica de Machico na Figura 3.

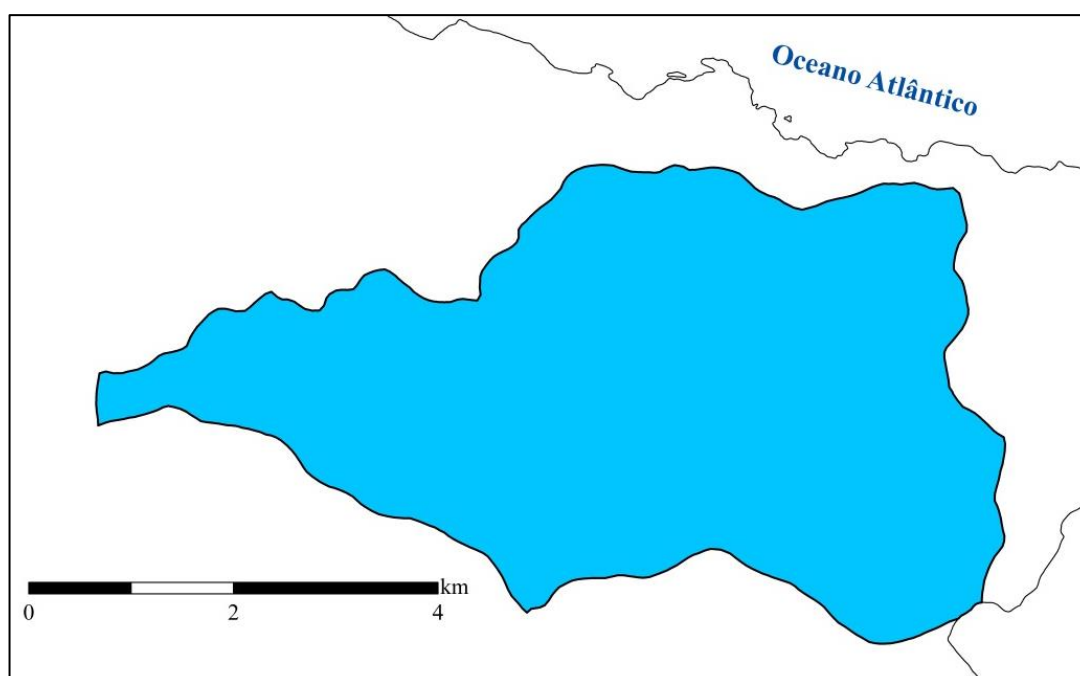


Figura 3. Bacia Hidrográfica de Machico

“A bacia hidrográfica de um rio em determinada secção transversal desse rio é o lugar geométrico dos pontos a partir dos quais o percurso superficial de uma gota de água passa na referida secção transversal, que se designa por secção de referência. O limite desse lugar geométrico designa-se por limite da bacia hidrográfica e constitui uma linha de separação de águas ou um divisor de águas.” (Hipólito & Vaz, 2011, pp.61).

2.2 - CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS

A análise de uma bacia hidrográfica quanto às suas características fisiográficas, como é o caso da geologia, solo e vegetação, pressupõe se tal bacia detém uma maior ou menor permeabilidade quanto à sua geologia, se possui grande densidade no seu coberto vegetal que diminua a erosão das vertentes, ou se o tipo de solos indica que haja maior prepotência de deslizamentos. Resumindo, características inerentes à própria gênese da bacia hidrográfica em estudo e da ilha da Madeira que poderão ser favoráveis ou não à ocorrência de cheias.

2.2.1 - Carta Geológica

Uma das propriedades físicas pode ser concedida através da análise da geologia, por intermédio da leitura da notícia explicativa da Carta Geológica da Madeira (Brum, da Silveira, et al., 2010a), apresentada publicamente no passado mês de Março, tratando-se de uma grande ajuda para a Engenharia Civil.

A Figura 4 representa um extrato da folha B da Carta Geológica da Ilha da Madeira para a zona de Machico.

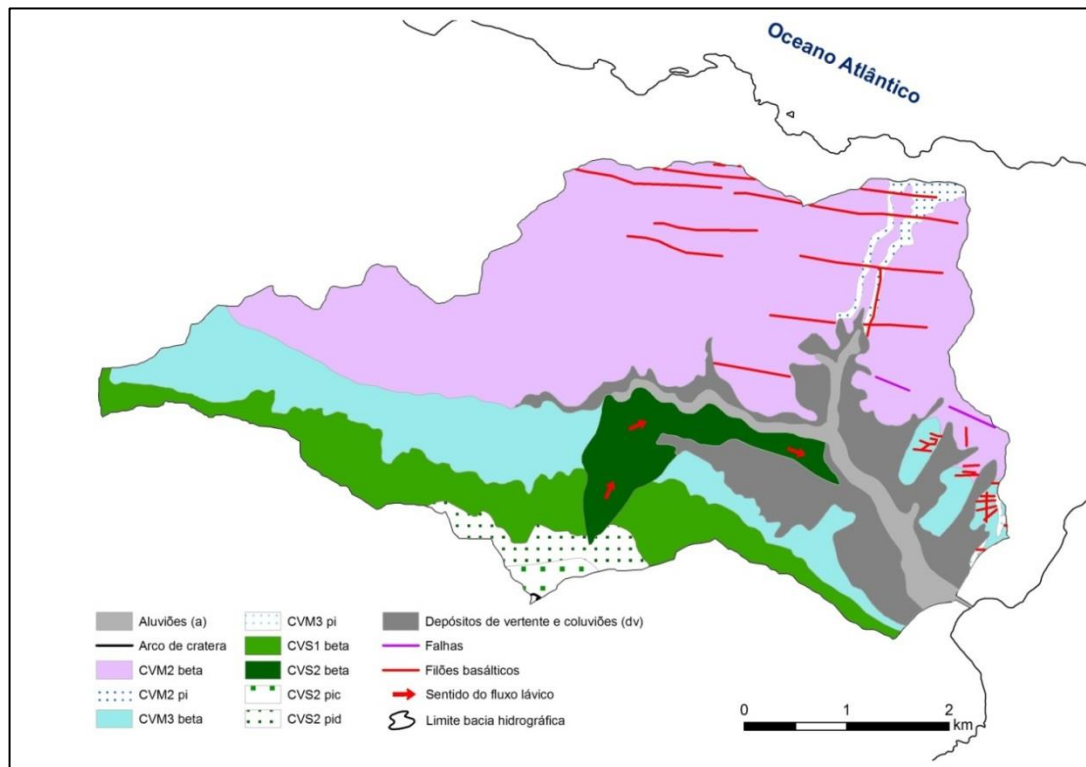


Figura 4. Carta Geológica da ilha da Madeira adaptada à bacia em estudo (Silveira, Madeira, Ramalho, Fonseca, & Prada, 2010b)

A bacia hidrográfica de Machico é composta pelos complexos vulcânicos intermédio (CVM) e Superior (CVS) que possuem mediana a boa permeabilidade.

No CVM possuímos a unidade da Penha de Águia (CVM2 beta e CVM2 pi) e do Curral das Freiras (CVM3 beta e CVM3 pi), existem ainda, a cobrir as unidades anteriores, zonas de aluviões e de depósitos de vertente e coluviões. Segue-se uma nota explicativa, presente na carta geológica, das unidades presentes no complexo vulcânico intermédio:

- O CVM2 beta é constituído por: derrames lávicos subaéreos de composição máfica, com intercalações ocasionais de tufos basálticos e produtos de atividade freatomagmática;
- O CVM2 pi é constituído por: depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufos de escórias e lapilli de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais e ocasionais produtos freatomagmáticos;
- O CVM3 beta é constituído por: derrames lávicos subaéreos de composição máfica, com intercalações de depósitos piroclásticos de queda, níveis de de tufitos e ocasionais produtos de atividade freatomagmática;
- O CVM3 pi é constituído por: depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufos de escórias e lapilli de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais, ocasionais produtos de atividade freatomagmática e níveis de tufos de cinzas traquíticas, ricas em cristais de feldspato (sanidina).

Por sua vez, o CVS é constituído pela Unidade dos Lombos (CVS1 beta) e pela Unidade do Funchal (CVS2 beta, CVS2 pid e CVS2 pic).

- O CVS1 beta é constituído por: derrames lávicos subaéreos de composição máfica, com intercalações de tufitos, depósitos piroclásticos de queda e ocasionais produtos máficos de atividade freato-magmática;
- O CVS2 beta é constituído por: derrames lávicos subaéreos de composição (basaltos), com intercalações ocasionais de piroclastos de queda (escórias, lapilli e cinzas basálticas) e produtos de atividade freato- magmática.
- CVS2 pid é constituído por: depósitos piroclásticos máficos subaéreos distais: cinzas e lapilli de queda, geralmente alterados.
- CVS2 pic é constituído por: depósitos piroclásticos máficos subaéreos: blocos

e bombas, lapilli e cinzas de cones estrombolianos/havaianos.

2.2.2 - Carta de Solos

No que respeita aos solos presentes na bacia hidrográfica de Machico, estes estão divididos em duas áreas distintas: foz e zonas de vertente. Assim sendo, na foz encontram-se os depósitos de praia (DP) e acumulações salinas (S). Por outro lado, nas zonas de vertente os solos presentes são:

- Vertisols (VR) – Eutric Vertisols (VRe1 e VRe4);
- Cambisols (CM) – Chromic Cambisols (CMx3) e Humic Cambisols (CMu1);
- Terreno Rochoso – Terreno Rochoso Êutrico (TRe3);
- Andosols (AN) – Umbric Andosols (ANu2, ANu8, ANu9, ANu18);
- Phaeozems (PH) – Haplic Phaeozems (PHh11, PHh16);
- Fluvisols (FL) – Eutric Fluvisols (FLe).

Posto a breve descrição dos solos presentes na bacia hidrográfica de Machico e de acordo com a nota explicativa da Carta de Solos da Ilha da Madeira (Ricardo, Câmara, & Ferreira, 1992), descrevo de seguida a mancha bem como o solo associado, as unidades identificadas, a altitude, o clima e ainda a litologia:

- Mancha nº16 (FLe): a unidade dominante é a *Eutric Fluvisols*, que se encontra a uma altitude entre 0 a 200m, a uma temperatura média anual de 17,5 °C. A precipitação anual é de 800 a 1200 mm e a litologia é constituída por aluviões. Este tipo de solo caracteriza-se por serem depósitos não consolidados muito heterogéneos, sobretudo de origem aluvionar, localizados nas margens das linhas de água. Consiste em material terroso e/ou fragmentos rochosos de dimensão variada e de natureza basáltica;
- Mancha nº17 (VRe1): a unidade dominante é a *Eutric Vertisols* com inclusões dos solos *Haplic Phaeozems*, que se encontra a uma altitude entre 0 a 400m, a uma temperatura média anual de 17,5 °C. A precipitação anual é de 800 a 1200 mm e a litologia é constituída rochas basálticas. Este tipo de solo contém argila (montmorilonite > 50%), ou seja, é um solo pouco permeável;
- Mancha nº18 (PHh16): a unidade dominante é a *Haplic Phaeozems* com sub dominâncias do solo *Eutric Vertisols*, que se encontra a uma altitude entre 50

a 200/400m, a uma temperatura média anual de 17,5 °C. A precipitação anual é de 800 a 1000 mm e a litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por uma elevada plasticidade e adesividade, ou seja, são solos muito impermeáveis;

- Mancha nº19 (PHh11): a unidade dominante é a *Haplic Phaeozems* com sub dominâncias do solo *Chromic Cambisols* e com inclusões dos solos *Eutric Vertisols*, *Eutric Cambisols* e *Leptosols*. Encontra-se a uma altitude entre 50/100 a 100/200m, a uma temperatura média anual de 17,5 °C e precipitação anual de 800/1000 a 1000/1200 mm. A litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por uma elevada plasticidade e adesividade, ou seja, são solos muito impermeáveis;
- Mancha nº 20 (ANu9): a unidade dominante é a *Umbric Andosols* com sub dominâncias do solo *Leptosols* e com inclusões dos solos *Haplic Andosols* e *Mollic Andosols* encontra-se a uma altitude entre 400 a 600/800 m, a uma temperatura média anual de 17,5 a 15/12,5 °C. A precipitação anual é de 700 a 1400 mm e a litologia é constituída essencialmente por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por diversos afloramentos rochosos e alguma pedregosidade, isto é, trata-se de um solo com permeabilidade média;
- Mancha nº 27 (ANu2): a unidade dominante é a *Umbric Andosols* com sub dominâncias do solo *Haplic Andosols* e com inclusões do solo *Leptosols*, que se encontra a uma altitude entre 200/400 a 600/800m e a uma temperatura média anual de 17,5/15 a 15/12,5 °C. A precipitação anual é de 1200 a 1600/2000 mm e a litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por alguma pedregosidade, o que tornará este solo pouco permeável;
- Mancha nº 28 (ANu18): a unidade dominante é a *Umbric Andosols* com sub dominâncias do solo *Dystric Andosols* e *Humic Andosols* e com inclusões do solo *Leptosols* e *Haplic Andosols*, encontra-se a uma altitude entre 200/400 a 400/600m, a uma temperatura média anual de 17,5/15 a 15/12,5 °C. A precipitação anual é de 1200/1400 a 1600/2000 mm e a litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por alguns afloramentos rochosos o que torna este solo pouco permeável;
- Mancha nº 29 (CMu1): a unidade dominante é a *Humic Cambisols* com sub

dominâncias do solo *Umbric Andosols* e *Dystric Andosols* e com inclusões do solo *Haplic Andosols*, encontra-se a uma altitude entre 200 a 400m, a uma temperatura média anual de 17,5 a 15 °C. A precipitação anual é de 1200 a 1400mm e a litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por alguns afloramentos rochosos o que notará alguma permeabilidade;

- Mancha nº 30 (CMx3): a unidade dominante é a *Chromic Cambisols* com sub dominâncias do solo *Eutri Andosols* e com inclusões do solo *Dystric Andosols*, encontra-se a uma altitude entre 50/100 a 200m, a uma temperatura média anual de 17,5⁺ a 17,5/15 °C. A precipitação anual é de 1000/1200 a 1200/1400mm e a litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por alguns afloramentos rochosos o que notará alguma permeabilidade;
- Mancha nº 31 (VRe4): a unidade dominante é a *Eutric Vertisols* com inclusões dos solos *Eutric Cambisols*, *Chromic Cambisols* e *Haplic Phaeozems*, encontra-se a uma altitude entre 0 a 100m, a uma temperatura média anual de 17,5⁺ a 17,5/15°C. A precipitação anual é de 800 a 1200mm e a litologia é constituída essencialmente por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por pouca pedregosidade;
- Mancha nº 32 (TRe3): a unidade dominante é Terreno Rochoso Êutrico com sub dominâncias do solo *Chromic Cambisols* e com inclusões do solo *Eutric Cambisols*, encontra-se a uma altitude entre 0 a 200/400m, a uma temperatura média anual de 17,5⁺ a 17,5/15 °C. A precipitação anual é de 800 a 1200mm e a litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por muitos afloramentos rochosos o que notará muita permeabilidade;
- Mancha nº 81 (ANu8): a unidade dominante é a *Umbric Andosols* com sub dominâncias do solo *Leptosols* e com inclusões do solo *Haplic Andosols*, encontra-se a uma altitude entre 200/400 a 1400/1600m, a uma temperatura média anual de 17,5 a 10 °C. A precipitação anual é de 1200/1400 a 2400/2800mm e a litologia é constituída por rochas basálticas. Este tipo de solo caracteriza-se por elevada pedregosidade à superfície e muitos afloramentos rochosos o que notará muita permeabilidade.

Na Figura 5 apresenta-se o extrato da carta de solos da ilha da Madeira para a bacia em estudo, onde se verifica que o tipo de solo com maior predominância na bacia são os *Andosols*.

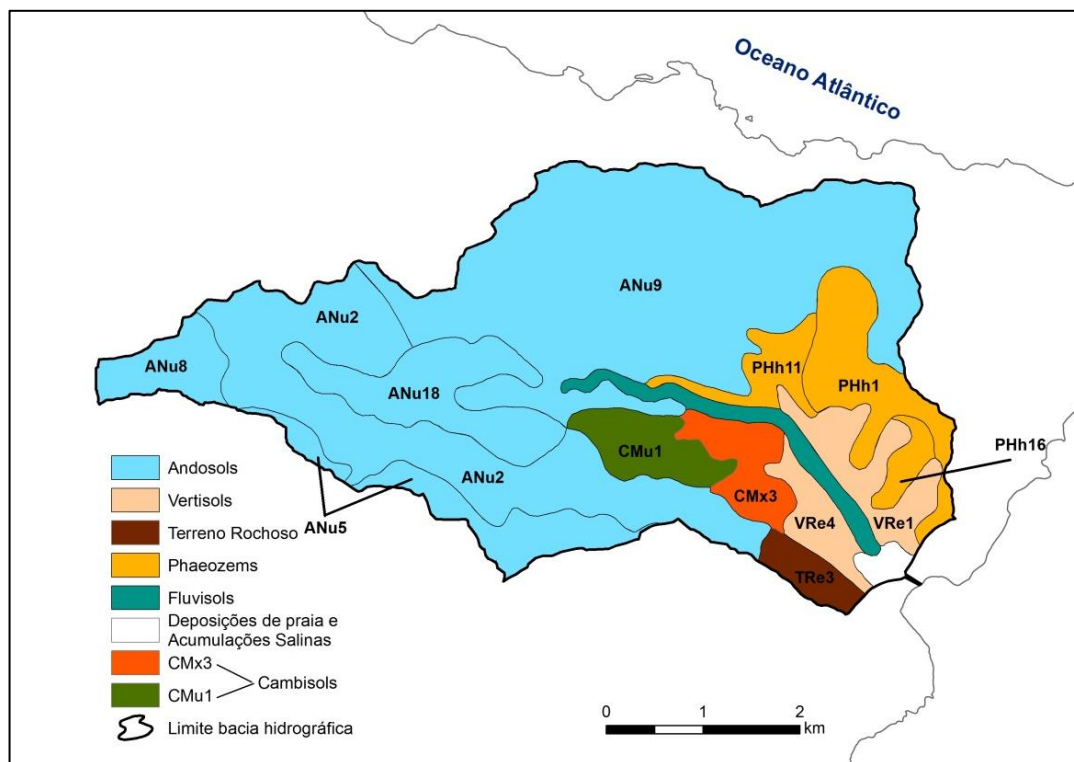


Figura 5. Carta de Solos da Ilha da Madeira adaptada à bacia em estudo (adaptado de Carta de Solos da Ilha da Madeira, 1992)

2.2.3 - Vegetação

Segundo a Carta dos Solos da ilha da Madeira (Ricardo *et al.*, 1992), a vegetação presente na bacia hidrográfica de Machico é muito diversificada. Assim sendo, abordarei esta temática tendo em conta as mesmas manchas referidas na carta de solos, descreverei a vegetação que nesta se encontra:

- Superfícies agrícolas com várias árvores de fruto - Mancha nº16;
- Culturas, nomeadamente bananal, cana-de-açúcar e hortícolas - Mancha nº17;
- Superfícies agrícolas e florestais (de espécies exóticas) - Mancha nº18;
- Culturas - Mancha nº19;
- Culturas, incluindo fruteiras das regiões temperadas. Pinhal. Floresta de loureiros - Mancha nº20;
- Matas de espécies exóticas e mato, essencialmente - Mancha nº27;
- Culturas, incluindo fruteiras de regiões temperadas - Mancha nº28;

- Culturas incluindo vinha - Mancha nº29, 30 e 31;
- Culturas e Mato - Mancha nº32;
- Mato, prado natural de altitude, matas de espécies exóticas e culturas, incluindo vinha - Mancha nº81.

2.3 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

2.3.1 - Localização Geográfica

Machico é um concelho pertencente à Região Autónoma da Madeira (RAM) que tem de área 68,3 km². Encontra-se dividido em cinco freguesias: Machico, Água de Pena, Santo António da Serra, Porto da Cruz e Caniçal (CMM, 2013).

A população é de 21 828 habitantes de acordo com os últimos censos (2011). Na economia machiquense predominam como principais atividades o comércio, serviços de hotelaria, pesca, restauração, construção civil, agropecuária, turismo entre outros (CMM, 2013).

Este concelho do leste da ilha da Madeira está rodeado a sudoeste pelo concelho de Santa Cruz, a noroeste pelo concelho de Santana e a norte, sul e este é banhado pelo Oceano Atlântico.



Figura 6. Bacia Hidrográfica inserida no Arquipélago da Madeira

A bacia hidrográfica de Machico (BHM) visualizada na Figura 6 encontra-se inserida nas Freguesias de Santo António da Serra, Água de Pena e Machico, pertencentes ao concelho de Machico. Sendo que cerca de 0,25 km² (o equivalente de 1% da área total da bacia hidrográfica de Machico) estão incluídos na freguesia de Santo António da Serra, concelho de Santa Cruz.

Na Figura 7 e Figura 8 visualiza-se a bacia hidrográfica de Machico, bem como o seu contorno sugerido pelas montanhas e ainda o perfil final canalizado da ribeira de Machico.



Figura 7. Bacia Hidrográfica de Machico (Fonte: M Virovets 2007)



Figura 8. Vista da parte final da Bacia Hidrográfica e ribeira de Machico (Fonte: RolloMaster 2008)

Como se visualiza na Figura 9, a bacia em estudo está limitada por sete bacias hidrográficas nomeadamente: a norte e nordeste encontra-se a bacia hidrográfica do Juncal e Caniçal respetivamente, a oeste encontra-se a bacia de São Roque do Faial, a sudoeste deparamo-nos com a bacia hidrográfica de Santa Cruz e por fim, a sul encontra-se a bacia hidrográfica do Seixo e do Moreno.



Figura 9. Bacias vizinhas da bacia em estudo

A bacia hidrográfica de Machico encontra-se georreferenciada através da Carta Militar a uma escala de 1:25.000, sendo as coordenadas retangulares: M=34+800m e P=21+375m. Coordenadas recolhidas através da Carta Militar de Portugal - Machico (Ilha da Madeira), na escala de 1:25.000, folhas 6 (1975) e 7 (1974), Serviços Cartográficos do Exército (IGEOE, 1974).

Está limitada geograficamente pelos paralelos 32° 45' 09'' N e 32° 42' 41'' N, e meridianos 16° 51' 01'' W e 16° 45' 16'' W.

2.3.2 - Área de Drenagem

A área de drenagem, A , é a área da projeção horizontal da superfície da bacia hidrográfica, sendo normalmente determinada por planimetria ou por utilização de SIG (sistema de informação geográfica) (Hipólito & Vaz, 2011).

Determinou-se a área da bacia utilizando o *software computacional* de sistema de informação geográfica (ArcGis), sendo que o valor determinado foi de 24,6 km².

É de referir que quanto maior for a área da bacia hidrográfica maior será o caudal de ponta de cheia, pois a fórmula utilizada para o seu cálculo, a do caudal de ponta de cheia pelo método racional, remete a que a área esteja inteiramente relacionada.

2.3.3 - Perímetro

O perímetro é o comprimento da linha limite que delimita a bacia hidrográfica que se encontra representada no plano horizontal. É necessária uma grande precisão para que não haja um perímetro a mais ou a menos daquele que efetivamente existe.

O processo efetuado para a sua determinação foi realizado através dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) com a utilização do programa ArcGis. O perímetro adotado foi de aproximadamente 25 km.

2.3.4 - Aspetos relacionados com a forma da bacia

No que concerne à forma da bacia hidrográfica é importante ter em conta diferentes aspetos, tais como, o índice de compacidade, fator de forma e índice de alongamento.

a) Índice de compacidade de Gravelius (K_C) ou coeficiente de compacidade

Este índice relaciona o perímetro da bacia com a sua área correspondente. A forma da bacia irá influenciar ou não a suscetibilidade de ocorrência de cheias. Se:

- $K_C < 1$ tem-se uma bacia arredondada;
- $K_C = 1$ tem-se uma bacia circular;
- $K_C = 1,128$ tem-se uma bacia quadrada;
- $K_C > 1,128$ é necessário posterior cálculo do índice de alongamento, K_L ;
- $K_C > 2$ tem-se uma bacia alongada.

Conforme o valor se for afastando da unidade, ou seja da forma circular, mais irregular será a forma da bacia.

$$K_C = 0,282 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,282 \cdot \frac{24,97}{\sqrt{24,58}} = 1,42 \quad (1)$$

Em que: “P” é o perímetro (km) e “A” é a área da bacia (km²).

O valor determinado indica que temos um Índice de Gravelius superior a 1,128, ou seja será necessário calcular o índice de alongamento, caso contrário, e se o K_C nos indicasse um valor próximo da unidade indicaria uma maior tendência para ocorrência de cheia imaginando uma precipitação instantânea e regular na bacia (Hipólito & Vaz, 2011).

b) Fator de forma (K_F)

O fator de forma é a relação entre o comprimento da bacia “L” e a sua largura média “b”. O comprimento da bacia é medido pelo curso de água mais longo desde a cabeceira mais distante da bacia até a desembocadura, por outro lado a largura média é obtida pela divisão da área da bacia pelo comprimento da bacia.

As bacias que têm forma estreita ou irregular são bacias com fator de forma baixo, sendo que nestas situações o acontecimento de chuvas intensas em toda a bacia de maneira uniforme e cobrindo-a totalmente é menos possível. Assim sendo, bacias com K_F baixos terão tendência para cheia com pontas de cheia menores dos que outras com fatores de forma elevados (Hipólito & Vaz, 2011).

$$K_F = \frac{A}{L^2} = \frac{24,58}{12,56^2} = 0,16 \quad (2)$$

em que: “A” é a área da bacia (km²) e “L” o comprimento do curso de água principal da bacia (km).

Verifica-se que na Bacia Hidrográfica de Machico existe um fator de forma baixo, ou seja, propício a pontas de cheias menores.

c) Índice de alongamento (K_L)

Este parâmetro relaciona, de forma adimensional, o comprimento com a largura da bacia, como se quiséssemos introduzir a bacia num “retângulo” com perímetro e

área iguais ao da bacia em estudo.

$$K_L = \frac{L}{b} \quad (3)$$

com: “L” como comprimento (km) e “b” largura (km).

Assim sendo, a variável “L” e “b” apresentam-se nas seguintes equações e os seguintes valores:

$$L = \frac{K_C \cdot \sqrt{A}}{1,128} \cdot \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C} \right)^2} \right| = 10,04 \text{ km} \quad (3a)$$

$$b = \frac{K_C \cdot \sqrt{A}}{1,128} \cdot \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C} \right)^2} \right| = 2,45 \text{ km} \quad (3b)$$

com: “K_C” como Índice de Gravelius (-) e “A” é a área da bacia (km²).

$$K_L = \frac{L}{b} = \frac{10,04}{2,45} = 4,10 \quad (3c)$$

Como K_L = 4,10 > 2, tem-se uma bacia alongada, o que implica um menor risco de cheia: percursos mais longos, maiores tempos de escoamento, logo maior tempo de resposta.

2.4 - CARACTERÍSTICAS DO RELEVO

2.4.1 - Curva Hipsométrica

Para a determinação do relevo foi usada a Hipsometria, técnica onde a representação das altitudes é realizada através das curvas de nível.

As áreas entre cotas foram medidas, bem como, a área acima da curva de nível mais alta existente na bacia, curva de nível dos 1050 m de altitude, através do programa ArcGis utilizado neste dissertação.

No Anexo I é apresentada uma tabela que contém informação de dados para constituir a curva hipsométrica e curva hipsométrica adimensional de modo definir-se o estado de maturidade da bacia e ainda outros parâmetros.

A metodologia para representar a curva hipsométrica foi a seguinte (efetuada em ArcGis) com a representação de 50 em 50m por parte das altitudes das curvas de nível:

1. No ArcCatalog (base de dados) foi criada uma “Feature Class” “Curvas_de_nivel_Machico” em que foi designada como polígono;
2. No ArcMap através do “editor” foi realizada exaustivamente a delimitação de todas as curvas de nível de 50 em 50m de modo a que o polígono efetuado indicasse a área compreendida entre cada duas curvas de nível;
3. Depois de determinadas as áreas entre as diferentes curvas de nível consecutivas, construiu-se a tabela que se encontra no Anexo I. Com as áreas acumuladas acima da cota e a partir da altitude máxima;
4. De seguida projetaram-se as cotas de todas as curvas de nível e com a respetiva área acima destas como se poderá visualizar na Figura 11;
5. Na Figura 10 visualiza-se a bacia hidrográfica de Machico com a representação das curvas de nível com diferentes cores.

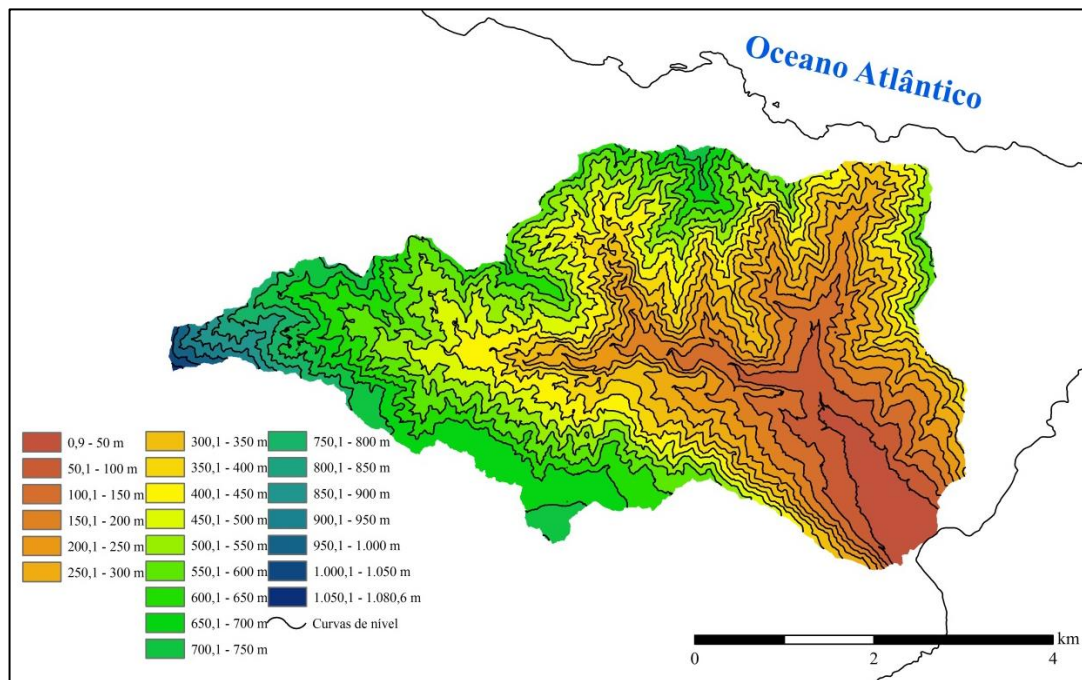


Figura 10. Curvas de nível

Segundo Quintela (1996), a curva hipsométrica relaciona as altitudes da superfície do terreno (em ordenadas) com as áreas das zonas da bacia (em abcissas) situadas acima dessas altitudes.

É possível através da análise gráfica e de cálculo, definir os parâmetros como: a

altitude máxima e mínima, altitude média e a altura média.

A altitude máxima determinada através do modelo digital do terreno (MDT) foi a de $Z_{\text{máx}} = 1080,6$ m.

Na ilha da Madeira todas as bacias têm em comum a sua altitude mínima que são os $Z_{\text{min}} = 0$ m.

A amplitude altimétrica é apresentada como sendo a diferença entre o ponto de altitude mais alto e a secção de referência (foz). No caso da bacia em estudo verifica-se que a amplitude altimétrica é igual à cota máxima, pois esta desagua no oceano (Christofolletti, 1980).

Acerca da altitude média, esta consiste no quociente entre o volume abaixo da superfície do terreno e a área da bacia.

$$Z_{\text{méd}} = \frac{1}{A_i} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} \cdot (z_i + z_{i+1}) \cdot A_i = 409,13 \text{ m} \quad (4)$$

É uma característica com grande efeito em variáveis hidrometeorológicas, como a precipitação e a temperatura (Hipólito & Vaz, 2011).

Em relação à altura média ($h_{\text{méd}}$), esta coincide com a altitude média devido à bacia hidrográfica apresentar como altitude mínima 0m.

$$h_{\text{méd}} = Z_{\text{méd}} - Z_{\text{min}} = 409,13 \text{ m} \quad (5)$$

Assim sendo, a altura média permite-nos ter a ideia se a bacia tem um grande declive ou porventura este é menos acidentado. As bacias com grande altura média apresentam declive bem acentuado, que poderá ser aproveitado para produção de energia hidroelétrica (Hipólito & Vaz, 2011).

Em suma, a Figura 11 representa os aspetos já mencionados anteriormente, assim como, a área acima de cada curva de nível.

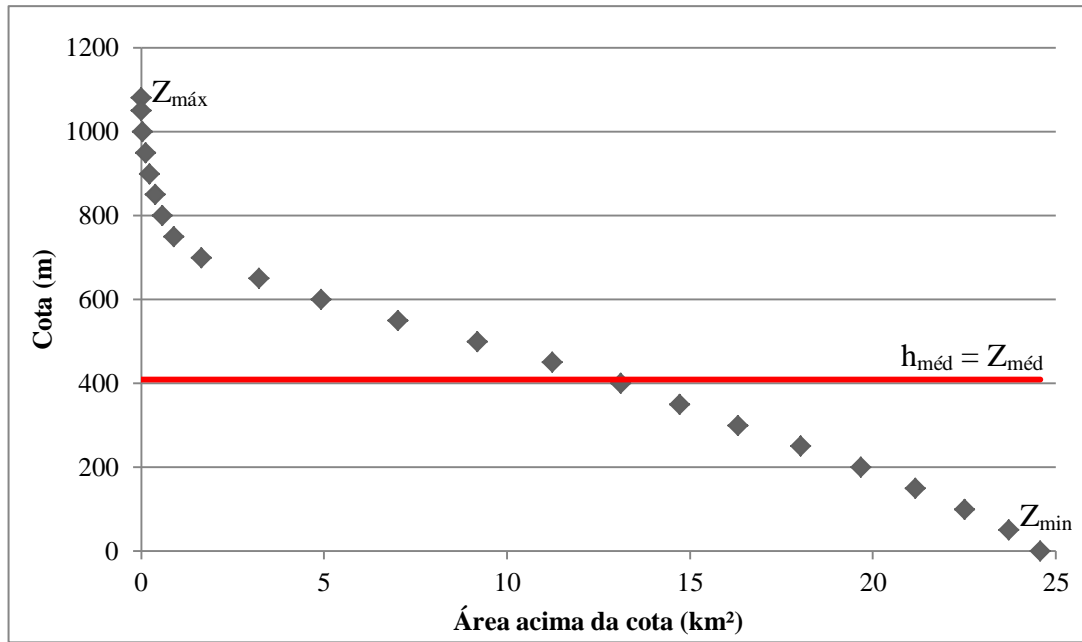


Figura 11. Curva hipsométrica

2.4.2 - Curva Hipsométrica Adimensional

O estado de maturidade de uma bacia poder-se-á observar pela representação gráfica da fração entre a área da curva de nível e a área total da bacia, e ainda com a correspondente altitude de cada curva de nível, neste caso de 50 em 50m. Na Figura 12 pode-se observar o que significa uma bacia ser jovem, ou seja, pouco erodida, uma bacia antiga.

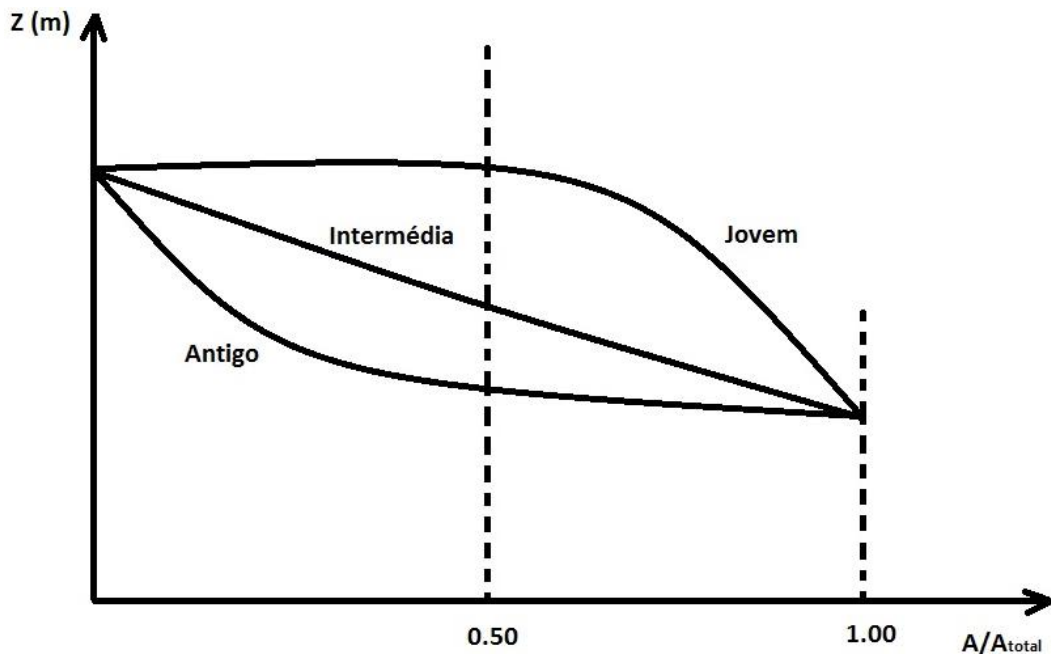


Figura 12. Estado de maturidade de uma Bacia

Esta curva estabelece graficamente a área acima da cota em percentagem com a altitude a que as curvas de nível se encontram. Pela linha que une os pontos a que correspondem $Z_{\text{máx}}$ e Z_{min} existentes na Figura 13 pode-se observar que a bacia em estudo já se apresenta erodida, ou seja, é uma bacia madura ou antiga.

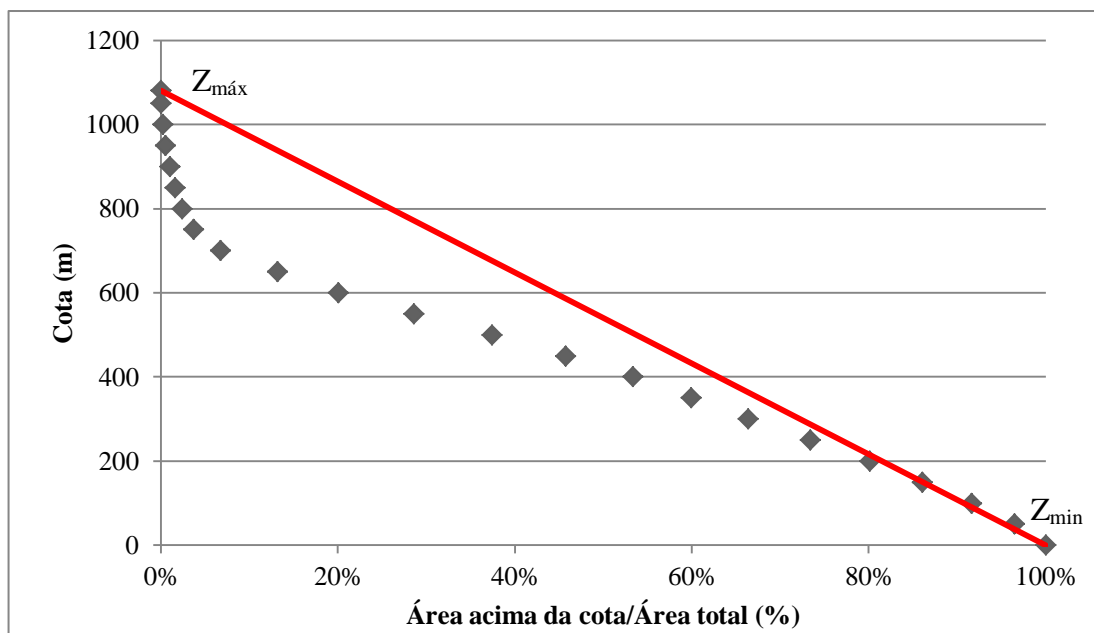


Figura 13. Curva hipsométrica adimensional

2.4.3 - Perfil Longitudinal

O perfil longitudinal de um rio, ribeira (linha de água principal de uma bacia hidrográfica) ou ribeiro (linha de água principal de uma sub-bacia) é representado graficamente pela altitude (Z) de 50 em 50m e pela distância desde a intersecção da linha de água principal de uma curva de nível até à foz (secção de referência).

Visualiza-se na Figura 14 a representação do curso de água principal existente na bacia.

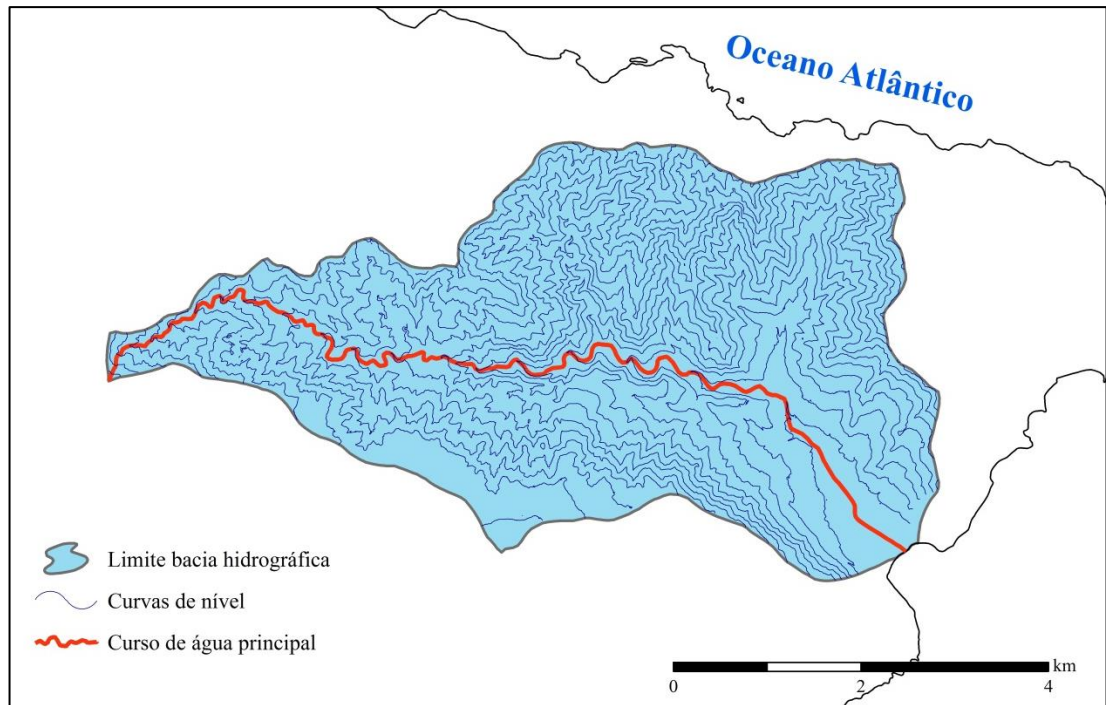


Figura 14. Curso de água principal

No Anexo II está patente os dados que permitiram traçar o gráfico do perfil longitudinal do curso de água principal.

Na Figura 15 apresenta-se o perfil longitudinal da bacia em estudo em que a linha de água mencionada acima está projetada em duas dimensões.

Como conclusão tem-se que a ribeira de Machico apresenta um declive baixo em comparação às ribeiras existentes no concelho do Funchal, estudadas no relatório de base aquando das cheias de 20 de Fevereiro de 2010.

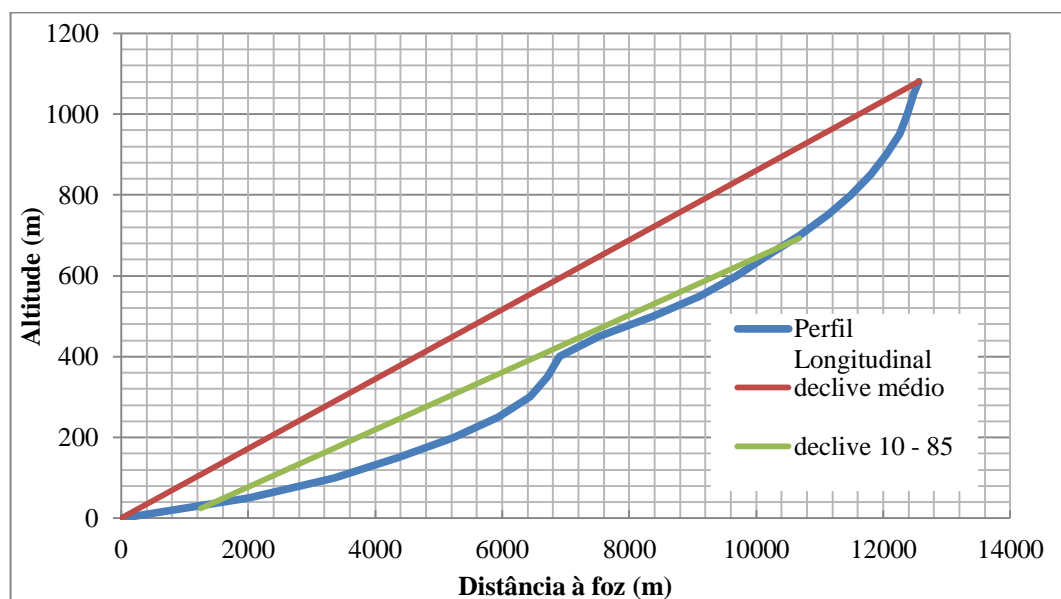


Figura 15. Perfil longitudinal do curso de água principal da ribeira de Machico

Na Figura 16 observam-se os perfis longitudinais das ribeiras do concelho do Funchal aquando do estudo das aluviões na RAM com base no evento aluvionar de 20 de Fevereiro de 2010.

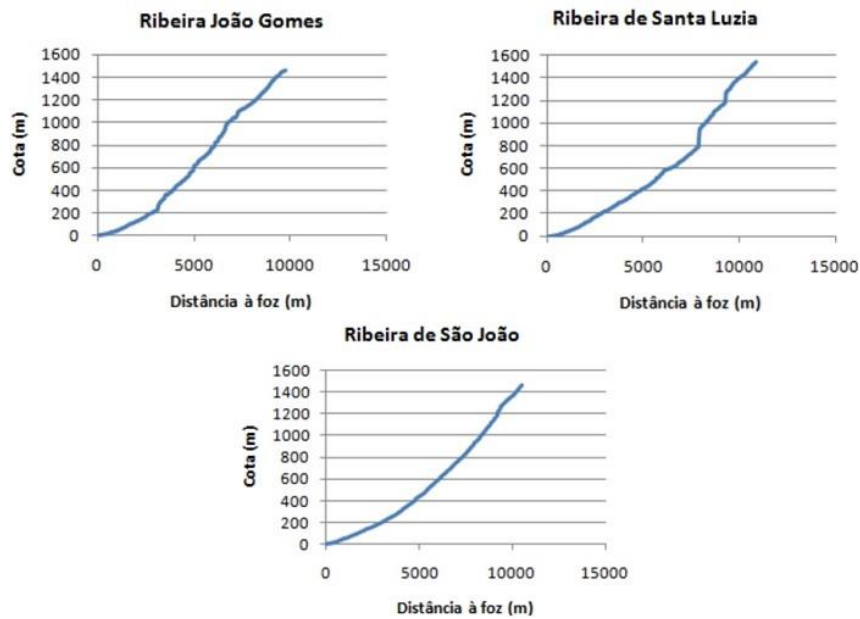


Figura 16. Perfis longitudinais das Ribeiras do Funchal (adaptado EARAM 2010)

2.4.4 - Declive médio ou Índice de declive de Roche

O índice de declive de Roche é também denominado de declive médio, sendo que este declive é estudado para toda a bacia. Este índice é afetado se a bacia tiver pequenas áreas de grande altitude (Hipólito & Vaz, 2011). Assim sendo tem-se:

$$i_{méd} = \frac{Z_{máx} - Z_{mín}}{L} \cdot 100\% = \frac{1078 - 0}{12561} \cdot 100\% = 8,6\% \quad (6)$$

$$I_{Roche} = \frac{Z_{máx} - Z_{mín}}{L} = \frac{1078 - 0}{12561} = 0,086 \quad (7)$$

em que a primeira equação relaciona o declive médio e a segunda equação identifica o índice de declive de Roche, tem-se que: $Z_{máx}$ (m) como a altitude máxima, $Z_{mín}$ (m) que é a altitude mínima e L (m) que corresponde ao comprimento do curso de água principal.

2.4.5 - Declive 10-85

É necessário calcular o declive 10-85, pois este exclui os 10% iniciais e 15% finais do comprimento total do curso de água principal, ou seja, os trechos de menor

e maior declividade respetivamente (Quintela, 1996). Deste modo obtém-se um valor mais próximo do declive real do principal curso de água. Os valores Z_{85} e Z_{10} foram calculados utilizando ferramentas SIG pelo programa ArcGis.

$$i_{10-85} = \frac{Z_{85} - Z_{10}}{0,75 \cdot L} \cdot 100\% = \frac{692,84 - 24,01}{0,75 \cdot 12561} \cdot 100\% = 7,10\% \quad (8)$$

em que: Z_{85} e Z_{10} (m) são as altitudes referentes a 85% e 10% do comprimento do curso de água principal e L (m) corresponde ao comprimento total da linha de água principal.

2.4.6 - Índice de Relevô

O índice de relevô é a razão entre a amplitude altimétrica e o comprimento da bacia, em que este é medido paralelamente ao curso de água principal. É um indicador da inclinação da bacia influenciando, por isso, a velocidade de escoamento, ou seja, quanto maior for esse índice de relevô da bacia mais rápida será a chegada das águas à foz (Ferreira, 2010).

Verifica-se que na bacia hidrográfica de Machico esse valor é baixo em comparação com outras bacias do concelho do Funchal.

$$I_{relevô} = \frac{A_{alt}}{L} = \frac{1078}{12561} = 0,086 \quad (9)$$

em que: A_{alt} (m) e L (m) respetivamente amplitude altimétrica e comprimento da linha de água principal.

Acontece que, como as bacias no Arquipélago da Madeira têm uma dada altitude máxima e apresentam sempre a mesma altitude mínima, os parâmetros como: índice de declive de Roche e índice de relevô serão sempre iguais.

2.5 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE DRENAGEM

2.5.1 - Rede de Drenagem

A rede de drenagem é um conjunto de linhas de água que encaminham a água precipitada até à cota mais baixa (secção de referência). Uma rede de drenagem poderá ser complexa ou simples, dependendo da ramificação que esta apresenta, sendo que o escoamento superficial se processará com maior ou menor rapidez,

aumentando ou diminuindo o maior risco de cheia respetivamente.

A bacia hidrográfica de Machico desagua no oceano atlântico, logo o tipo de drenagem é exorreica. Por sua vez o padrão de drenagem da bacia assemelha-se à ramificação de uma árvore, denominando-se como dendrítica.

A rede de drenagem é a facilidade com que água se escoia, sendo esta um importante fator na ocorrência de cheias. É caracterizada pela densidade de drenagem, pelo percurso médio à superfície do terreno, pela razão de bifurcação média, pelo perfil longitudinal do curso de água, pelo declive médio e pelo declive 10-85.

2.5.2 - Hierarquização pelo Método de Strahler

Este método, bem como outros existentes, como por exemplo o método de Horton ou o método de Shreve consistem no estudo do grau de ramificação da rede hidrográfica da bacia em estudo (Hipólito & Vaz, 2011).

Quanto maior for o grau de ramificação da bacia proporcionará uma maior ocorrência de cheias, pois a complexidade da rede fará com que a precipitação ocorrida através do escoamento superficial gerado encontre logo uma linha de água em que este será encaminhado rapidamente. Ao contrário acontece com uma rede ramificada simples ou de pouca ordem, fazendo com que o escoamento superficial que infiltre antes de encontrar uma linha de água.

Uma das formas de hierarquizar a ramificação existente numa bacia consiste em realizar a contagem de cada curso de água pela sua ordem (1, 2, 3, 4...).

No exemplo presente na Figura 17 começa-se por organizar a rede de drenagem pela 1.^a ordem, de montante para jusante.

Assim sendo, se tivermos dois cursos de água de ordem 1, o cruzamento destes dois cursos irá originar um curso de água de ordem superior.

Por outro lado, se possuirmos o cruzamento de um curso de água de ordem 1 com outro de ordem 2, o curso de água originado irá manter-se na ordem 2.

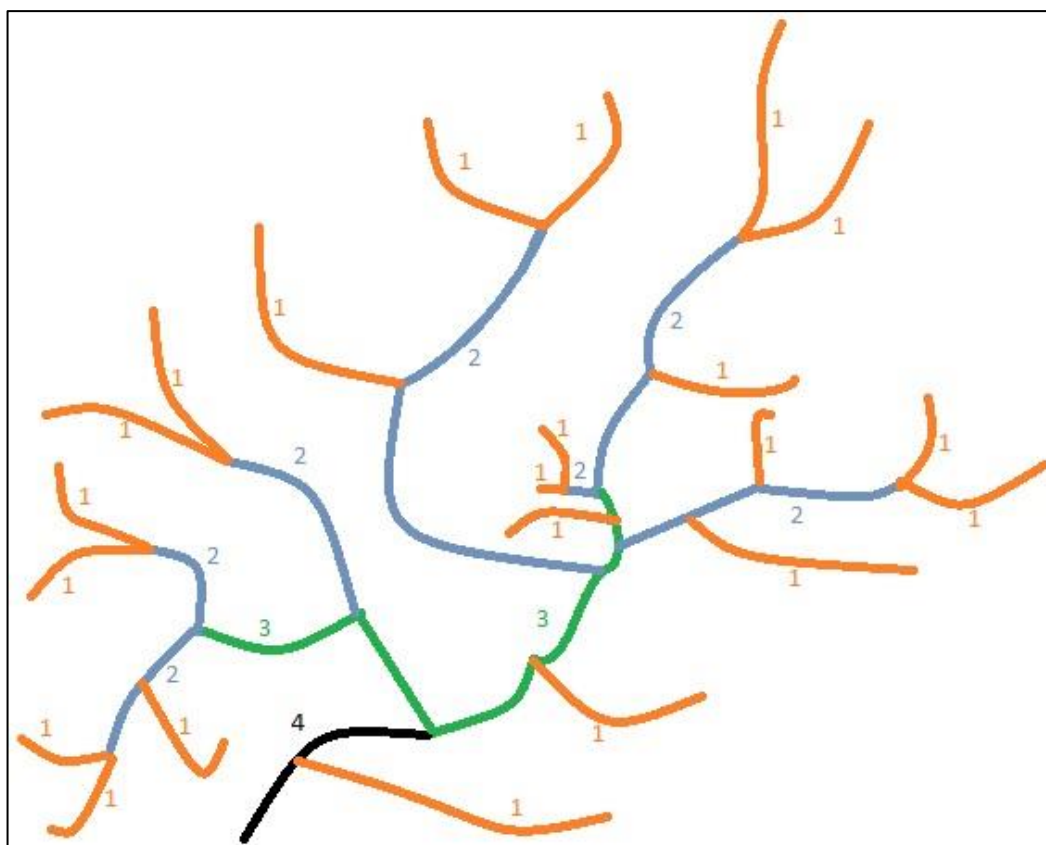


Figura 17. Exemplo de hierarquização de Strahler

A contagem dos cursos de água do exemplo anterior apresenta-se na seguinte Tabela 2:

Tabela 2. Contagem dos trechos do exemplo anterior

Ordem	Nº de cursos de água
1	22
2	7
3	2
4	1

Quanto à rede de drenagem (rede hidrográfica) da bacia hidrográfica de Machico, como se poderá visualizar na Figura 18, esta trata-se de uma rede pouco complexa e de ordem 4.

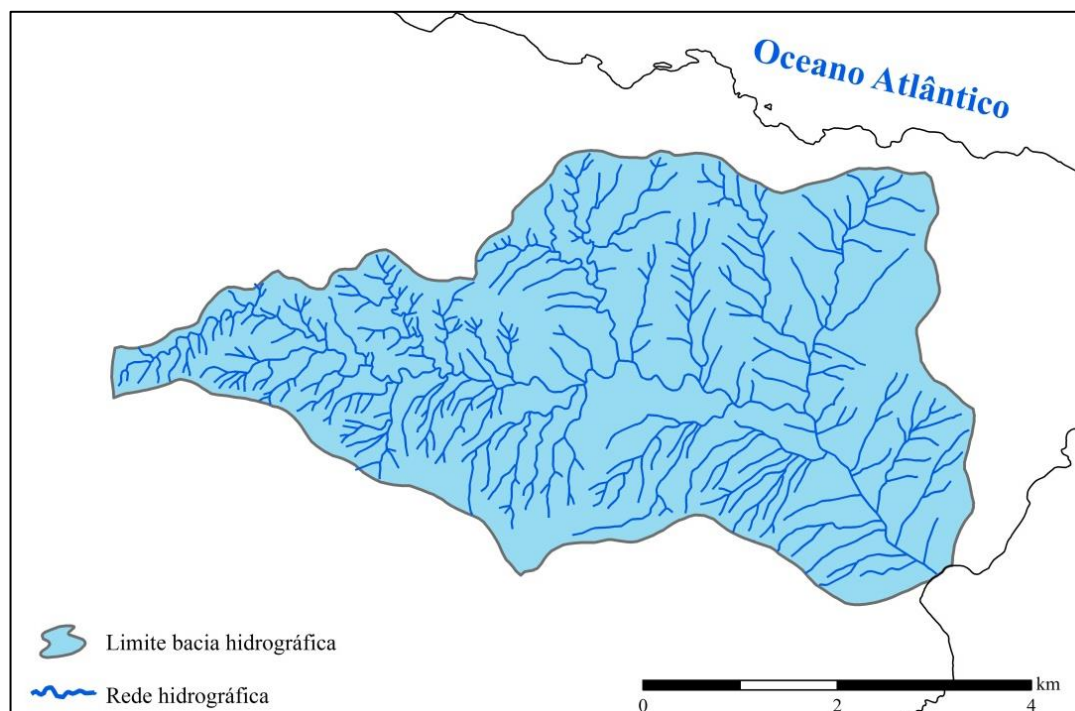


Figura 18. Rede de hidrográfica da bacia hidrográfica de Machico

A hierarquização reflete o grau de ramificação ou bifurcação da bacia. Utilizou-se a classificação de Strahler, que consiste em dividir os cursos de água segundo um número de ordem, em que os cursos de água sem tributários são de 1.^a ordem. Se confluem dois cursos de água da mesma ordem esta sobe um, caso contrário, prevalece a maior ordem.

Obteve-se assim a seguinte Tabela 3 referente à ordem da bacia, segundo a hierarquização de Strahler.

Tabela 3. Hierarquização da rede hidrográfica da bacia em estudo pelo Método de Strahler

Ordem	N.º de cursos de água	Comprimento (km)
1	297	80,71
2	69	33,04
3	15	15,14
4	1	9,42
Total	382	138,31

2.5.3 - Razão de bifurcação

A razão de bifurcação é calculada com base na ordem dos cursos de água e na

contagem dos cursos de água de ordem 1.

$$R_{b_{méd}} = k \cdot \sqrt[k]{N_1} = 4 \cdot \sqrt[4]{382} = 6,7 \quad (10)$$

em que: N (-) corresponde ao número de cursos de água de ordem 1 e onde k (-) representa a ordem dos cursos de água final.

2.5.4 - Densidade de drenagem (D_d)

A densidade de drenagem é a relação entre o comprimento total dos cursos de água de uma bacia e a área total da desta.

A densidade de drenagem exerce influência na formação de cheias e no escoamento anual, por dela depender o percurso do escoamento superficial sobre o terreno e, portanto, a maior ou menor oportunidade para a infiltração e a evapotranspiração. Esta depende da escala da carta em que é medida, quanto menor a escala maior o pormenor. Assim sendo, uma densidade de drenagem elevada corresponde a uma bacia impermeável e/ou relevo acentuado, o que irá proporcionar maior risco de cheia. Por outro lado D_d baixa subentende-se bacia permeável e/ou relevo suave ocasionando menor risco de cheia.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} = \frac{138,31}{24,58} = 5,63 \text{ km/km}^2 \quad (11)$$

em que $\sum L_i$ (km) é o somatório comprimento total dos cursos de água, e A é a área da bacia (km²).

A densidade de drenagem de uma bacia varia entre 0,5km/km² nas bacias mal drenadas e 3,5 km/km² ou mais para bacias bem drenadas (Hipólito & Vaz, 2011).

Como $D_d = 5,63 \text{ km/km}^2$ pode-se concluir que se está na presença de uma bacia bem drenada, isto é, com uma densidade de drenagem elevada, logo um maior risco de cheia, pois tem-se uma bacia impermeável e relevo acentuado.

2.5.4 - Percurso médio sobre o terreno

É o percurso médio que uma gota precipitada dista desde o limite da bacia até encontrar um curso de água. Assim sendo, tem-se a seguinte equação:

$$\bar{P}_L = \frac{l}{2 \cdot D_d} = \frac{l}{2 \cdot 5,63} = 0,0889 \text{ km} = 88,9 \text{ m} \quad (12)$$

em que: D_d (km/km²) é densidade de drenagem.

2.5.5 - Percurso médio sobre o terreno até um curso de água

Como o subcapítulo indica, é a distância média sobre o terreno até se encontrar um curso de água, ou seja é a distância média de qualquer ponto da bacia até ao curso de água mais próximo.

$$\bar{P} = \frac{I}{2} \cdot \bar{P}_L = \frac{I}{4 \cdot D_d} = \frac{I}{4 \cdot 5,63} = 0,0444 \text{ km} = 44,4 \text{ m} \quad (13)$$

Em suma e após o cálculo dos últimos três aspetos referentes à drenagem da bacia, conclui-se que a densidade de drenagem alta, o percurso médio sobre o terreno, bem como, o indicador do percurso médio sobre o terreno até um curso de água com valores baixos, indica-nos que o escoamento superficial é canalizado organizadamente e rapidamente para as linhas de água bem definidas, surgindo assim mais rápido e concentrado na secção de referência (Hipólito & Vaz, 2011). Esta situação poderá desencadear pontas de cheias elevadas.

2.5.6 - Densidade Hídrica

Segundo Christofolletti (1980), a densidade hídrica é a resultante do número de rios ou cursos de água em relação a área da bacia hidrográfica, ou seja, quantos cursos de água existem por km² numa dada bacia hidrográfica.

$$D_h = \frac{N_t}{A_t} = \frac{382}{24,58} \approx 16 \text{ cursos de água/km}^2 \quad (14)$$

em que: N_t são os cursos de água e A_t (km²) é a área total da bacia hidrográfica de Machico.

2.6 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DA RIBEIRA DE MACHICO

De modo a sintetizar parâmetros, indicadores e índices, tornou-se pertinente colocar no fim do capítulo a Tabela 4 na qual constam as características da bacia hidrográfica de Machico.

Tabela 4. Resumo das características da Bacia Hidrográfica de Machico

Componentes físicas	Parâmetros, indicadores e Índices	
Geometria	Área	24,58 km ²
	Perímetro	24,97 km
	Fator de Forma	0,16
	Índice de Gravelius	1,42
	Índice de Alongamento	4,1
Rede de Drenagem	Hierarquia (Strahler)	4
	Densidade Hídrica	16 cursos de água/km ²
	Densidade de Drenagem	5,63 km/km ²
	Comprimento da Ribeira de Machico	12,561 km
	Percurso médio sobre o terreno	88,9 m
	Percurso médio sobre o terreno até um curso de água	44,4 m
	Razão de bifurcação	6,7
Relevo	Altitude máxima	1080,6 m
	Altitude mínima	0 m
	Altitude média	409,13 m
	Amplitude altimétrica	1078 m
	Altura média	409,13 m
	Inclinação da Ribeira de Machico	8,6 m/km
	Índice de declive de Roche/ Declive médio	0,086 / 8,6 %
	Índice de relevo	0,086
	Declive 10-85	7,1 %

2.7 - SUB-BACIAS ESTUDADAS INSERIDAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DE MACHICO

Com o objetivo de aumentar a riqueza desta dissertação de mestrado, tornou-se pertinente a implementação do estudo de catorze sub-bacias existentes na Bacia Hidrográfica da ribeira de Machico.

Apresenta-se de seguida, na Figura 19 as sub-bacias em estudo, aquelas em que foram medidas as secções de desaguamento para a linha de água principal. As restantes, por variadíssimas razões não foram medidas, uma vez que constituíam perigo durante a sua medição, ou encontravam-se em locais de difícil acesso.

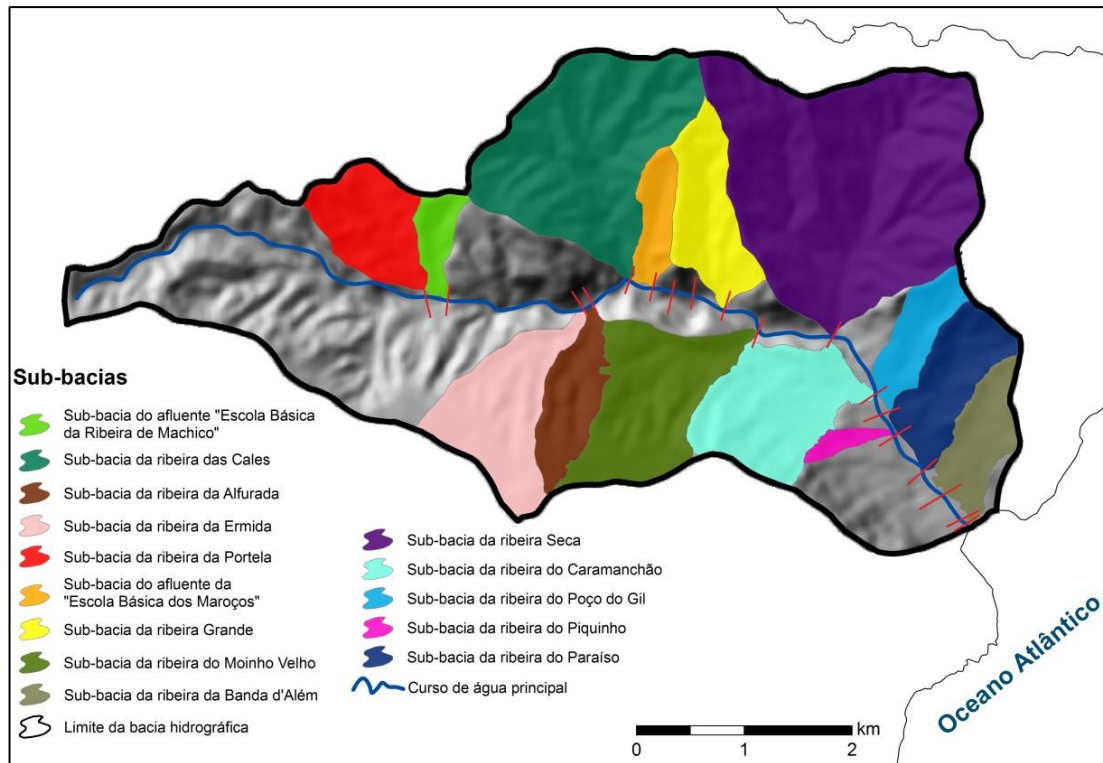


Figura 19. Sub-bacias em estudo

Embora o estudo das sub-bacias não tenha sido tão exaustivo como para a bacia hidrográfica de Machico no seu todo, pretende-se que haja uma noção das sub-bacias que serão mais influentes e aquelas que mais contribuem para o seu escoamento.

Relativamente às áreas das sub-bacias tem-se que, estas oscilam entre a mais pequena das estudadas, sub-bacia do Piquinho, com cerca de 13 hectares (equivalente a 0,13 km²) e a sub-bacia maior estudada, Ribeira Seca, com cerca de 460 hectares (4,6 km²).

Por fim, e no que concerne ao Índice de Compacidade ou Índice de Gravelius para as todas sub-bacias refletem-se em números maiores que 1,128, ou seja, é necessário calcular o índice de alongamento. O cálculo deste índice indica que todas as sub-bacias são alongadas, implicando um menor risco de cheia, percursos mais longos, maiores tempos de escoamento, logo maior tempo de resposta.

3 - PRECIPITAÇÕES INTENSAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Um projetista de obras hidráulicas ao realizar um projeto para uma entidade pública, e de acordo com a Portaria n.º 701-H/2008 (1973), pp.63, deverá ter em conta os seguintes elementos:

- a) *“Estudo sobre necessidades de água, elementos sobre populações e indústrias a abastecer, áreas de rega, produção de energia, controlo de cheias, caudais e imposições ambientais, outros usos;*
- b) *Estudos de base hidrológicos, geológicos, geotécnicos, sismológicos, sócio-económicos;*
- c) *Descrição e justificação de exigências de comportamento, funcionamento, exploração e conservação da obra;*
- d) *Condições económicas relativas à exploração, manutenção e conservação da obra;*
- e) *Informação sobre a necessidade de obtenção de elementos complementares topográficos, geológicos, geotécnicos, hidrológicos ou de qualquer outra natureza que interessem ao estudo do problema, bem como sobre a realização de modelos, ensaios, ou de quaisquer outras atividades que possam ser exigidas, quer para as fases seguintes de projeto quer para a execução da obra;*
- f) *Outros elementos e estudos definidos nos Regulamentos e Normas de Barragens;*
- g) *Estudo de impacte ambiental, se aplicável”.*

Os projetos que um Engenheiro Hidráulico é competente para realizar, são: canalização de uma dada ribeira, adução por elevação, adução por gravidade com aproveitamentos energéticos, construção de barragem, passagem hidráulica, mudança do curso da ribeira, entre outros. A base de um projeto de canalização de uma ribeira ou de uma análise de cheias são as precipitações ocorridas numa dada região.

3.1 - POSTOS UDOMÉTRICOS USADOS NO ESTUDO

Os postos udométricos utilizados no estudo da bacia hidrográfica de Machico foram o Posto Florestal de Machico e o Posto do Santo da Serra localizado na Quinta da Junta.

Na Figura 20 apresentam-se os postos de monitorização que inicialmente foram considerados para o estudo da bacia hidrográfica de Machico, no entanto, estes postos foram excluídos após realização de análise das precipitações existentes.



Figura 20. Localização dos postos de monitorização da precipitação na zona leste da Madeira

No que concerne ao estudo da bacia hidrográfica outros postos foram tidos em conta, no entanto, é importante realçar que a WMO (1975) citado por Blain et al., (2009) com base em princípios estatísticos de tendência de valor médio, indica que o clima em uma dada região deve ser caracterizado com base no período mínimo de 30 anos.

“Sob o ponto de vista estatístico, pode-se dizer que o objetivo de uma caracterização é descrever as características inerentes a uma população. Em outras palavras, hipóteses levantadas sobre uma dada população são confirmadas (ou negadas) por meio de um espaço amostral. Analogamente, em termos de caracterização climática, é desejado que as inferências realizadas sobre uma amostra (relativa, por exemplo, aos anos de 1961 a 1990) sejam válidas para um período futuro (1991 a 2020, por exemplo). Não há, entretanto, indicações exatas que determinem se as inferências realizadas com base em um período amostra, devem ser vistas apenas como características da amostra, ou podem ser extrapoladas para períodos futuros. Com isso, torna-se evidente a importância do

estudo das variações paramétricas observadas em diferentes períodos amostrais.”
(Blain et al., 2009) pp.2.

Assim sendo, os postos de monitorização com menos de 30 anos hidrológicos foram excluídos.

Designa-se ano hidrológico como o período compreendido entre 1 de Outubro desse ano e 30 de Setembro do ano posterior. Importa referir que o registo de precipitação num determinado dia se refere ao período de 24 horas compreendido entre as 9:00 h do dia anterior e as 9:00 h do dia ao qual é-lhe imputado.

Na Tabela 5 são apresentados os vários postos de monitorização (udógrafos e udómetros) de precipitação que estão próximos da bacia com várias informações detalhadas.

Tabela 5. Características das estações de monitorização da precipitação (Fonte: (EARAM, 2010) e (SNIRH, 2012))

Nome	Entidade	Tipo	Medição	Altitude (m)	Concelho	Início e Fim
Canical	JGM	Udómetro	Diário	14	Machico	1953-1998
Massapez	JGM	Udómetro	Diário	146	Machico	1941
Posto Florestal de Machico	JGM	Udómetro	Diário	144	Machico	1941-1999
Santo do Serra (Quinta da Junta)	IM	Udógrafo	Diário	690	Machico	1936
Ribeiro Frio	JGM	Udómetro	Diário	904	Santana	1941-1999
Santa Catarina - Aeroporto	IM	Udógrafo	Diário	25	Santa Cruz	1962

A ligação entre a precipitação e a altitude está longe de ser linear, difícil e incerta no espaço, mas, em geral, a precipitação aumenta com a altitude, principalmente devido ao efeito orográfico de terreno montanhoso (Johansson & Chen, 2005).

Nas encostas do lado de onde o vento sopra, a subida imposta de quantidades de massa de ar propaga-se à ocorrência de precipitação, bem como o aumento desta com a altitude. Dependendo do tamanho da montanha e da eficiência dos métodos de formação da chuva, as precipitações tendem a diminuir do lado oposto ao lado de onde o vento sopra (Costa, 2009).

Em suma, a precipitação aumenta com a altitude, porque as massas de ar são obrigadas a subir quando se deparam com uma montanha. Ao subir, essas massas de ar húmido, arrefecem, provocando a condensação do vapor de água, formando-se nuvens que podem originar precipitação.

Decidi excluir o posto udométrico do Caniçal e o posto udográfico de Santa Catarina – Aeroporto – Santa Cruz pois estes estão a uma cota muito baixa, sendo assim, ao realizar cálculos de ponta de cheia e ao ponderar-se as precipitações totais pelo Método de Thiessen, estas seriam menores, tendo influência na precipitação ponderada para toda a bacia. Após aplicação do Método de Thiessen, excluiu-se o posto udométrico do Ribeiro Frio, pois este revelou ter muito pouca influência sobre a bacia.

Foi ponderada a hipótese de incluir o posto udométrico do Massapez – Porto da Cruz – Machico, mas este mesmo posto estava incluído na bacia hidrográfica do Juncal a norte da bacia em estudo. Por sua vez, a bacia hidrográfica do Juncal situa-se já na parte norte da Ilha da Madeira em que esta apresenta outras especificidades climatológicas e hidrológicas. Dada a explicação decidi excluir o posto udométrico do Massapez.

São apresentadas de seguida a Figura 21 e Figura 22, a localização específica e detalhada onde se apresentam os postos de monitorização utilizados para o estudo. Estas mesmas figuras apresentam em rodapé a data das imagens, coordenadas GPS, e a própria altitude do posto de registo.



**Figura 21. Visualização do Posto Florestal de Machico
(Fonte: Google Earth 2007)**



**Figura 22. Visualização do Posto (Quinta da Junta) do Santo da Serra
(Fonte: Google Earth 2007)**

3.2 - ANÁLISE E CONSTITUIÇÃO DA AMOSTRA

Depois da seriação realizada quanto aos postos de monitorização que tinham condições para serem abordados para estudo, em que a 1ª etapa de escolha foi selecionar apenas postos de monitorização com amostras de dados iguais de precipitação diária ou superiores a 30 anos e a 2ª etapa foi eleger os que tinham condições para fazer parte do estudo e que não implicassem com futuros valores finais de precipitação. Assim sendo, foi necessário recolher a amostra já anteriormente analisada tanto para o Posto do Santo da Serra (“Quinta da Junta”) como para o Posto Florestal de Machico.

É de salientar que os dados recolhidos para o Posto do Santo da Serra (Quinta da Junta) foram fornecidos pelo Observatório Meteorológico do Funchal. Relativamente ao registo de precipitação diária para o Posto Florestal de Machico foi obtido pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

A tabela em Anexo III possui a informação dos anos de funcionamento dos anos hidrológicos para os dois postos monitorizados.

3.3 - PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS

Nos postos udométricos em estudo, foram constituídas séries de precipitação máximas anuais em períodos consecutivos de 1 a 5 dias.

Assim sendo, foram constituídos para o PFM uma amostra de 55 anos hidrológicos e para o SS uma amostra de 75 anos. Determinou-se ainda para estes dois postos, aspetos gerais tais como, valor máximo e mínimo e dimensão da amostra. A nível estatístico calculou-se a média, desvio-padrão, coeficiente de variação e a assimetria.

Na Tabela 6 e seguinte é apresentada tal informação.

Tabela 6. Síntese do Posto Florestal de Machico

		Posto Florestal de Machico					
		1dia	2dias	3dias	4dias	5dias	
Informação	Amostra	Dimensão	55				
		Máximo (mm)	182,90	251,00	302,20	348,00	374,60
		Mínimo (mm)	8,20	14,40	17,80	17,80	20,10
	Estatística	Média (mm)	71,29	89,68	103,00	113,75	121,72
		Desvio-padrão (mm)	39,16	50,82	61,57	70,81	74,14
		Coef. Assimetria (-)	0,9652	1,1587	1,3486	1,4302	1,4032
		Coef. Variação (-)	0,5493	0,5667	0,5977	0,6226	0,6091

Tabela 7. Síntese do Posto do Santo da Serra

		Posto do Santo da Serra (Quinta da Junta)					
		1dia	2dias	3dias	4dias	5dias	
Informação	Amostra	Dimensão	75				
		Máximo (mm)	248,00	393,80	560,10	613,30	628,00
		Mínimo (mm)	33,70	47,10	58,60	58,70	59,10
	Estatística	Média (mm)	129,22	185,23	216,91	244,47	266,96
		Desvio-padrão (mm)	48,01	75,35	93,61	102,17	113,65
		Coef. Assimetria (-)	0,4933	0,6104	0,9347	0,8675	0,8552
		Coef. Variação (-)	0,3716	0,4068	0,4316	0,4179	0,4257

3.4 - ANÁLISE DE TENDÊNCIAS

Na tentativa de descrever a tendência das precipitações máximas anuais que tinham vindo a ser medidas no PFM decidi representar graficamente essas mesmas precipitações para saber se as mesmas são mais altas ou mais baixas nos anos mais recentes. A seguinte Figura 23 permite ter a ideia do trajeto da série de precipitação anual registada no PFM para 1 dia consecutivo.

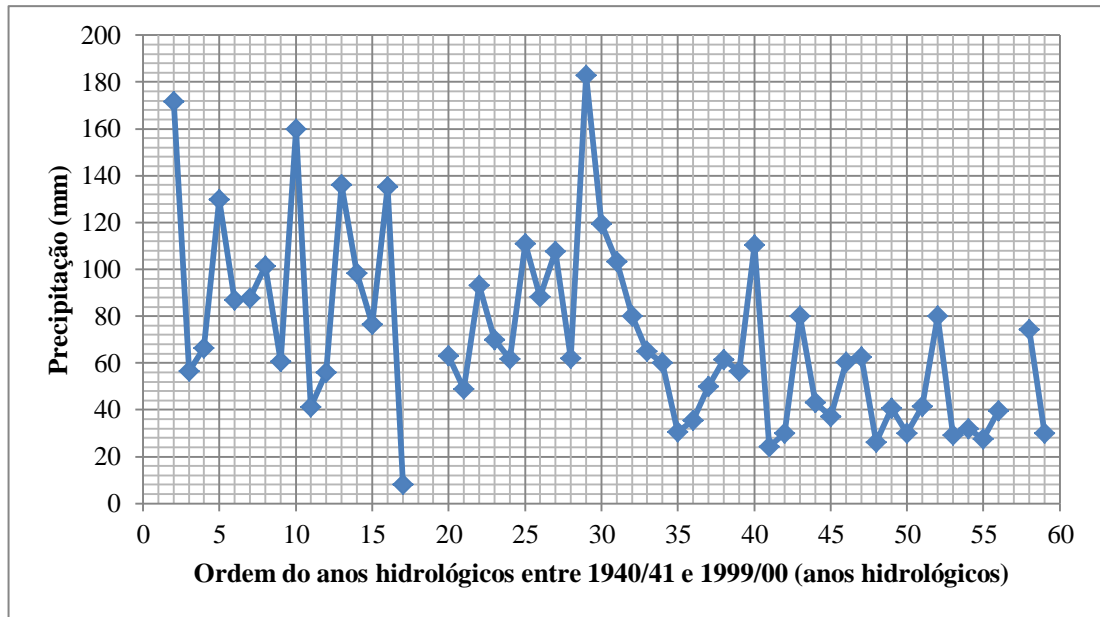


Figura 23. Representação gráfica das precipitações máximas diárias anuais para o Posto Florestal de Machico

Constata-se que nos primeiros 17 anos hidrológicos registou-se picos de precipitação alternados entre mínimos e máximos. Nos restantes anos visualiza-se que houve um pico máximo em toda a série para precipitação máxima anual de 1 dia consecutivo no ano hidrológico 29º com o valor de 182,9 mm como se evidencia na Tabela 6. A partir do pico referido anteriormente, visualiza-se que a tendência recente é a precipitação máxima anual para 1 dia decrescer.

É de notar que para a realização deste gráfico inclui 60 anos hidrológicos como sendo o período de tempo ao qual esteve o PFM em monitorização, mas na realidade a amostra consiste nos 55 anos hidrológicos já apresentados, analisados e justificados anteriormente.

Em relação ao posto do Santo da Serra (Quinta da Junta) é apresentada a seguinte Figura 24 onde se apresentam as precipitações máximas diárias anuais.

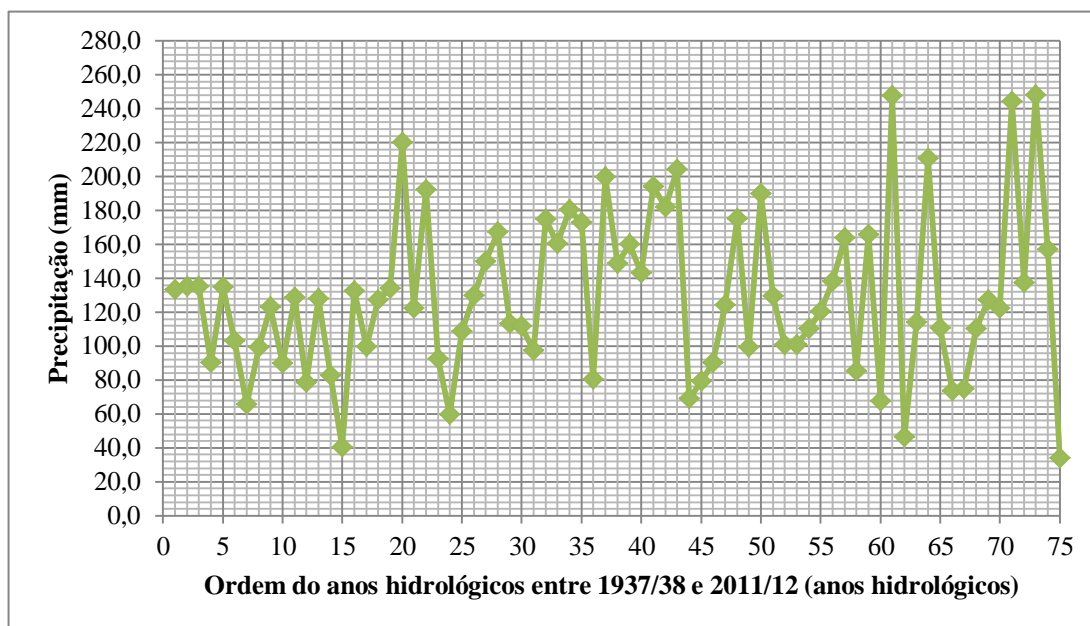


Figura 24. Representação gráfica das precipitações máximas anuais para o posto do Santo da Serra

Ao contrário do que se sucede com o registo monitorizado de precipitação máxima anual para o PFM, no SS ocorre que, conforme os anos hidrológicos vão aumentando para o período mais recente, existe uma tendência para os máximos picos se irem tornando mais altos e os mínimos se irem tornando cada vez mais baixos. Numa ideia geral pode-se afirmar que, nos períodos mais recentes existem cada vez mais períodos de seca e também mais períodos de ocorrência de precipitações máximas.

Quanto a estas precipitações máximas ou picos máximos de precipitação tem-se nos últimos 15 anos hidrológicos precipitações de 250 mm, sendo que o valor referente ao máximo pico ocorrido no Posto do Santo da Serra ocorreu no dia 20 de Fevereiro de 2010 com o valor de 248 mm.

No caso do gráfico apresentado para o Posto do SS, em relação ao eixo dos xx os 75 anos hidrológicos de amostra representativa de máxima precipitação anual na verdade correspondem a 77 anos hidrológicos de funcionamento do posto udométrico, sendo que o 1º e último ano hidrológico são respetivamente 1936/37 e 2012/13 não representativos para o estudo.

Em Anexo IV encontram-se o total das precipitações máximas ocorridas nos dois postos para os cinco dias consecutivos.

3.5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

De modo a efetuar uma análise estatística, foi necessário realizar várias tarefas antes de se visualizar qual das leis estatísticas (Gumbel, Galton ou Pearson III) se ajustava melhor à amostra, composta por valores máximos anuais de precipitação para 1, 2, 3, 4 e 5 dias consecutivos. Assim, as tarefas realizadas foram as seguintes para ajuste das leis enunciadas acima:

1. Os valores de precipitação diários foram retirados e facultados pelo SNIRH e OMF respetivamente para o Posto Florestal de Machico e Posto do Santo da Serra (Quinta da Junta) para a máxima dimensão disponível;
2. De seguida foram retirados valores de precipitação diários correspondentes a cada ano hidrológico, sendo estes dispostos do mais antigo para o mais recente ano hidrológico;
3. Após esta tarefa de organizar valores de precipitação diária para cada ano hidrológico pertencente, foi elaborada uma folha de Excel de modo a que fossem obtidos os valores máximos anuais para 1, 2, 3, 4 e 5 dias consecutivos;
4. De novo foi criada uma folha de Excel denominada de “Precipitação Máxima Anual” para os tais dias consecutivos enunciados no ponto acima, em que esses valores de precipitação máxima anual correspondiam aos seus anos hidrológicos;
5. Posteriormente calculou-se os parâmetros estatísticos como os referidos na Tabela 6 e Tabela 7 para o valor de precipitação máxima anual para 1º dia consecutivo e também para o logaritmo dessa mesma precipitação. É de referir que esta tarefa foi também realizada para o 2.º, 3.º, 4.º e 5.º dia consecutivo;
6. Seguidamente retirou-se os valores correspondentes a 1 dia consecutivo e ordenou-se as precipitações máximas anuais desde o valor mais baixo que correspondia ao número de ordem 1 até ao valor mais alto que correspondia à ordem 55, para a série extraída do Posto Florestal de Machico e à ordem 75, para o Posto do Santo da Serra. Esta tarefa foi realizada igualmente para o 2.º, 3.º, 4.º e 5.º dia consecutivo;

7. Depois dos valores de precipitação máximos anuais ordenados procedeu-se ao cálculo da probabilidade de não-excedência.

Cada valor de uma amostra é associado uma probabilidade empírica de não-excedência, F (plotting position). A fórmula utilizada foi a de Weibull.

$$F = \frac{i}{N+1} \quad (15)$$

em que: F é probabilidade de não excedência (-), i é o número de ordem de um dado elemento (-) e N é a dimensão total da amostra (-).

A probabilidade de não-excedência é a possibilidade de ocorrência de precipitações menores ou iguais a um dado valor de precipitação.

“Se a amostra representasse toda a população, a probabilidade de não-excedência associada a cada elemento seu seria dada pelo quociente entre o número de elementos da amostra inferiores ou iguais ao considerado e a dimensão da amostra, N (ou seja, seria a fração dos elementos da amostra com valor inferior ou igual a cada elemento seu) ”.

“Numa amostra sem valores repetidos, se i representasse o número de ordem de um dado elemento pós ordenação dos elementos dessa amostra por valores crescentes, tal probabilidade seria simplesmente dada por i/N . De acordo com essa noção, a probabilidade de ocorrerem elementos com valor, tanto inferior ao elemento com menor valor da amostra, como superior ao elemento com maior valor da amostra seria nula (acontecimentos impossíveis). Em face de amostras finitas representativas de populações infinitas, o pressuposto de que nunca poderão ocorrer elementos com valores para além da gama de valores patente na amostra não tem sentido. Surgiram, assim, fórmulas de estimação de probabilidades empíricas que corrigem esse pressuposto. Tais fórmulas fazem intervir o número de ordem i de cada elemento da amostra, após ordenação dos elementos da mesma por valores crescentes (i igual a 1 para o menor valor da amostra e igual a N , para o maior valor) e são frequentemente casos particulares” (Naghattini & Portela, 2011).

Como referido acima, esta tarefa foi realizada para os cinco dias consecutivos;

8. De seguida é calculado o período de retorno, T, que significa o número de anos que separaria em média a ocorrência numa mesma zona ou localidade, uma determinada precipitação, P, com uma dada duração. (Quintela, 1996)

$$T = \frac{1}{1-F} \quad (16)$$

em que: T (anos) é o período de retorno e F (-) é a probabilidade de não-excedência.

É necessário ter e atenção que a definição de período de retorno não está associado a qualquer ideia de repetição cíclica. Assim sendo, segundo Quintela 1996, podem ocorrer em dois anos sucessivos valores de precipitação que ultrapassem o valor de precipitação referente ao período de retorno de 100 anos, P₁₀₀.

A probabilidade do valor ocorrer em qualquer ano é de 1/T, de ocorrer em dois anos consecutivos é de (1/T)², em três anos consecutivos é (1/T)³ e assim sucessivamente.

Os períodos de retorno a considerar no dimensionamento de obras hidráulicas encontram-se referenciados na Tabela 8:

Tabela 8. Períodos de retorno a considerar no dimensionamento de obras hidráulicas (Oliveira, 2010) citando Tonini, 1966

Tipo de obra ou estudo	Período de retorno (anos)
Drenagem de zonas urbanas	10 a 20
Obras de enxugo	20 a 50
Obras longitudinais de defesa contra cheias em rios ou ribeiras	50 a 100
Obras de defesa do mar	50 a 100
Análise de cheias	≥ 100
Descarregadores de cheias de barragens de betão, de modesta dimensão, em zonas pouco habitadas	100 a 250
Descarregadores de cheias de barragens de betão, de grande dimensão, em zonas muito habitadas	500 a 1000
Descarregadores de cheias de barragens de aterro, de modesta dimensão, em zonas pouco habitadas	1000 a 5000
Descarregadores de cheias de barragens de aterro, de grande dimensão, em zonas muito habitadas	5000 a 10000

9. Por inversão da lei normal, calcula-se o correspondente valor da normal reduzida, Z. Para obtenção do valor da normal reduzida em folha de Excel tem-se a seguinte função: =INV.NORMP(F) em que F (-) é a probabilidade de não-excedência;

10. Para o ajuste de leis estatísticas procede-se em primeiro ao arbítrio da probabilidade de não-excedência começando no valor de 0,010, sendo os restantes sempre pela soma de 0,010 até obtenção do valor de 0,900. A partir do valor referenciado é somado 0,001;
11. Após arbítrio das probabilidades de não-excedência foi calculado o período de retorno (T) pela fórmula presente no ponto 8;
12. Seguidamente calculam-se os fatores de probabilidade (K), em função das probabilidades de não-excedência e, no caso da Lei de Pearson III, do coeficiente de assimetria. Na Tabela 9 apresentam-se os fatores de probabilidade para as leis de Gumbel e de Pearson III.

Tabela 9. Fatores de probabilidade das leis estatísticas (Naghetini & Portela, 2011)

Lei estatística	Fator de probabilidade	Aspetos envolvidos
Gumbel	$K_G = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\}$	Função do período de retorno
Pearson III	<p style="text-align: center;">z – normal reduzida - K_N</p> <p style="text-align: center;">$k = \frac{C_a}{6}$</p> $K_p = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + zk^4 + \frac{1}{3}k^5$	Função do período de retorno, T, através da normal reduzida, z, e do coeficiente de assimetria, através de k

13. Calcular o fator de probabilidade da coluna referente à lei estatística “Log-Normal ou de Galton” através da fórmula:

$$X = \bar{x} + K_N s \tag{17}$$

em que: o primeiro termo é a média (-) do logaritmo da precipitação já calculado no ponto 5 assim como s (-) que é o desvio-padrão e K_N (-) é o fator de probabilidade calculado anteriormente no ponto 9;

14. Após o preenchimento das colunas referentes aos fatores de probabilidade para as leis de Gumbel, Pearson III, Log-Normal e de Galton, calculou-se a Precipitação (P (mm)) de modo a obtermos o gráfico da normal reduzida no eixo dos xx e precipitação (mm) no eixo dos yy
Para as leis estatísticas Normal, Gumbel e Pearson III temos a seguinte formulação para determinação da precipitação:

$$P = \bar{x} + K.s \quad (18)$$

em que: a primeira parcela é a média (mm) referente à amostra assim como s (mm) é o desvio padrão, por último K (-) é o fator de probabilidade de cada uma das leis estatísticas calculadas.

Apenas a lei estatística Log-Normal, a sua precipitação é calculada com a exponencial do fator de probabilidade calculado no ponto 13;

15. Por fim é realizada uma análise qualitativa da projeção da amostra com cada uma das leis estatísticas de modo a escolher qual das curvas se ajusta melhor à amostra de precipitação para os 5 dias consecutivos.

3.6 - ANÁLISE QUALITATIVA

O procedimento posterior ao ajuste das leis estatísticas deve submeter uma análise qualitativa, através de um processo visual de modo a comparar qual das curvas se ajusta melhor à amostra.

Poderia ter complementado o estudo do ajuste visual com a apreciação da qualidade do ajustamento e escolha do modelo distributivo de acordo com o estudo do “Qui-quadrado” ou pelo modelo de “Kolmogorov-Smirnov”, que é uma das outras formas de identificar qual das leis estatísticas melhor se adequa. No entanto, segundo (Naghattini & Portela, 2011):

- i. Não são objetivamente decisivos no que respeita à qualidade do ajustamento das caudas superiores das distribuições de valores máximos, onde, em geral existem poucos pontos amostrais;
- ii. Não foram concebidos para comparar, em termos relativos e por meio das suas estatísticas, as diferentes distribuições teóricas aplicadas a uma dada amostra.

Dada esta explicação optei por realizar um ajuste visual, apenas qualitativo. Assim sendo e mediante os gráficos de visualização de ajuste das leis estatísticas à amostra colocados em Anexo V, tem-se a tabela no Anexo VI que identifica os valores determinados pela lei estatística que melhor se ajusta à amostra. Os valores estão distribuídos para vários períodos de retorno e também para 1, 2, 3, 4 e 5 dias consecutivos, respetivamente 24, 48, 72, 96 e 120 horas.

Após análise da tabela presente no Anexo VI, tiram-se as seguintes conclusões:

- Pelo menos uma vez em 100 anos poderá ocorrer uma precipitação máxima diária para o PFM e SS respetivamente 239,9 mm e 258,1 mm;
- Com um período de retorno de 50 anos, ou seja, duas vezes no século, poderão ocorrer cerca de 204,3 mm e 240,0 mm respetivamente para o PFM e SS de precipitação máxima diária;
- Tendo em consideração que o valor de precipitação máxima diária para o Posto Florestal de Machico com o registo obtido de 55 anos foi cerca de 182,9 mm, é de realçar perante o quadro das precipitações de ajuste das leis o facto de este valor estar próximo do período de retorno de 32 anos que é de 183,0 mm (10/02/1969 – Segunda Feira). Significa que existe a probabilidade deste valor ocorrer ou ser excedido cerca de três vezes em 100 anos;
- Tendo em consideração que o valor de precipitação máxima diária para o Posto do Santo da Serra (Quinta da Junta) para o registo obtido de 75 anos foi cerca de 248,0 mm (20/02/2010 – Sábado), é de realçar perante o quadro das precipitações de ajuste das leis, o facto de o valor estar próximo do período de retorno de 66 anos que é de 247,6 mm. Significa que, existe a probabilidade deste valor ocorrer ou ser excedido cerca de uma vez e meia em 100 anos;
- Sendo o valor máximo registado nos 55 e 75 anos igual a 183,0 mm e 248,0 mm respetivamente no PFM e SS, existe uma elevada probabilidade destes máximos diários serem excedidos em valores muito superiores, visto que uma vez em 100 anos há probabilidade de ocorrer 239,9 mm e 258,1 mm para o PFM e SS de valores máximos de precipitação diária, respetivamente. Assim sendo, conclui-se que existe um elevado risco associado à probabilidade de ocorrência de aluviões na ribeira da Bacia Hidrográfica de Machico.

4. ANÁLISE DE CHEIAS

Neste capítulo irei averiguar se o caudal de ponta de cheia, calculado através da formulação do método racional, é possível ser comportado pelas secções. Para constatar tal facto irei calcular o caudal na secção pela equação de Manning - Strickler e verificar se o tal caudal de ponta de cheia cabe efetivamente em tal secção, seja ela de desembocadura, seja uma secção ao longo da ribeira de Machico.

É de referir que o estudo será apenas realizado para caudais de natureza líquida, ou seja, compostos unicamente por água. Este estudo de análise de cheias na bacia hidrográfica de Machico irá debruçar-se sobre o “Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira”, relatório elaborado após as cheias de 20 de Fevereiro de 2010, na edição de Outubro e Dezembro de 2010.

Alguns aspetos serviram de base para esta investigação, que sem o estudo acima referido seria difícil a sua execução, dado que alguns cálculos realizados nesta dissertação de mestrado tiveram por base conclusões retiradas de tal estudo e emprego de dados referentes a precipitações horárias e sub-horárias do posto udométrico do Observatório Meteorológico do Funchal passíveis de serem analisadas, dado este posto udométrico já possuir registo de precipitação horária desde o ano hidrológico de 1980/81.

Por fim realiza-se uma análise das sub-bacias, de modo a elaborar um mapa de vulnerabilidade de cheias, ou seja, quais as secções suscetíveis de transbordar e que deverão ser alvo de intervenção de obras de Engenharia Civil ou demais operações.

4.1 - PROCEDIMENTO A REALIZAR PARA CÁLCULO DOS CAUDAIS DE PONTA DE CHEIA

Na década de 80 o posto udométrico do Observatório Meteorológico do Funchal começou a efetuar o registo dos valores de precipitação horários. O que implica que se possa, de uma forma generalizada, proceder à extrapolação dos valores decorrentes da análise do referido posto para o cálculo das precipitações com duração igual ao tempo de concentração para as restantes bacias hidrográficas da Ilha da Madeira.

De acordo com o estudo da avaliação de risco das aluviões na Região Autónoma da Madeira conclui-se o seguinte procedimento a efetuar na análise de cheias nas bacias hidrográficas do Arquipélago:

“Na tentativa de “verter” o estudo efetuado 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 na Tabela 10, a par com as precipitações que lhes deram origem.” (EARAM, 2010).

Tabela 10. Quocientes entre precipitações máximas anuais com durações inferiores a 24 h (numerador) e de 24 h (denominador) para diferentes períodos de retorno para o OMF adaptado de (EARAM, 2010)

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 24h, P _d /P ₂₄							
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

Como seria de esperar, seria impossível que se ajustasse a Tabela 10 para qualquer tempo de concentração de qualquer bacia existente na Ilha da Madeira, daí que a (WMO, 1994) refere quais os intervalos de tempo recomendados para tal análise: 5, 10, 15, 30 minutos e 1, 2, 6, 12 horas.

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 25. Deste modo, torna-se necessário a inclusão de um coeficiente de majoração às precipitações, como é tradição realizar-se em outros domínios da Engenharia Civil, como é o caso do projeto de estruturas e outros.

Os coeficientes de majoração foram obtidos realizando o quociente entre as precipitações máximas anuais definidas com base em amostras, no numerador, em qualquer intervalo de tempo e, no denominador, o registo de precipitação das 9:00 às 9:00 h.

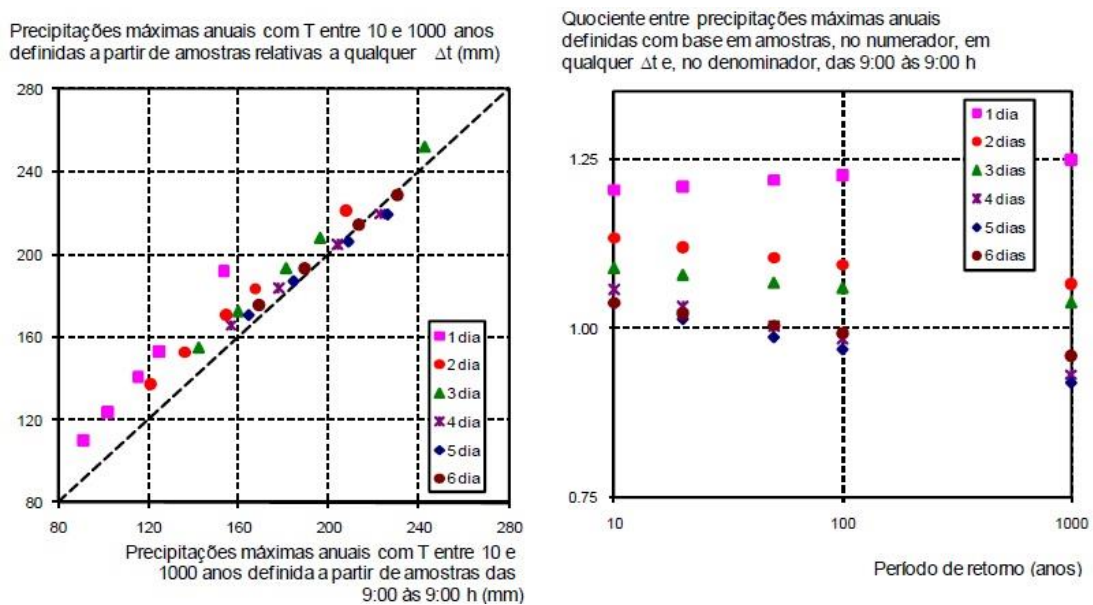


Figura 25. Coeficientes de majoração a aplicar às precipitações para diferentes tempos de retorno adaptado (EARAM, 2010)

O tempo de concentração para a bacia hidrográfica de Machico fixa-se nas 2 horas e 17 minutos e como não se dispunha do valor de “repartição”, tornou-se necessário saber qual a precipitação caída nessa duração. A forma evidente e utilizada para encontrar tal valor foi a de dispor num gráfico para os vários períodos de retorno (10, 20, 50, 100 e 1000 anos) os valores de duração de precipitação, d em horas, no eixo dos xx e no eixo dos yy, o valor de repartição correspondente a cada duração.

A partir dos valores dispostos graficamente, visualizou-se uma curva do tipo para todos os períodos de retorno como é exemplificativa na Figura 26. Em Anexo VII

estão dispostos os restantes gráficos usados para determinação do valor de repartição para os vários períodos de retorno.

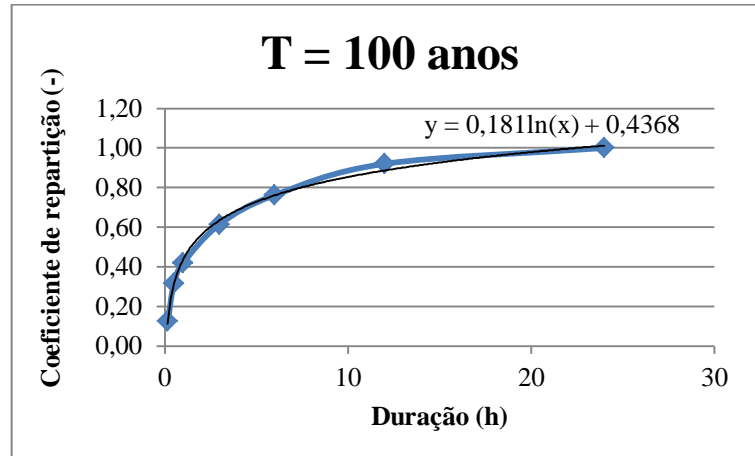


Figura 26. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 100 anos

De seguida foi realizada uma análise tendencial por forma a determinar qual das regressões se ajustaria melhor ao gráfico obtido através dos valores descritos anteriormente.

Determinou-se que seria a função logarítmica a que se ajustava melhor aos dados, assim sendo, a função que se visualiza na Figura 26 para o período de retorno de 100 anos, determinaria, substituindo o tempo de concentração em x pelo valor de repartição, a precipitação final.

Assim sendo, os fatores corretivos ou de repartição para os períodos de retorno anteriormente descritos e para o tempo de concentração de 2 horas e 17 minutos (enumerado como valor de 2,29 horas) foram os subsequentes valores expostos na seguinte Tabela 11. Importa referir que foram determinados os coeficientes de repartição através dos tempos de concentração tanto para as sub-bacias como também para as áreas de drenagem localizadas a montante das secções estudadas ao longo da ribeira de Machico.

Tabela 11. Valores de repartição relativos aos períodos de retorno para o tempo de concentração da bacia hidrográfica

Período de retorno, T (anos)	t_c (horas)	Coeficientes de repartição (-)
	2,29	
10	0,597	
20	0,593	
50	0,589	
100	0,587	
1000	0,581	

4.2 - LINHA DE POSSIBILIDADE UDOMÉTRICA (LPU)

O estabelecimento da relação entre precipitação e a duração, para período de retorno fixo é a chamada Linha de Possibilidade Udométrica (LPU). Com base nas coordenadas (d,P), em que d é a duração (h) e P é a precipitação (mm), define-se uma relação para o período de retorno considerado. Um gráfico da linha de possibilidade udométrica é apresentado sob forma de escalas logarítmicas de modo a obter-se uma reta. A linha de possibilidade udométrica trata-se de uma equação do tipo potencial:

$$P = a.t^n \quad (19)$$

em que: a (-) e n (-) são parâmetros em função do período de retorno, t (h) é a duração de precipitação e P (mm) é a precipitação ocorrida para uma dada duração.

Após realizada a análise estatística houve lugar a que se dispusesse para os dois postos udométricos em estudo, as LPU para os diferentes períodos de retorno (10, 20, 50, 100 e 1000 anos).

Mas devido a dispormos de valores de precipitação diária compreendidos entre as 9:00 h do dia anterior e as 9:00 h do dia que se realiza o registo, não é possível extrapolar essas precipitações para tempos de concentração nas bacias hidrográficas iguais à duração das cheias existentes na Madeira, que em média duram entre 30 min a 3h no máximo. Quer isto dizer que é impossível extrapolar-se as linhas de possibilidade udométrica para durações iguais às praticadas ou existentes para as bacias hidrográficas na Ilha da Madeira, podendo-se apenas extrapolar até 12h.

4.3 - TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O tempo de concentração de uma bacia é o tempo que uma gota de água precipitada no ponto cinematicamente mais afastado da secção de referência demora a atingir tal secção (Hipólito & Vaz, 2011).

O tempo de concentração de uma bacia depende:

- Da inclinação média registada nas bacias do Arquipélago da Madeira, pois verifica-se um declive muito acentuado na ordem das duas dezenas como é o caso de algumas das bacias existentes no Funchal, com exceção de algumas bacias, como a de Machico, com o declive médio de 8,6 %, ou seja, declive médios maiores darão lugar a um escoamento rápido e em menos tempo;

- A área da bacia hidrográfica de Machico é relativamente pequena, logo haverá lugar a um tempo de concentração igualmente baixo;
- A complexidade da rede de drenagem também terá influência no tempo de concentração, pois uma maior complexidade da rede haverá lugar a que o tempo de concentração aumente;
- O desenvolvimento do curso de água principal também será significativo, quanto maior o curso de água maior será o tempo de concentração;
- Da altura média da bacia, quanto maior a sua altura média, menor será o tempo de concentração;
- Da vegetação, quanto maior vegetação houver mais precipitação terá dificuldade em se encaminhar para a linha de água mais próxima.

De modo a calcular os tempos de concentração, t_c (h), foram utilizadas as seguintes fórmulas, criadas por Giandotti, Kirpich e Témez.

- Fórmula de Giandotti

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{h_m}} = \frac{4 \cdot \sqrt{24,58} + 1,5 \cdot 12,561}{0,8 \cdot \sqrt{409,13}} = 2,39 \text{ horas} \quad (20)$$

em que: A (km²) é área da bacia hidrográfica de Machico, L (km) é o desenvolvimento do curso de água principal e h_m (m) é a altura média da bacia hidrográfica em estudo.

- Fórmula de Kirpich

$$t_c = 0,946 \cdot \frac{L^{1,155}}{\Delta H^{0,385}} = 0,946 \cdot \frac{12,561^{1,155}}{1080,6^{0,385}} = 1,19 \text{ horas} \quad (21)$$

em que: L (km) é o desenvolvimento do curso de água principal e ΔH (m) é a diferença máxima de cotas no curso de água principal.

- Fórmula de Témez

$$t_c = 1,115 \cdot \frac{L^{0,95}}{\Delta H^{0,19}} = 1,115 \cdot \frac{12,56^{0,95}}{1078^{0,19}} = 3,27 \text{ horas} \quad (22)$$

em que: L e ΔH têm os mesmos significados da anterior formulação.

Efetuada a média aritmética dos três valores calculados anteriormente, obteve-se um tempo de concentração na ordem das 2,29 horas ou seja, 2 horas e 17 minutos. Conclui-se portanto, que é necessário chover durante de 2 horas e 17 minutos para que toda a área da bacia esteja a contribuir para o escoamento.

Em suma, para um dado período de retorno, T, o caudal de ponta de cheia aumenta com o aumento da duração de precipitação, ou seja, por aumento da área que contribui em simultâneo para o escoamento na seção terminal até atingir o valor máximo para a duração igual ao tempo de concentração. Se chover mais do que o tempo de concentração, toda a área contribui igualmente para escoamento, mas a intensidade de precipitação diminuirá pois o tempo em que decorrerá a precipitação aumenta, logo o caudal diminuirá igualmente.

4.4 - TEMPO DE RESPOSTA

O tempo de resposta, t_r , em horas, corresponde ao tempo que uma determinada bacia leva a responder à precipitação gerada em escoamento superficial (precipitação útil) responsável pela ponta de cheia, verifica-se como sendo o tempo que leva desde o pico de precipitação até ao pico de cheia.

A formulação é a seguinte:

$$t_r = 0,6.t_c = 0,6.2,29 = 1,37 \text{ horas} \quad (23)$$

em que: t_c (horas) é o tempo de concentração na bacia.

O tempo de resposta entre o pico de precipitação e o pico de cheia encontra-se em 1 hora e 22 minutos.

4.5 - MÉTODO DE THIESSEN OU DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA

Quando se trata de ponderar a precipitação ocorrida numa dada bacia hidrográfica, a determinação dos valores máximos anuais da amostra é realizada, em geral, pelo Método das Isoietas, ou pelo Método de Thiessen (Método das Áreas de Influência), sendo um dos métodos mais conhecidos.

Este método de cálculo determina, através das áreas de influência de cada posto de monitorização, a precipitação ponderada para toda a bacia. Neste processo, a área está dividida em sub-áreas poligonais, utilizando udómetros ou outros processos para medição de precipitação em cada posto. As sub-áreas são usadas como pesos para

estimar a precipitação média nas bacias hidrográficas em estudo. De seguida a precipitação medida é multiplicada pelo peso que cada posto significa perante a bacia. Finalmente a soma desta última operação, determinará a precipitação ponderada na bacia (Viessman & Lewis, 2003).

O procedimento para realizar o Método de Thiessen concentra-se nos seguintes pontos:

- Delimita-se a bacia hidrográfica e marcam-se os postos udométricos na carta ou se for o caso, em ambiente de programa de Sistemas de Informação Geográfica que se entendem como os necessários para a realização deste método;
- Seguidamente unem-se as estações udométricas com segmentos de retas. No caso da Bacia Hidrográfica de Machico só dispomos de dois postos de monitorização, assim bastará apenas a realização do traçado de uma reta entre os dois postos;
- Por fim, traçam-se as mediatrizes de cada segmento de reta e prolongam-se até aos limites exteriores da bacia de modo a formar polígonos.

A Figura 27 que se segue permite-nos visualizar a ponderação dos postos de monitorização do Posto Florestal de Machico e do Santo da Serra que terão influência na precipitação final caída sobre a bacia.

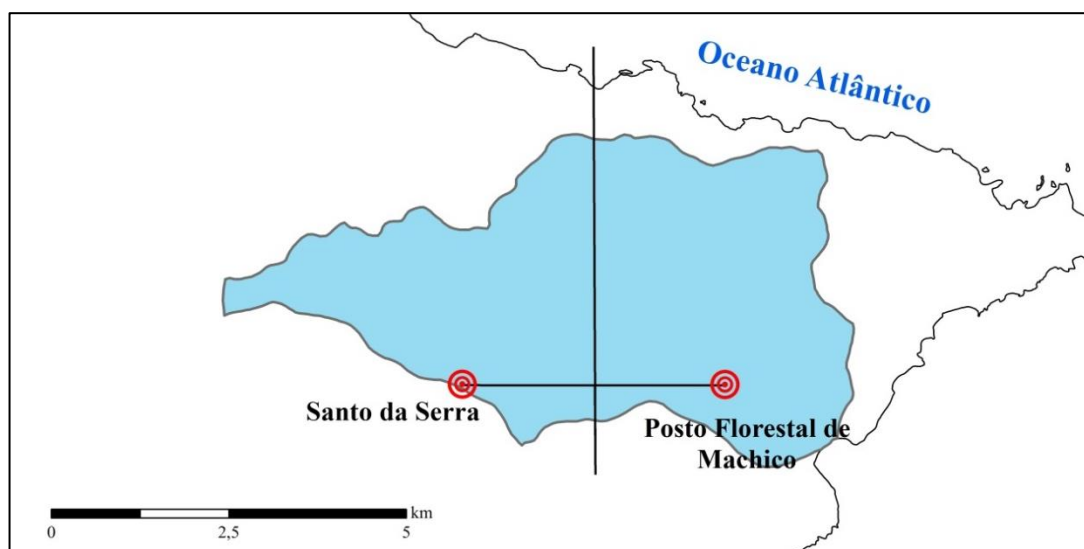


Figura 27. Ponderação da Bacia Hidrográfica de Machico pelo Método de Thiessen

Pelo Método de Thiessen e com a ajuda do programa ArcGis foi obtida a área do polígono correspondente ao Posto Florestal de Machico com o valor de 13,48 km²,

com o restante da bacia a ser afetado pelo Posto do Santo da Serra (Quinta da Junta) com 11,10 km².

Ao estimar-se o peso que cada posto teria sobre a bacia foi necessário realizar a razão entre a área correspondente a cada posto sobre a área total da bacia, o que fez as percentagens de 55% e 45%, respetivamente para o PFM e SS.

Importa referir que ao determinarmos o caudal de ponta de cheia através do método racional, a precipitação máxima diária anual dos vários períodos de retorno a utilizar seria a pertencente aos postos udométricos estudados com incidência sobre as sub-bacias e as áreas de drenagem.

4.6 - CAUDAL DE PONTA DE CHEIA PELO MÉTODO RACIONAL

4.6.1 - Formulação

Segundo Hipólito & Vaz (2011), o cálculo de caudais de ponta de cheia através da utilização do método racional é referenciado para aplicação a bacias de pequena dimensão pressupondo-se que a precipitação ocorre uniformemente em toda a bacia e que a intensidade de precipitação é constante ao longo da sua duração, sendo esse intervalo de tempo igual ao tempo de concentração.

A formulação do caudal de ponta de cheia pelo método racional é a seguinte:

$$Q = C.i.A \quad (24)$$

em que: C (-) é um coeficiente que agravará ou diminuirá o caudal de ponta de cheia, i (m/s) é a intensidade de precipitação e A (m²) é a área da bacia hidrográfica em estudo.

4.6.2 - Determinação do coeficiente “C”

O coeficiente adimensional, C (-), é um fator presente na fórmula do método racional que agravará ou por outro lado fará diminuir o caudal de ponta de cheia.

Este coeficiente baseia-se em diversos fatores, nomeadamente, tipo e uso dos solos ou terrenos superficiais e também do respetivo declive. (Hipólito & Vaz, 2011)

Este parâmetro não corresponde a um coeficiente de escoamento (relação entre volumes do escoamento e da precipitação que o origina). Pretende então, traduzir os efeitos no caudal de ponta da retenção superficial, da infiltração, da detenção superficial e do armazenamento nos leitos. (Quintela, 1996)

Tal parâmetro depende também do período de retorno, aumentando com este. Em bacias muito heterogêneas com várias sub-áreas poder-se-á utilizar o coeficiente C determinando a média ponderada com a respetiva sub-área correspondente a cada valor C de acordo com o tipo de solo. (Hipólito & Vaz, 2011)

Segundo (Portela, Gaspar, & Hora, 2002), os resultados referentes aos valores de escoamento subterrâneo e hipodérmico da Ilha da Madeira, foram avaliados a partir do escoamento superficial, resultando assim, no escoamento total anual médio. Depois de estudadas e analisadas as 95 bacias que quase cobriram a totalidade da ilha, o resultado foi o traçado do mapa de isolinhas anuais médias para os dois tipos de escoamento, assim como, o conjunto destes dois, que resultou no escoamento total anual médio. Na Figura 28 poder-se-á comprovar a existência de escoamento subterrâneo na ilha da Madeira e certamente na bacia hidrográfica de Machico.

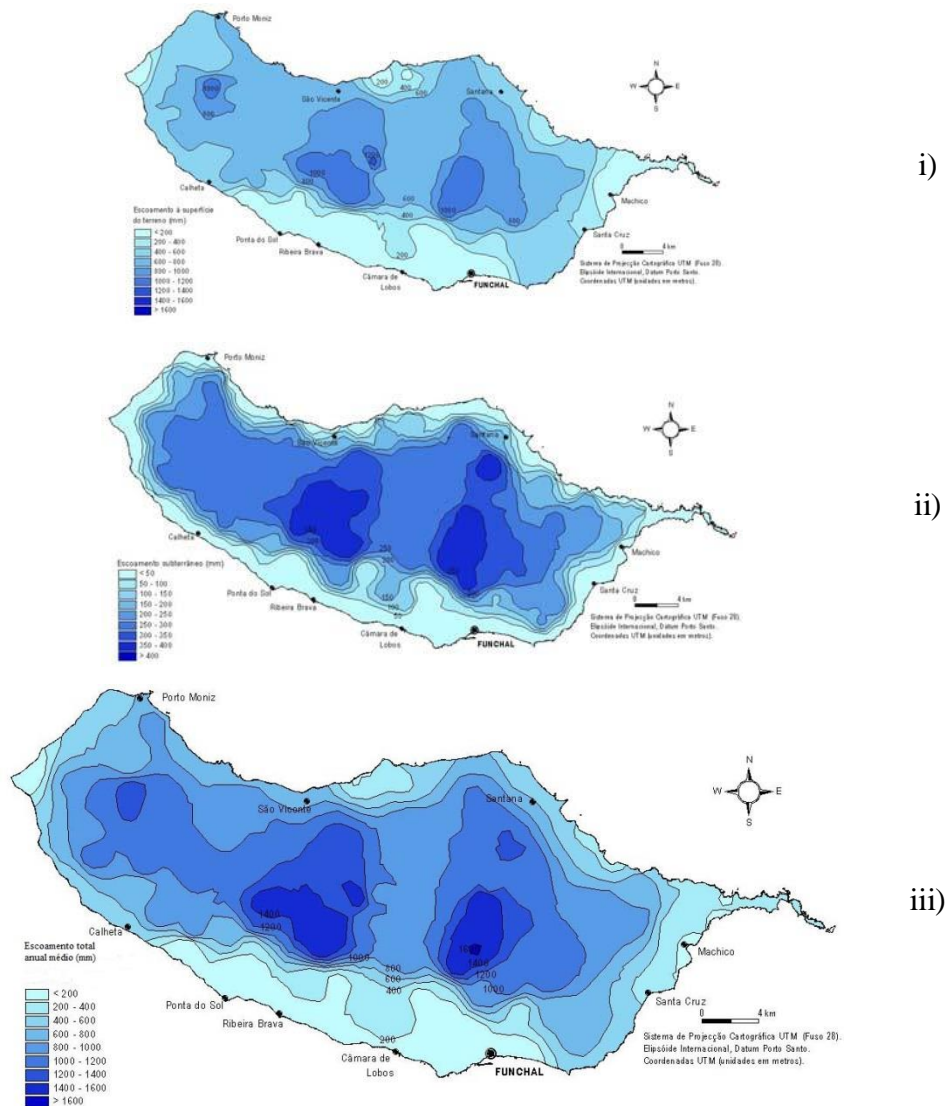


Figura 28. Isolinhas anuais médias: i) Escoamento Subterrâneo e Hipodérmico, ii) Escoamento Superficial, iii) Escoamento Total adaptado (Portela et al., 2002)

Pode-se de outra forma, e mediante uma análise muito simples verificar se, porventura, existem excedentes subterrâneos que são drenados para o canal nos meses de Verão e mediante dessa análise escolher um fator perto da unidade, tanto superior como inferior.

O valor razoável para o parâmetro C, critério que poderá condicionar o cálculo do caudal de ponta de cheia, tanto para excesso como por defeito, foi considerado como sendo unitário.

Pelo facto de haver escoamento subterrâneo considerável durante o verão por maioria de razão, considera-se que existe escoamento subterrâneo a drenar para dentro da bacia todo o ano.

O parâmetro de escoamento subterrâneo (água precipitada anteriormente e infiltrada até à zona saturada que finalmente drena para dentro da ribeira) estará a contribuir para agravar o caudal de ponta de cheia. No entanto, como a bacia não é impermeável a água infiltrada dessa dada precipitação irá reduzir o caudal de ponta de cheia, daí ter considerado que o parâmetro “C” tem o valor de 1.

4.6.3 - Intensidade de precipitação

Define-se intensidade de precipitação, i (m/s), como a precipitação ocorrida durante um certo intervalo de tempo. Por vezes afirmamos que precipitou 10 mm ou 100 mm, no entanto é desconhecida a intensidade. É de referir que à medida que o tempo aumenta a intensidade de precipitação diminuí.

4.6.4 - Cálculo do caudal de ponta de cheia pelo método racional

a) Cálculo do caudal de ponta de cheia para as sub-bacias

As sub-bacias estudadas para o cálculo de ponta de cheia perfazem um total de 14 e estão indicadas na Tabela 12 que se segue. Nesta tabela encontra-se registada a área de cada sub-bacia, bem como, o comprimento do curso de água principal e o seu desnível geométrico.

Tabela 12. Quadro síntese das características das sub-bacias em estudo

Id	Sub-bacia	Área da sub-bacia, A (km ²)	Comprimento do curso de água principal, L (m)	Desnível geométrico, ΔH (m)
1	ribeira da Portela	0,882	1940,8	234,3
2	afluente "Escola da Ribeira de Machico"	0,297	1155,9	230,4
3	ribeira da Ermida	1,281	2317,6	475,3
4	ribeira da Alfurada	0,657	1752	445,1
5	ribeira das Cales	2,694	2894,7	499,7
6	afluente "Escola dos Maroços"	0,379	1280,1	360
7	ribeira Grande	0,921	1943,7	550
8	ribeira do Moinho Velho	1,523	2472,7	589,8
9	ribeira Seca	4,626	3348,5	587,5
10	ribeira do Caramanchão	1,402	2145,6	509,1
11	ribeira do Poço do Gil	0,515	1387,3	429,1
12	ribeira do Piquinho	0,129	874,8	210,4
13	ribeira do Paraíso	0,851	1546,1	389
14	ribeira da Banda d'Além	0,647	1442	349,2

É importante referir que só foi possível realizar o estudo de catorze sub-bacias de outras tantas existentes na bacia hidrográfica de Machico devido a vários motivos, entre os quais se destacam, a dificuldade em realizar medições e perigosidade em chegar a tais secções de desembocadura.

De modo a calcular o caudal de ponta de cheia através da fórmula do Método Racional já apresentada anteriormente no capítulo 3.6.1, foi necessário calcular o tempo de concentração de cada uma das sub-bacias.

Assim, na Tabela 13 visualiza-se o tempo de concentração médio para cada sub-bacia em estudo. Optou-se por calcular os tempos de concentração por Kirpich e Témez pois trata-se de valores por excesso e defeito e em que um valor médio desta duração de concentração iria resultar em um valor próximo da formulação de Giandotti, em que a morosidade a efetuar tal cálculo não seria proveitosa para o resultado final. Tal procedimento foi também utilizado para calcular os tempos de concentração referentes às áreas de drenagem a montante das secções ao longo da ribeira de Machico.

Tabela 13. Tempo de concentração médio para as sub-bacias em estudo

Sub-bacias	t_c – kirpich (h)	t_c – temez (h)	t_c – médio (h)	t_c – médio (min)
ribeira da Portela	0,249	0,742	0,496	30
afluente "Escola da Ribeira de Machico"	0,138	0,455	0,296	18
ribeira da Ermida	0,233	0,768	0,500	30
ribeira da Alfurada	0,173	0,596	0,385	23
ribeira das Cales	0,295	0,940	0,617	37
afluente "Escola Maroços"	0,130	0,461	0,296	18
ribeira Grande	0,180	0,632	0,406	24
ribeira do Moinho Velho	0,231	0,784	0,507	30
ribeira Seca	0,328	1,047	0,687	41
ribeira do Caramanchão	0,207	0,705	0,456	27
ribeira do Poço do Gil	0,134	0,481	0,307	18
ribeira do Piquinho	0,103	0,355	0,229	14
ribeira do Paraíso	0,158	0,543	0,350	21
ribeira da Banda d'Além	0,151	0,519	0,335	20

Tornava-se importante saber quais seriam as sub-bacias que estariam influenciadas pela precipitação de cada posto de monitorização.

Na Figura 29 observam-se os postos de monitorização e as sub-bacias que estão afetadas por estes, sub-bacias essas já identificadas na Figura 19, página 32. Pela repartição da bacia hidrográfica de Machico pelo Método de Thiessen verifica-se que as sub-bacias da Portela, afluente “Escola Básica da Ribeira de Machico”, Ermida e Alfurada estão afetadas pelo posto de monitorização do Santo da Serra. Por outro lado, as restantes sub-bacias estão afetadas pelo posto florestal de Machico, excetuando, a sub-bacia do Caramanchão e Cales que são afetadas pelos dois postos, ou seja, estas duas sub-bacias têm uma precipitação média diária anual ponderada.

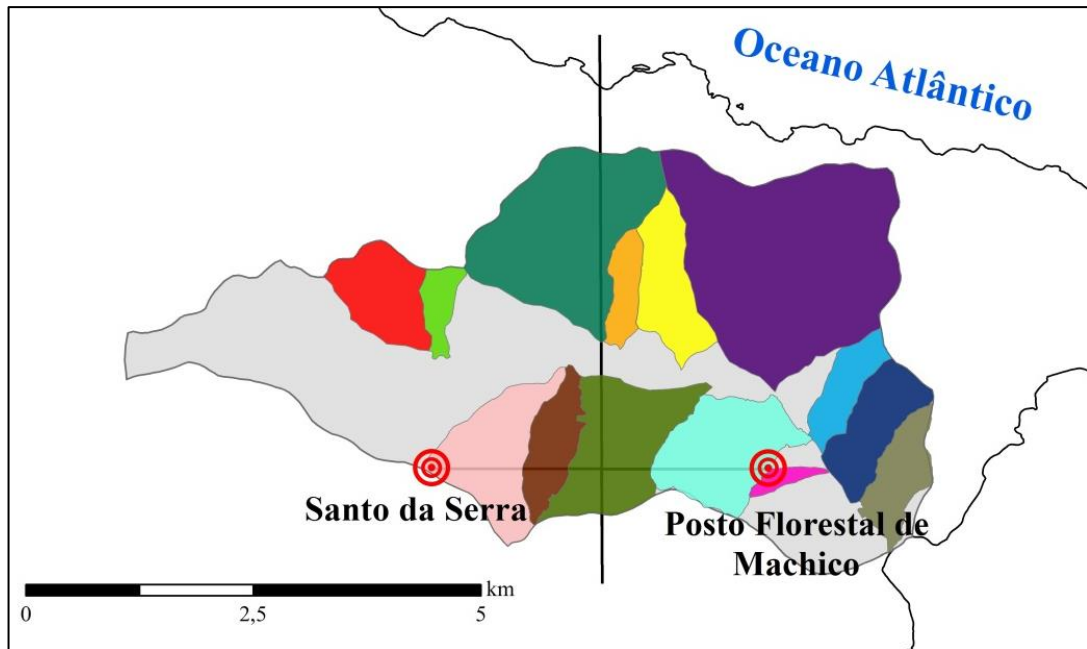


Figura 29. Sub-bacias afetadas pelos postos de monitorização

Para efeitos de cálculo do método racional é de realçar que o parâmetro “C” faz parte da formulação de forma unitária e a intensidade de precipitação (m/s) é calculada como sendo a razão entre a precipitação afetada por um coeficiente de acordo com o tempo de concentração de uma dada sub-bacia, pelo seu próprio tempo de concentração.

Depois de calculados os caudais de ponta de cheia pelo método racional, apresentam-se de seguida na Tabela 14 os resultados obtidos para as sub-bacias e caudais com período de retorno de 100 anos, estando os restantes colocados no Anexo VIII.

Tabela 14. Caudal das sub-bacias através do cálculo pelo Método Racional para T=100 anos

Id	Sub-bacia	Caudal de ponta de cheia, Q (m³/s)
1	ribeira da Portela	48,96
2	afluente "Escola da Ribeira de Machico"	19,33
3	ribeira da Ermida	70,87
4	ribeira da Alfurada	40,08
5	ribeira das Cales	128,41
6	afluente "Escola dos Marços"	22,16
7	ribeira Grande	49,53
8	ribeira do Moinho Velho	79,43
9	ribeira Seca	197,67
10	ribeira do Caramanchão	72,25
11	ribeira do Poço do Gil	29,92
12	ribeira do Piquinho	7,72
13	ribeira do Paraíso	47,91
14	ribeira da Banda d'Além	36,82

b) Cálculo do caudal de ponta de cheia para as várias secções da ribeira de Machico

O estudo das secções da ribeira canalizada realizou-se na perspetiva de montante para jusante. Assim para o cálculo do caudal de ponta de cheia da primeira secção foi tido em conta apenas a área a montante dessa secção, no entanto, para as secções seguintes as áreas de drenagem tidas em conta foram aquelas em que as linhas de água desaguavam para essa mesma secção.

Após calculados os caudais de ponta de cheia para cada secção, caudais acumulados, isto é, para a secção 2, contabilizou-se a área correspondente a esta secção como também a área da secção 1. Em suma, este foi o critério utilizada em todas secções da ribeira de Machico.

Na seguinte Tabela 15 mostram-se as áreas e o tempo de concentração, t_c em horas, utilizadas para o cálculo do caudal de ponta de cheia pelo método racional.

Tabela 15. Áreas dos polígonos que serviram de base para o cálculo do caudal de ponta de cheia pelo método racional

Id das secções	Área dos polígonos (m ²)	Tempo de concentração	
		(h)	(min)
1	3953424,84	1,009	60,5
2	746245,03	0,357	21,4
3	2790162,59	0,486	29,2
4	772854,93	0,389	23,3
5	3013349,63	0,625	37,5
6a	399806,74	0,298	17,9
6b	79857,06	0,096	5,7
6c	59468,12	0,118	7,1
7	210354,80	0,129	7,8
8	2597267,16	0,516	31,0
9	4839589,87	0,695	41,7
10	1595126,00	0,458	27,5
11	688192,38	0,310	18,6
12a	162539,64	0,231	13,9
12b	102328,43	0,212	12,7
14a	1532899,67	0,372	22,3
14b	690670,00	0,341	20,4
14c	345863,11	0,253	15,2

Os resultados apresentados na Tabela 16 mostram o caudal de cada secção e o caudal que ia sendo acumulado, à medida que a área da bacia ia contribuindo para tal cálculo.

Tabela 16. Caudal calculado para as diferentes secções da ribeira de Machico para um período de retorno de 100 anos

Id das secções	Caudal Método Racional de cada secção, Q (m³/s)	Caudal acumulado, Q (m³/s)	Área acumulada da bacia (%)
1	149,56	149,56	16,08
2	45,55	195,11	19,12
3	153,00	348,10	30,47
4	45,99	394,09	33,62
5	139,98	534,07	45,87
6a	22,80	556,87	47,50
6b	0,79	557,66	47,83
6c	1,97	559,63	48,07
7	8,46	568,10	48,92
8	131,73	699,83	59,49
9	201,64	901,47	79,18
10	80,31	981,78	85,67
11	38,97	1020,75	88,47
12a	9,43	1030,18	89,13
12b	5,88	1036,06	89,55
14a	82,95	1119,01	95,78
14b	38,29	1157,30	98,59
14c	20,07	1177,37	100,00

4.7 - CÁLCULO DE CAUDAIS PELA EQUAÇÃO DE MANNING-STRICKLER

A equação de Manning – Strickler utilizada para calcular o caudal, tal volume que num determinado instante de tempo seria capaz de passar num determinada secção, com determinadas características físicas, declive e de acordo com as medições realizadas, tratando-se de um canal retangular. Assim, tem-se a seguinte equação:

$$Q = \frac{I}{n} \cdot \left(R_h^{\frac{2}{3}} \right) \cdot A \cdot \left(i^{\frac{1}{2}} \right), \text{ onde } R_h = \frac{A}{P} \quad (25)$$

em que: n é o coeficiente de rugosidade do canal ($m^{-1/3}s$), R_h é o raio hidráulico (m), A trata-se da área da secção medida (m^2) e i é o declive do leito do canal (m/m).

Quanto ao raio hidráulico, R_h , trata-se da razão entre a área da secção do canal, A (m^2) pelo perímetro molhado, P (m), ou seja duas vezes a altura mais uma vez a largura.

É de referir que para os cálculos do caudal pela equação de Manning-Strickler, foi utilizado o coeficiente de rugosidade ponderado, através da seguinte formulação e de acordo com valores deste coeficiente para o leito e paredes. (Porto, 1998)

$$n = \frac{2 \cdot n_{paredes} \cdot h_{parede} + n_{leito} \cdot l_{leito}}{2 \cdot h_{paredes} + l_{leito}} \quad (26)$$

em que: n é o coeficiente de rugosidade do canal ($m^{-1/3}s$), h (m) é a altura das margens e l (m) é a largura do leito.

4.7.1 - Cálculo de caudal para as sub-bacias

No que se refere ao cálculo do caudal mediante a equação de Manning – Strickler, é apresentado apenas o caudal calculado, sendo que todos os parâmetros que advêm de tal equação são mostrados em Anexo IX. Isto é válido para as secções de desembocadura das sub-bacias como também para as secções medidas ao longo da ribeira de Machico.

Apresenta-se de seguida, na Tabela 17, os caudais calculados das secções de desembocadura ou de desaguamento das sub-bacias para dentro da ribeira principal para um período de retorno de 100 anos.

Tabela 17. Caudais de Manning - Strickler para as secções de desembocadura das sub-bacias

Id	Desembocadura sub-bacia	Caudal Manning-Strickler, Q (m ³ /s)
1	ribeira da Portela	109,8
2	afluente "Escola da Ribeira de Machico"	21,5
3	ribeira da Ermida	855,9
4	ribeira da Alfurada	117,7
5	ribeira das Cales	313,2
6	afluente "Escola Maroços"	365,6
7	ribeira Grande	96,7
8	ribeira do Moinho Velho	214,4
9	ribeira Seca	101,1
10	ribeira do Caramanchão	76,0
11	ribeira do Poço do Gil	102,2
12	ribeira do Piquinho	51,2
13	ribeira do Paraíso	36,4
14	ribeira da Banda d'Além	170,4

4.7.2 - Secções da ribeira de Machico

Para a medição das secções da ribeira de Machico, assim como, para as restantes medições realizadas nas sub-bacias, foi utilizado como instrumento de medição, um medidor a laser. Como referido anteriormente, devido à perigosidade e difícil acesso à ribeira é de realçar que não foi possível realizar outras medições.

Relativamente à determinação do declive, esta foi uma tarefa de igual modo complicada. Após tentativa de realizá-la “*in situ*”, esta tarefa revelou-se difícil. Através do programa informático que constitui um sistema de informação geográfica, ArcGis, é que foi possível determinar com fiabilidade e exatidão os declives necessários para completar o estudo com sucesso.

Importa salientar que a aplicação do declive no cálculo da equação de Manning-Strickler tornou-se muito complicada, pois à mínima mudança de declive o caudal determinado já era totalmente diferente do calculado. Mas de acordo com uma análise prontificada, racional e minuciosa foram conseguidos resultados aceitáveis.

No que concerne aos caudais calculados para as secções da ribeira, apresentam-se de seguida na Tabela 18 os seguintes valores para um período de retorno de 1000 anos, sendo que, as características das secções estarão presentes no Anexo X.

Tabela 18. Caudais de cálculo pela equação de Manning–Strickler

Id	Caudal Manning-Strickler, Q (m³/s)
1	131,8
2	75,1
3	348,5
4	337,8
5	591,8
6a	1029,1
6b	490,9
6c	1519,6
7	664,9
8	678,3
9	1419,1
10	1671,7
11	1158,0
12a	1346,0
12b	1024,5
14a	1202,6
14b	1239,8
14c	2476,9

5 - VULNERABILIDADE DE CHEIAS

Pretende-se neste capítulo avaliar a vulnerabilidade de ocorrência de cheias em 32 secções, situadas em afluentes e na linha de água principal.

A partir do caudal calculado pelo método racional e do calculado pela equação de Manning é possível avaliar a percentagem de preenchimento da secção em causa. Após esta análise, irei indicar quais as secções que poderão causar problemas, perante precipitações com períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 ou 1000 anos.

5.1 - DEFINIÇÃO DE VULNERABILIDADE

A Vulnerabilidade representa o grau de perda de componente ou componentes expostos às cheias, sendo este aspeto diferente do conceito de risco, estando fortemente ligada às características económicas, etárias, culturais, sociais de uma sociedade, como também, da ocupação do território. (Ferreira, 2010)

Com o decorrer dos tempos e com o aumento da população, tornou-se evidente a construção de novos equipamentos e infraestruturas para os habitantes de uma dada região. Assim, as construções teriam de ser realizadas, mesmo que por vezes isso tivesse de incluir mudanças de direção de leitos de ribeiras, estrangulamento de secções, ocupação indevida dos leitos das ribeiras e outras.

Por outro lado as variáveis da vulnerabilidade são os atributos do grupo humano ou sociedade ameaçados por um fenómeno natural, o uso do solo, em que locais estão inseridos os serviços, a densidade populacional, tipo de estruturas e entidades/coletividades de apoio, a eficácia dos sistemas de proteção e prevenção, a eficácia dos sistemas de evacuação e resposta à cheia. (Ferreira, 2010)

“Ainda assim, segundo alguns autores, a vulnerabilidade passa pela capacidade das sociedades darem resposta às crises provocadas por um fenómeno natural e tecnológico, ou seja, à sua capacidade de reagir e recuperar da adversidade que os atingiu. Assume-se, assim, o pressuposto de um determinado grau de vulnerabilidade permanente do sistema social. A vulnerabilidade social aos desastres é sinónima de insegurança e fragilidade face a um perigo, em que existe um nível e um determinado grau de exposição, onde se terá que avaliar a capacidade de absorver e recuperar dos impactes sofridos.” (Ferreira, 2010)





Apresenta-se o grau de vulnerabilidade à cheia consoante a percentagem mediante a divisão entre o caudal de ponta de cheia pelo método racional e o caudal pela

equação de Manning – Strickler. À percentagem daí resultante irá advir uma cor para cada classe de vulnerabilidade. Segue-se na Tabela 19 informação relativa às classes de vulnerabilidade definidas para este estudo.

$$\% \text{preenchimento} = \frac{Q_{MR}}{Q_{M-S}} \cdot 100\% \quad (27)$$

Importa referir que para a última classe, a percentagem de preenchimento superior a 100% irá resultar no transbordo das secções, ocorrendo assim em vulnerabilidade muito elevada todas as áreas vulneráveis. Referir ainda que as secções de desembocadura e ainda as secções ao longo da ribeira de Machico apresentam quase sempre nas suas margens residências, comércio e serviços, mas de acordo com algumas das percentagens de preenchimento baixas obtidas não poderiam resultar em vulnerabilidades elevadas, embora cada classe de vulnerabilidade apresentasse respetivamente as suas áreas vulneráveis. Tentou-se qualitativamente ponderar através da percentagem de preenchimento e área vulnerável a melhor classe de vulnerabilidade a atribuir. Apresentam-se na Tabela 19 as classes de vulnerabilidade definidas para o estudo.

Tabela 19. Classes de Vulnerabilidade de acordo com as áreas vulneráveis - adaptado de (Duarte, Borges, Ramos, Pedro, & Pancada, 2007)

Classes de vulnerabilidade	Áreas vulneráveis	Cores	Preenchimento (%)
Vulnerabilidade baixa	Atividade agrícola abandonada, terrenos incultos e “vazios urbanos”		< 40 %
Vulnerabilidade média	Áreas agrícolas e jardins		40 ≤ % ≤ 75
Vulnerabilidade elevada	Residências, Infraestruturas, Comércio, Indústrias, Serviços		75 < % ≤ 100
Vulnerabilidade muito elevada	Ocorrência de transbordos e consequentes cheias		< 100 %

5.2 - RESULTADOS OBTIDOS E COMENTÁRIOS

Por fim são apresentados os resultados finais, após uma cuidada e minuciosa análise de todos os valores de cálculo de caudais, determinados pelas duas formulações. Este procedimento foi realizado para as secções de desembocadura das sub-bacias para dentro da ribeira principal, como também, para as secções da ribeira de Machico.

Após os caudais calculados pelos dois métodos e de modo a constituir uma análise quantitativa, decidi realizar o quociente entre esses mesmos caudais entre si, caudal

de ponta de cheia pelo método racional e o caudal pela equação de Manning-Strickler correspondendo ao numerador e denominador em tal equação. O quociente entre estes caudais foi multiplicado por 100% de modo a que se obtivesse uma percentagem de preenchimento da secção e que depois corresponderia a uma classe de vulnerabilidade, áreas vulneráveis e cor. Este procedimento foi realizado para todos os períodos de retorno (10, 20, 50, 100 e 1000 anos), igualmente para secções de desembocadura de sub-bacia e ribeira de Machico.

5.2.1 - Sub-bacias

Apresentam-se de seguida comentários relativos aos resultados que constam nas cinco tabelas, no Anexo XI, uma para cada um dos períodos de retorno estudados.

- Período de retorno de 10 anos

No que concerne às secções de desembocadura das sub-bacias, é de salientar que para um período de retorno de uma década, as secções finais de todas as sub-bacias não apresentam nenhuma percentagem de preenchimento da área de secção superior a 100%. No entanto, existe um valor preocupante relativo à secção final da sub-bacia da Ribeira Seca, em que este se encontra com um valor de 96,2%.

Importa mencionar que para um caudal de outra natureza, contendo água, material rochoso, solo e outros, esta secção não conseguiria comportar tal caudal e transbordaria.

- Período de retorno de 20 anos

Para um período de retorno de 20 anos, apenas a sub-bacia da ribeira do Paraíso carece de cuidados pois faltam preencher cerca de 20% da secção final.

Por outro lado, a secção final da sub-bacia da Ribeira Seca, para um período de retorno de 20 anos, precisaria, para caudais com água no seu conteúdo, cerca de 1,2 vezes a sua secção atual.

- Período de retorno de 50 anos

De acordo com os resultados da Tabela 33, verifica-se que a secção final da sub-bacia da Ribeira do Paraíso já excede em cerca de 9 % o seu preenchimento.

É de referenciar também que as sub-bacias do Afluente “Escola Ribeira de Machico” e Ribeira do Caramanchão estão com a sua secção de preenchimento em cerca 80%, apresentando pois algum cuidado.

- Período de retorno de 100 anos

Relativamente ao período de retorno de 100, período esse utilizado por Engenheiros Hidráulicos Projetistas para projetar uma obra de canalização de uma dada ribeira. Visualiza-se que as secções finais citadas anteriormente já estão próximas de exceder a sua capacidade total.

Quanto à secção final da sub-bacia da Ribeira Seca, esta apresenta o valor de 200 %, ou seja seria necessário para o período de retorno indicado, uma secção com mais de o dobro da secção final atual.

- Período de retorno de 1000 anos

Por fim, a análise das sub-bacias foi também preconizada para um período de retorno de 1000 anos, ou seja, valor de precipitação que poderá ocorrer pelo menos uma vez durante um milénio.

As secções finais das sub-bacias do Afluente "Escola da Ribeira de Machico", da ribeira Seca, do Caramanchão e do Paraíso já superaram largamente a sua capacidade.

No entanto, apenas a sub-bacia da ribeira Grande aproxima-se dos 90% de capacidade total. Enquanto as restantes secções finais das sub-bacias não oferecem qualquer tipo de vulnerabilidade.

5.2.2 - Secções da ribeira de Machico

Por fim, e após exposição dos resultados das secções finais das sub-bacias, é de igual modo apresentado os resultados das secções ao longo da ribeira principal. Segue-se um comentário para cada uma das tabelas em Anexo XII, uma para cada um dos períodos de retorno, 10, 20, 50, 100 e 1000 anos

- Período de retorno de 10 anos

Para um período de retorno de 10 anos, as secções 1a, 2a, 4a e 6b apresentam valores acima dos 70% de preenchimento da secção. As restantes não oferecem qualquer tipo de comentário mais cuidadoso.

- Período de retorno de 20 anos

Segundo a Tabela 37, o valor correspondente à secção 2a, apresenta aquando das medições efetuadas uma secção muito irregular e não canalizada. A percentagem de excedência desta secção aproxima-se dos 100%, encontra-se aqui uma secção que poderá vulnerável, mas como não existem populações por perto, esta vulnerabilidade não deverá ser muito acentuada.

- Período de retorno de 50 anos

Para um período de retorno de 50 anos as secções da ribeira canalizada 1a, 2a, 4a e 6b já excederam a sua capacidade total, sendo que estas secções irão transbordar.

As secções 3a, 8a e 12b estão claramente num patamar de vulnerabilidade alta, muito embora as referentes percentagens de excedência de secção não estejam preenchidas, relembra-se que, o estudo apenas foi realizado para caudais que apenas continham água, e que juntando outros materiais a este caudal, estas mesmas secções transbordariam.

- Período de retorno de 100 anos

Com um acontecimento possível em 100 anos, esta tabela informa que dez das dezoito secções estudadas da ribeira principal já excederam a sua capacidade total e acabaram por transbordar.

É de realçar que, em muitas secções, incluindo as dez excedidas com um episódio referente a precipitações com período de retorno de 100 anos, a medição foi realizada sobre passagens pedonais e pontes rodoviárias, ou seja, tudo secções que de certa forma diminuiram a sua área.

É importante referir, que a última secção encontrava-se desimpedida para efeitos de medição. O valor de percentagem de preenchimento da última área de secção encontra-se perto de preencher metade da sua capacidade.

- Período de retorno de 1000 anos

Para um período de retorno de 1000 anos, e de acordo com a Tabela 40, apenas cinco secções não excederam a sua capacidade total.

As restantes secções estão na casa das centenas, transbordando o seu escoamento para fora da ribeira canalizada, sendo a 2.^a secção a mais crítica.

5.3 - MAPAS DE VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade é representável cartograficamente através de mapas de zonamento, como os que se apresentam em Anexo XIII, sendo o resultado obtido através da percentagem entre caudais, de acordo com as respetivas cores, como já foi anteriormente designado.

A Tabela 20 e Tabela 21 apresentam o indicativo da classe de vulnerabilidade de cada secção, tanto das secções finais das sub-bacias, como das secções da ribeira de Machico.

Tabela 20. Percentagem de preenchimento e respetiva indicação da cor respeitante à classe de vulnerabilidade para as secções finais das sub-bacias

Secções	Período de retorno (anos)											
	10		20		50		100		1000		Vulnerabilidade	
	Preenchimento (%)	Vulnerabilidade	Preenchimento (%)	Vulnerabilidade	Preenchimento (%)	Vulnerabilidade	Preenchimento (%)	Vulnerabilidade	Preenchimento (%)	Vulnerabilidade		
1	30,09		34,20		40,42		44,61		58,70			
2	60,65		68,86		81,47		89,93		118,33			
3	5,58		6,35		7,50		8,28		10,89			
4	22,96		26,08		30,84		34,04		44,79			
5	24,12		28,62		35,69		41,00		61,30			
6	2,98		3,76		5,04		6,06		10,28			
7	25,21		31,81		42,56		51,22		86,83			
8	21,79		25,85		32,24		37,04		55,39			
9	96,18		121,49		162,40		195,45		331,34			
10	46,77		59,05		78,97		95,04		161,13			
11	14,40		18,17		24,32		29,27		49,61			
12	7,42		9,35		12,52		15,07		25,55			
13	64,71		81,64		109,25		131,49		222,90			
14	10,63		13,41		17,95		21,60		36,62			

Tabela 21. Percentagem de preenchimento e respetiva indicação da cor respeitante à classe de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico

Secções	Período de retorno (anos)														
	10			20			50			100			1000		
	Preenchimento (%)	Vulnerabilidade		Preenchimento (%)	Vulnerabilidade		Preenchimento (%)	Vulnerabilidade		Preenchimento (%)	Vulnerabilidade		Preenchimento (%)	Vulnerabilidade	
1	77,93		88,63		103,22		113,45		148,03						
2	86,72		98,60		114,78		126,13		164,65						
3	68,71		78,11		90,90		99,88		130,42						
4	80,28		91,25		106,18		116,67		152,34						
5	60,01		68,92		81,29		90,24		122,04						
6a	35,63		41,04		48,60		54,11		73,92						
6b	74,78		86,16		102,02		113,60		155,26						
6c	24,23		27,92		33,07		36,83		50,38						
7	56,02		64,62		76,64		85,44		117,30						
8	66,57		77,18		92,11		103,17		143,80						
9	38,95		45,89		55,88		63,52		92,63						
10	35,48		42,01		51,45		58,73		86,72						
11	52,91		62,78		77,09		88,15		130,87						
12a	45,87		54,45		66,90		76,53		113,76						
12b	60,56		71,91		88,38		101,13		150,44						
14a	55,06		65,64		81,05		93,05		139,77						
14b	54,97		65,63		81,20		93,35		140,79						
14c	27,92		33,37		41,32		47,53		71,83						

CONCLUSÕES E MEDIDAS A IMPLEMENTAR

A ilha da Madeira apresenta-se como uma região propícia à ocorrência de cheias rápidas, localmente designadas por aluviões, que se devem a vários fatores, entre eles, o declive longitudinal e transversal das bacias hidrográficas, ao qual se associam, com alguma frequência, precipitações intensas.

Esta dissertação de mestrado iniciou-se com a inclusão de um capítulo alusivo às aluviões, acontecimentos catastróficos que infelizmente tem abalado a ilha da Madeira de alguns séculos até hoje. Realizou-se a descrição de alguns relatos e registos das datas das aluviões mais marcantes na freguesia de Machico.

Após essa breve resenha histórica, iniciou-se o estudo da bacia hidrográfica, uma caracterização geomorfológica. Tipo de relevo, perfil longitudinal, rede de drenagem, características fisiográficas, fatores com maior ou menor suscetibilidade de ocorrência de cheias.

Posteriormente procedeu-se à análise estatística das precipitações que serviram de base para o estudo da análise de cheias. Começou-se por analisar e constituir uma amostra de precipitações para dois postos de monitorização. De seguida determinou-se as precipitações máximas anuais indispensáveis ao estudo e à análise de tendências perante o ajuste de leis. Determinou-se assim, e perante a lei estatística, precipitações para os vários períodos de retorno.

No quarto capítulo, análise de cheias, precedeu-se em primeiro lugar à determinação das linhas de possibilidade udométrica através das precipitações para os períodos já anteriormente referenciados. Estas linhas só são extrapoláveis para a ilha da Madeira até 12h, o facto é que nenhuma bacia hidrográfica na região possui tal tempo de concentração, tornou-se assim necessário conhecer qual a precipitação para o tempo de concentração da bacia para posterior cálculo do caudal de ponta de cheia. De seguida calculou-se os caudais de ponta de cheia e de Manning para as secções estudadas. Após tal operação, analisou-se se o caudal pela equação de Manning de uma secção de uma sub-bacia por exemplo, comportava o caudal de ponta de cheia calculado pelo método racional.

Assim sendo, para um período de retorno de 100 anos, referente às secções de desembocadura das sub-bacias para a ribeira principal, apenas duas (Ribeira Seca e Ribeira do Paraíso) das catorze sub-bacias estudadas não comportam tal volume de água e acabam por transbordar. Quanto às secções da ribeira principal e igualmente

para o mesmo período de retorno, seis das dezoito secções estudadas não comportam tal volume de água, mas por vezes o que se sucede é que as secções estão estranguladas ou por ali são construídas pontes rodoviárias e pedonais que acabam se encontrarem abaixo do nível da cota das margens da ribeira. É de salientar que um caudal proveniente de uma precipitação extrema, constituído apenas por água poderá não atingir 50% da capacidade total da secção, mas se o mesmo caudal transportar uma significativa carga sólida (argilas, areias, material rochoso de grande dimensão, troncos de árvores entre outros) poderá vir a resultar numa dramática cheia e em que pessoas e bens estarão vulneráveis.

O objetivo deste trabalho foi a realização de mapas de vulnerabilidade nos quais estão assinaladas manchas cujas cores indicam diferentes graus de vulnerabilidade, uma sequência de cores que vão desde o amarelo, com vulnerabilidade baixa e vermelho para vulnerabilidade alta.

As principais dificuldades encontradas foram, a complexidade em determinar um declive exato e correto, medição de algumas secções, tratamento de dados de precipitações para os postos utilizados no estudo, entre outras.

Face a isto as possíveis medidas a implementar de modo a diminuir os estragos provocados pelas aluviões são:

- Repensar o dimensionamento de passagens pedonais e pontes rodoviárias, colocando-as possivelmente numa cota acima da altura das margens da ribeira;
- Realização de limpezas anuais nas ribeiras das sub-bacias e ao nível de dragagem da ribeira principal;
- Obras de intervenção nos trechos da ribeira que ainda estão por canalizar, dimensionando secções de betão armado bem definidas;
- De acordo com o desnível presente a partir do quarto quilómetro de norte para sul na linha de água principal, tornar-se-á necessário, colocar a jusante desse desnível sistemas que possam mitigar velocidades altas;
- Dados os declives altos presentes em determinadas secções das ribeiras das sub-bacias e ribeira principal, tornar-se-ia evidente a colocação do leito da ribeira num sistema de degraus, de modo a constituir também uma importante técnica de retenção de material rochoso e diminuição da velocidade;

- Perceber qual o material com coeficiente de rugosidade alto de modo a emprega-lo em tais trechos da ribeira que ainda estão por canalizar;
- É urgente toda a canalização da sub-bacia da ribeira Seca desde o seu início até esta desaguar na ribeira principal, pois trata-se de uma das sub-bacias com maior área de drenagem;
- Importante monitorizar movimentos de vertente e realizar a sua contenção;
- Construir açudes a montante para retenção de material sólido;
- Elaboração de cartas de risco na bacia hidrográfica de Machico;
- Medidas de ordenamento de território, deslocação do leito da ribeira de novas infraestruturas e outras novas construções.

Por fim, espera-se que com estas medidas e outras a implementar, acontecimentos como os existentes no passado sejam apenas memórias esquecidas e levadas nas águas que jamais transbordem as vidas existentes.

BIBLIOGRAFIA

- Blain, G. C., Kayano, M. T., De, M. B. P., Lulu, C. E. J., Agrônômico, I., Iac, D. C., & Sp, C. (2009). Variabilidade Amostral das Séries Mensais de Precipitação Pluvial em duas Regiões do Brasil: Pelotas-RS E Campinas-SP, (1968), 1–11.
- Carvalho, A. (2001). *Avaliação da Perigosidade das Cheias Rápidas na Bacia da Ribeira de Machico (Ilha da Madeira)*. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.
- Christofolletti, A. (1980). *Geomorfologia* (2^a Edição., p. 188). São Paulo: Edgar Blüchler.
- CMM. (2013). Caracterização do Concelho.
- Costa, A. C. M. da. (2009). *Stochastic space – time models for the characterization of precipitation extreme values A contribution to the study of the desertification phenomenon*. Instituto Superior Técnico.
- DRIGOT. (2010). Ortofotomapas da Ilha da Madeira.
- Duarte, A., Borges, B., Ramos, C., Pedro, P., & Pancada, R. (2007). *Cheias Rápidas em Áreas Urbanas e sua Percepção: O caso da Bacia da R^a de Odivelas* (pp. 1–15).
- EARAM. (2010). *Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira*. Es.
- Ferreira, A. (2010). Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Dinâmicas Sociais, Riscos Naturais e Tecnológicos.
- Hipólito, J. R., & Vaz, Á. C. (2011). *Hidrologia e Recursos Hídricos* (1st ed., p. 796). IST Press.
- IGEOE. (1974). Carta Militar de Portugal (Madeira).
- Johansson, B., & Chen, D. (2005). Estimation of areal precipitation for runoff modelling using wind data : a case study in Sweden, 29(1979), 53–61.

- Marzol, M. V., Yanes, A., Romero, C., Brito de Azevedo, E., Prada, S., & Martins, A. (2006). Los riesgos da las lluvias torrenciales en las islas de la Macaronesia (Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde). *Clima, Sociedad y Media Ambiente. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A, n^o5*, 442–452.
- Naghattini, M., & Portela, M. M. (2011). **PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA APLICADAS À HIDROLOGIA.**
- Oliveira, R. P. de. (2010). *Análise da Precipitação*. Lisboa.
- Portela, M. M., Gaspar, M. A., & Hora, G. R. (2002). Avaliação do escoamento anual médio na Ilha da Madeira. *Tecnologia da Água, Edição II*, 50–58.
- Porto, R. M. (1998). *Hidráulica Básica*. (USP, Ed.) (2^a Edição.). São Carlos.
- Quintal, R. (1999). Aluviões da Madeira desde o Século XIX. *Territorium*, 6.
- Quintela, A. C. (1996). *Hidrologia e Recursos Hídricos* (1st ed., p. 256). Lisboa.
- Ribeiro, J. A. (2001). *Machico - Subsídios para a história do seu concelho* (Câmara Mun., p. 295). Machico.
- Ricardo, R. P., Câmara, E. M. S. da, & Ferreira, M. A. M. (1992). Carta dos Solos da Ilha da Madeira. In RAM (Ed.), (CEP/ISA/CP., p. 162). Lisboa.
- Silveira, A. B. da, Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P., & Prada, S. (2010a). *Notícia Explicativa da Carta Geológica da ilha de Madeira na escala de 1:50.000, Folhas A e B*. (S. R. do A. e R. N. da R. A. da M. e U. Madeira, Ed.) (1^a Edição.).
- Silveira, A. B. da, Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P., & Prada, S. (2010b). *Carta Geológica da ilha da Madeira na Escala 1:50.000, Folhas A e B*. (Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais da Região Autónoma da Madeira e Universidade da Madeira, Ed.).
- SNIRH. (2012). Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.

Viessman, W., & Lewis, G. L. (2003). *Introduction to Hydrology* (5^a Edição., p. 612).
New Jersey: Pearson Education.

WMO. (1994). *Guide to Hydrological Practices* (5^a Edição., p. 735).

ANEXOS

ANEXO I

A tabela que se segue possui dados para definir a curva hipsométrica e curva hipsométrica adimensional.

Tabela 22. Dados para definir a curva hipsométrica

Cota (m)	Área entre cotas (km²)	Área acima da cota (km²)	Área (%)
1080,6		0,000000	0,00%
	0,005797		
1050		0,005797	0,02%
	0,040567		
1000		0,046364	0,19%
	0,084030		
950		0,130394	0,53%
	0,108717		
900		0,239111	0,97%
	0,147952		
850		0,387063	1,57%
	0,196726		
800		0,583789	2,37%
	0,322757		
750		0,906546	3,69%
	0,742429		
700		1,648976	6,71%
	1,580578		
650		3,229553	13,14%
	1,694514		
600		4,924068	20,03%
	2,109577		
550		7,033645	28,61%
	2,162813		
500		9,196458	37,41%
	2,044560		
450		11,241018	45,73%
	1,869928		
400		13,110946	53,34%
	1,613677		
350		14,724623	59,90%
	1,594924		
300		16,319547	66,39%
	1,714913		
250		18,034460	73,36%
	1,653949		
200		19,688409	80,09%

150	1,472504	21,160913	86,08%
100	1,363712	22,524624	91,63%
50	1,198859	23,723484	96,51%
0	0,853056	24,582036	100,00%

ANEXO II

Os dados que se seguem foram utilizados para construir o perfil longitudinal do curso de água principal.

Tabela 23. Dados para constituição do perfil longitudinal

Cota (m)	Distância até à foz (km)
0,0	0,000
50,0	2,010
100,0	3,351
150,0	4,365
200,0	5,228
250,0	5,937
300,0	6,439
350,0	6,707
400,0	6,901
450,0	7,515
500,0	8,384
550,0	9,106
600,0	9,691
650,0	10,173
700,0	10,680
750,0	11,125
800,0	11,493
850,0	11,804
900,0	12,047
950,0	12,255
1000,0	12,379
1050,0	12,479
1080,6	12,561





ANEXO III

A tabela que se segue apresenta os anos hidrológicos monitorizados.

Tabela 24. Anos hidrológicos dos postos monitorizados

Postos	Posto Florestal de Machico	Santo da Serra (Quinta da Junta)
Ano Hidrológico (1/10/ano) até (30/09/ano+1)	1936/37	1936/37
	1937/38	1937/38
	1938/39	1938/39
	1939/40	1939/40
	1940/41	1940/41
	1941/42	1941/42
	1942/43	1942/43
	1943/44	1943/44
	1944/45	1944/45
	1945/46	1945/46
	1946/47	1946/47
	1947/48	1947/48
	1948/49	1948/49
	1949/50	1949/50
	1950/51	1950/51
	1951/52	1951/52
	1952/53	1952/53
	1953/54	1953/54
	1954/55	1954/55
	1955/56	1955/56
	1956/57	1956/57
	1957/58	1957/58
	1958/59	1958/59
	1959/60	1959/60
	1960/61	1960/61
	1961/62	1961/62
	1962/63	1962/63
	1963/64	1963/64
	1964/65	1964/65
	1965/66	1965/66
1966/67	1966/67	
1967/68	1967/68	
1968/69	1968/69	
1969/70	1969/70	
1970/71	1970/71	
1971/72	1971/72	
1972/73	1972/73	
1973/74	1973/74	
1974/75	1974/75	

	1975/76	1975/76
	1976/77	1976/77
	1977/78	1977/78
	1978/79	1978/79
	1979/80	1979/80
	1980/81	1980/81
	1981/82	1981/82
	1982/83	1982/83
	1983/84	1983/84
	1984/85	1984/85
	1985/86	1985/86
	1986/87	1986/87
	1987/88	1987/88
	1988/89	1988/89
	1989/90	1989/90
	1990/91	1990/91
	1991/92	1991/92
	1992/93	1992/93
	1993/94	1993/94
	1994/95	1994/95
	1995/96	1995/96
	1996/97	1996/97
	1997/98	1997/98
	1998/99	1998/99
	1999/00	1999/00
	2000/01	2000/01
	2001/02	2001/02
	2002/03	2002/03
	2003/04	2003/04
	2004/05	2004/05
	2005/06	2005/06
	2006/07	2006/07
	2007/08	2007/08
	2008/09	2008/09
	2009/10	2009/10
	2010/11	2010/11
	2011/12	2011/12
	2012/13	2012/13
n	55	75

	Ano hidrológico sem dados
	Inatividade do posto
	Ano hidrológico com dados
	Dados insuficientes para resultar um ano hidrológico

ANEXO IV

Seguem-se precipitações máximas totais para os dois postos de monitorização para os cinco dias consecutivos para o posto florestal de Machico e Santo da Serra correspondente.

Tabela 25. Precipitações máximas anuais para o posto florestal de Machico para cinco dias consecutivos

Ano Hidrológico	Precipitação máxima anual (Posto Florestal de Machico)				
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias
	P _i (mm)	P _i (mm)	P _i (mm)	P _i (mm)	P _i (mm)
1	171,7	251,0	302,2	327,9	342,6
2	56,5	71,1	76,2	87,4	104,9
3	66,3	66,6	66,6	75,1	75,9
4	129,8	134,4	147,0	195,6	200,2
5	87,0	141,5	146,5	149,3	155,9
6	87,6	132,6	199,1	209,6	216,2
7	101,3	110,0	110,0	123,1	135,1
8	60,6	64,4	80,1	85,3	85,3
9	160,0	173,3	189,7	196,0	208,1
10	41,3	52,4	61,5	62,4	68,7
11	56,0	60,3	65,1	86,6	100,6
12	136,2	140,9	150,4	157,7	157,7
13	98,4	98,8	118,2	143,0	143,0
14	76,6	94,6	101,7	102,6	117,6
15	135,2	207,6	292,8	348,0	374,6
16	8,2	14,4	17,8	17,8	20,1
17	63,0	104,0	108,6	127,7	141,7
18	48,8	55,6	55,6	58,0	58,0
19	93,2	94,3	114,7	115,8	134,2
20	69,8	115,2	134,8	185,0	202,0
21	61,8	72,6	73,4	85,0	85,1
22	110,9	113,6	162,1	202,2	215,6
23	88,2	106,6	143,7	151,7	158,9
24	107,7	143,4	167,5	220,4	223,4
25	62,0	81,8	93,6	101,0	102,5
26	182,9	226,8	229,9	269,3	277,0
27	119,4	167,9	169,1	169,1	183,7
28	103,4	143,9	187,8	192,8	198,0
29	80,0	100,2	110,4	114,5	114,5
30	65,0	91,2	121,5	133,7	143,7
31	60,0	85,0	90,4	90,4	90,4

32	30,5	30,5	35,9	41,4	41,9
33	35,5	40,4	46,6	51,1	51,6
34	50,0	70,0	75,0	75,0	76,6
35	61,4	71,4	82,4	82,4	85,4
36	56,5	72,5	74,5	74,5	74,5
37	110,5	135,3	145,0	145,4	145,4
38	24,2	24,2	31,1	35,7	41,8
39	30,0	33,0	38,3	46,4	49,9
40	80,0	90,0	90,7	90,7	90,7
41	43,0	68,0	78,0	79,0	79,0
42	37,0	37,0	62,2	71,2	71,2
43	60,4	62,8	65,4	72,4	78,9
44	62,5	87,9	107,9	118,4	124,4
45	26,3	43,7	47,7	58,2	63,7
46	40,6	43,4	45,4	47,0	49,8
47	30,0	51,4	67,4	70,4	70,4
48	41,4	51,4	57,8	67,0	68,4
49	80,0	95,0	95,0	95,0	156,0
50	29,2	52,0	56,0	60,0	70,0
51	32,0	43,3	57,7	57,8	57,8
52	27,5	31,6	33,4	43,0	43,0
53	39,5	56,0	56,6	59,0	72,0
54	74,2	94,7	96,1	99,9	146,7
55	30,0	30,8	30,9	31,1	50,1

Tabela 26. Precipitações máximas anuais para o Santo da Serra para cinco dias consecutivos

Ano Hidrológico	Precipitação máxima anual (Santo da Serra)				
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias
	Pi (mm)	Pi (mm)	Pi (mm)	Pi (mm)	Pi (mm)
1	133,3	253,3	287,3	317,8	437,8
2	135	158,7	160,4	160,7	166,9
3	135	253,3	287,3	317,8	437,8
4	90,2	103,2	107,7	135,1	135,1
5	134,8	219,1	284,8	298,1	306,1
6	102,9	132,7	155,5	185,1	226,4
7	65,7	81,3	101,5	125,3	125,3
8	99,3	127	166,1	233,4	249,9
9	123,2	148,4	166	178,3	188,3
10	89,7	139,1	175,3	201,9	201,9
11	128,6	172,9	206,3	226,3	239,9
12	78,4	147,8	203,2	253,8	284,2
13	127,8	247,8	251,9	272,1	282,3

14	82,6	106,2	128,5	162,1	164,2
15	40,2	78,3	118,3	125,5	132,3
16	132,6	203,3	203,3	216,9	216,9
17	99,7	120,8	128,6	157,2	178,3
18	127,2	180	197,6	197,6	199,7
19	134	212,3	293,5	346,8	385,4
20	220,1	300	307,2	310,4	310,4
21	122,1	205,6	280,9	364,4	410,2
22	192	272,2	294,3	353,4	354,5
23	92,3	162,1	162,1	197,5	197,5
24	59,4	66,7	72,4	88,6	105,1
25	108,5	132,6	158,9	209,9	238,7
26	130	136,7	136,9	216,6	239,2
27	150	175,8	176,7	176,7	176,7
28	167,3	174,3	241,1	275,9	300,4
29	113,3	158,7	198,8	221,9	233
30	111,5	142,2	211,9	242,6	252,1
31	97,3	155,9	168	186,9	197,4
32	174,9	279,6	308,5	358,6	442,7
33	160,5	261,3	263,8	263,8	285,4
34	180,6	234,4	237,7	292,7	346,5
35	173	182	192,6	291,1	308,5
36	80,4	110,7	136,5	174,6	192,3
37	199,8	239,9	279,8	281,3	281,5
38	148,7	151,9	156,8	174,6	181,9
39	160	205,8	242,1	250,3	257,1
40	143,1	158,7	188,4	211,4	223,1
41	194,2	275,1	307,4	388,3	428,5
42	181,9	359,1	367,6	445,1	482,9
43	204,3	243,9	267,1	268,5	269,1
44	69,1	82,2	82,5	92,7	107,8
45	79,2	84,1	89,3	95,1	132,8
46	90,2	161,3	172,5	173,3	202
47	124,3	215,6	266	308,3	344,6
48	175	260,8	336	361,7	374,9
49	99,2	140,6	175,8	185,9	211,1
50	190	375,1	560,1	613,3	628
51	129,5	178	180,1	225,8	275,9
52	100,7	114,6	122,4	122,4	135,1
53	100,8	170	206,3	226,5	226,5
54	110	183,1	215,1	222,9	272,1
55	120,3	231	341,7	401,2	481,6
56	138,2	248,4	327,5	411,5	467,4
57	163,8	241,6	339,9	342	342
58	85,2	145,5	145,5	168,6	228,9

59	165,6	286,1	338,3	345	353,1
60	67,5	106,9	150,7	165,3	198,3
61	247,5	258	262,2	262,5	298,5
62	46,4	63,9	87,3	104,5	120,2
63	113,8	149,3	170,8	178,3	180,9
64	210,5	393,8	461,3	486,6	565
65	110,5	195,7	273,1	318,3	334
66	73,7	111,3	114,9	133,4	161
67	74,8	81,5	101,2	123,3	131,1
68	110	160,3	170,8	216,7	234,8
69	127,3	205,8	217,9	247,1	247,3
70	122,4	158,8	167,3	170	178,5
71	244,3	351,7	407,5	426,7	439
72	137,2	147,5	157,7	180,7	192,7
73	248	283,7	345,2	348,4	357,6
74	157,1	188,3	241,9	261,9	266,8
75	33,7	47,1	58,6	58,7	59,1

ANEXO V

Visualizam-se de seguida os gráficos referentes ao ajuste de leis estatísticas à amostra para os cinco dias consecutivos e para os dois pontos estudados.

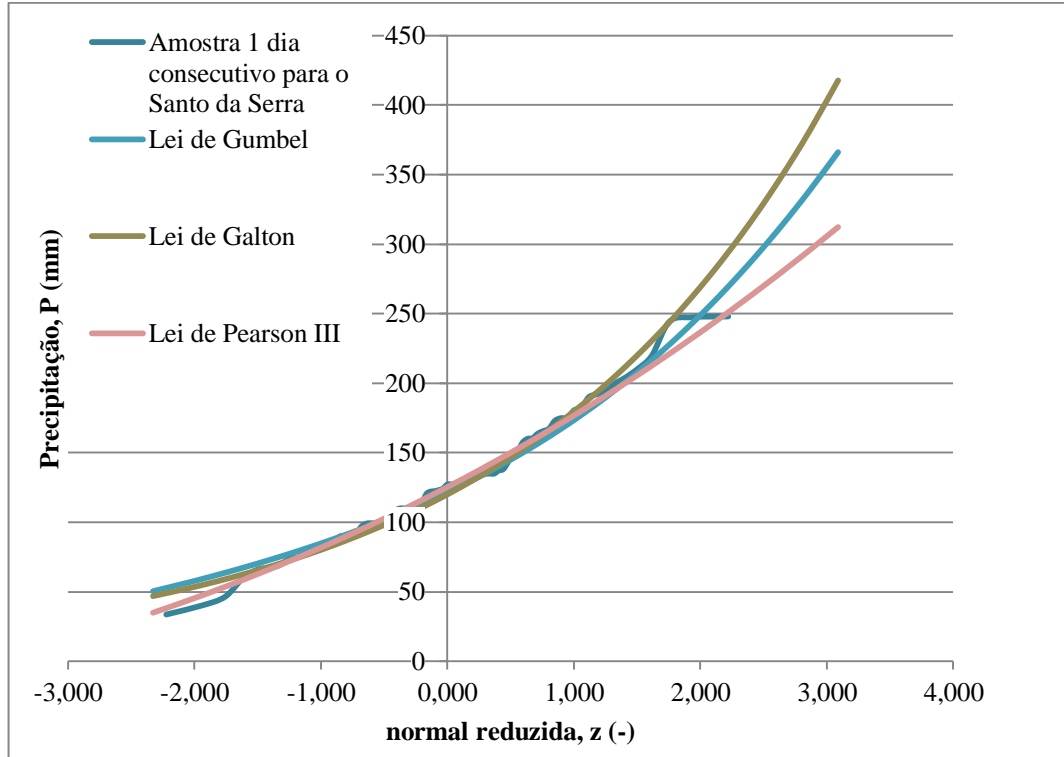


Figura 30. Ajuste de leis para 1 dia consecutivo - Santo da Serra

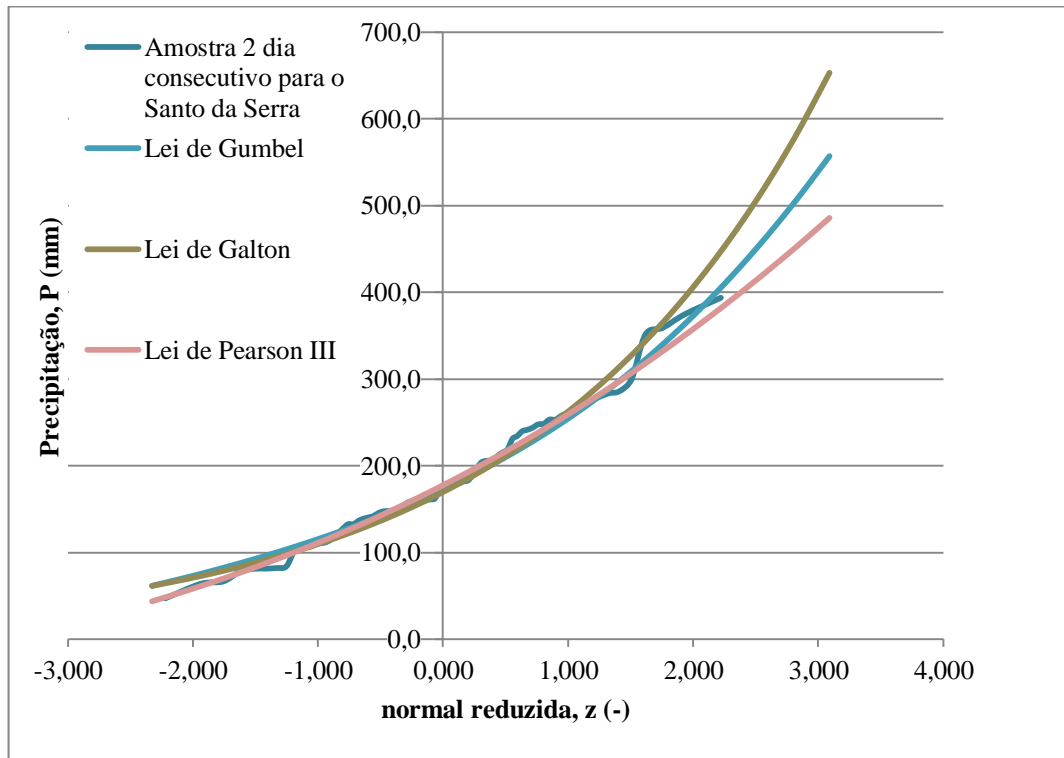


Figura 31. Ajuste de leis para 2 dias consecutivos - Santo da Serra

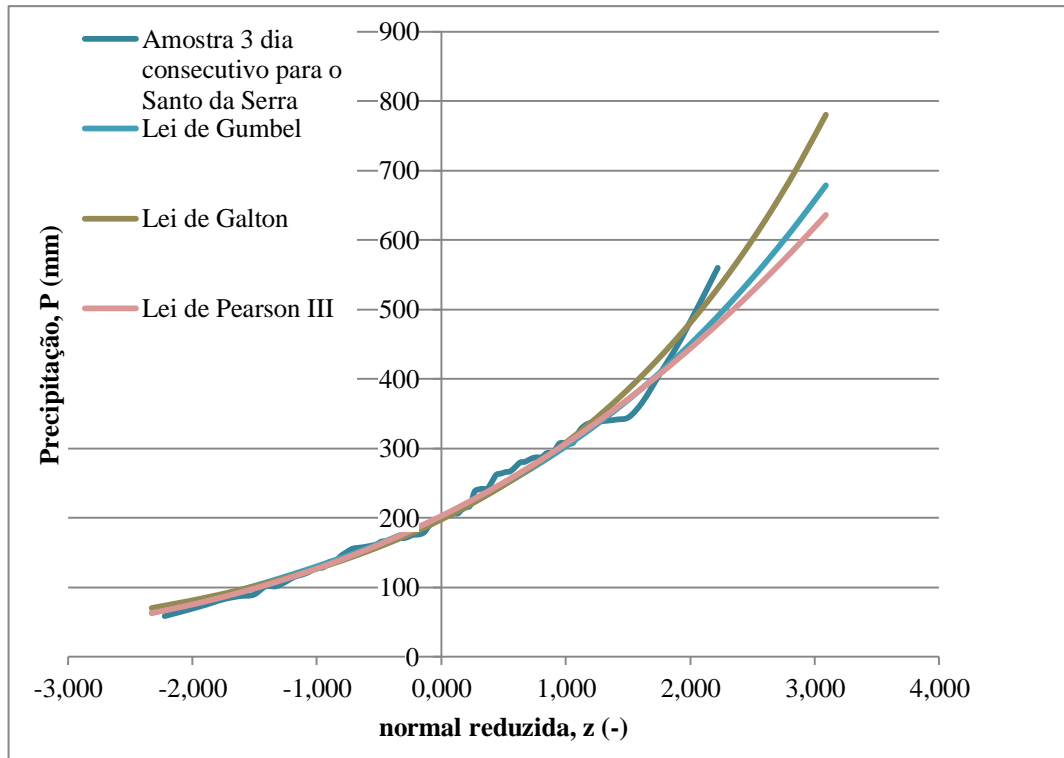


Figura 32. Ajuste de leis para 3 dias consecutivos - Santo da Serra

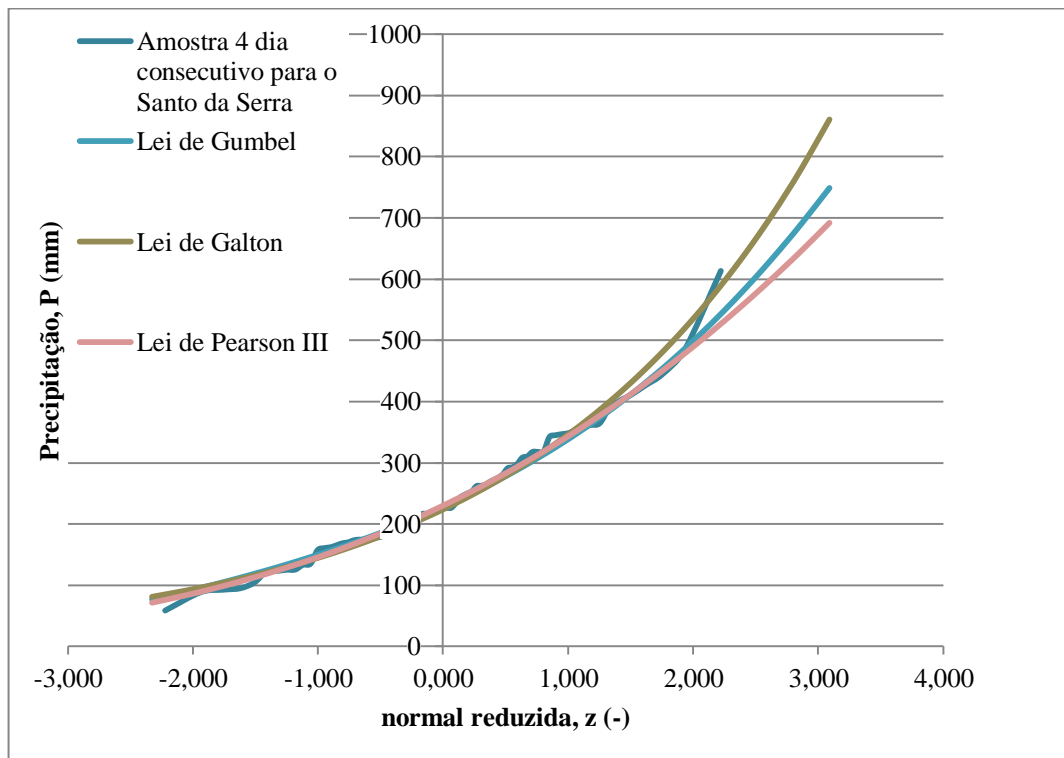


Figura 33. Ajuste de leis para 4 dias consecutivos - Santo da Serra

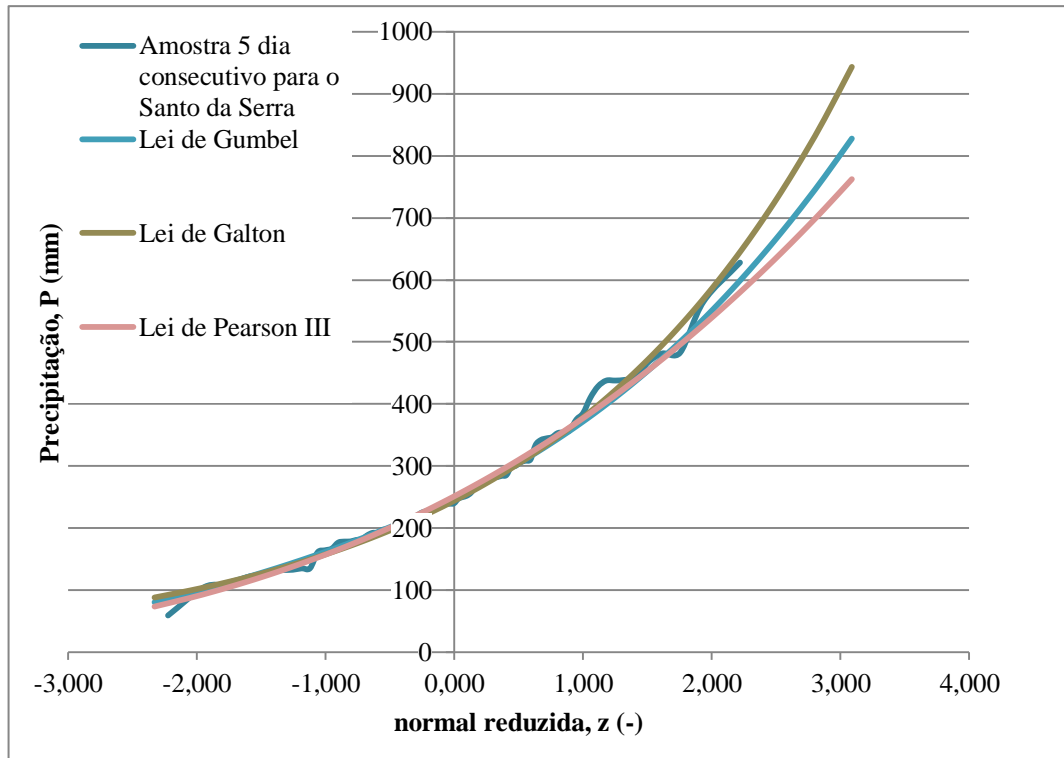


Figura 34. Ajuste de leis para 5 dias consecutivos - Santo da Serra

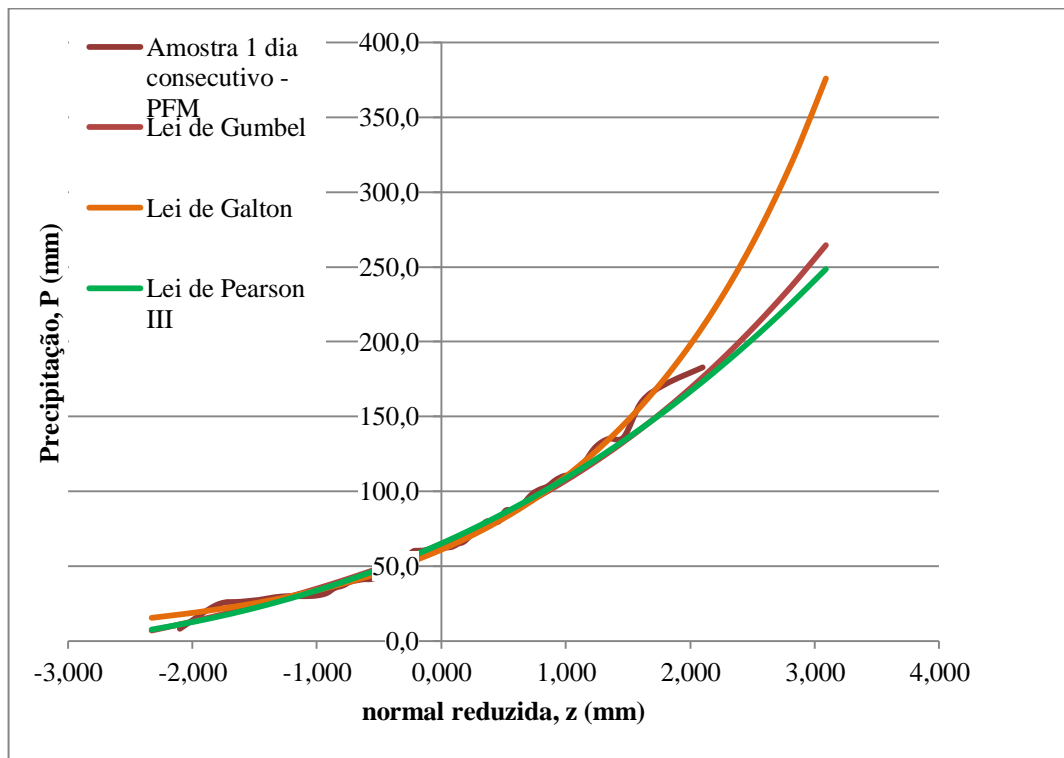


Figura 35. Ajuste de leis para 1 dia consecutivo - PFM

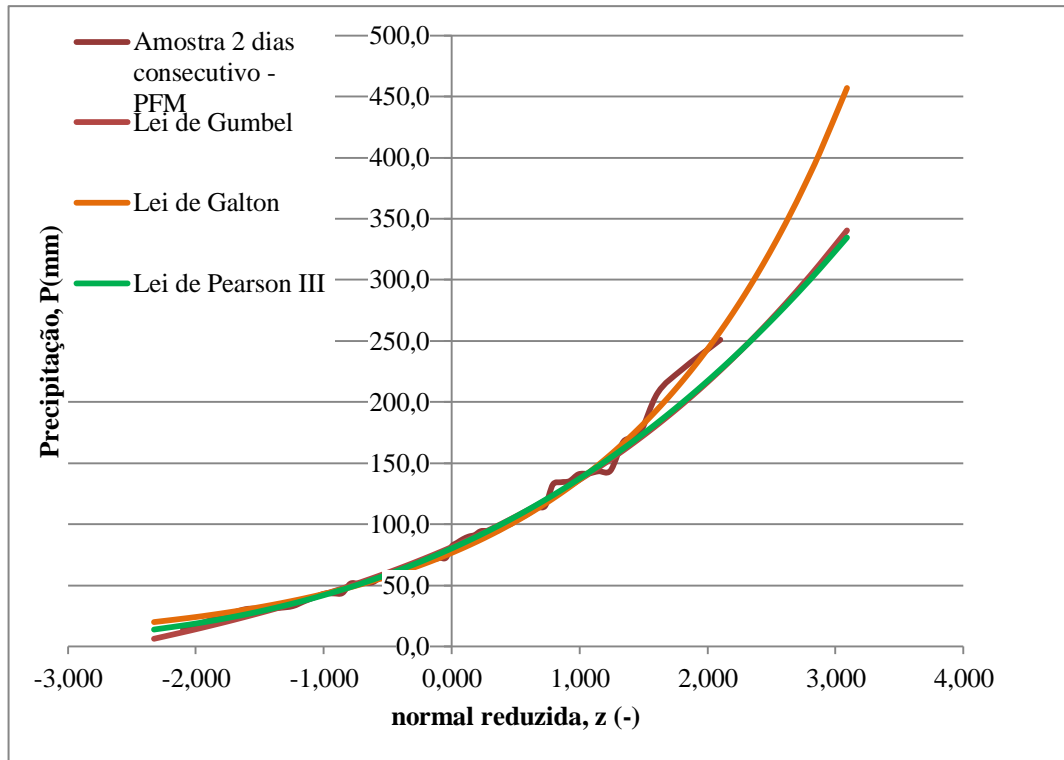


Figura 36. Ajuste de leis para 2 dias consecutivos - PFM

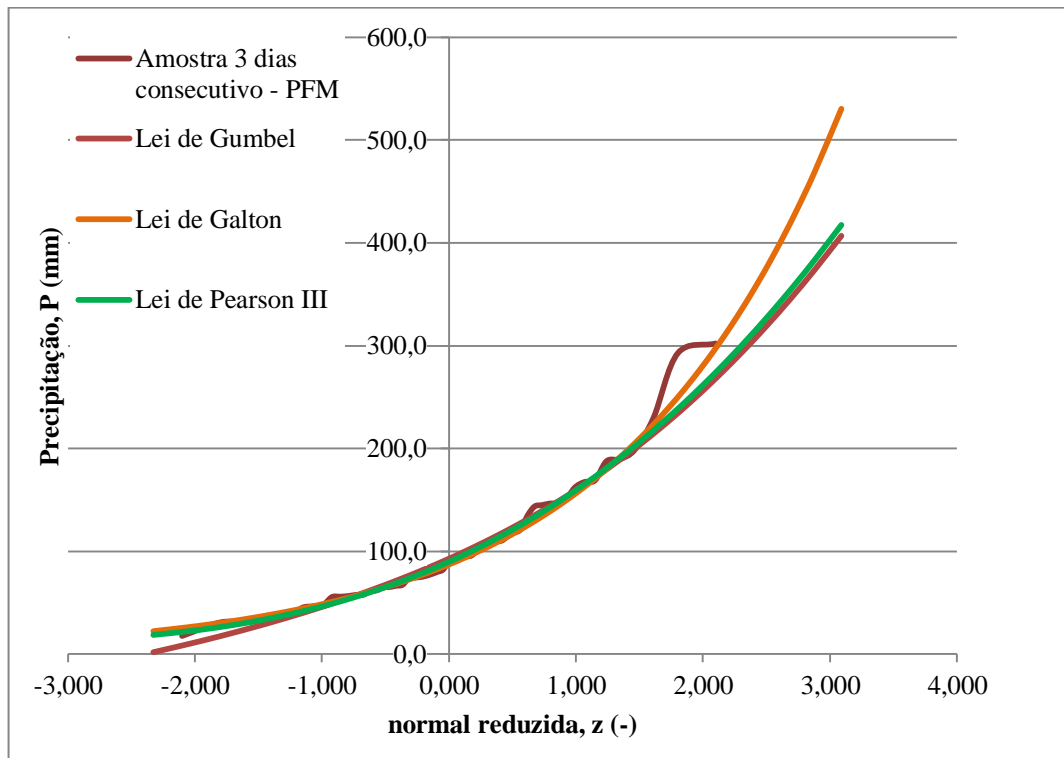


Figura 37. Ajuste de leis para 3 dias consecutivos - PFM

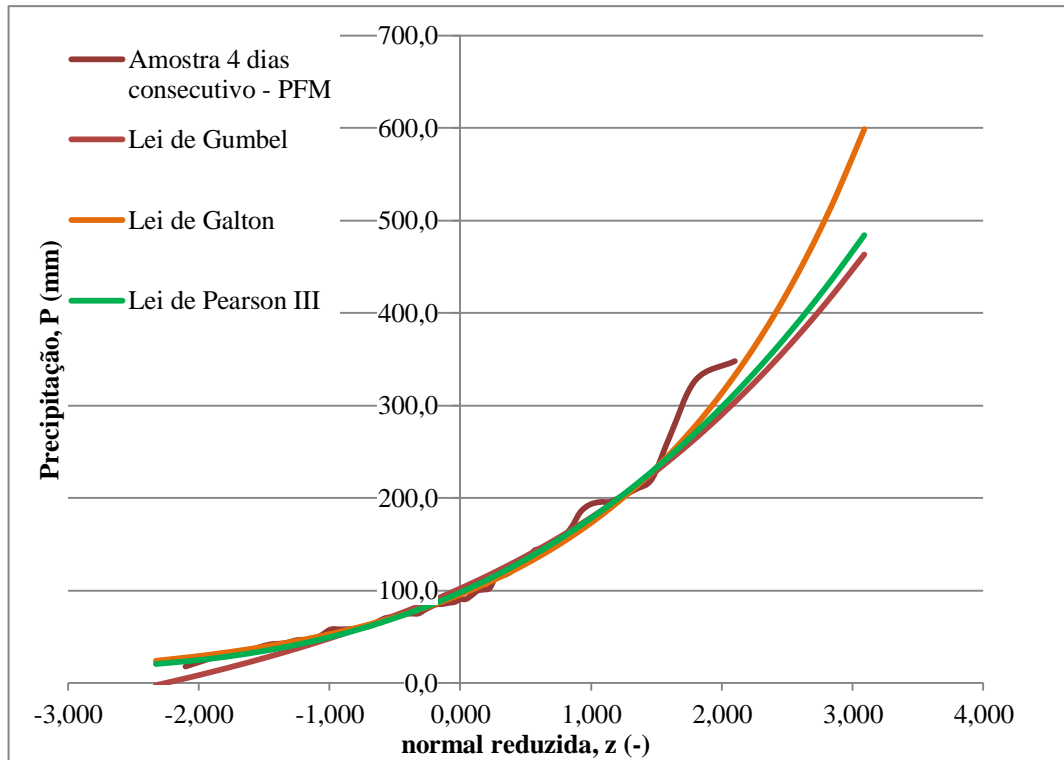


Figura 38. Ajuste de leis para 4 dias consecutivos - PFM

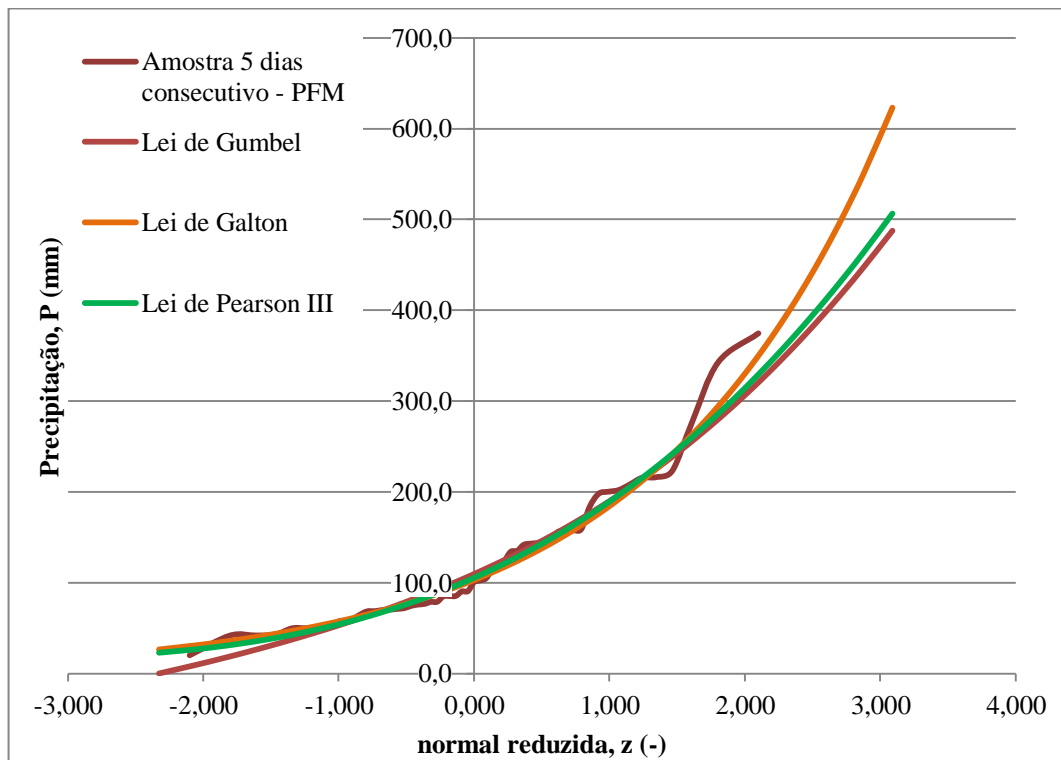


Figura 39. Ajuste de leis para 5 dias consecutivos - PFM

ANEXO VI

Apresentam-se na tabela seguinte os valores de precipitação para vários períodos de retorno, assim como, a melhor lei que se ajusta à amostra.

Posto Florestal de Machico	Lei estatística com melhor ajuste à amostra			Lei de Galton				
	T (anos) - período de retorno	F(P) - probabilidade de não-excedência	1-F(P) - probabilidade de excedência	Período de medição consecutivo (h)				
				24	48	72	96	120
				Precipitações para os períodos de retorno (mm)				
10	0,9	0,1	129,7	160,6	184,4	204,5	217,1	
20	0,95	0,05	160,6	198,2	229,3	253,8	268,3	
50	0,98	0,02	204,3	251,0	289,5	323,5	340,6	
100	0,99	0,01	239,9	293,9	339,5	380,4	399,2	
1000	0,999	0,001	375,9	457,1	530,4	598,8	623,1	
Posto Santo da Serra (Quinta da Junta)	Lei estatística com melhor ajuste à amostra			Leis de Pearson III				
	T (anos) - período de retorno	F(P) - probabilidade de não-excedência	1-F(P) - probabilidade de excedência	Período de medição consecutivo (h)				
				24	48	72	96	120
				Precipitações para os períodos de retorno (mm)				
10	0,9	0,1	192,7	285,2	341,9	380,8	418,6	
20	0,95	0,05	214,3	320,7	391,1	433,4	476,9	
50	0,98	0,02	240,0	363,5	452,3	498,3	548,7	
100	0,99	0,01	258,1	393,6	496,5	545,1	600,4	
1000	0,999	0,001	312,3	485,8	636,3	691,8	762,4	

ANEXO VII

Seguem-se os gráficos usados para determinação do valor de repartição para os vários períodos de retorno.

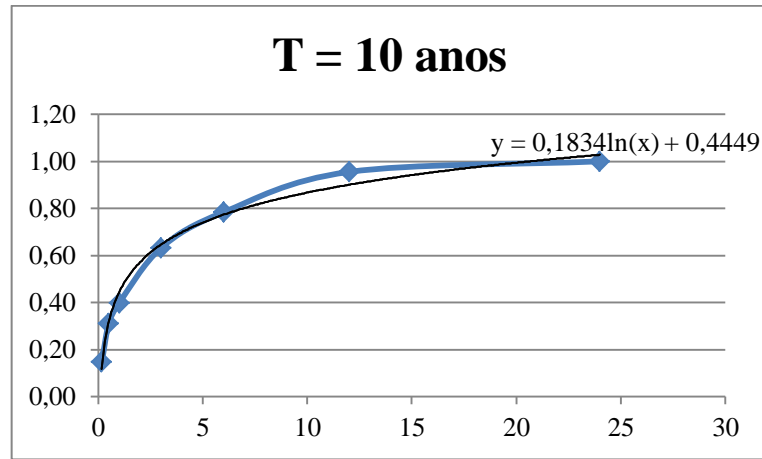


Figura 40. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 10 anos

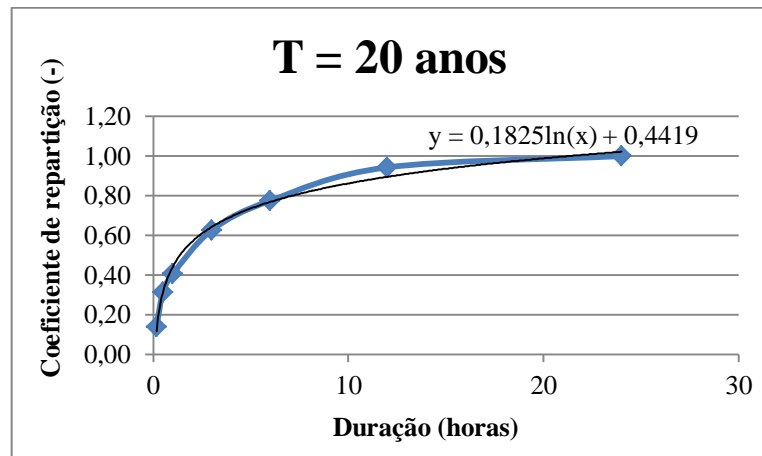


Figura 41. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 20 anos

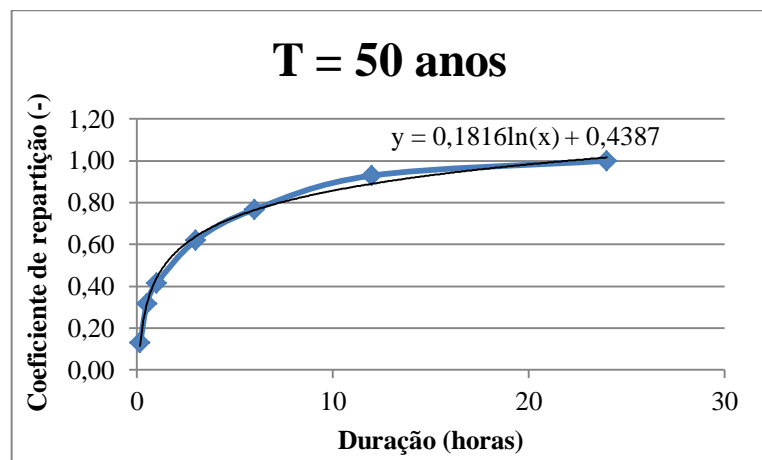


Figura 42. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 50 anos

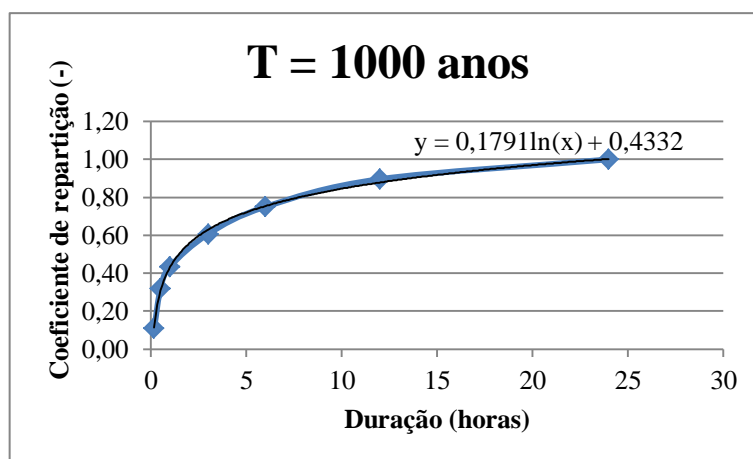


Figura 43. Análise tendencial para determinar coeficiente de repartição para T = 1000 anos

ANEXO VIII

Seguem-se as tabelas referentes aos caudais de cálculo de ponta de cheia pelo método racional para os vários períodos de retorno

Tabela 27. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 10 anos

Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m³/s)
1	Ribeira da Portela	33,0
2	Afluente "Escola da Ribeira de Machico"	13,0
3	Ribeira da Ermida	47,8
4	Ribeira da Alfurada	27,0
5	Ribeira das Cales	75,5
6	Afluente "Escola Maroços"	10,9
7	Ribeira Grande	24,4
8	Landeiros	46,7
9	Ribeira Seca	97,3
10	Caramanchão	35,6
11	Poço do Gil	14,7
12	Piquinho	3,8
13	Paraíso	23,6
14	Band'Além	18,1

Tabela 28. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 20 anos

Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m³/s)
1	Ribeira da Portela	37,5
2	Afluente "Escola da Ribeira de Machico"	14,8
3	Ribeira da Ermida	54,3
4	Ribeira da Alfurada	30,7
5	Ribeira das Cales	89,6
6	Afluente "Escola Maroços"	13,8
7	Ribeira Grande	30,8
8	Landeiros	55,4
9	Ribeira Seca	122,9
10	Caramanchão	44,9
11	Poço do Gil	18,6
12	Piquinho	4,8
13	Paraíso	29,7
14	Band'Além	22,9

Tabela 29. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 50 anos

Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m ³ /s)
1	Ribeira da Portela	44,4
2	Afluente "Escola da Ribeira de Machico"	17,5
3	Ribeira da Ermida	64,2
4	Ribeira da Alfurada	36,3
5	Ribeira das Cales	111,8
6	Afluente "Escola Maroços"	18,4
7	Ribeira Grande	41,2
8	Landeiros	69,1
9	Ribeira Seca	164,2
10	Caramanchão	60,0
11	Poço do Gil	24,9
12	Piquinho	6,4
13	Paraíso	39,8
14	Band'Além	30,6

Tabela 30. Caudal de ponta de cheia - Período de retorno de 1000 anos

Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m ³ /s)
1	Ribeira da Portela	64,4
2	Afluente "Escola da Ribeira de Machico"	25,4
3	Ribeira da Ermida	93,2
4	Ribeira da Alfurada	52,7
5	Ribeira das Cales	192,0
6	Afluente "Escola Maroços"	37,6
7	Ribeira Grande	84,0
8	Landeiros	118,8
9	Ribeira Seca	335,1
10	Caramanchão	122,5
11	Poço do Gil	50,7
12	Piquinho	13,1
13	Paraíso	81,2
14	Band'Além	62,4

ANEXO IX

Secções finais das sub-bacias – características geométricas e físicas. (importa referir que todas as figuras aqui apresentadas neste anexo foram retiradas a partir de Ortofotomapas cedidos pela (DRIGOT, 2010))



Figura 44. Secções de desembocadura 1 e 2

Secção de desembocadura 1 relativa à sub-bacia da Portela

Largura do canal: 2,94 m

Altura do canal: 1,55 m

Declive na secção medida: 0,168 m/m

Características físicas da secção: Paredes em betão e leito com vegetação e algumas rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção de desembocadura 2 relativa à sub-bacia do Afluente “Escola Basica da Ribeira de Machico”

Largura do canal: 1,00 m

Altura do canal: 1,60 m

Declive na secção medida: 0,253 m/m

Características físicas da secção: Paredes em betão e leito com rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 45. Secções de desembocadura 3 e 4

Secção de desembocadura 3 relativa à sub-bacia da Ermida

Largura do canal: 4,50 m

Altura do canal: 6,50 m

Declive na secção medida: 0,140 m/m

Características físicas da secção: Paredes e leito em betão

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção de desembocadura 4 relativa à sub-bacia da Alfurada

Largura do canal: 4,20 m

Altura do canal: 2,00 m

Declive na secção medida: 0,102 m/m

Características físicas da secção: Paredes em betão e leito com pouca vegetação e rochas

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,023 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

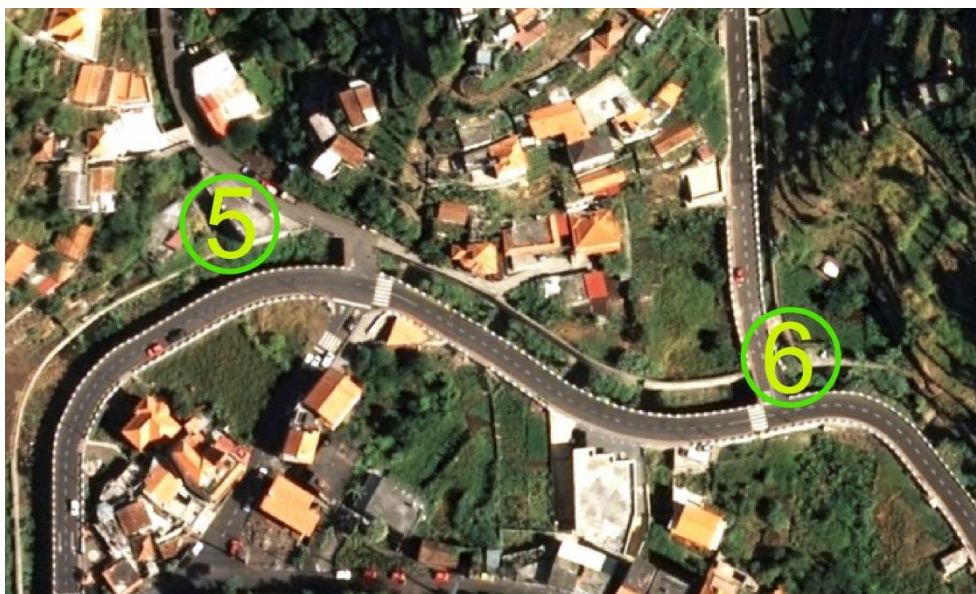


Figura 46. Secções de desembocadura 5 e 6

Secção de desembocadura 5 relativa à sub-bacia das Cales

Largura do canal: 4,70 m

Altura do canal: 3,47 m

Declive na secção medida: 0,102 m/m

Características físicas da secção: Paredes em betão e leito com vegetação e rochas

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,021 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção de desembocadura 6 relativa à sub-bacia do Afluente “Escola Básica dos Maroços”

Largura do canal: 4,20 m

Altura do canal: 4,13 m

Declive na secção medida: 0,112 m/m

Características físicas da secção: Paredes em betão e leito com terra, vegetação e rochas

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 47. Secções de desembocadura 7 e 8

Secção de desembocadura 7 relativa à sub-bacia da Ribeira Grande

Largura do canal: 2,24 m

Altura do canal: 3,00 m

Declive na secção medida: 0,088 m/m

Características físicas da secção: Paredes e leito em betão

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção de desembocadura 8 relativa à sub-bacia dos Landeiros

Largura do canal: 5,00 m

Altura do canal: 3,20 m

Declive na secção medida: 0,037 m/m

Características físicas da secção: Paredes e leito em betão

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 48. Secção de desembocadura 9

Secção de desembocadura 9 relativa à sub-bacia da Ribeira Seca

Largura do canal: 4,00 m

Altura do canal: 2,00 m

Declive na secção medida: 0,061 m/m

Características físicas da secção: Paredes em vegetação e leito com rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,040 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 49. Secção de desembocadura 10 e 11

Secção de desembocadura 10 relativa à sub-bacia do Caramanchão

Largura do canal: 2,90 m

Altura do canal: 2,90 m

Declive na secção medida: 0,028 m/m

Características físicas da secção: Paredes e leito em betão

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção de desembocadura 11 relativa à sub-bacia do Poço do Gil

Duas condutas de fibrocimento com $\text{Ø}1500 \text{ mm}$ cada uma

Declive na secção medida: 0,069 m/m

Características físicas da secção: Conduto em fibrocimento

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler: $0,015 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 50. Secção de desembocadura 12 e 13

Secção de desembocadura 12 relativa à sub-bacia do Piquinho

Largura do canal: 2,00 m

Altura do canal: 2,00 m

Declive na secção medida: 0,091 m/m

Características físicas da secção: Paredes e leito em betão

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção de desembocadura 13 relativa à sub-bacia do Paraíso

Largura do canal: 2,00 m

Altura do canal: 2,00 m

Declive na secção medida: 0,046 m/m

Características físicas da secção: Paredes e leito em betão

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 51. Secção de desembocadura 14

Secção de desembocadura 14 relativa à sub-bacia da Band' Além

Largura do canal: 3,70 m

Altura do canal: 2,50 m

Declive na secção medida: 0,101 m/m

Características físicas da secção: Paredes e leito em betão

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,018 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

ANEXO X

Apresentam-se de seguida as secções da ribeira de Machico – características geométricas e físicas. (importa referir que todas as figuras aqui apresentadas neste anexo foram retiradas a partir de Ortofotomapas cedidos pela (DRIGOT, 2010))



Figura 52. Secções 1 e 2 da ribeira de Machico

Secção 1

Largura de secção: 5,91 m

Altura de secção: 1,84 m

Declive na secção medida: 0,062 m/m

Características físicas da secção: Paredes em betão e leito com vegetação e rocha

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,022 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 2

Largura de secção: 6,40 m

Altura de secção: 2,50 m

Declive na secção medida: 0,095 m/m

Características físicas da secção: paredes com vegetação e leito com rochas

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,040 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 53. Secções 3 e 4 da ribeira de Machico

Secção 3

Largura de secção: 7,00 m

Altura de secção: 3,32 m

Declive na secção medida: 0,059 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com pouca vegetação e rocha

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,023 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 4

Largura de secção: 7,00 m

Altura de secção: 3,32 m

Declive na secção medida: 0,056 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com pouca vegetação e rocha

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,023 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 54. Secções 5 e 6 da ribeira de Machico

Secção 5

Largura de secção: 8,40 m

Altura de secção: 3,62 m

Declive na secção medida: 0,074 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com vegetação e rocha

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,022 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 6a

Largura de secção: 8,10 m

Altura de secção: 4,66 m

Declive na secção medida: 0,054 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com vegetação e poucas rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 55. Secções 6b e 6c da ribeira de Machico

Secção 6b

Largura de secção 6,00 m

Altura de secção: 3,80 m

Declive na secção medida: 0,049 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com vegetação e poucas rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 6c

Largura de secção: 13,00 m

Altura de secção: 3,75 m

Declive na secção medida: 0,051 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com vegetação e poucas rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,013 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 56. Secções 7 e 8 da ribeira de Machico

Secção 7

Largura de secção: 9,93 m

Altura de secção: 4,60 m

Declive na secção medida: 0,050 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e rocha e leito com vegetação e rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,027 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 8

Largura de secção: 9,45 m

Altura de secção: 4,50 m

Declive na secção medida: 0,063 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e rocha e leito com vegetação e rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,027 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 57. Secção 9 da ribeira de Machico

Secção 9

Largura de secção: 14,70 m

Altura de secção: 5,30 m

Declive na secção medida: 0,036 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com vegetação e rocha

Coefficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,022 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 58. Secção 10 da ribeira de Machico

Secção 10

Largura de secção: 14,90 m

Altura de secção: 6,30 m

Declive na secção medida: 0,034 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,023 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 59. Secções 11, 12a e 12b da ribeira de Machico

Secção 11

Largura de secção: 17,80 m

Altura de secção: 4,50 m

Declive na secção medida: 0,025 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com pouca vegetação e rocha

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,023 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 12a

Largura de secção: 18,90 m

Altura de secção: 5,20 m

Declive na secção medida: 0,022 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,024 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 12b

Largura de secção: 16,10 m

Altura de secção: 4,70 m

Declive na secção medida: 0,025 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com pouca vegetação e rocha

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,024 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



Figura 60. Secções 14a, 14b e 14c da ribeira de Machico

Secção 14a

Largura de secção: 24,00 m

Altura de secção: 4,70 m

Declive na secção medida: 0,014 m/m

Características físicas da secção: Paredes de betão e leito com pouca vegetação e rocha

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 14b

Largura de secção: 18,70 m

Altura de secção: 4,00 m

Declive na secção medida: 0,010 m/m

Características físicas da secção: Paredes de basalto e leito com vegetação e poucas rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,012 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Secção 14c

Largura de secção: 22,60 m

Altura de secção: 4,90 m

Declive na secção medida: 0,014 m/m

Características físicas da secção: Paredes de basalto e leito com vegetação e poucas rochas

Coeficiente de rugosidade de Manning – Strickler ponderado: $0,012 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

ANEXO XI

As tabelas que se seguem referem-se aos resultados obtidos no que concerne às secções de desembocadura das sub-bacias.

Tabela 31. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 10 anos

Período de retorno 10 anos	Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m ³ /s)	Caudal Manning, Q (m ³ /s)	Preenchimento (%)
	1	ribeira da Portela	33,0	109,8	30,1
	2	afluente "Escola da Ribeira de Machico"	13,0	21,5	60,7
	3	ribeira da Ermida	47,8	855,9	5,6
	4	ribeira da Alfurada	27,0	117,7	23,0
	5	ribeira das Cales	75,5	313,2	24,1
	6	afluente "Escola Maroços"	10,9	365,6	3,0
	7	ribeira Grande	24,4	96,7	25,2
	8	ribeira do Moinho da Serra	46,7	214,4	21,8
	9	ribeira Seca	97,3	101,1	96,2
	10	ribeira do Caramanchão	35,6	76,0	46,8
	11	ribeira do Poço do Gil	14,7	102,2	14,4
	12	ribeira do Piquinho	3,8	51,2	7,4
	13	ribeira do Paraíso	23,6	36,4	64,7
	14	ribeira da Banda d'Além	18,1	170,4	10,6

Tabela 32. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 20 anos

Período de retorno 20 anos	Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m ³ /s)	Caudal Manning, Q (m ³ /s)	Preenchimento (%)
	1	ribeira da Portela	37,5	109,8	34,2
	2	afluente "Escola da Ribeira de Machico"	14,8	21,5	68,9
	3	ribeira da Ermida	54,3	855,9	6,3
	4	ribeira da Alfurada	30,7	117,7	26,1
	5	ribeira das Cales	89,6	313,2	28,6
	6	afluente "Escola Maroços"	13,8	365,6	3,8
	7	ribeira Grande	30,8	96,7	31,8
	8	ribeira do Moinho da Serra	55,4	214,4	25,9
	9	ribeira Seca	122,9	101,1	121,5
	10	ribeira do Caramanchão	44,9	76,0	59,0
	11	ribeira do Poço do Gil	18,6	102,2	18,2
	12	ribeira do Piquinho	4,8	51,2	9,3
	13	ribeira do Paraíso	29,7	36,4	81,6
	14	ribeira da Banda d'Além	22,9	170,4	13,4

Tabela 33. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 50 anos

Período de retorno 50 anos	Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m ³ /s)	Caudal Manning, Q (m ³ /s)	Preenchimento (%)
	1	ribeira da Portela	44,4	109,8	40,4
	2	afluente "Escola da Ribeira de Machico"	17,5	21,5	81,5
	3	ribeira da Ermida	64,2	855,9	7,5
	4	ribeira da Alfurada	36,3	117,7	30,8
	5	ribeira das Cales	111,8	313,2	35,7
	6	afluente "Escola Maroços"	18,4	365,6	5,0
	7	ribeira Grande	41,2	96,7	42,6
	8	ribeira do Moinho da Serra	69,1	214,4	32,2
	9	ribeira Seca	164,2	101,1	162,4
	10	ribeira do Caramanchão	60,0	76,0	79,0
	11	ribeira do Poço do Gil	24,9	102,2	24,3
	12	ribeira do Piquinho	6,4	51,2	12,5
	13	ribeira do Paraíso	39,8	36,4	109,2
	14	ribeira da Band'Além	30,6	170,4	17,9

Tabela 34. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 100 anos

Período de retorno 100 anos	Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m ³ /s)	Caudal Manning, Q (m ³ /s)	Preenchimento (%)
	1	ribeira da Portela	49,0	109,8	44,6
	2	Afluente "Escola da Ribeira de Machico"	19,3	21,5	89,9
	3	ribeira da Ermida	70,9	855,9	8,3
	4	ribeira da Alfurada	40,1	117,7	34,0
	5	ribeira das Cales	128,4	313,2	41,0
	6	Afluente "Escola Maroços"	22,2	365,6	6,1
	7	ribeira Grande	49,5	96,7	51,2
	8	ribeira do Moinho da Serra	79,4	214,4	37,0
	9	ribeira Seca	197,7	101,1	195,5
	10	ribeira do Caramanchão	72,3	76,0	95,0
	11	ribeira do Poço do Gil	29,9	102,2	29,3
	12	ribeira do Piquinho	7,7	51,2	15,1
	13	ribeira do Paraíso	47,9	36,4	131,5
	14	ribeira da Banda d'Além	36,8	170,4	21,6

Tabela 35. Caudais e percentagem de preenchimento das secções de desembocadura das sub-bacias para T = 1000 anos

Período de retorno 1000 anos	Id	Sub-bacia	Caudal Método Racional, Q (m³/s)	Caudal Manning, Q (m³/s)	Preenchimento (%)
	1	ribeira da Portela	64,4	109,8	58,7
	2	afluente "Escola da Ribeira de Machico"	25,4	21,5	118,3
	3	ribeira da Ermida	93,2	855,9	10,9
	4	Ribeira da Alfurada	52,7	117,7	44,8
	5	ribeira das Cales	192,0	313,2	61,3
	6	afluente "Escola Maroços"	37,6	365,6	10,3
	7	ribeira Grande	84,0	96,7	86,8
	8	ribeira do Moinho da Serra	118,8	214,4	55,4
	9	ribeira Seca	335,1	101,1	331,3
	10	ribeira do Caramanchão	122,5	76,0	161,1
	11	ribeira do Poço do Gil	50,7	102,2	49,6
	12	ribeira do Piquinho	13,1	51,2	25,6
	13	ribeira do Paraíso	81,2	36,4	222,9
	14	ribeira da Banda d'Além	62,4	170,4	36,6

ANEXO XII

As tabelas que se seguem referem-se aos resultados obtidos no que concerne às secções da ribeira de Machico.

Tabela 36. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 10 anos

Período de retorno 10 anos	Id das secções	Caudal Método Racional Acumulado, Q (m ³ /s)	Caudal Manning, Q (m ³ /s)	Preenchimento (%)
	1	102,7	131,8	77,9
	2	134,1	154,7	86,7
	3	239,5	348,5	68,7
	4	271,2	337,8	80,3
	5	355,1	591,8	60,0
	6a	366,6	1029,1	35,6
	6b	367,1	490,9	74,8
	6c	368,1	1519,6	24,2
	7	372,5	664,9	56,0
	8	451,6	678,3	66,6
	9	552,7	1419,1	38,9
	10	593,1	1671,7	35,5
	11	612,7	1158,0	52,9
	12a	617,5	1346,0	45,9
	12b	620,5	1024,5	60,6
	14a	662,2	1202,6	55,1
14b	681,5	1239,8	55,0	
14c	691,6	2476,9	27,9	

Tabela 37. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 20 anos

Período de retorno 20 anos	Id das secções	Caudal Método Racional Acumulado, Q (m ³ /s)	Caudal Manning, Q (m ³ /s)	Preenchimento (%)
	1	116,9	131,8	88,6
	2	152,5	75,1	98,6
	3	272,2	348,5	78,1
	4	308,2	337,8	91,2
	5	407,9	591,8	68,9
	6a	422,4	1029,1	41,0
	6b	422,9	490,9	86,2
	6c	424,2	1519,6	27,9
	7	429,7	664,9	64,6
	8	523,5	678,3	77,2
	9	651,3	1419,1	45,9
10	702,2	1671,7	42,0	
11	727,0	1158,0	62,8	

	12a	733,0	1346,0	54,5
	12b	736,7	1024,5	71,9
	14a	789,4	1202,6	65,6
	14b	813,7	1239,8	65,6
	14c	826,5	2476,9	33,4

Tabela 38. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 50 anos

	Id das secções	Caudal Método		Preenchimento (%)
		Racional Acumulado, Q (m ³ /s)	Manning, Q (m ³ /s)	
Período de retorno 50 anos	1	136,1	131,8	103,2
	2	177,5	75,1	114,8
	3	316,8	348,5	90,9
	4	358,7	337,8	106,2
	5	481,1	591,8	81,3
	6a	500,1	1029,1	48,6
	6b	500,8	490,9	102,0
	6c	502,5	1519,6	33,1
	7	509,6	664,9	76,6
	8	624,8	678,3	92,1
	9	793,1	1419,1	55,9
	10	860,1	1671,7	51,5
	11	892,7	1158,0	77,1
	12a	900,6	1346,0	66,9
	12b	905,5	1024,5	88,4
	14a	974,7	1202,6	81,1
14b	1006,7	1239,8	81,2	
14c	1023,5	2476,9	41,3	

Tabela 39. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 100 anos

	Id das secções	Caudal Método		Preenchimento (%)
		Racional Acumulado, Q (m ³ /s)	Manning, Q (m ³ /s)	
Período de retorno 100 anos	1	149,6	131,8	113,4
	2	195,1	75,1	126,1
	3	348,1	348,5	99,9
	4	394,1	337,8	116,7
	5	534,1	591,8	90,2
	6a	556,9	1029,1	54,1
	6b	557,7	490,9	113,6
	6c	559,6	1519,6	36,8
	7	568,1	664,9	85,4
	8	699,8	678,3	103,2
9	901,5	1419,1	63,5	
10	981,8	1671,7	58,7	

	11	1020,8	1158,0	88,1
	12a	1030,2	1346,0	76,5
	12b	1036,1	1024,5	101,1
	14a	1119,0	1202,6	93,0
	14b	1157,3	1239,8	93,3
	14c	1177,4	2476,9	47,5

Tabela 40. Caudais e percentagem de preenchimento das secções da ribeira de Machico para T = 1000 anos

	Id das secções	Caudal		Preenchimento (%)
		Método Racional Acumulado, Q (m ³ /s)	Manning, Q (m ³ /s)	
Período de retorno 1000 anos	1	195,2	131,8	148,0
	2	254,7	75,1	164,6
	3	454,5	348,5	130,4
	4	514,6	337,8	152,3
	5	722,3	591,8	122,0
	6a	760,7	1029,1	73,9
	6b	762,2	490,9	155,3
	6c	765,5	1519,6	50,4
	7	779,9	664,9	117,3
	8	975,4	678,3	143,8
	9	1314,6	1419,1	92,6
	10	1449,8	1671,7	86,7
	11	1515,4	1158,0	130,9
	12a	1531,3	1346,0	113,8
	12b	1541,3	1024,5	150,4
	14a	1680,9	1202,6	139,8
14b	1745,4	1239,8	140,8	
14c	1779,3	2476,9	71,8	

ANEXO XIII

Seguem-se os mapas de vulnerabilidade de cheias para as secções das sub-bacias e ribeira de Machico (importa referir que todas as figuras aqui apresentadas neste anexo foram retiradas a partir de Ortofotomapas cedidos pela (DRIGOT, 2010)).

Todas as secções estarão devidamente assinaladas pela sua identidade em que se poderão visualizar com maior detalhe tais secções nos ANEXOS IX e X.

Os primeiros cinco mapas são relativos às sub-bacias enquanto que os restantes cinco correspondem às secções da ribeira de Machico.

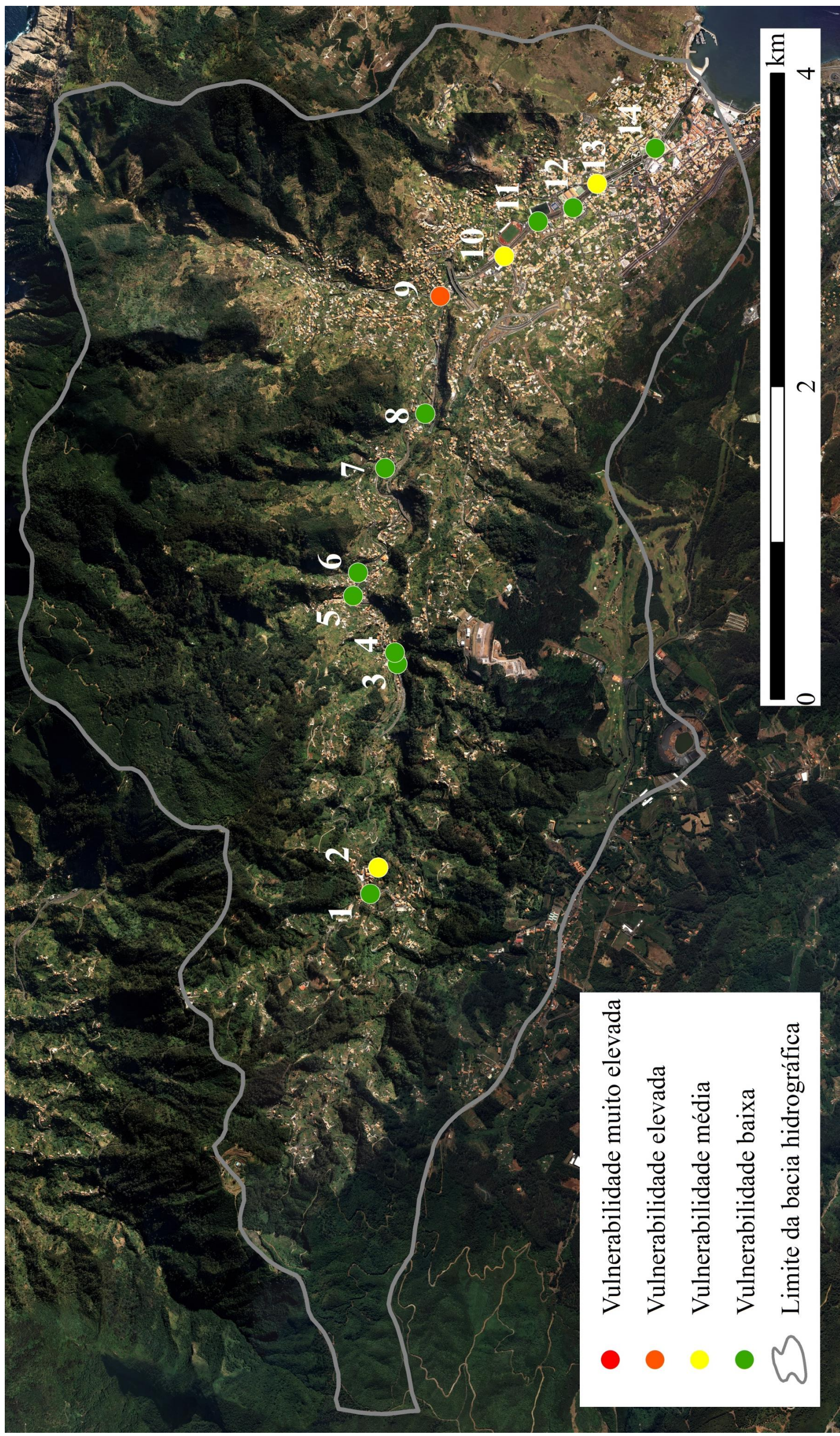


Figura 61. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 10 anos

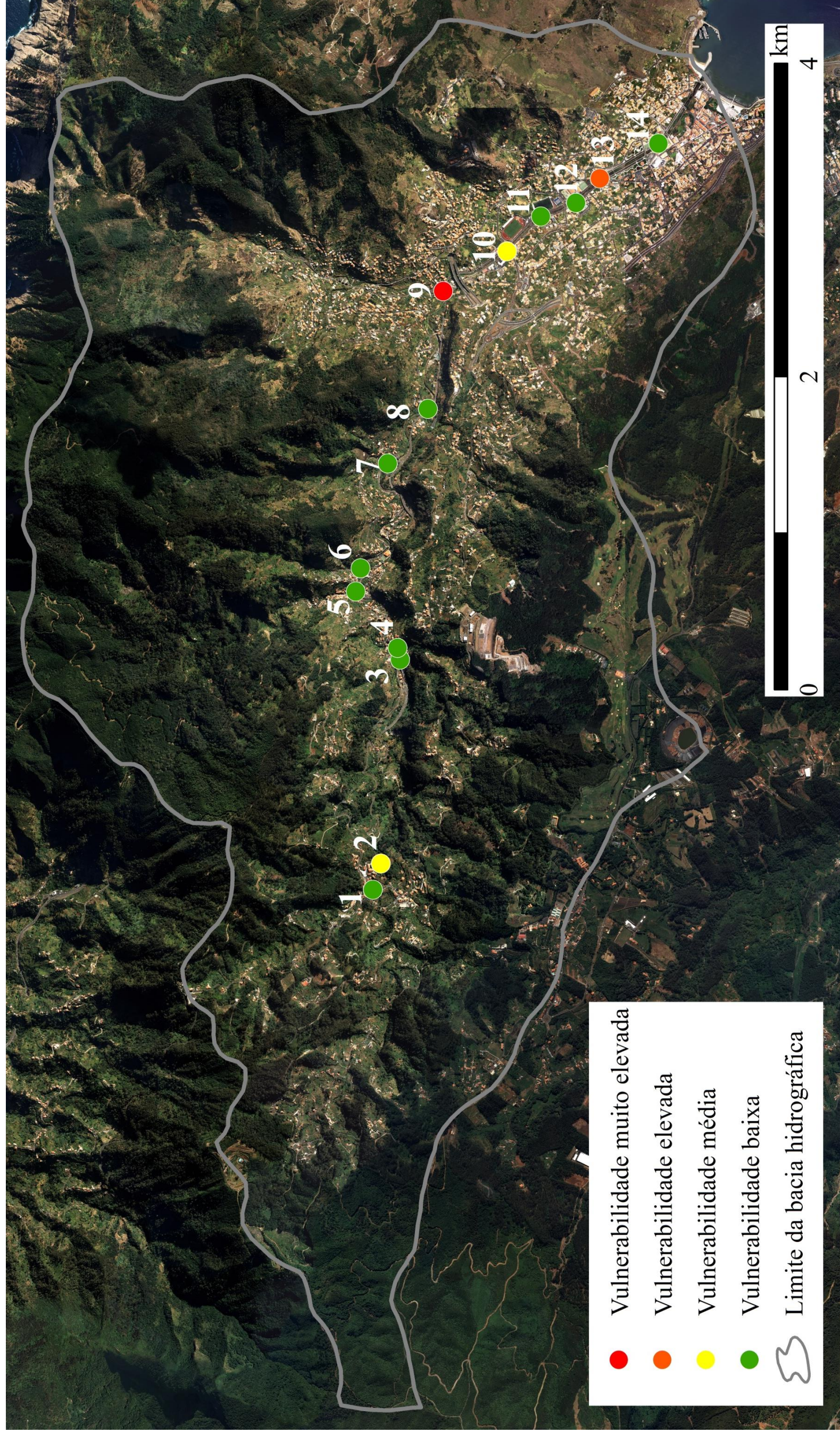


Figura 62. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 20 anos

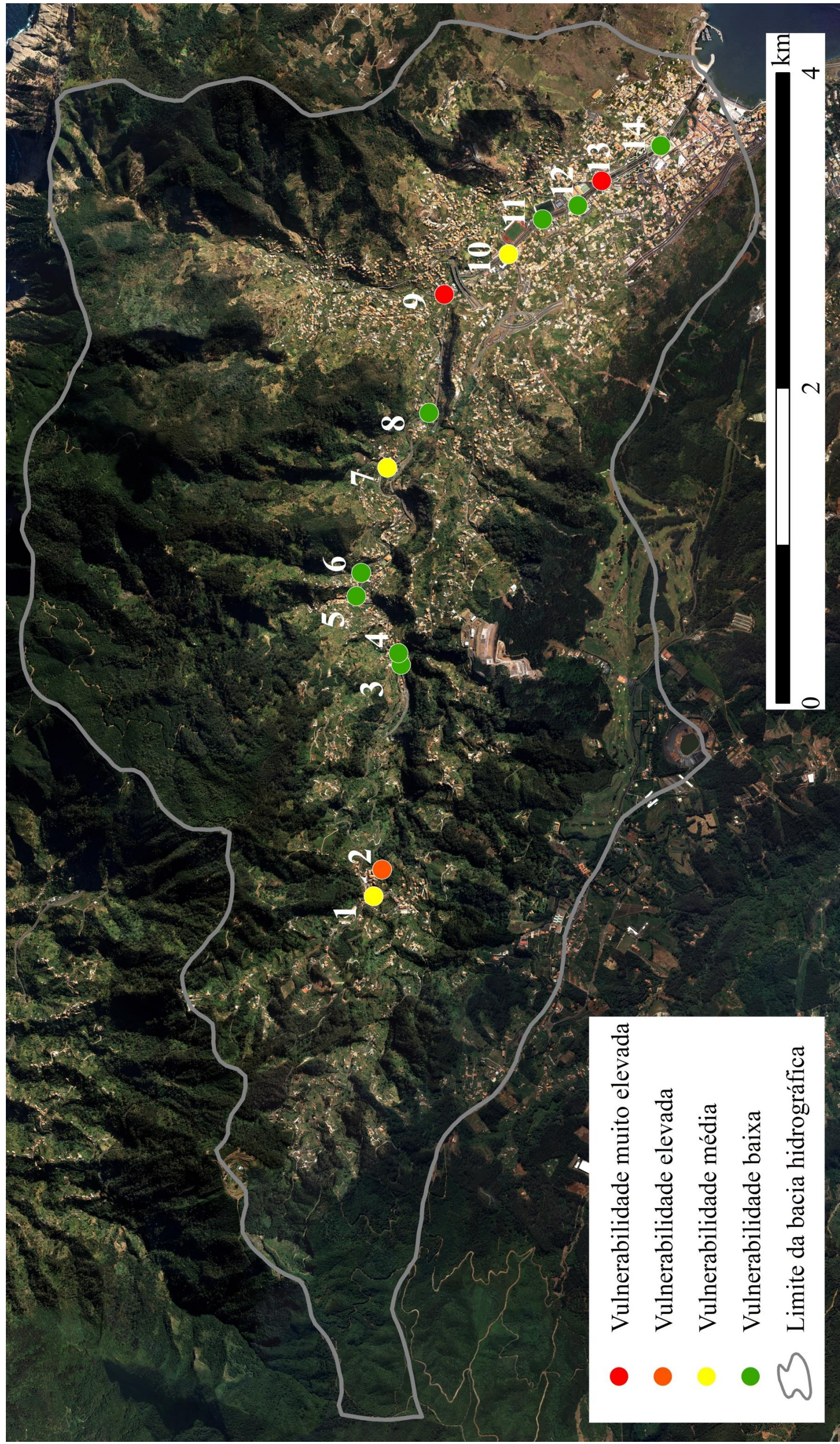


Figura 63. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 50 anos

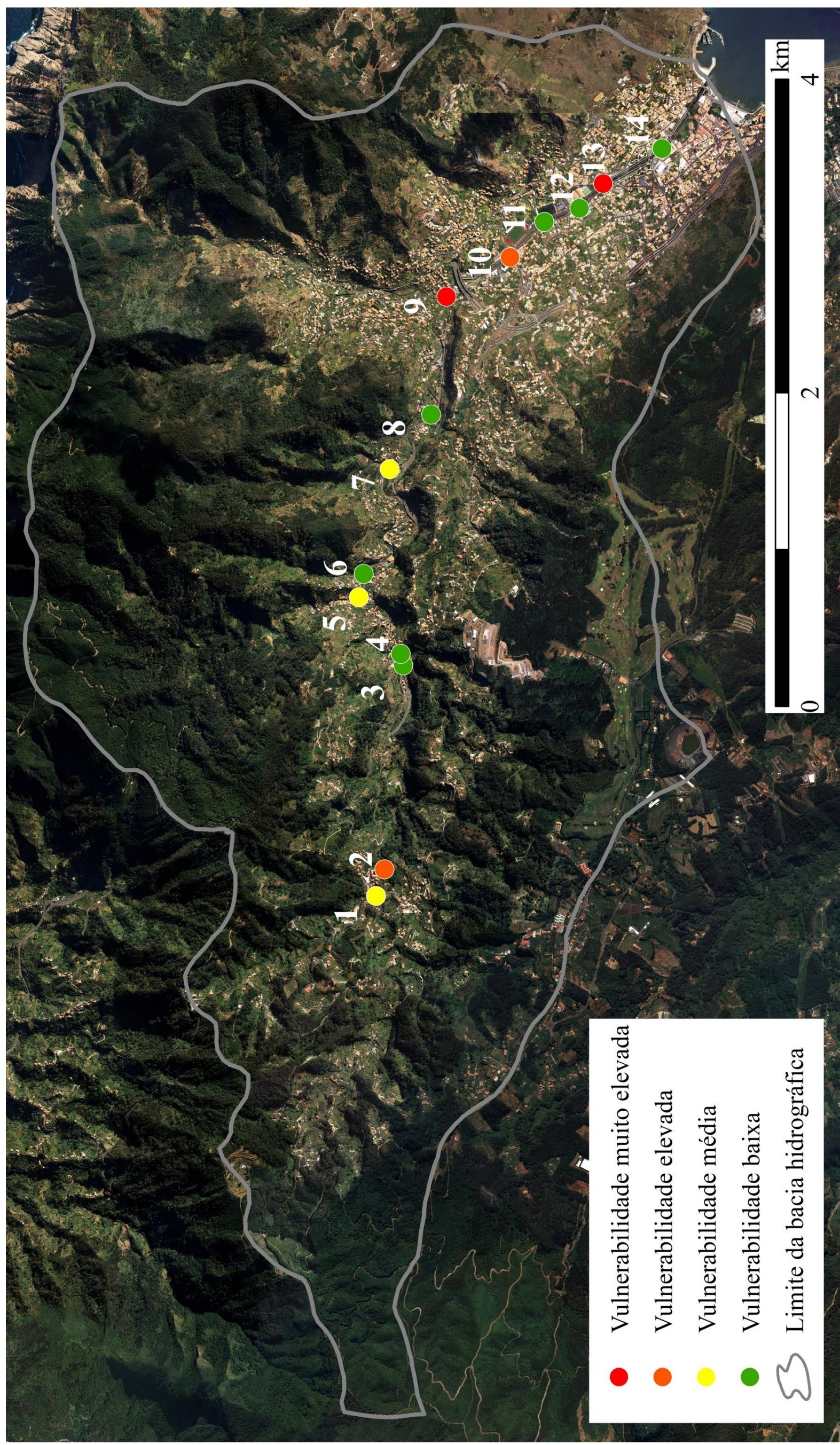


Figura 64. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com T = 100 anos

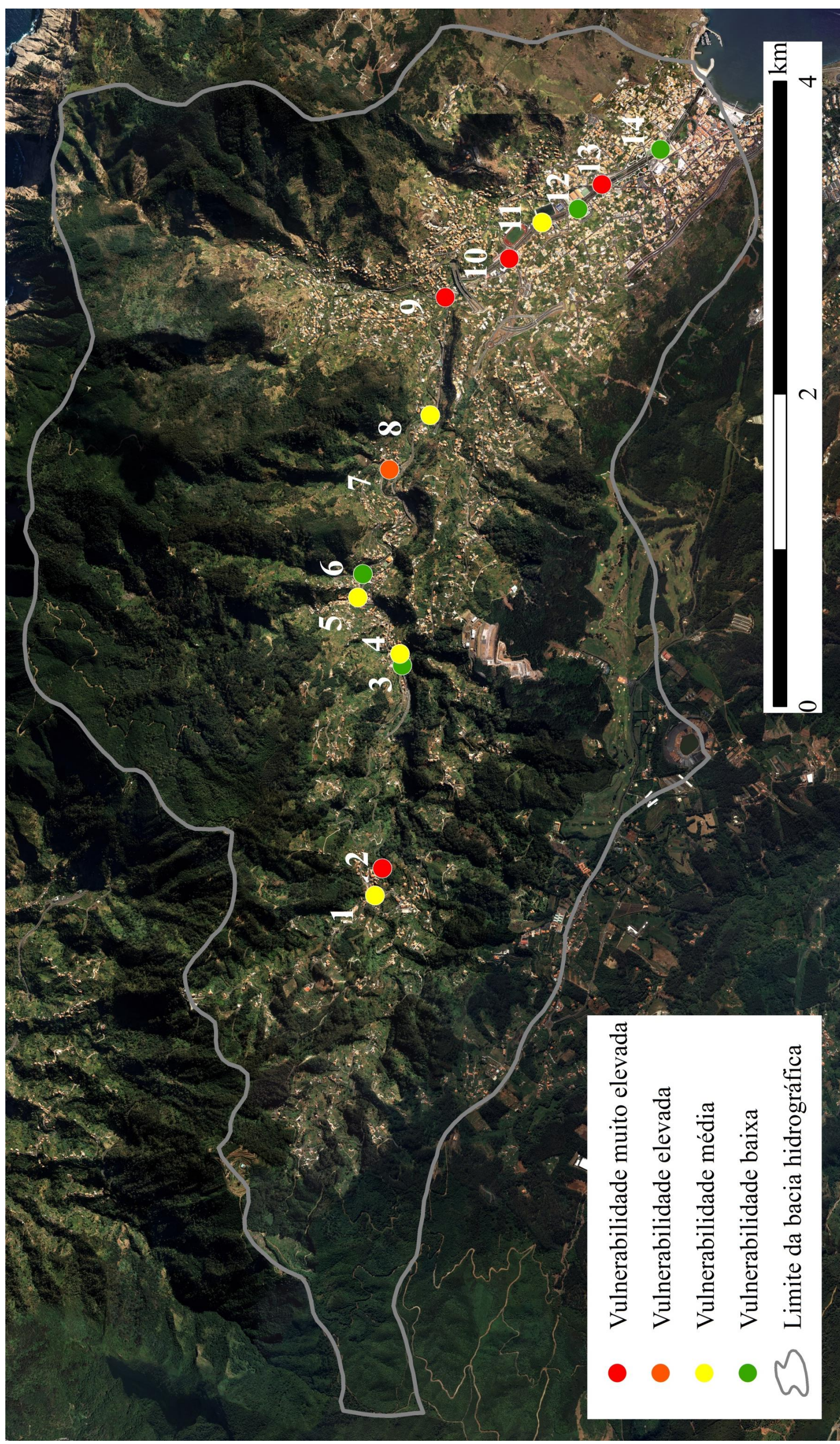


Figura 65. Mapa de vulnerabilidade para sub-bacias com $T = 1000$ anos

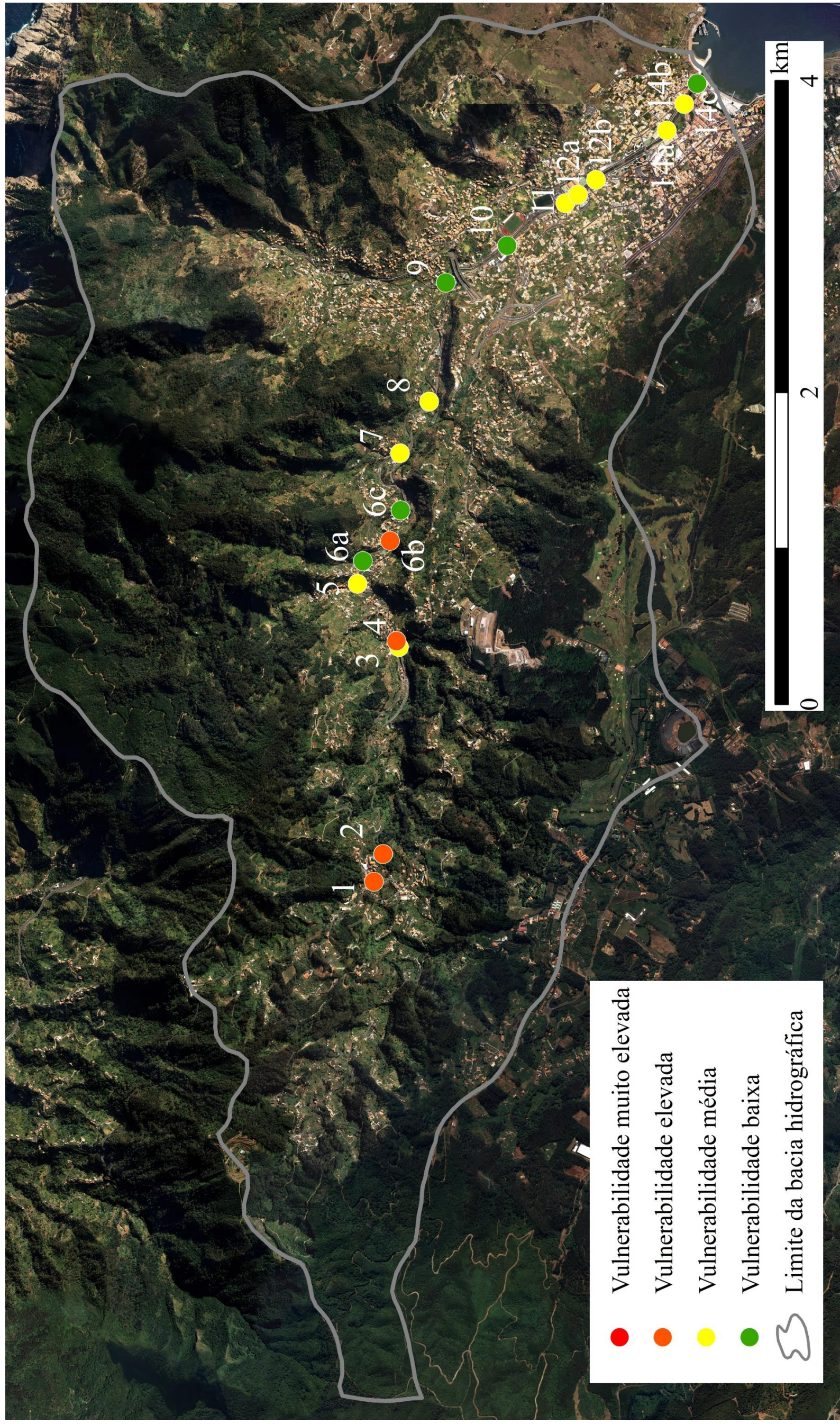


Figura 66. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 10 anos

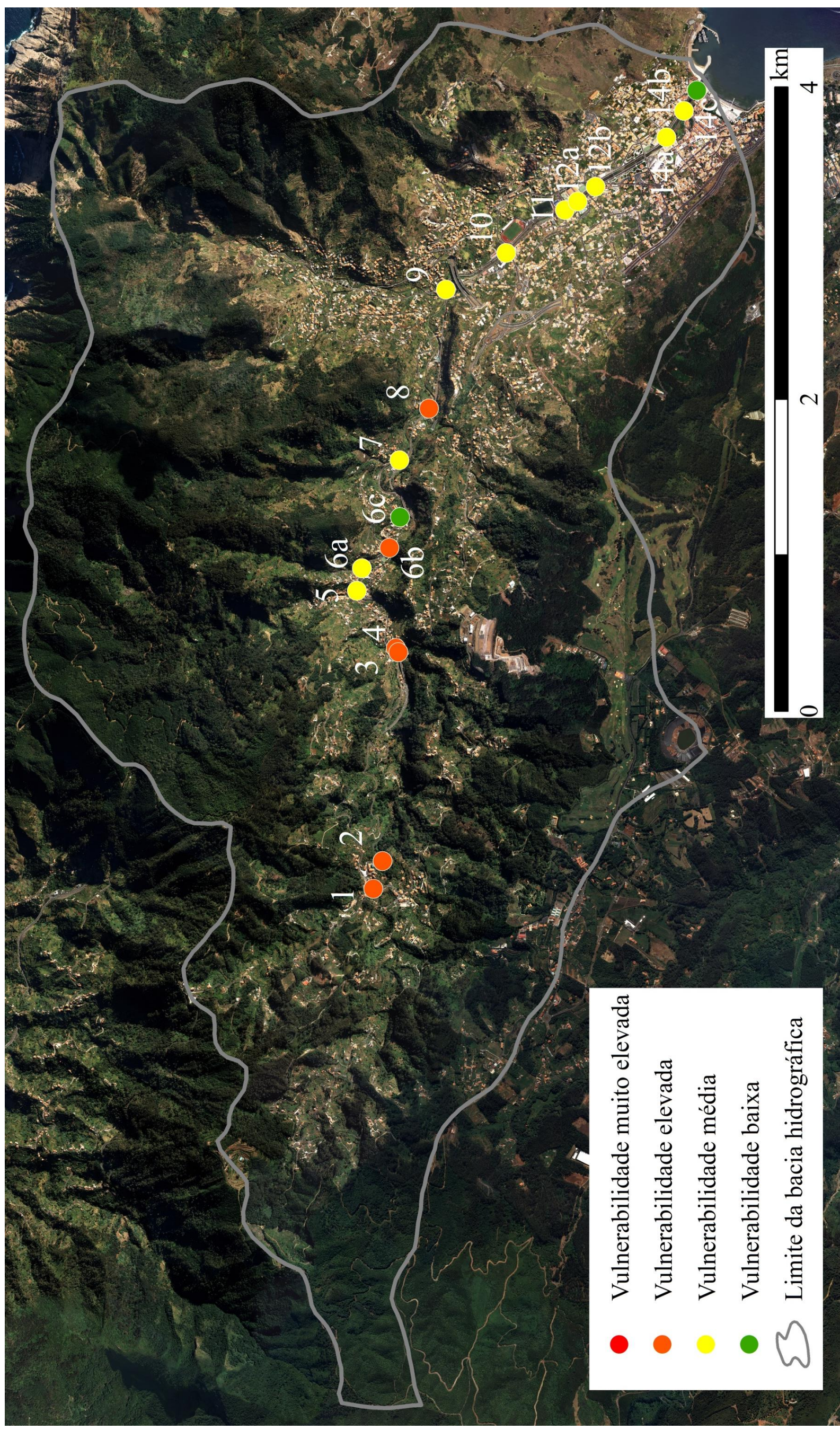


Figura 67. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com $T = 20$ anos

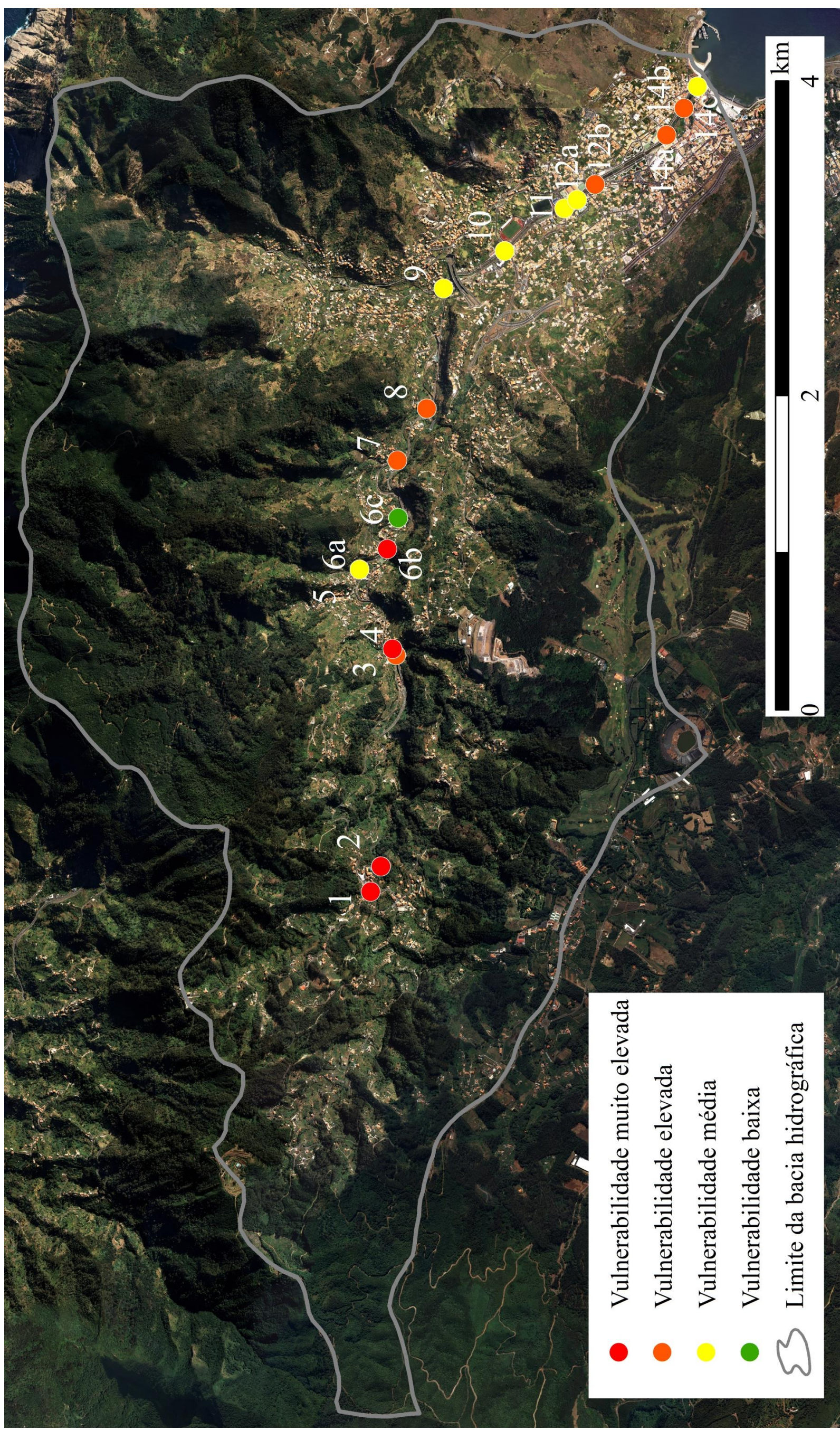


Figura 68. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 50 anos

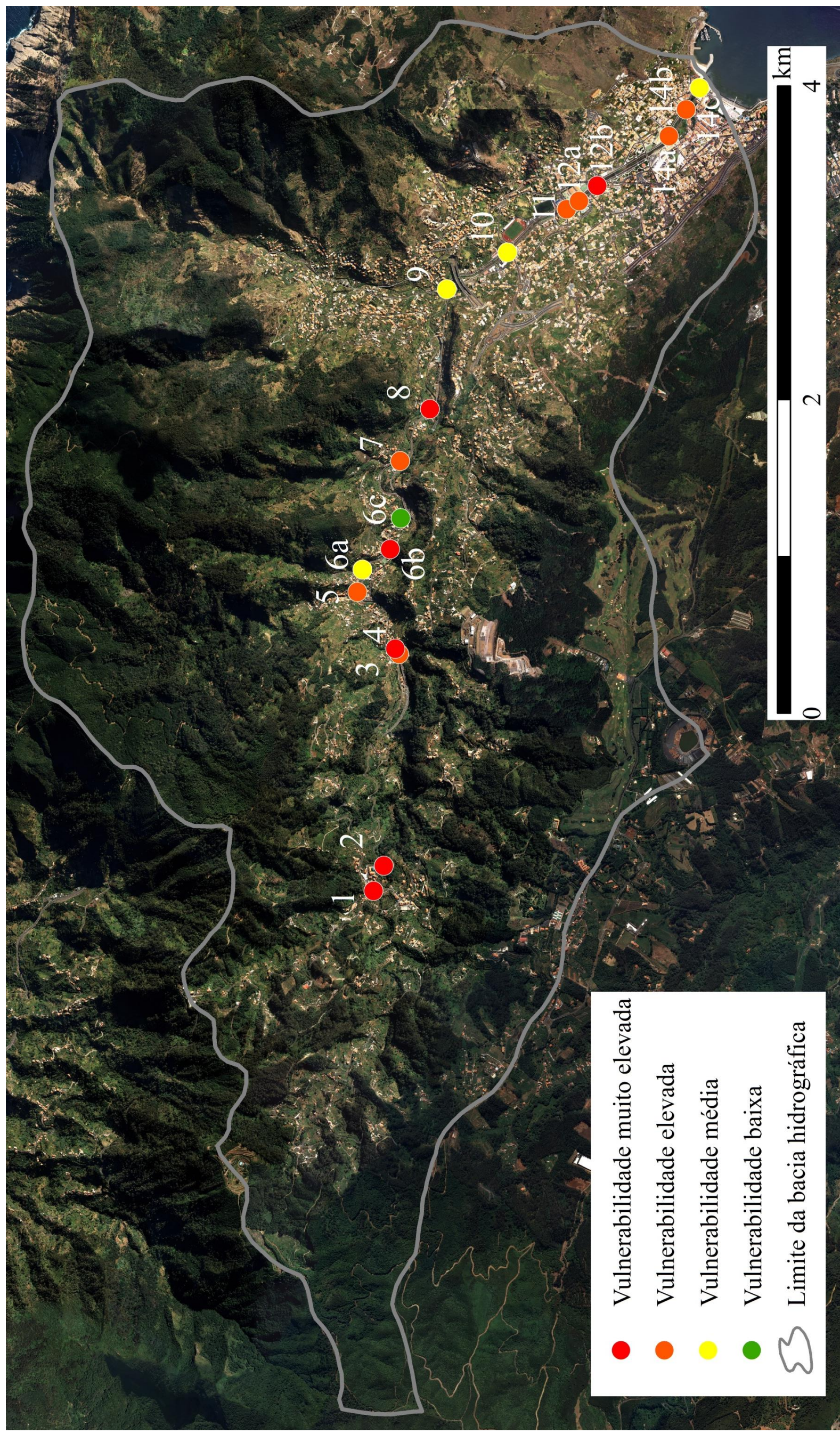


Figura 69. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 100 anos

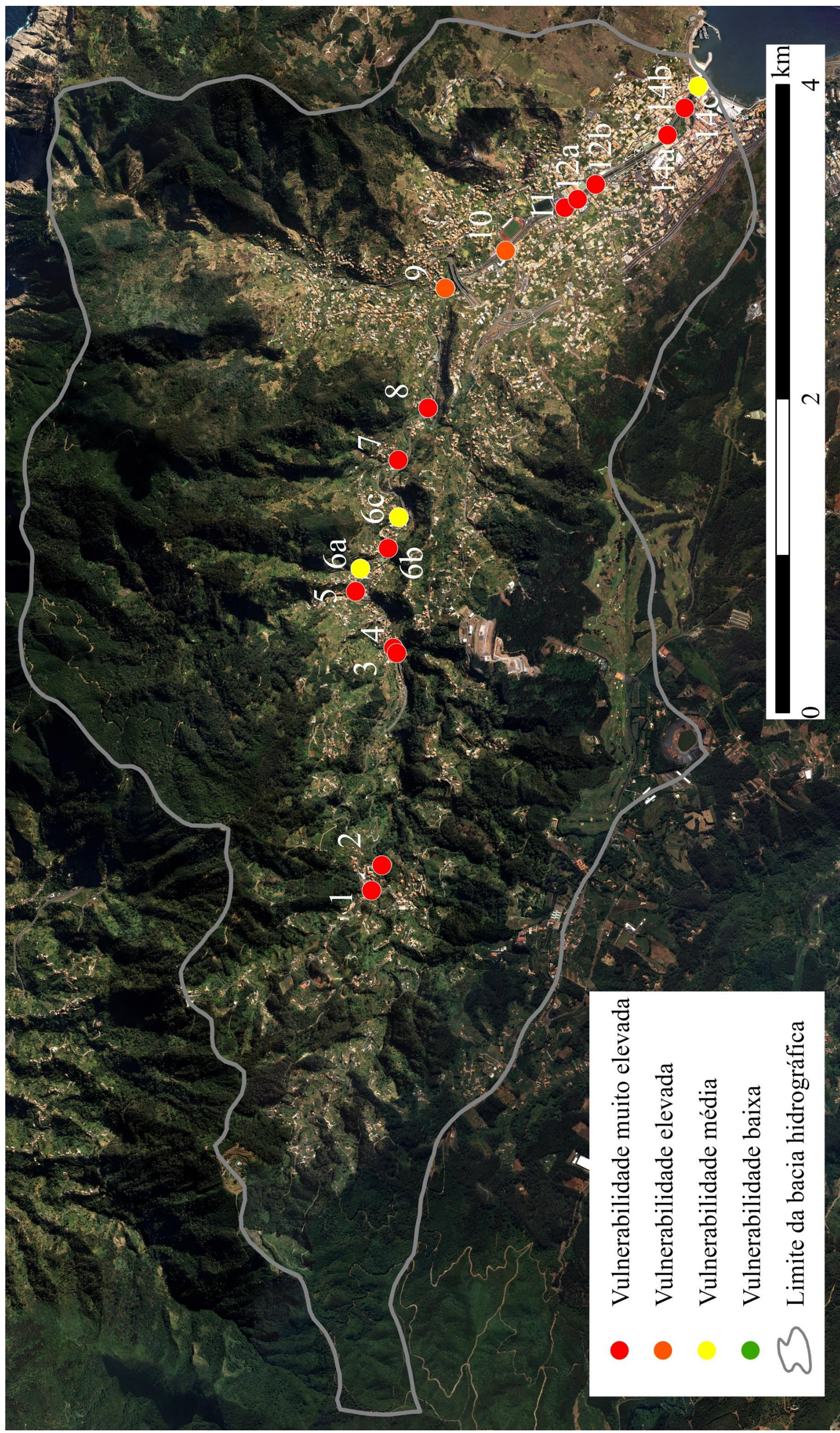


Figura 70. Mapa de vulnerabilidade para as secções da ribeira de Machico com T = 1000 anos