

Análise da capacidade de resposta, transporte e evacuação: contribuição para o estudo do risco vulcânico no concelho de Ponta Delgada

Dissertação de Mestrado

Linda Inês Fortuna Tavares Silva

Mestrado em

Geologia do Ambiente e Sociedade



Ponta Delgada
2023

Análise da capacidade de resposta, transporte e evacuação: contribuição para o estudo do risco vulcânico no concelho de Ponta Delgada

Dissertação de Mestrado

Linda Inês Fortuna Tavares Silva

Orientadores

Doutor José Manuel Rodrigues Pacheco

Doutorado em Geologia (especialidade Vulcanologia); Investigador Auxiliar do IVAR, Universidade dos Açores

Doutora Maria de Fátima Batista Viveiros

Doutorada em Geologia (especialidade Vulcanologia); Professora Auxiliar na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade dos Açores; Investigadora do IVAR, Universidade dos Açores

Dissertação de Mestrado submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geologia do Ambiente e Sociedade

*À minha mãe,
à minha avó,*

e ao Miguel

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABELAS	x
AGRADECIMENTOS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1. Nota Prévia.....	1
1.2. Gestão de Crises.....	4
1.2.1. 1. ^a Fase: Mitigação.....	5
1.2.1.1. Avaliação do Risco.....	6
1.2.1.2. Técnicas de Monitorização.....	8
a) Técnicas de Monitorização Geofísicas.....	8
b) Técnicas de Monitorização Geodésicas.....	10
c) Técnicas de Monitorização Geoquímica.....	10
1.2.2. 2. ^a Fase: Preparação.....	11
1.2.2.1. Sistemas de Alerta e Alarme.....	11
1.2.2.2. Exercícios de Proteção Civil e Planeamento Emergência.....	13
1.2.2.3. Evacuação.....	15
1.2.3. 3. ^a Fase: Resposta.....	16
1.2.4. 4. ^a Fase: Recuperação.....	17
1.2.5. Intervenientes numa Crise.....	17
1.3. Alguns casos de estudo que conduziram à evacuação.....	19
1.3.1. 1. ^o Caso de Estudo: Monte Pinatubo.....	19
1.3.2. 2. ^o Caso de Estudo: Vulcão Tungurahua.....	23
1.3.3. 3. ^o Caso de Estudo: La Soufrière.....	28
1.3.4. Casos de evacuação no arquipélago dos Açores.....	33
a) Vulcão dos Capelinhos (ilha do Faial).....	33
b) Crises sismovulcânicas na ilha de São Jorge.....	35
CAPÍTULO II – CARATERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
2.1. Nota Prévia.....	39
2.2. Localização Geográfica.....	40

2.3.	Enquadramento Geodinâmico dos Açores.....	40
2.4.	Atividade Geológica Histórica.....	42
2.5.	Ilha de São Miguel.....	42
2.6.	Caraterização do Vulcão das Sete Cidades.....	45
	2.6.1. Geomorfologia.....	45
	2.6.2. História Eruptiva.....	47
	2.6.3. Erupções Históricas.....	48
	2.6.4. Vulcanismo Secundário.....	48
2.7.	Caraterização do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos.....	49
	2.7.1. Geomorfologia.....	49
	2.7.2. História Eruptiva.....	51
	2.7.3. Erupções Históricas.....	52
	2.7.4. Vulcanismo Secundário.....	53
2.8.	Elementos de Vulnerabilidade.....	53
	2.8.1. População.....	55
	2.8.2. Edificado.....	59
	2.8.3. Rede Viária.....	61
	2.8.4. Transportes.....	63
	2.8.5. Infraestruturas Essenciais.....	64
	2.8.5.1. Aeroportos, Heliportos e Portos.....	65
	2.8.5.2. Rede de Telecomunicações.....	66
	2.8.5.3. Hospitais e Centros de Saúde.....	67
	2.8.5.4. Serviços Municipalizados de Água e Saneamento Básico.....	67
	2.8.5.5. Infraestruturas de armazenamento e produção de energia e de combustíveis.....	68
	a) Energia Elétrica.....	68
	b) Combustíveis.....	69
	2.8.5.6. Estabelecimentos de ensino.....	69
	2.8.5.7. Outros Edifícios Públicos.....	70
	2.8.6. Infraestruturas Essenciais de apoio à Gestão da Crise.....	71
	2.8.6.1. Segurança e Proteção Civil.....	71
	2.8.6.2. Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores.....	72
	2.8.6.3. Segurança e Proteção Civil no concelho de Ponta Delgada.....	73
	2.8.7. Usos do Solo.....	74

CAPÍTULO III – METODOLOGIA.....76

3.1.	Estudos Anteriores.....	76
3.2.	Metodologia aplicada.....	84
	3.2.1. Seleção do Cenário.....	84
	3.2.2. Seleção da Área de Estudo e Simulações da Atividade Vulcânica.....	85
	3.2.3. População Exposta.....	88

3.2.4. Transportes.....	88
3.2.4.1. Veículos Disponíveis.....	89
3.2.4.2. Distribuição de Veículos Ligeiros por Habitação.....	89
3.2.5. Rede Viária.....	89
3.2.6. Evacuação.....	91
3.2.6.1. Pontos de Encontro.....	91
3.2.6.2. Centros de Realojamento.....	91
3.2.6.3. Cálculo do Tempo de Evacuação.....	92
3.2.6.4. Modelação.....	93
3.2.7. Modelo de Transporte.....	94
3.2.7.1. <i>Network Dataset</i>	94
3.2.7.2. Análise de Redes.....	96
CAPÍTULO IV – RESULTADOS.....	104
4.1. População.....	104
4.2. Tempo de Transportes.....	106
4.3. Rotas.....	106
4.4. Evacuação.....	121
4.5. Congestionamento.....	127
CAPÍTULO V – DISCUSSÃO.....	132
5.1. Discussão.....	132
CAPÍTULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	145
6.1. Conclusões	145
6.2. Trabalhos Futuros.....	147
BIBLIOGRAFIA.....	150
WEBGRAFIA.....	162
LEGISLAÇÃO.....	164

ANEXOS	A1
Anexo I. Escalas de Alertas Científicos do Estado de Atividade Sismovulcânica dos Açores	A2
Anexo II. Escala de alertas científicos para caracterização da qualidade do ar interior (CO ₂).....	A3
Anexo III. Portal da Direção Regional das Obras Públicas - Rede viária regional da ilha de São Miguel.....	A4
Anexo IV. Plano Regional de Emergência de Proteção Civil dos Açores (2019) – Classificação e subclassificações da rede viária.....	A5
Anexo V. Plano Diretor Municipal de Ponta Delgada – Carta de Usos do Solo.....	A6
Anexo VI. Informação da foto aérea utilizada para delimitar a freguesia de Arrifes.....	A7
Anexo VII. Simulações em <i>VORIS</i> de erupções vulcânicas com produção de escoada lávica com direção a N da freguesia de Arrifes.....	A8
Anexos VIII. Simulações em <i>VORIS</i> de erupções vulcânicas com produção de escoada lávica com direção aos lados N e S da freguesia de Arrifes.....	A11
Anexos IX. Simulações em <i>VORIS</i> de erupções vulcânicas com produção de escoada lávica com direção a S da freguesia de Arrifes.....	A14
Anexo X. Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária - Artigo 27.º - Limites gerais de velocidades.....	A17
Anexo XI. Estradas preferenciais para a evacuação da zona S da freguesia de Arrifes, nos três cenários elaborados.....	A18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ciclo de gestão de crises.....	5
Figura 1.2. Localização geográfica do Monte Pinatubo. Base: <i>World Imagery ESRI</i> ©, 2023, Projeção Mercator.....	20
Figura 1.3. Erupção Pliniana de 15 de junho de 1991 no Monte Pinatubo (Newhall e Punongbayan, 1996).....	21
Figura 1.4. Localização geográfica do vulcão Tungurahua. Base: <i>World Imagery ESRI</i> ©, 2023, Projeção Mercator.....	24
Figura 1.5. Mapa das zonas de refúgio de Banões (adaptado do mapa das vias de evacuação, pontos de encontro e refúgios temporais do município de Baños).....	28
Figura 1.6. Localização geográfica do vulcão La Soufrière. Base: <i>World Imagery ESRI</i> ©, 2023, Projeção Mercator.....	29
Figura 1.7. Erupção do vulcão La Soufrière (22 de setembro de 1976) (fotografia de M. Feuillard/IPGP).....	32
Figura 1.8. Erupção do Vulcão dos Capelinhos (fotografia do arquivo do Diário de Notícias).....	35
Figura 1.9. Destruição dos edifícios durante a crise sismovulcânica de 1964 na ilha de São Jorge (Fotografia do arquivo da RTP).....	36
Figura 2.1. Localização do arquipélago dos Açores no Oceano Atlântico e detalhe da localização geográfica das ilhas do arquipélago. Base: <i>Oceans Esri</i> ©, 2023, Projeção Mercator.....	40
Figura 2.2. Enquadramento tectónico do arquipélago dos Açores e principais estruturas (Carmo, 2013; Silva, 2021). Legenda: NA – Placa Norte-Americana; EU – Placa Euroasiática; NU – Placa Núbica (=Africana); CMA – Crista Média Atlântica; ZFK – Zona de Fratura Kurchatov; ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFF – Zona de Fratura do Faial; ZFA – Zona de Fratura Açor; ZFPA – Zona de Fratura Princesa Alice; ZFP – Zona de Fratura do Pico; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – <i>Rift</i> da Terceira e FG – Falha Glória. Base: <i>Oceans Esri</i> ©, 2023, Projeção Mercator e <i>Tectonic_Plate_Boundaries</i> do <i>ArcGIS Online</i>	41
Figura 2.3. Unidades vulcanológicas da ilha de São Miguel. Legenda: 1 – Vulcão das Sete Cidades; 2 – Sistema Vulcânico Fissural dos Picos; 3 – Vulcão do Fogo; 4 – Sistema Vulcânico Fissural do Congro; 5 – Vulcão das Furnas; 6 – Vulcão da Povoação; 7 –	

Sistema Vulcânico do Nordeste (Gaspar <i>et al.</i> , 2015a). Projeção UTM, Zona 26S; <i>Datum</i> WGS84.....	43
Figura 2.4. Mapa do Vulcão das Sete Cidades – tectónica (Carmo, 2013), morfologia (Queiroz, 1997; Carmo, 2013); erupções históricas, limite do Vulcão das Sete Cidades (Queiroz, 1997) e limite do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Ferreira, 2000). 1 – Caldeira Seca; 2 – Caldeira dos Alferes; 3 - Seara; 4 - Lagoa do Santiago; 5 - Lagoa do Canário. Projeção UTM, Zona 26S; <i>Datum</i> WGS84.....	46
Figura 2.5. Fotografia do enquadramento do SVFP entre o Vulcão do Fogo e o Vulcão das Sete Cidades (22/05/2021).....	49
Figura 2.6. Mapa do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos – tectónica (Carmo, 2013), morfologia (Ferreira, 2000; Carmo, 2013); Erupções históricas (1563 e 1652), limite do Vulcão das Sete Cidades (Queiroz, 1997), limite do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Ferreira, 2000) e limite do Vulcão do Fogo (Wallenstein, 1999). Projeção UTM, Zona 26S; <i>Datum</i> WGS84.....	50
Figura 2.7. Localização dos centros eruptivos com idade inferior a 5 000 anos. Realce da freguesia dos Arrifes a vermelho. (adaptado de Ferreira <i>et al.</i> , 2015).....	52
Figura 2.8. Freguesias do concelho de Ponta Delgada, com destaque para a freguesia dos Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; <i>Datum</i> WGS84.....	54
Figura 2.9. Gráfico da distribuição da população dos Arrifes pelas faixas etárias (INE, 2022).....	57
Figura 2.10. Edificado da freguesia de Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; <i>Datum</i> WGS84.....	58
Figura 2.11. Rede Viária da freguesia dos Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; <i>Datum</i> WGS84.....	63
Figura 2.12. Heliporto sediado no COA na freguesia dos Arrifes (07/05/2023).....	65
Figura 2.13. Heliporto sediado no Hospital Divino Espírito Santo em Ponta Delgada (07/05/2023).....	65
Figura 2.14. Reservatório da Carreira na freguesia dos Arrifes (07/05/2023).....	68
Figura 2.15. Infraestruturas Essenciais da freguesia dos Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; <i>Datum</i> WGS84.....	74

Figura 3.1. Sobreposição das cinco simulações individuais realizadas para a faixa N. No anexo VII observam-se as simulações individualmente. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.....	87
Figura 3.2. Sobreposição das cinco simulações individuais realizadas para a faixa central. No anexo VIII observam-se as simulações individualmente. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.....	87
Figura 3.3. Sobreposição das cinco simulações individuais realizadas para a faixa S. No anexo IX observam-se as simulações individualmente. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.....	87
Figura 3.4. Parcela da tabela de atributos do <i>layer</i> das estradas.....	91
Figura 3.5. Localização dos pontos de encontro e centros de realojamento, de acordo com o Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPDL). Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.....	93
Figura 3.6. Janela das propriedades da <i>Network Dataset</i>	95
Figura 3.7. <i>Network Dataset</i> : Linhas da rede de transporte com informação guardada...	95
Figura 3.8. Propriedades da ferramenta <i>Closest Facility</i>	100
Figura 3.9. Configurações avançadas da ferramenta <i>location-allocation</i>	100
Figura 3.10. Exemplo <i>Location-Allocation</i> . Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.....	101
Figura 3.11. Tabela de atributos resultante da aplicação da ferramenta <i>Location-Allocation</i>	102
Figura 3.12. Exemplos de <i>New Route Analysis</i> . Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.....	103
Figura 4.1. Distribuição do edificado a evacuar na freguesia de Arrifes num cenário de erupção estromboliana/havaiana na zona S da freguesia.....	105
Figura 4.2. Mapa com as rotas definidas pela aplicação da ferramenta <i>Closest Facility</i>	108
Figura 4.3. Distribuição da população e dos veículos pelos pontos de encontro, de acordo com a análise do ponto mais próximo.....	109

Figura 4.4. Mapa do edificado a evacuar e as respetivas rotas a seguir. Nota: os edifícios estão na mesma cor que as rotas pelas quais devem seguir para chegar ao ponto de encontro, que por sua vez tem a mesma tonalidade que o edificado.....	110
Figura 4.5. Mapa resultante da aplicação da ferramenta <i>Location-Allocation</i> , com restrição de 250 incidentes por ponto de encontro.....	111
Figura 4.6. Distribuição da população e dos veículos pelos pontos de encontro com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.....	112
Figura 4.7. Mapa das rotas entre os edifícios e os pontos de encontro, com a restrição de 250 veículos por ponto de encontro, utilizando a ferramenta <i>New Route</i>	113
Figura 4.8. Mapa com a discriminação dos edifícios a evacuar, de acordo com o ponto de encontro para o qual se devem dirigir, considerando um limite de 250 edifícios por ponto de encontro.....	115
Figura 4.9. Mapa resultante da aplicação da ferramenta <i>Location-Allocation</i> , com restrição de 150 incidentes por instalação.....	116
Figura 4.10. Distribuição da população e dos veículos pelos pontos de encontro, com restrição de 150 incidentes.....	117
Figura 4.11. Mapa das rotas entre os edifícios e os pontos de encontro, com a restrição de 150 veículos por ponto de encontro, utilizando a ferramenta <i>New Route</i>	118
Figura 4.12. Mapa com a discriminação dos edifícios a evacuar, de acordo com o ponto de encontro para o qual se devem dirigir, considerando um limite de 150 edifícios por ponto de encontro.....	120
Figure 5.1. Tempo em minutos até à evacuação do primeiro veículo e de todos os veículos para os respetivos pontos de encontro, num cenário sem restrições.....	133
Figure 5.2. Tempo total em horas para completar a evacuação para os respetivos pontos de encontro num cenário sem restrições.....	134
Figure 5.3. Tempo em minutos até à evacuação do primeiro veículo e de todos os veículos para os respetivos pontos de encontro, num cenário com restrição de 250 veículos.....	135
Figure 5.4. Tempo total em horas para completar a evacuação num cenário com limitação de 250 veículos por ponto de encontro, em fluxos livre e com congestionamento da estrada a um terço e dois terços.....	136
Figura 5.5. Tempo em minutos até à evacuação do primeiro veículo e de todos os veículos para os respetivos pontos de encontro, num cenário com restrição de 150 veículos.....	137

Figure 5.6. Tempo total em horas para completar a evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro num cenário com limitação de 150 veículos, sem congestionamento da estrada e com congestionamento da estrada a um terço e dois terços.....138

Figure 5.7. Tempo total em horas para evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro nos três cenários, em fluxo livre.....139

Figure 5.8. Tempo total em horas para evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro nos três cenários, com congestionamento de um terço da estrada.....140

Figure 5.9. Tempo total para evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro nos três cenários, com congestionamento de dois terços da estrada.....140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Categorias dos perigos (UNDRR, 2020; 2021).....	1
Tabela 1.2. Frequência dos perigos geológicos no Açores (adaptado de Gaspar <i>et al.</i> , 2015a).....	2
Tabela 1.3. Matriz do risco (PMEPCPDL, 2014).....	8
Tabela 1.4. Níveis do estado de alerta previstos no Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (2014).....	12
Tabela 1.5. Fases da Evacuação (adaptado de Tomsen <i>et al.</i> , 2014).....	16
Tabela 1.6. Intervenientes numa crise vulcânica (adaptado de Bonfils <i>et al.</i> , 2012).....	18
Tabela 1.7. Desenvolvimento dos processos eruptivos associados à erupção de 1991 do Monte Pinatubo (adaptado de Newhall e Punongbayan, 1996; Newhall e Solidum, 2015). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.....	22
Tabela 1.8. Desenvolvimento dos processos eruptivos do Vulcão Tungurahua (* Alertas: Branco - condições normais; Amarelo - ameaça de perigo; Laranja - iminência de perigo; Vermelho - evento em curso (sítio: https://manualcoe.gestionderiesgos.gob.ec/portfolio-item/estados-de-alerta-por-eventos-peligrosos/) (adaptado de: Lane <i>et al.</i> (2003); Armijos <i>et al.</i> , 2017). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.....	26
Tabela 1.9. Desenvolvimento da crise vulcânica de 1976-1977 no vulcão La Soufrière (adaptado de: Heiken <i>et al.</i> , 1980; Feuillard <i>et al.</i> , 1983; Komorowski <i>et al.</i> , 2005, Loughlin <i>et al.</i> , 2015; Chenet <i>et al.</i> , 2014; Hincks <i>et al.</i> , 2014). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.....	29
Tabela 1.10. Desenvolvimento dos processos eruptivos do Vulcão dos Capelinhos (adaptado de: Castello Branco <i>et al.</i> (1959), Cole <i>et al.</i> (1996; 2001), Machado (1958, 1959), Zbyzewski e Veiga (1959), Zbyzewski (1960), Machado <i>et al.</i> (1962), Scarth e Tanguy (2001), Lobão (2008), Coutinho <i>et al.</i> (2010)). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.....	32
Tabela 1.11. Desenvolvimento da crise sismovulcânica de 1964 na ilha de São Jorge. (adaptado de: Zbyszewski e Rosa, 1977; Decreto-Lei n.º 45 685, de 27 de abril; Decreto-Lei n.º 45 687, de 27 de abril). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação	34

Tabela 1.12. Evolução da crise sismovulcânica de 2022 a 2023 na ilha de São Jorge (CIVISA,2022; 2023 e SRPCBA, 2022; 2023). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.....	37
Tabela 2.1. Área em km ² das freguesias do concelho de Ponta Delgada.....	55
Tabela 2.2. Distribuição da população e densidade populacional do concelho de Ponta Delgada (Instituto Nacional de Estatística, 2021).....	56
Tabela 2.3. Época de construção do edificado do arquipélago dos Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia dos Arrifes (INE, 2021).....	59
Tabela 2.4. Número de pisos do edificado do arquipélago dos Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia dos Arrifes (INE, 2021).....	60
Tabela 2.5. Tipo de utilização do edificado do arquipélago dos Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia dos Arrifes (INE, 2021).....	60
Tabela 2.6. Ocupação do edificado do arquipélago dos Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia dos Arrifes (INE, 2021).....	61
Tabela 2.7. Parque Automóvel da Região Autónoma dos Açores e do concelho de Ponta Delgada em 2021 (ASF).....	64
Tabela 3.1. Modelos de aplicação dos SIG, nomeadamente na modelação da população perante perigos e na seleção ótima de localizações importantes para cada estudo. *Modelo que gera interações entre diferentes agentes autónomos, simulando o comportamento de um sistema.....	76
Tabela 3.2. Modelo de trabalho para definição de evacuação segundo Wild <i>et al.</i> (2021).....	80
Tabela 3.3. Dados estatísticos da distribuição da população pelo edificado na freguesia dos Arrifes. (1) - dados dos censos de 2021, Instituto Nacional de Estatística (INE); (2) - cartografia de 2002.....	88
Tabela 3.4. Total de alojamentos e total de veículos ligeiros no concelho de Ponta Delgada segundo o INE (2021) e a Autoridade de Supervisão de Seguros e Fundos de Pensões, respetivamente. Nota: veículos por alojamento = veículos por n.º de residências efetivas.....	89
Tabela 3.5. Parâmetros da classificação das estradas.....	90
Tabela 3.6. Subdivisão da ferramenta Location-Allocation.....	99

Tabela 4.1. Total de edifícios e habitantes a evacuar na freguesia dos Arrifes, em caso de uma erupção vulcânica do tipo havaiana ou estromboliana na zona S da freguesia dos Arrifes.....	106
Tabela 4.2. Média de veículos por alojamento e total de veículos envolvidos na evacuação da zona S da freguesia dos Arrifes.....	106
Tabela 4.3. Tempo mínimo, máximo e médio em minutos dos percursos entre os agregados familiares e os pontos de encontro, sem qualquer tipo de restrição.....	121
Tabela 4.4. Dados estatísticos da distância mínima, máxima e média em quilómetros entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro, sem considerar qualquer tipo de restrição.....	121
Tabela 4.5. Tempo mínimo, máximo e médio em minutos dos percursos entre os agregados familiares e os pontos de encontro, com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.....	122
Tabela 4.6. Dados estatísticos da distância mínima, máxima e média em quilómetros entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro, com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.....	123
Tabela 4.7. Tempo mínimo, máximo e médio em minutos dos percursos entre os agregados familiares e os pontos de encontro, com restrição de 150 veículos por ponto de encontro.....	124
Tabela 4.8. Dados estatísticos da distância mínima, máxima e média em quilómetros entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro, com restrição de 150 veículos por ponto de encontro.....	125
Tabela 4.9. Cálculo do tempo total em horas para evacuação de toda a população para os respetivos pontos de encontro, sem congestionamento.....	126
Tabela 4.10. Dados temporais em horas dos congestionamentos da estrada a um terço e a dois terços para o cenário 1.....	127
Tabela 4.11. Dados temporais em horas dos congestionamentos da estrada a um terço e a dois terços, com restrição máxima de 250 veículos por ponto de encontro.....	128
Tabela 4.12. Dados temporais em horas dos congestionamentos da estrada a um terço e dois terços, com uma restrição máxima de 150 veículos por ponto de encontro.....	129
Tabela 4.13. Evacuação total em horas com congestionamento da estrada a um terço, para os três cenários desenvolvidos (sem restrição, com 250 veículos de restrição e com 150 veículos de restrição).....	130

Tabela 4.14. Evacuação total em horas com congestionamento da estrada a dois terços, para os três cenários desenvolvidos (sem restrição, com 250 veículos de restrição e com 150 veículos de restrição).....130

AGRADECIMENTOS

No decorrer da elaboração desta dissertação foram várias as pessoas e/ou entidades que com ajuda, colaboração e apoio possibilitaram a sua realização. Assim, de forma especial quero agradecer:

À Universidade dos Açores e à Faculdade de Ciências e Tecnologia, pelas facilidades concedidas;

Ao Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR), pela oportunidade de iniciar a minha vida profissional;

Ao Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), pelo reforço na aprendizagem da monitorização sismovulcânica;

A todos os professores da licenciatura e do mestrado que acompanharam o meu percurso académico;

Ao Doutor José Pacheco, Orientador Científico, pela orientação ao longo dos meses de escrita e pela paciência durante os períodos de incerteza na consolidação do tema da dissertação;

À Doutora Fátima Viveiros, Orientadora Científica, pela sua orientação e profissionalismo durante todo o processo de elaboração da dissertação e pelo apoio e confiança depositada;

De modo geral a todos os investigadores, professores e colaboradores que diariamente apoiavam direta ou indiretamente o meu percurso profissional:

À Simone Aguiar pela motivação e ajuda na utilização do *VORIS 2.0*;

À Daniela Matias pela revisão de capítulos e pelo incentivo ao desenvolvimento do meu currículo profissional;

Ao Sandro Matos por todo apoio no esclarecimento de dúvidas do *Software ArcGIS* e pelas críticas construtivas;

Ao Nuno Cabral pela revisão do *curriculum vitae* e pelo perfeccionismo na construção da imagem referente ao mapa de Baños (Tunguruhua);

Ao Hadi Cruz pela impecável revisão e pelas críticas construtivas do resumo e do *abstract*;

A todos os restantes alunos de doutoramento e membros do IVAR/CIVISA, pelo apoio e incentivo à continuação do trabalho;

Aos meus colegas de mestrado, Diogo Cabral e Kleiton Dias, pelas mensagens de motivação nas horas mais difíceis;

À minha família pelo incansável apoio ao longo destes meses. À minha mãe pela leitura informal em todas as conclusões de capítulos. À minha avó pela força que me transmite. E por fim, ao Miguel por todo o carinho e compreensão quando o mau feitiço apertava.

A execução desta dissertação contou com o apoio do Projeto VolriskMac II financiado pelo Programa de Cooperação INTERREG V-A Espanha-Portugal MAC (Madeira-Açores-Canárias) e com o apoio do Financiamento Programático da Fundação para a Ciência e Tecnologia.

RESUMO

Os principais perigos naturais que têm afetado o arquipélago dos Açores ao longo da sua história são os geológicos (essencialmente sismos, erupções vulcânicas, emissões gasosas e movimentos de vertente) e os hidrometeorológicos (cheias e inundações). Nos últimos 600 anos foram contabilizadas, neste arquipélago, 28 erupções vulcânicas que resultaram em cerca de 250 fatalidades, para além de danos materiais. Estes acontecimentos destacam a importância de se estudar os diferentes tipos de perigos e de se desenvolverem planos de ação para uma melhor capacidade de resposta, e assim, mitigar o risco.

A definição de planos de evacuação para a freguesia de Arrifes (concelho de Ponta Delgada, ilha de São Miguel, Açores), tendo como base um cenário de erupção vulcânica do tipo havaiana e/ou estromboliana, constitui o foco do presente trabalho. O estudo centra-se no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (SVFP), uma das sete unidades vulcanológicas que formam a ilha de São Miguel. O SVFP é caracterizado pela presença de cones de escórias e escoadas lávicas basálticas (*s.l.*). Neste sentido, o cenário de erupção vulcânica selecionado é do tipo havaiana/estromboliana com desenvolvimento de uma escoada lávica com impacto na zona sul (S) da freguesia de Arrifes.

A seleção do melhor percurso de evacuação na iminência de uma erupção vulcânica considera a existência de três cenários relativamente à capacidade dos pontos de encontro, nomeadamente: (1) ausência de restrições; (2) com uma restrição de 250 veículos; e (3) com uma restrição de 150 veículos por ponto de encontro.

Os cenários desenvolvidos possibilitam também quantificar o tempo necessário para evacuar a população, com pressuposto que a mesma ocorreria durante o período noturno. A modelação é efetuada com recurso ao *software ArcGIS®* e utilizam-se os dados do edificado e da população da freguesia de Arrifes (carta militar da ilha de São Miguel (2002) à escala 1:25 000, Instituto Nacional de Estatística de Portugal), assim como os pontos de encontro estabelecidos no Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPDL) de 2014. As ferramentas de *Network Analysis (Closest Facility e Location-Allocation)* permitem efetuar a análise do percurso entre as habitações e os pontos de encontro.

A análise da informação decorrente da aplicação das ferramentas supramencionadas permite o cálculo do tempo total de evacuação da zona S de Arrifes para os três cenários explorados neste estudo. O congestionamento das estradas a um terço e a dois terços da

sua capacidade é também avaliado para cada um dos cenários. Os resultados obtidos demonstram que, independentemente do congestionamento, a aplicação das restrições no número de veículos nos pontos de encontro permite uma evacuação total mais eficaz. Dos cenários considerados, o mais eficiente é o que impõe uma limitação de 150 veículos por ponto de encontro, porque promove uma maior dispersão da população, diminuindo o tempo total de evacuação (um máximo de 39 minutos, com congestionamento de dois terços da estrada).

A metodologia desenvolvida possibilita avaliar a eficácia da evacuação e caracterizar as suas diversas rotas, assim como quantificar as solicitações dos diferentes pontos de encontro e, ainda, estimar a importância ou irrelevância de alguns. Esta metodologia constitui uma ferramenta útil para a gestão de crises, quer durante as fases de preparação, quer nas fases de reposta.

ABSTRACT

Throughout its history, the Azores archipelago has been mainly affected by natural hazards of a geological nature (namely earthquakes, volcanic eruptions, gas emissions, and landslides) as well as hydro-meteorological (*viz.* floods and inundations). In the past 600 years, 28 eruptions have been documented in the archipelago, resulting in about 250 fatalities as well as extensive property/infrastructure damage. These events emphasize the need for researching these hazards and develop strategies to improve the emergency response capacity, as well as risk mitigation.

The aim of this study is the development of evacuation plans for the parish of Arrifes (municipality of Ponta Delgada, São Miguel Island, Azores), based on Hawaiian and/or Strombolian volcanic eruption scenarios. The research focuses on the Picos' Fissural Volcanic System (PFVS), which is one of the seven volcanological units that compose the island of São Miguel. This system is characterized by presence of scoria cones and basaltic lava flows (*s.l.*). Accordingly, the selected volcanic eruption scenario is of the Hawaiian/Strombolian type, with a lava flow developing and having an impact in the Southern (S) part of the parish of Arrifes.

The selection of the best evacuation route in the case of an imminent volcanic eruption considers three scenarios with regards to the capacity of the meeting points. They are: (1) no restrictions; (2) with a restriction of 250 vehicles; (3) with a restriction of 150 vehicles per meeting point.

The assessed generated also allow for the quantification of the necessary time frame to evacuate the population, under the assumption that the emergency occurs during the night. The modelling is carried out using ArcGIS® software and uses data from the parish of Arrifes' buildings and population (military map of São Miguel Island (2002) at a scale of 1:25 000; National Institute of Statistics of Portugal), as well as the meeting points established in the Municipal Civil Protection Emergency Plan of Ponta Delgada (PMEPCPDL "*acronym in portuguese*"), of 2014. The Network Analysis tools (Closest Facility and Location-Allocation) allow for the assessment of the route between the households and the meeting points.

The analysis of the information obtained from the aforementioned tools, enables an estimation of the overall evacuation time of the Arrifes S zone for the three suggested scenarios. For each scenario, the congestion of the roadways at one-third and two-thirds

of their capacity is also considered. The results reveal that, regardless of the congestion, limiting the number of vehicles at the meeting points allows for a more effective overall evacuation. The study shows that the most efficient scenario is the one that sets a limit of 150 vehicles per meeting point, because it promotes population dispersion, resulting in a decrease in the overall evacuation time (a maximum 39 minutes with two-thirds of congestion).

The developed methodology allows for the evaluation of the evacuation's success and the characterization of its numerous paths, as well as quantifying the needs of the various meeting points and estimating the importance or irrelevance of some of these locations. As a result, the established approach is a valuable tool for crisis management throughout both the preparation and response phases.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1. Nota Prévia

“Não podemos parar as calamidades naturais, mas podemos e devemos equipar melhor os indivíduos e comunidades para resistir.”

– Ex-secretário-Geral das Nações Unidas - Kofi Annan (ISDR, 2005)

Os desastres resultantes de causas naturais provocam perdas em todo o mundo. No ano de 2020 o *Center for Research on Epidemiology of Disasters* (CRED) registou 389 eventos dos quais resultaram 15 080 vítimas mortais, 98,4 milhões de pessoas afetadas e 151,57 mil milhões de euros em perdas económicas (CRED e UNDRR, 2021).

O conceito de desastre traduz o impacto de um perigo sobre um indivíduo ou comunidade, perturbando o seu normal funcionamento. Os desastres não são naturais e para ser considerado um desastre deve haver impacto de um perigo num indivíduo ou numa sociedade (UNISDR, 2009). Por outro lado, os perigos subdividem-se em oito categorias: geológicos, hidrometeorológicos, biológicos, ambientais, tecnológicos, extraterrestres, químicos e sociais. Na tabela 1.1 estão tipificados os perigos e exemplos de fenómenos associados (UNDRR, 2020).

Tabela 1.1. Categorias dos perigos (adaptado de UNDRR, 2020, 2021).

Tipologia de Perigo	Descrição	Evento
Perigos Geológicos	Fenómenos naturais relacionados com: (1) processos geofísicos internos da Terra e (2) processos à superfície ou próximos da superfície.	Sismos
		Erupções Vulcânicas
		Emanações Gasosas
		Movimentos de Vertente
		Tsunamis
Perigos Hidrometeorológicos	Fenómenos atmosféricos, hidrológicos e/ou oceanográficos.	Cheias e Inundações
		Tempestades
		Seca
		Temperaturas extremas
		Avalanches
Perigos Extraterrestres	Fenómenos com origem fora da Terra.	Asteroides
		Impacto de Meteoritos
		Erupções Solares
Perigos Biológicos	Fenómeno de origem biológica ou transmitido por vetor biológico.	Doenças Epidémicas
		Doenças originadas por contágio de Plantas e/ou Animais
		Infestações

Tabela 1.1. (Continuação).

Perigos Ambientais	Fenómenos de degradação dos ecossistemas.	Poluição do ar
		Salinidade
		Erosão do solo
		Pesticidas
		Eutrofização
Perigos Tecnológicos	Fenómeno tecnológico ou resultante de condições industriais.	Poluição Industrial
		Radiação Nuclear
		Lixo Tóxico
		Explosões
Perigos Sociais	Fenómenos que resultam de escolhas humanas: (1) atividade sociopolítica e económica; (2) atividade cultural e de mobilidade; (3) uso de tecnologia; (4) comportamento da população.	Conflito armado internacional/ não-internacional
		Violência
		Choque Financeiro
		Agitação Civil
Perigos Químicos	Fenómenos resultantes da exposição da população a químicos de origem natural e humana.	Metais Pesados
		Hidrocarbonetos
		Contaminação de Alimentos
		Resíduos de Pesticidas

No arquipélago dos Açores, os principais perigos que têm afetado a população ao longo da sua história são os perigos geológicos e hidrometeorológicos. Para além destes, desde 2020 que os perigos biológicos ganharam relevo ao nível mundial com a pandemia COVID-19.

Nos Açores, os perigos geológicos permanentes ou quase permanentes, são as emanações gasosas e os movimentos de vertente. A atividade sísmica e as erupções vulcânicas contam com um período de retorno de 18 e 20 anos, respetivamente (Gaspar *et al.*, 2015a). Na tabela 1.2 observa-se a frequência dos perigos geológicos na região, com base nos eventos dos últimos 570 anos (Gaspar *et al.*, 2015a).

Tabela 1.2. Frequência dos perigos geológicos no Açores (adaptado de Gaspar *et al.*, 2015a).

Classes de Retorno (anos)	Frequência dos Eventos	Tipo de Perigo	Retorno (anos)
5 000 – 10 000	Muito baixa a Insignificante	-	-
1 000 – 5 000	Muito Baixa	-	-
500 – 1 000	Baixa	Tsunamis	570
100 – 500	Moderada	-	-

Tabela 1.2. (Continuação).

50 – 100	Alta	-	-
10 – 50	Muito Alta	Atividade Sísmica	18,4
		Erupções Vulcânicas	20,4
1 – 10	Quase Permanente	Movimentos de Vertente	-
< 1	Permanente	Emanações gasosas	-

Os perigos associados a um evento eruptivo dependem de vários fatores como o tipo de vulcão, o tempo decorrido desde a última erupção, a localização geográfica, o clima local e a altura do ano. Em geral, se uma erupção ocorrer num local longe da comunidade, independentemente do tipo de erupção, terá um impacto menor quando comparada a uma erupção que ocorra junto a uma comunidade (Rymer, 2015).

Em 2015 havia registo de pelo menos 1 500 vulcões terrestres considerados ativos, ou seja, com atividade eruptiva conhecida ou possível no holocénico e uma média anual de 70 erupções (Siebert *et al.*, 2015). Além disso, as estatísticas mostravam que cerca de 800 milhões da população mundial vivia num raio de 100 km de vulcões ativos e 29 milhões residiam a apenas 10 km de um centro eruptivo. Dentro destas distâncias, há a possibilidade de perigos vulcânicos devastadores para a população (Brown *et al.*, 2015).

As erupções vulcânicas podem resultar em perturbações sociais e económicas significativas, bem como na perda de vidas e meios de subsistência. Embora as erupções possam ter consequências regionais e globais, a maioria dos efeitos são locais (Brown *et al.*, 2015).

Entre os anos 1500 e 2017 contabilizam-se 581 incidentes graves associados a eventos eruptivos que resultaram em 278 368 fatalidades. Uma análise detalhada dos tipos de perigos permite averiguar que num raio inferior a 5 km a causa primordial das fatalidades são a queda de piroclastos de trajetória balística; entre os 5 e os 15 km são as escoadas piroclásticas o perigo mais devastador; e num raio superior a 15 km do centro eruptivo as principais causas são os tsunamis, *lahars* e piroclastos de queda (Brown *et al.*, 2017).

As escoadas piroclásticas são o perigo vulcânico que registou maior número de vítimas mortais entre 1600 e 2010, seguido das causas indiretas (fome e doença), dos tsunamis e dos *lahars* primários (Auker *et al.*, 2013).

Uma análise geral às fatalidades associadas a erupções vulcânicas entre 1986 e 2015 mostra que cerca de 63 % ocorrem na primeira semana do evento eruptivo e aproximadamente 44 % ocorre pelo regresso não autorizado às zonas de perigo (Barclay *et al.*, 2019).

O número de vítimas mortais associadas aos perigos vulcânicos tem, contudo, vindo a diminuir. Isto deve-se ao avanço tecnológico, como melhorias nos sistemas de monitorização vulcânica, avaliação do risco e ações de sensibilização (Brown *et al.*, 2017; Wild *et al.*, 2021).

A população do arquipélago dos Açores vive em ilhas vulcânicas onde nos últimos 600 anos de História foram contabilizadas 28 erupções que resultaram em cerca de 250 fatalidades (Gaspar *et al.*, 2015b). Estas observações destacam a importância de se estudar estes perigos e de se desenvolverem planos de ação para mitigar o risco.

Este trabalho tem por objetivos analisar o processo de evacuação de uma freguesia do arquipélago dos Açores, salientando o tempo necessário para percorrer a rota entre cada habitação e os pontos de encontro estipulados no Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada. Importa referir que este estudo é pioneiro na definição de procedimentos de evacuação durante uma crise vulcânica na região. Primeiramente será feita uma introdução acerca do processo de gestão de crise.

1.2. Gestão de Crises

Um perigo é um fenómeno que pode ocorrer e ter impacto negativo na população e/ou no ambiente. A atividade sísmica e vulcânica são exemplos de perigos geológicos (Jolly *et al.*, 2015; UNDRR, 2020).

A gestão de crises é um processo organizado de instrução de procedimentos que visam mitigar o risco (Jolly *et al.*, 2015). O ciclo de gestão do risco conta com fases proativas e fases reativas (Figura 1.1). As fases proativas ocorrem antes do impacto e englobam a fase de prevenção e/ou mitigação e a fase de preparação, nomeadamente através do planeamento de emergência e dos exercícios. Por outro lado, as fases reativas, nomeadamente as fases de resposta e recuperação, ocorrem durante e após o impacto, e resultam das ações levadas a cabo no decorrer da crise e das ações de restabelecimento das comunidades, assim como introdução de correções na preparação para eventos futuros (Alexander, 2002).

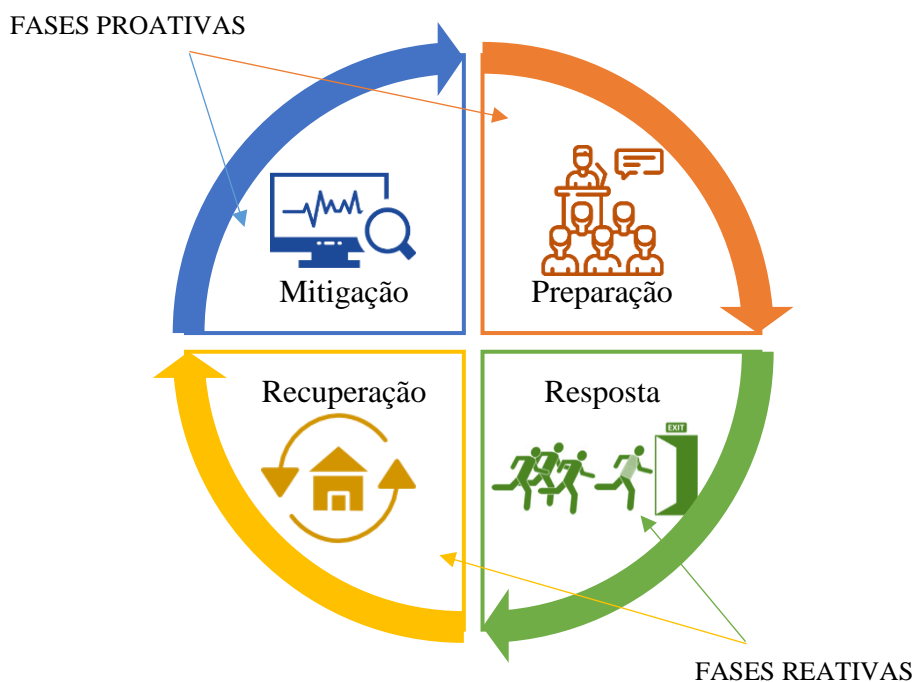


Figura 1.1. Ciclo de gestão de crises.

A redução do risco vulcânico e a gestão de crises envolvem situações de incerteza e de complexidade por parte das entidades envolvidas. Perante uma erupção vulcânica existem variáveis que complicam os planos de gestão de crise, como os diferentes perigos, as diferentes escalas temporais, intensidades e os diferentes setores afetados (Jolly e Cruz, 2015).

Esta dissertação versa essencialmente sobre as fases proativas, contribuindo para o desenvolvimento de planos de emergência e evacuação em cenários de erupção vulcânica do estilo havaiana/estromboliana. Contudo, serão descritas as quatro fases do ciclo de gestão de crises

1.2.1. 1.ª Fase: Mitigação

A fase da mitigação refere um conjunto de ações para redução de futuros impactos e envolve medidas estruturais, como as intervenções ao nível de obras de construção, e medidas não estruturais, tais como o ordenamento do território, o desenvolvimento de legislação adequada à redução do risco, a sensibilização da população para os possíveis desastres e a monitorização de perigos (Alexander, 2002; UNGA, 2016).

Nesta primeira fase, para além das construções resistentes aos perigos, da informação à população e das políticas para mitigação dos impactos, desenvolvem-se ações para a avaliação do risco.

1.2.1.1. Avaliação do Risco

O estudo do risco parte da análise de conceitos que, relacionados, fundamentam o modelo conceptual do risco, nomeadamente, a perigosidade, a vulnerabilidade, a exposição, o valor e a capacidade de resposta. A equação 1.1 apresenta o modelo conceitual de risco adaptado de La Cruz-Reyna (1996) e de Costantini e Thierry (2012).

$$Risco = \frac{Perigosidade * (Vulnerabilidade * Exposição) * Valor}{Capacidade de Resposta} \quad (\text{Eq. 1.1})$$

A perigosidade consiste na probabilidade de um fenómeno perigoso ocorrer num determinado local e num determinado período de tempo. O valor corresponde à quantificação de danos potenciais e a vulnerabilidade consiste nas características dos elementos que os diferenciam e permitem reagir aos perigos (por exemplo a idade), ou seja, que fazem modificar a suscetibilidade ao impacto do perigo. Adicionalmente, deve ser analisada a exposição, que corresponde aos elementos vulneráveis localizados em áreas de maior suscetibilidade (por exemplo pessoas, edifícios, infraestruturas) e a capacidade de resposta, que é a combinação dos meios e recursos disponíveis por um indivíduo, comunidade ou sociedade, que atenua o risco ou o efeito do desastre. Esta capacidade envolve meios físicos, institucionais, sociais e/ou económicos, e ainda, atributos pessoais e coletivos, como a liderança (Varnes e IAEG-CLOMS, 1984; La Cruz-Reyna, 1996; UNISDR, 2009; Costantini e Thierry, 2012; UNGA, 2016; UNDRR, 2020).

A mitigação do risco vulcânico passa pela análise clara de cada elemento da equação. Face à perigosidade, quando se estuda o risco vulcânico, deve-se identificar e compreender os perigos vulcânicos, nomeadamente a probabilidade de ocorrer um determinado perigo associado à erupção, como as escoadas lávicas e/ou a queda de cinzas, e a área provável de ser afetada (UNGA, 2016). O estudo da história de um sistema vulcânico é essencial para a gestão de uma crise vulcânica, uma vez que a probabilidade de ocorrer uma erupção vulcânica com características semelhantes a erupções vulcânicas passadas é elevada (Nakada, 2002).

O risco vulcânico implica ainda o estudo da capacidade de resposta, que é um elemento atenuante na equação. A capacidade de resposta perante o risco vulcânico, corresponde à preparação da população, das organizações e dos sistemas, para com os recursos disponíveis, mitigarem o impacto dos perigos vulcânicos. Nomeadamente, a sensibilização da população para os perigos decorrentes de erupções vulcânicas e os meios e recursos disponíveis para auxiliar todo o processo de crise vulcânica (UNGA, 2016).

Do ponto de vista operacional em termos de proteção civil, o risco é analisado a nível nacional pela Autoridade Nacional de Emergência de Proteção Civil (ANEPC). A nível regional é analisado pelo Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores (SRPCBA) e ao nível municipal pelo serviço municipal de proteção civil (SMPC). Sendo que a análise do risco a nível nacional e regional e/ou municipal difere em termos de perigos analisados, por exemplo o perigo vulcânico é analisado exclusivamente para o arquipélago dos Açores, pelo que não se encontra evidenciado na tipologia de perigos a serem analisados a nível nacional.

No Plano Regional de Emergência de Proteção Civil dos Açores (PREPCA) a avaliação do risco considera a relação entre a probabilidade de ocorrência e a gravidade, sendo que a probabilidade tem por base o histórico de ocorrência. Ou seja, no PREPCA é apresentado uma componente quantitativa para definição das diferentes classes consideradas na matriz de risco. No Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPDL) o risco é apresentado exclusivamente na vertente qualitativa, tendo por base a mesma matriz de risco que o PREPCA (PREPCA, 2019).

A matriz de risco apresentada no PMEPCPDL relaciona o grau de gravidade e o grau de probabilidade associados ao perigo. A probabilidade varia entre baixa (poderá ocorrer em circunstâncias excepcionais), média-baixa (não é provável que ocorra), média (irá provavelmente ocorrer), média-alta (expectável que ocorra), elevada (poderá ocorrer a qualquer momento) e confirmada (ocorrência verificada). A gravidade varia entre residual (sem danos significativos/impactos), reduzida (baixo número de feridos e sem vítimas mortais), moderada (sem vítimas mortais e alguns danos), acentuada (elevado número de feridos, vítimas mortais e danos que exigem recursos externos) e crítica (elevado número de feridos e de vítimas mortais, necessidade de apoio reforçada) (PMEPCPDL, 2014).

Na tabela 1.3 observa-se a relação entre a probabilidade e a gravidade, que se traduz na matriz do risco.

Tabela 1.3. Matriz do risco (PMEPCPDL, 2014).

Probabilidade	Gravidade				
	Residual	Reduzida	Moderada	Acentuada	Crítica
Confirmada	Baixo	Moderado	Elevado	Extremo	Extremo
Elevada	Baixo	Moderado	Elevado	Extremo	Extremo
Média – Alta	Baixo	Moderado	Moderado	Elevado	Elevado
Média	Baixo	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado
Média – Baixa	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Baixa	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

1.2.1.2. Técnicas de Monitorização

Ao nível da vulcanologia existem várias técnicas (geofísicas, geodésicas e geoquímicas) de monitorização que, no seu conjunto e de forma integrada, podem contribuir para reconhecer períodos de reativação de um sistema vulcânico.

No geral, devem ser estabelecidos valores de normalidade da atividade vulcânica em todas as técnicas de monitorização, para permitir a identificação de períodos anómalos.

A monitorização pode ser realizada de forma permanente (instalação de equipamentos permanentes) ou discreta (campanhas de medição periódicas), e ainda pode ser realizada *in situ* (no local) ou por satélite (Baubron *et al.*, 1991; Fischer e Chiodini, 2015).

a. Técnicas de Monitorização Geofísicas

Uma das ferramentas principais na monitorização vulcânica é a sismologia, que permite determinar o estado de um vulcão através da perceção da movimentação do magma desde a profundidade até à superfície. A base de dados de sismos permite conhecer a tipologia dos sismos e identificar possíveis precursores de atividade vulcânica (Bagni *et al.*, 2012; McNutt *et al.*, 2015).

Os sismos podem ser classificados em quatro categorias: 1) Sismos Vulcano-tectónicos ou de alta-frequência, que correspondem à rutura de rocha, 2) Sismos de baixa frequência ou de longo período, produzidos pelo movimento de fluidos, 3) Tremor vulcânico, que corresponde a um sinal contínuo harmonioso associado à atividade eruptiva de um vulcão, e 4) Sismos associados a explosões, movimentos de vertente e/ou escoadas piroclásticas, que são caracterizados pela sua forma alongada e pelo sinal contínuo de segundos a minutos (*e.g.*, Bagni *et al.*, 2012).

O registo sísmico é efetuado por sismógrafos, que detetam o sinal da onda sísmica. Um sismo é analisado por especialistas e os princípios básicos para análise de um sismo

incluem a detecção de sismos e a caracterização da sua tipologia, a localização do sismo, a magnitude ou energia libertada pelo evento e a sua frequência (Bagni *et al.*, 2012; McNutt *et al.*, 2015).

Outra ferramenta cada vez mais usual é o estudo de infrassons, que resultam da perturbação da atmosfera e propagam-se como uma onda mecânica através de um meio (Campus, 2004). Os infrassons têm frequências entre 0,003 Hz a aproximadamente 20 Hz e têm origem natural ou antropogénica, como por exemplo as auroras boreais, avalanches, sismos, explosões nucleares, tempestades e atividade vulcânica, entre outras fontes. Relativamente à atividade vulcânica, aquando da emissão de gás e cinza vulcânica são gerados infrassons que permitem compreender os mecanismos eruptivos e o estado de atividade de um sistema vulcânico (*e.g.*, Campus, 2004; Matos, 2018).

Além das ferramentas de monitorização descritas, podem ser utilizadas técnicas de monitorização da gravidade e de monitorização magnética para detetar o comportamento de um vulcão (Freymueller *et al.*, 2015).

A monitorização da gravidade identifica variações espaciais da gravidade que ocorrem devido a heterogeneidades na densidade superficial. A elaboração de um mapa da variação espacial da gravidade torna possível identificar diques, filões, condutas e/ou reservatórios magmáticos. A microgravimetria permite medir valores relativos da gravidade à superfície do solo e estabelecer correlações com a distribuição das densidades subterrâneas. Na gravimetria é utilizado o gravímetro, instrumento que mede o campo gravitacional da Terra num local específico, com base no princípio da medição da aceleração constante da gravidade (Freymueller *et al.*, 2015).

A magnetotelúrica é um método geofísico eletromagnético que, mediante a medição do campo geomagnético e geoelectrico da superfície terrestre, permite inferir a condutividade eléctrica do subsolo. A monitorização magnética é um método pouco desenvolvido e de difícil interpretação, que tem por base a análise do magnetismo das rochas para compreensão de fenómenos e processos geodinâmicos relacionados, por exemplo, com a mecânica das falhas, a propagação dos sismos e a composição da litosfera (Freymueller *et al.*, 2015).

b. Técnicas de Monitorização Geodésicas

As técnicas de monitorização geodésicas englobam a análise da deformação de um sistema vulcânico. Esta monitorização utiliza dados essencialmente de estação total, GNSS ou de satélite para medir e estudar a deformação da crosta terrestre.

Antes de uma erupção vulcânica há migração do magma, o que conseqüentemente se traduz em alterações na pressão dentro do reservatório magmático e/ou na crosta terrestre, o que torna as técnicas de monitorização geodésicas relevantes na compreensão da atividade vulcânica (Freymueller *et al.*, 2015).

A estação total é um instrumento utilizado na leitura *in situ* de distâncias e de ângulos, permitindo a análise da deformação em detalhe em zonas localizadas.

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) utilizam um modelo de geoide híbrido e uma rede de pontos referenciados para medir a altura do elipsoide e converter em alturas ortométricas, ou seja, elevações. Esta técnica combina conjuntos de satélites com estações terrestres (Freymueller *et al.*, 2015).

A monitorização geodésica utiliza ainda satélites para analisar as alterações da superfície terrestre, como por exemplo o método InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*). Esta técnica utiliza duas ou mais imagens da mesma área para criar interferogramas representativos da deformação do solo durante o intervalo de tempo entre a aquisição das duas imagens. A dimensão é definida como uma linha reta entre um sensor e a superfície do solo (Freymueller *et al.*, 2015; D'Araújo, 2022).

c. Técnicas de Monitorização Geoquímica

A monitorização geoquímica engloba técnicas de análise química de gases, nascentes, lagos, fumarolas, cinzas e rochas vulcânicas.

A monitorização do gás e a monitorização térmica são ambas formas de monitorização que permitem detetar variações antes, durante e após a erupção. Esta monitorização permite estabelecer valores normais e anómalos que conseqüentemente auxilia na predição e compreensão dos processos magmáticos.

A monitorização de gases em fumarolas e nascentes hidrotermais e de águas gasocarbónicas pode ser realizada *in-situ* (análise de parâmetros físicos e químicos no local) ou através da recolha de amostras e posterior análise laboratorial. Paralelamente, utilizam-se equipamentos específicos para análise da desgaseificação difusa, ou seja,

aquela que ocorre ao nível dos solos e dos lagos (Baubron *et al.*, 1991; Chiodini *et al.*, 1998).

A análise térmica utiliza termómetros e sensores infravermelhos manuais ou aerotransportados, e permite identificar áreas de anomalias térmicas associadas a zonas de desgaseificação e/ou extrusão de domos lávicos (Freymueller *et al.*, 2015).

A deteção remota quer com recurso a satélite, quer com outros equipamentos (FTIR, mobile-DOAS, câmaras UV, câmara de infravermelhos) também permite detetar anomalias térmicas, caraterizar aerossóis e outros gases vulcânicos (SO₂, H₂O, HCl, HF, entre outros) essenciais para se compreender a dinâmica dos processos eruptivos. Os dados provenientes dos satélites também permitem determinar a taxa de efusão de escoadas lávicas e caraterizar as plumas vulcânicas (Bagni *et al.*, 2012).

Adicionalmente, têm sido realizados estudos que demonstram a importância da monitorização petrológica na compreensão dos processos que ocorrem num sistema vulcânico. A composição química e a textura das rochas de uma erupção contêm informação sobre o processo eruptivo, antes e após a erupção. A análise dos produtos eruptivos quer de erupções passadas, quer durante o evento eruptivo, permite estabelecer parâmetros correlativos com a atividade futura, nomeadamente o estilo eruptivo e/ou profundidade do reservatório magmático (Hammer *et al.*, 1999; Corsaro *et al.*, 2005; Blundy e Cashman, 2008; Re *et al.*, 2021).

1.2.2. 2.ª Fase: Preparação

A fase de preparação corresponde às ações desenvolvidas na iminência do desastre, como as medidas implementadas pela Proteção Civil para minimizar o impacto, nomeadamente, inventário e manutenção de equipamentos e aplicação da legislação para redução do risco (Alexander, 2002). É nesta fase que se estabelecem os sistemas de alerta e alarme e se coordena a evacuação e informação ao público, bem como a formação e os exercícios de Proteção Civil (UNGA, 2016).

1.2.2.1. Sistema de Alerta e Alarme

Os sistemas de alerta e alarme constituem um conjunto de mecanismos de notificação das entidades intervenientes. Um sistema de monitorização deve estar associado a uma escala de alerta de forma a operacionalizar uma ação aos dados que possam estar a ser adquiridos (Gregg *et al.*, 2015). No caso de erupções vulcânicas, a definição de estados de alerta é

essencial na fase de preparação. Os cientistas devem colaborar com as autoridades de forma a criar níveis de alerta que transmitam à população o potencial impacto da atividade vulcânica (Jolly e Cruz, 2015).

No Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPD) estão descritos o estado de alerta normal, que corresponde à monitorização de rotina, e o estado de alerta especial, que compreende o reforço na monitorização e o incremento na prontidão das entidades intervenientes. O estado de alerta normal corresponde ao nível verde e o estado de alerta especial subdivide-se em quatro subníveis, que dependem da gravidade e do grau de prontidão exigido (Tabela 1.4).

Tabela 1.4. Níveis do estado de alerta previstos no Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (2014).

Estado de Alerta	Risco	Grau de Prontidão	Grau de Mobilização (%)	Descrição
Estado de Alerta Normal				
Verde	Baixo/Inexistente	-	-	Procedimentos de rotina
Estados de Alerta Especial				
Azul	Moderado	12 horas	10	Emergências diárias, gestão de recursos próprios
Amarelo	Moderado (gravidade moderada e probabilidade média-alta)	6 horas	25	Iminência ou ocorrência de uma emergência de dimensão limitada e com potencial de agravamento
Laranja	Elevado	2 horas	50	Iminência ou ocorrência de uma emergência com ativação de planos de contingência
Vermelho	Extremo	Imediato	100	Ocorrência de uma emergência que obriga a ativação do plano de contingência e do plano municipal de emergência

Os sistemas de alerta e alarme devem ser divulgados à população com a maior brevidade possível e devem prever mecanismos de informação e formação, com vista à sensibilização em matéria de autoproteção e de colaboração com as autoridades.

No PMEPCPD (2014) estão previstos os seguintes sistemas de alerta: sirenes, viaturas com megafones, igrejas com megafone, estações de rádio, estações de televisão, internet, folhetos informativos e sessões de esclarecimento. Os sistemas a adotar dependem do tipo, dimensão e localização geográfica da área populacional a alertar e na proximidade geográfica dos meios e recursos disponíveis. Adicionalmente, as

comunidades devem ser informadas das zonas potencialmente afetadas, dos pontos de encontro, dos itinerários de evacuação e dos locais de abrigo.

Na Região Autónoma dos Açores foi definida por Gaspar *et al.* (2012a) uma escala de caracterização do estado da atividade sismovulcânica. Esta escala conta com sete estados de alerta que variam de V0 a V6, e representam, respetivamente, a atividade normal (estado de repouso) e a atividade vulcânica catastrófica (erupção VEI 4 ou superior) (Anexo I).

Adicionalmente, Gaspar *et al.* (2012b) definiram ainda uma escala de alerta para a caracterização da qualidade do ar interior (CO₂) que varia entre G0, que corresponde a uma percentagem de CO₂ semelhante ao existente na atmosfera (< 0,1 %vol.) e G6, que corresponde a uma percentagem de CO₂ igual ou superior a 9,5 %vol. (Anexo II).

1.2.2.2. Exercícios de Proteção Civil e Planeamento de Emergência

Os planos de emergência de proteção civil são “documentos formais nos quais as autoridades de Proteção Civil, nos seus diversos níveis, definem as orientações relativamente ao modo de atuação dos vários organismos, serviços e estruturas a empenhar em operações de proteção civil” (Decreto-Lei n.º 27/2006, de 3 de julho).

Quanto à sua finalidade os planos podem ser gerais – contém a generalidade das situações de emergência no âmbito territorial, ou especiais – cujo objetivo é a aplicação a situações de iminência ou ocorrência de acidentes graves ou catástrofes específicas (Decreto-Lei n.º 27/2006, de 3 de julho).

Os planos especiais de emergência de proteção civil são planos que exigem uma metodologia técnica e científica adequada à especificidade do perigo em análise, como por exemplo a atividade vulcânica.

Os planos de emergência de proteção civil são elaborados para diferentes âmbitos territoriais, nomeadamente, nacional, regional, distrital ou municipal e devem ser revistos num prazo máximo de cinco anos após a entrada em vigor. Nas regiões autónomas, os planos de emergência de proteção civil de âmbito municipal são elaborados pelas câmaras municipais e aprovados pelo membro do Governo Regional responsável pelo setor da proteção civil (Decreto-Lei n.º 27/2006, de 3 de julho).

No que concerne à estrutura de um plano de emergência de proteção civil, este divide-se em três partes – I) Enquadramento, II) Execução e III) Inventários, Modelos e Listagens. O enquadramento apresenta o documento, nomeadamente, o diretor e os

substitutos, a finalidade do plano, a tipificação dos riscos e os mecanismos para ativação ou desativação do plano (Resolução n.º 30/2015, de 7 de maio).

A segunda parte – a Execução, apresenta os procedimentos de resposta ao perigo, desde a organização e coordenação geral das operações de proteção civil, responsabilidades dos agentes e organismos de apoio, mecanismos de notificação e medidas de intervenção de cada organização (Resolução n.º 30/2015, de 7 de maio).

A terceira e última parte de um plano de emergência de proteção civil deve listar os recursos públicos e privados existentes, enunciar os contactos dos intervenientes na operação de proteção civil e detalhar os modelos de situação e de comunicados a operacionalizar. Adicionalmente, deve ser apresentado em anexo a cartografia de suporte à emergência e as medidas de prevenção e mitigação dos perigos identificados (Resolução n.º 30/2015, de 7 de maio).

O PMEPCPDL é uma ferramenta de prevenção e de gestão operacional. Neste plano estão identificados os riscos possíveis de afetar o concelho, os meios disponíveis em caso de emergência e as responsabilidades de cada equipa de intervenção (PMEPCPDL, 2014). Atualmente o PMEPCPDL encontra-se em revisão, pelo que se mantém em concordância com a legislação anterior a 2015.

O PMEPCPDL está dividido em dois volumes: o volume 1 corresponde à Operacionalização e o volume 2 descreve a Organização Geral e os Mecanismos. A operacionalização subdivide-se ainda em três partes, a parte I - enquadramento geral do plano, a parte II - organização da resposta e a parte III - área de intervenção. O volume 2 subdivide-se Organização Geral da Proteção Civil em Portugal e em Mecanismo da Estrutura de Proteção Civil.

No arquipélago dos Açores, o plano de emergência de proteção civil regional é elaborado pelo SRPCBA e aprovado pelo conselho do Governo Regional, mediante um parecer prévio da Comissão Regional de Proteção Civil (CRPC) e da Comissão Nacional de Proteção Civil (CNPC) e os planos de emergência de proteção civil municipais são elaborados pela câmara municipal e aprovados pelo órgão do Governo Regional responsável pelo setor da proteção civil, mediante um parecer prévio da Comissão Municipal de Proteção Civil (CMPC) e do SRPCBA (Resolução n.º 30/2015, de 7 de maio).

Os planos de emergência de proteção civil devem ser regularmente treinados mediante a elaboração de exercícios e simulacros. Estes permitem testar a preparação das entidades envolvidas em matéria de proteção civil e introduzir melhorias nas ações.

Quanto à natureza do exercício, existem três tipos, de decisão (TTX) – que são exercícios transmitidos de forma escrita ou verbal em sala, de postos de comando (CPX) – que são exercícios que se realizam em contexto de sala de operações, e à escala real (LIVEX) – que envolve missões no terreno (SRPCBA, 2020).

O SRPCBA realiza, periodicamente, um simulacro ao nível regional – exercício Touro, simulando a resposta dos diferentes agentes de proteção civil a situações variadas, meteorologia adversa, atividade sísmica e movimentos de vertentes (*sítio*: www.prociv.azores.gov.pt/noticias/).

Ao nível municipal, o Serviço Municipal de Proteção Civil de Ponta Delgada (SMPC-PDL) procura aperfeiçoar os procedimentos de atuação em cenários de emergência através da organização de simulacros. Em 2019 foi elaborado um exercício com simulação de sismo no terreno do Azores Park. Neste exercício foram analisados quatro cenários: despiste de uma viatura, abatimento de pisos de uma casa, resgate de uma pessoa presa numa cave e de uma pessoa presa numa fossa. Este simulacro contou com a colaboração da Proteção Civil Municipal e dos Bombeiros Voluntários de Ponta Delgada, e ainda das corporações de Carcavelos e São Domingos de Rana e Mistos de Amora (*sítio*: https://www.cm-pontadelgada.pt/pages/541?news_id=1616).

1.2.2.3. Evacuação

A evacuação é um dos princípios para reduzir o perigo para a vida humana. Pode ser desenvolvida em três momentos de uma crise, antes do evento, como forma preventiva, durante o episódio, como autopreservação, ou após o evento, como forma de resgate (Alexander, 2002, UNGA, 2016). Por isso, a evacuação é também um dos mecanismos usados na fase de resposta. Contudo, nesta dissertação, e tal como referido em vários estudos (*eg.* Tomsen *et al.*, 2014; Wild *et al.*, 2021), será associada essencialmente à fase de preparação.

O planeamento de uma evacuação deve incluir as rotas e pontos de encontro, para que a evacuação prossiga de forma organizada entre o ponto de partida e o centro designado para a receção de deslocados (Alexander, 2002). Pode, ainda, incluir planos de regresso dos evacuados (UNGA, 2016).

O processo de evacuação envolve seis fases (Tabela 1.5), 1) a decisão, que consiste em determinar a necessidade de evacuar por parte das autoridades, 2) a notificação da população para proceder à evacuação e quais os pontos de encontro para onde se deslocar,

3) a preparação da população para a evacuação, que constitui o período após a notificação em que os indivíduos juntam os mantimentos necessários, quando possível, 4) a resposta, ou seja, tempo decorrido efetivamente em percurso entre a localização do indivíduo e o ponto de encontro para o qual se deve dirigir, 5) a verificação, que corresponde ao período temporal para averiguar o sucesso da evacuação e 6) o retorno após o perigo (Tomsen *et al.*, 2014).

Tabela 1.5. Fases da Evacuação (adaptado de Tomsen *et al.*, 2014).

Fases da Evacuação	
Fase	Definição
1 - Decisão	Tempo entre a deteção de um possível evento e a decisão das autoridades para evacuar;
2 - Notificação	Tempo requerido para notificar a população;
3 - Preparação	Tempo de preparação entre a notificação e a partida até ao ponto de receção de desalojados;
4 - Resposta	Tempo entre a partida e a chegada ao ponto de receção de desalojados;
5 - Verificação	Tempo necessário para averiguar o sucesso da evacuação;
6 - Retorno	Regresso após o perigo.

No que concerne o tempo necessário para evacuar, devem ser incorporados ainda os percalços que possam ocorrer durante o processo de evacuação, nomeadamente o congestionamento de estradas, a quantidade de veículos necessários e a resistência da população à evacuação. O processo deve ser monitorizado e verificado pelas autoridades (Alexander, 2002).

1.2.3. 3.^a Fase: Resposta

A resposta refere a ação desenvolvida durante o impacto e no curto espaço de tempo após o desastre, e é nesta fase que se põem em prática as medidas previstas no planeamento de emergência. O principal objetivo é a salvaguarda da população, através do resgate e das ações de reabilitação (Alexander, 2002; UNGA, 2016).

O primeiro aspeto da fase da resposta é a deteção da crise, em seguida coloca-se em prática os procedimentos de emergência e comunicação estabelecidos na fase proativa (Jolly *et al.*, 2015). Durante a fase da resposta é colocado em ação os serviços de emergência, ou seja, as entidades especializadas e especificadas nos planos de emergência

de proteção civil devem assumir as suas responsabilidades, nomeadamente no auxílio e salvaguarda da população (UNGA, 2016).

1.2.4. 4.^a Fase: Recuperação

A última fase do ciclo de desastre corresponde à recuperação. Esta envolve a reconstrução da estrutura social, reparação dos danos e recuperação dos serviços. Pode ser uma fase célere ou extremamente prolongada, dependendo da magnitude, da frequência e da localização do perigo, bem como da preparação da população e das autoridades (Alexander, 2002; Jolly *et al.*, 2015; UNGA, 2016).

Nesta fase deve haver um reconhecimento do fim da crise, uma avaliação dos procedimentos adotados nas fases antecedentes e introdução de correções que visam melhorar todo o processo da gestão de crises (Jolly *et al.*, 2015). Para além de se procurar reestabelecer os níveis económicos e sociais, devem ser desenvolvidos princípios de sustentabilidade que apoiem a redução do impacto de um perigo no futuro (UNGA, 2016).

1.2.5. Intervenientes numa Crise

Importa referir que a difusão da informação durante uma crise ocorre em todas as fases e deve ser realizada por mensagens claras e específicas. Neste processo estão presentes quatro intervenientes, os cientistas, as autoridades, a comunicação social e o público (Jolly *et al.*, 2015).

Os cientistas intervenientes num perigo vulcânico são os vulcanólogos, sendo que a estes cabe estudar e conhecer um vulcão e os seus produtos, elaborar possíveis cenários, aplicar modelos, monitorizar e acompanhar a crise (Alexander, 2002; Bonfils *et al.*, 2012; Jolly *et al.*, 2015).

As autoridades estão incumbidas, entre outras, da divulgação da informação, das ações de socorro e salvamento, da manutenção da ordem pública e de fornecer abrigo e bem-estar (Alexander, 2002; Jolly *et al.*, 2015).

A comunicação social refere-se a qualquer órgão de difusão da informação e o público é o recetor que, em colaboração com as restantes entidades, deve adotar medidas preventivas (Alexander, 2002; Jolly *et al.*, 2015).

Na tabela 1.6 estão evidenciadas as responsabilidades e/ou ações dos quatro intervenientes numa crise.

Tabela 1.6. Intervenientes numa crise vulcânica (adaptado de Bonfils *et al.*, 2012).

Intervenientes	Responsabilidades/Ações
Autoridades	<ul style="list-style-type: none"> • Promover a perceção do risco; • Organizar recursos para mitigar o impacto; • Informar e educar a população; • Desenvolver planos de emergência; • Definir as responsabilidades da proteção civil em cada nível de alerta; • Organizar a resposta a uma erupção; • Atribuir responsabilidades a cada entidade interveniente numa crise; • Promover exercícios de proteção civil; • Estabelecer medidas de proteção civil; • Estabelecer ligações com organizações nacionais e internacionais de proteção civil; • Estabelecer contacto diário com a comunicação social de forma clara e concisa;
Cientistas (vulcanólogos)	<ul style="list-style-type: none"> • Estudar e conhecer os vulcões e os seus comportamentos; • Monitorizar os sistemas vulcânicos; • Estabelecer níveis de alerta e informar as autoridades sempre que for alterado o nível; • Informar o público sobre a monitorização e o estudo do vulcão; • Promover um relacionamento interdisciplinar, através da partilha de informação com outros cientistas não vulcanólogos; • Informar as autoridades do estado de atividade do vulcão;
Público	<ul style="list-style-type: none"> • Receber a informação; • Adotar medidas de autoproteção; • Colaborar com as autoridades;
Comunicação Social	<ul style="list-style-type: none"> • Difundir a informação;

Além das responsabilidades gerais, os intervenientes estabelecem relações entre si. Na iminência de um perigo, os cientistas devem contactar as autoridades de forma clara e precisa, evitando mal-entendidos e rumores, e explicando a incerteza da inerência do perigo e dos cenários possíveis (Bonfils *et al.*, 2012).

As autoridades decidem as ações a adotar com base nas recomendações dos cientistas e no conhecimento sobre a vulnerabilidade da população local. Estas devem informar a população sobre as ações em desenvolvimento e, de forma clara, quem comunica entre si, quem são os responsáveis por cada operação durante o processo de gestão de crise, nomeadamente a coordenação dos grupos e a mobilização de recursos necessários para colocar em prática o plano (Alexander, 2002; Jolly *et al.*, 2015).

1.3. Alguns casos de estudo que conduziram à evacuação

A resposta ao risco vulcânico pode envolver a evacuação dos habitantes para locais seguros (Tobin e Whiteford, 2002). Nesta secção são apresentados três casos de erupções vulcânicas que conduziram à evacuação em massa, como resposta das autoridades ao perigo e em que os impactos nas ações da população e compreensão dos fenómenos foram distintos. A erupção do Monte de Pinatubo (Filipinas) em 1991 é relevante pelo sucesso no processo de evacuação. O caso do Vulcão Tungurahua (Equador) representa a evacuação e gestão da população residente num vulcão com várias crises eruptivas que decorrem ao longo de vários anos (1999 a 2021). A erupção do Vulcão La Soufrière (Guadalupe) em 1976-1977, que representa uma situação em que a evacuação, apesar dos eventos eruptivos não terem atingido magnitude significativa, teve implicações na relação entre cientistas e sociedade. Adicionalmente, são apresentados casos de evacuações realizadas no arquipélago dos Açores, nomeadamente em 1957/58 durante a erupção do Vulcão dos Capelinhos (ilha do Faial) e durante as crises sismovulcânicas de 1964 e de 2022 na ilha de São Jorge.

1.3.1. 1.º Caso de estudo: Monte Pinatubo (1991)

O Monte Pinatubo está localizado na ilha de Luzon, nas Filipinas (Figura 1.2). Estas ilhas estão localizadas no denominado *Ring of Fire* (= Anel de Fogo do Pacífico), nomeadamente numa zona de subducção de placas tectónicas a SE da Ásia, que conta com 744 vulcões ativos e potencialmente ativos (Whelley *et al.*, 2015).

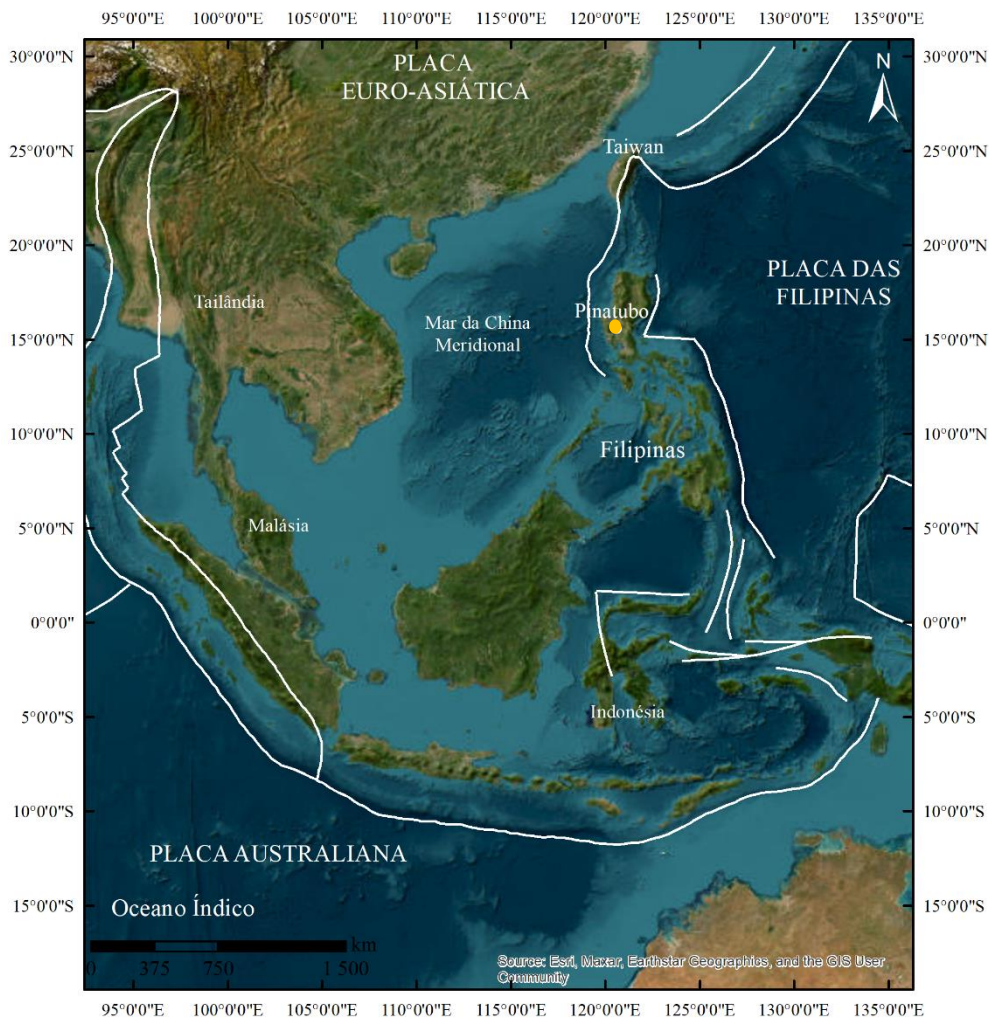


Figura 1.2. Localização geográfica do Monte Pinatubo. Base: *World Imagery ESRI*©, 2023, Projeção Mercator.

Em 1991, o Monte Pinatubo foi palco de uma erupção pliniana, e na área envolvente ao vulcão residiam quase 1 milhão de habitantes e estavam sediadas duas bases militares americanas (Newhall e Solidum, 2015).

No ano de 1991, o Monte Pinatubo precedido por incremento da sismicidade, desencadeou diferentes eventos eruptivos, destacam-se erupções freáticas, subpliniana e pliniana. A erupção subpliniana registou um índice de explosividade vulcânica (VEI) 3 e a erupção pliniana um VEI 6 (Figura 1.3), tendo esta gerado 5 km³ de material, incluindo escoadas piroclásticas, *lahars* e cinzas (Pyle, 2015; Newhall e Solidum, 2015).



Figura 1.3. Erupção Pliniana de 15 de junho de 1991 no Monte Pinatubo (Newhall e Punongbayan, 1996).

A população residente em áreas próximas do vulcão foi evacuada. Durante este procedimento foi fulcral o apoio internacional proveniente dos EUA, em consequência da localização das bases militares (Newhall e Solidum, 2015).

A erupção cessou em 1992 com a extrusão de um domo lávico. No entanto, os perigos pós erupção permaneceram, nomeadamente as explosões resultantes do contacto da água com os produtos de elevada temperatura da erupção e os *lahars* gerados do transporte de material pelas chuvas (Newhall e Punongbayan, 1996).

Após a erupção, a população não pôde regressar às suas comunidades, devido à elevada destruição provocada pelas escoadas piroclásticas e *lahars*. Desta forma, as autoridades surgiram com um papel fundamental no realojamento ou construção de alojamentos, permitindo a retoma da normalidade (Newhall e Punongbayan, 1996).

Na tabela 1.7 estão detalhadas as etapas do desenvolvimento da erupção, desde a atividade precursora até à extrusão do domo lávico de 1992.

Tabela 1.7. Desenvolvimento dos processos eruptivos associados à erupção de 1991 do Monte Pinatubo (adaptado de Newhall e Punongbayan, 1996; Newhall e Solidum, 2015). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.

Data	Evento	Impactos/Danos	Resposta
16 de julho de 1990	Sismo de magnitude 7,8	Movimento de vertente; Ligeiro incremento da emissão de vapor de água em áreas geotérmicas; ~ 2 mil vítimas mortais a N das Filipinas; ~ 4 mil feridos; ~ 800 desaparecidos; ~ 98 mil casas, 200 escolas, 56 estradas e 30 pontes ficaram total ou parcialmente destruídas.	Mobilização de unidades municipais e nacionais; Apoio militar e da força aérea na busca e salvamento; Evacuação dos residentes junto à zona costeira como medida preventiva à ocorrência de tsunamis; Pedido de ajuda internacional (recursos humanos, bens alimentar, assistência médica).
2 de abril de 1991	Explosões freáticas	-	Evacuação da população num raio de 10 km da base do vulcão (~ 5 000 habitantes); Instalação de sismómetros para monitorização de sismos.
13 de maio de 1991	Deteção de intrusão magmática; Atividade sísmica moderada.	-	Medição da emissão de SO ₂ das fumarolas junto à base do vulcão; Estado de Alerta: Nível 2
23 de maio de 1991	Contínuo incremento da emissão de SO ₂	-	Mapa de perigosidade elaborado pela equipa do instituto PHIVOLCS-VDAP
5 de junho de 1991	Contínuo incremento da atividade sísmica; Diminuição da emissão de SO ₂ .	-	Estado de Alerta: Nível 3
6 de junho de 1991	Deformação detetada com recurso a inclinómetros instalados no flanco do vulcão	-	-
7 a 12 de junho de 1991	Extrusão de um domo lávico; Emissão de cinzas; Sismicidade.	-	Estado de Alerta: Nível 4 (predição de erupção em 24h)
9 de junho de 1991	Erupções explosivas	-	Estado de Alerta: Nível 5 (erupção em progresso); Evacuação da população num raio entre 10 a 20 km da base do vulcão (~ 25 000 evacuados).
12 a 14 de junho de 1991	Erupção subpliniana com uma coluna eruptiva de 19 km; Escoada piroclástica.	-	Evacuação da população num raio entre 20 a 30 km da base do vulcão (~ 58 000 evacuados)

Tabela 1.7. (Continuação).

15 de junho de 1991	Erupção pliniana com uma coluna eruptiva de 40 km; Formação de uma caldeira com 2,5 km de diâmetro	847 vítimas mortais; ~ 75 000 casas total ou parcialmente destruídas	Evacuação da população num raio entre 30 a 40 km da base do vulcão (~ 80 000 evacuados)
18 de junho de 1991	-	-	Área de perigo num raio até 20 km da base do vulcão (estado de alerta mantém-se no nível 5)
4 de setembro de 1991	-	-	Estado de Alerta: Nível 3 Área de perigo num raio de 10 km até à base do vulcão
4 de dezembro de 1991	-	-	Estado de Alerta: Nível 2
Julho a outubro de 1992	Extrusão de um domo lávico que indicou o fim da erupção	-	-

Os eventos ocorridos levaram à evacuação de aproximadamente 80 000 pessoas e à morte de 847. Para além disso, a dispersão de cinzas e aerossóis na troposfera, afetou o clima global por dois a três anos (Newhall e Punongbayan, 1995; Newhall e Solidum, 2015; Pyle, 2015).

No geral, apesar dos 847 mortos a lamentar, a resposta ao evento de 1991 foi um sucesso, pela predição de uma erupção e a evacuação atempada. O número de vítimas mortais associadas à erupção pliniana seria provavelmente muito superior na ausência da evacuação. Num conjunto de lições aprendidas, salienta-se a importância de se conhecer a história do vulcão, a monitorização da atividade sísmica, da deformação e da desgaseificação e os sistemas de alerta partilhados entre as autoridades e a população. Dos aspetos menos positivos, retêm-se a importância da análise da queda de cinzas como perigo potencialmente fatal e a possibilidade de remobilização de material pelas chuvas (Newhall e Solidum, 2015).

1.3.2. 2.º Caso de estudo: Vulcão Tungurahua (1999-2021)

O vulcão Tungurahua está localizado no Equador, na região da cordilheira dos Andes a W da América do Sul, a 5 032 m acima do nível médio da água do mar (Figura 1.4). A altitude do vulcão Tungurahua leva à formação de neve e, posteriormente, à possível formação de *lahars*. O Tungurahua é um vulcão de forma cónica aproximadamente simétrica com declives de 30-35°. Este vulcão é caracterizado por uma atividade regular com períodos de atividade vulcânica mais explosiva e nos últimos 1 300 anos tem uma

frequência eruptiva de 1 erupção a cada 100 anos (Hall *et al.*, 1999; Le Pennec *et al.*, 2005, Armijos *et al.*, 2017).

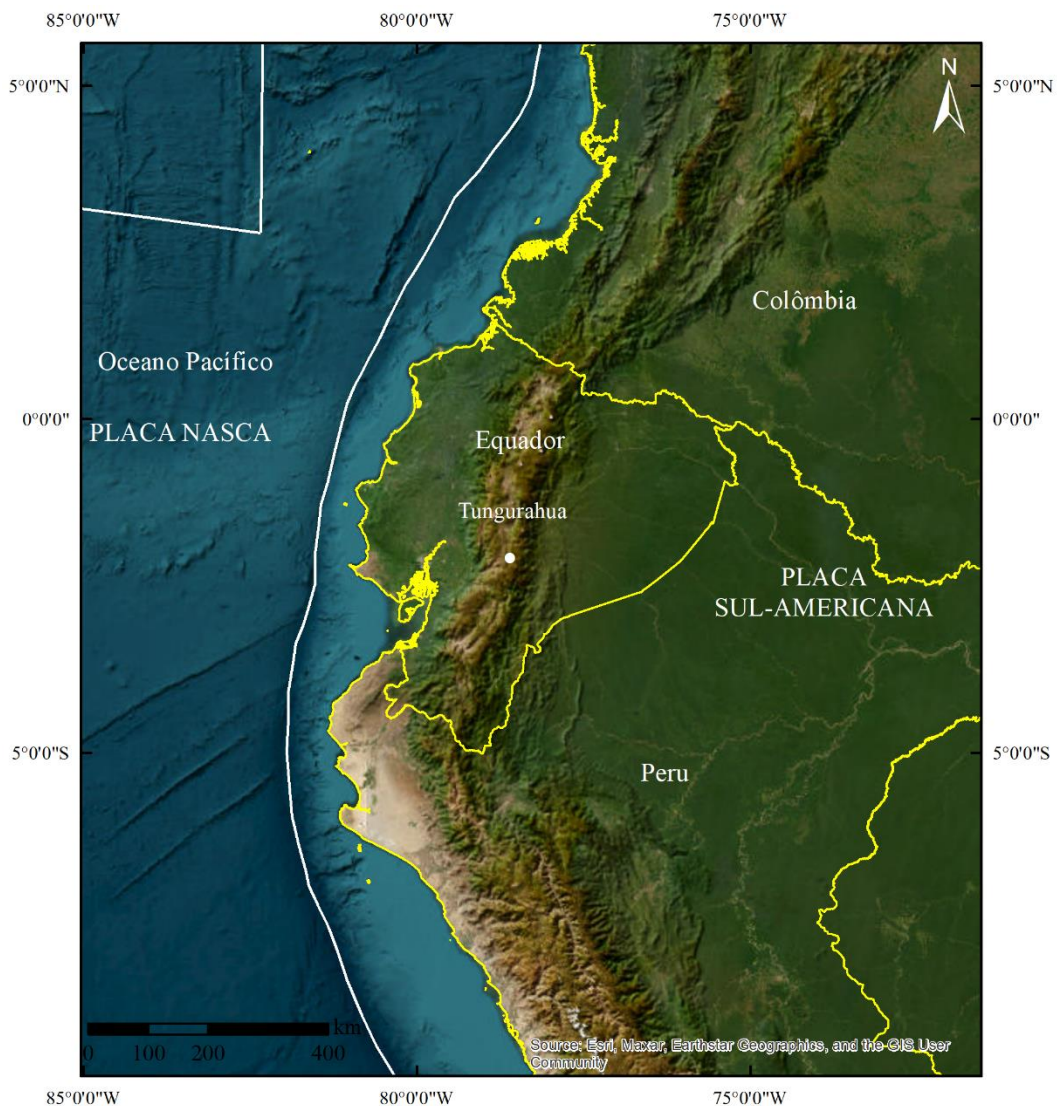


Figura 1.4. Localização geográfica do vulcão Tungurahua. Base: *World Imagery ESRI*©, 2023, Projeção Mercator.

Na história eruptiva recente do vulcão Tungurahua destacam-se vários períodos de erupções mais explosivas (1640, 1773, 1886, 1916-1918). Por exemplo, no período de 1916-1918 registaram-se erupções com formação de escoadas piroclásticas que fluíram pelos flancos N e NW e queda de cinzas, bem como períodos de atividade menos explosiva (Hall *et al.*, 1999; Le Pennec *et al.*, 2005).

Após 1999 ocorreram períodos intermitentes de erupções do estilo estromboliana, vulcaniana e subpliniana, com emissão de gases, cinzas, escoadas lávicas, escoadas

piroclásticas e formação de *lahars*, que se prolongaram durante vários anos, tendo o último episódio ocorrido em 2021.

Durante a reativação da atividade vulcânica em 1999, as autoridades decidiram evacuar a população como medida preventiva, baseada na observação dos cientistas da iminência de uma fase mais explosiva da erupção. A localização da cidade de Banões (a 8 km do vulcão) e a incerteza quanto às características explosivas da atividade vulcânica levaram ao aumento da preocupação. Esta cidade tinha aproximadamente 20 000 habitantes e uma única estrada a NW com ligação à cidade de Ambato, localizada a aproximadamente 38 km. Contudo, uma erupção certamente causaria a inutilização da estrada pela formação de escoadas piroclásticas e/ou *lahars*.

A evacuação ocorreu num dos períodos mais complicados da história da economia equatoriana. Após dois meses e meio de espera, as comunidades organizaram um retorno à vila de Banões. No dia 5 de janeiro de 2000, centenas de pessoas avançaram contra as forças militares para zonas consideradas de perigo (Lane *et al.*, 2003).

Em 2006 como consequência de uma nova fase mais explosiva da crise eruptiva e do regresso não autorizado a Baños, cinco pessoas faleceram (Toulkeridis, 2007).

A história eruptiva do vulcão Tungurahua demonstra a necessidade de as vilas próximas do vulcão aprenderem a lidar com a ameaça de erupção, que exige a evacuação quando há incremento da atividade vulcânica, e simultaneamente manter a vida quotidiana (Tabela 1.8).

Tabela 1.8. Desenvolvimento dos processos eruptivos do Vulcão Tungurahua (* Alertas: Branco - condições normais; Amarelo - ameaça de perigo; Laranja - iminência de perigo; Vermelho - evento em curso (sítio: <https://manualcoe.gestionderiesgos.gob.ec/portfolio-item/estados-de-alerta-por-eventos-peligrosos/>) (adaptado de: Lane *et al.* 2003; Armijos *et al.*, 2017). Nota: “-“ significa ausência de fenômenos/ações e/ou falta de informação.

Data	Evento	Impactos/Danos	Resposta
Abril de 1999	Incremento da atividade sísmica (sismos tectônicos e de longo período)	-	-
Julho de 1999	Sismos de longo período Pequenas colunas de vapor na cratera e cheiro a enxofre	-	-
15 de setembro de 1999	Incremento da atividade sísmica; Libertação de cinzas e de gases vulcânicos	-	*Alerta Amarelo; Relatórios diários da atividade do vulcão
5 a 15 de outubro de 1999	Pequenas explosões freáticas; Incremento dos níveis de SO ₂ ; Incandescência.	-	-
16 de outubro de 1999	Incremento da atividade vulcânica com emissão de cinzas	-	* Alerta Laranja; Evacuação de ~ 25 000 pessoas em zonas adjacentes ao vulcão com duração de três meses
5 de janeiro de 2000	Diminuição da atividade vulcânica	-	População avança contra a força militar para a zona de perigo, com vista a regressar às suas habitações
Março de 2000	-	-	Instalação do sistema de monitorização de lahars (AFM)
5 de setembro de 2000	-	-	* Alerta Amarelo em Baños
Outubro e novembro de 2000	Diminuição da atividade vulcânica	-	-
31 de dezembro de 2000	Diminuição de todos os parâmetros de atividade registada	-	* Alerta Amarelo para toda a zona do vulcão
Mai de 2001	Incremento da atividade sísmica Injeção de novo magma	-	-
Agosto de 2001	Erupções explosivas com queda de cinzas com espessura de 3 a 10 cm	-	-
Outubro a dezembro de 2001	Diminuição da atividade eruptiva	-	-
Janeiro a julho de 2002	Incremento da atividade sísmica; Fontes de lava; Queda de cinzas.	-	-

Tabela 1.8. (Continuação).

Agosto de 2002	Atividade eruptiva do estilo estromboliano com emissões de cinzas	-	-
Dezembro de 2002	Diminuição da atividade sísmica; Desgaseificação contínua.	-	-
Março de 2003	Incremento progressivo da atividade sísmica; Atividade estromboliana.	-	-
Junho e julho de 2003	Fontes de lava; Atividade estromboliana; Escoadas lávicas; Queda de cinzas.	-	Declaração de estado de emergência nas zonas mais suscetíveis pelo presidente da República do Equador
2004 e 2005	Períodos intermitentes de atividade eruptiva, associados a queda de cinzas e incremento da atividade e seguidos de fases de menor atividade	-	-
Maior de 2006	Incremento da atividade sísmica	-	-
14 de julho de 2006	Escoadas piroclásticas	-	Evacuação
16 de agosto de 2006	Tremor vulcânico; Erupções vulcanianas.	-	Evacuação das vilas próximas ao vulcão
17 de agosto de 2006	Erupção subpliniana VEI 3; Escoadas piroclásticas.	-	-
Maior de 2010 até 2015	Erupções vulcanianas; Erupções estrombolianas; Emissão de gás e cinzas; Escoadas piroclásticas de pouco volume.	-	-
2021	Última erupção	-	-

Entre 1999 e 2006, as autoridades locais e as autoridades de proteção civil trabalharam em prol da sensibilização da população e da melhoria na disponibilidade de refúgios e de vias de evacuação. Foram também construídos locais de realojamento entre 2007 e 2012 para proporcionar casas alternativas aos residentes que viviam em zonas de alto risco (Armijos *et al.*, 2017).

Concomitantemente aos procedimentos locais desenvolvidos para emergências vulcânicas do vulcão Tungurahua, nomeadamente o sistema de alerta por cores (amarelo, laranja e vermelho) são implementadas sinaléticas nas vilas mais suscetíveis ao perigo vulcânico, como Baños (Figura 1.5) (Armijos *et al.*, 2017).



Figura 1.5. Mapa das zonas de refúgio de Baños (adaptado do mapa das rotas de evacuação, pontos de encontro e refúgios temporais do município de Baños, *sítio*: <https://municipiobanos.gob.ec/banos/index.php/es/>).

Ao longo dos anos da atividade do vulcão Tungurahua, a comunidade, os cientistas e as autoridades melhoraram, individualmente, a capacidade de resposta e coletivamente as suas interações, promovendo uma eficácia na comunicação e nos processos de evacuação. Em 1999, o conhecimento do vulcão era restrito e a monitorização exclusivamente geofísica. Por outro lado, em 2014, a monitorização do vulcão era mais rica e completa (novas técnicas de monitorização), promovendo a compreensão do comportamento da atividade vulcânica (Armijos *et al.*, 2017).

1.3.3. 3.º Caso de estudo: La Soufrière (1976-1977)

O vulcão La Soufrière está localizado na ilha de Guadalupe do arquipélago francês Guadalupe, no mar das Caraíbas. Este arquipélago situa-se na zona central do Arco Vulcânico das Pequenas Antilhas (= *Lesser Antilles Arc*) que corresponde a uma zona de subducção entre a placa litosférica Norte-Americana e placa tectónica das Caraíbas a N e entre as placas tectónicas Cocos, Nazca, Sul-Americana e a placa tectónica das Caraíbas a S (Figura 1.6) (Boundon *et al.*, 2008).

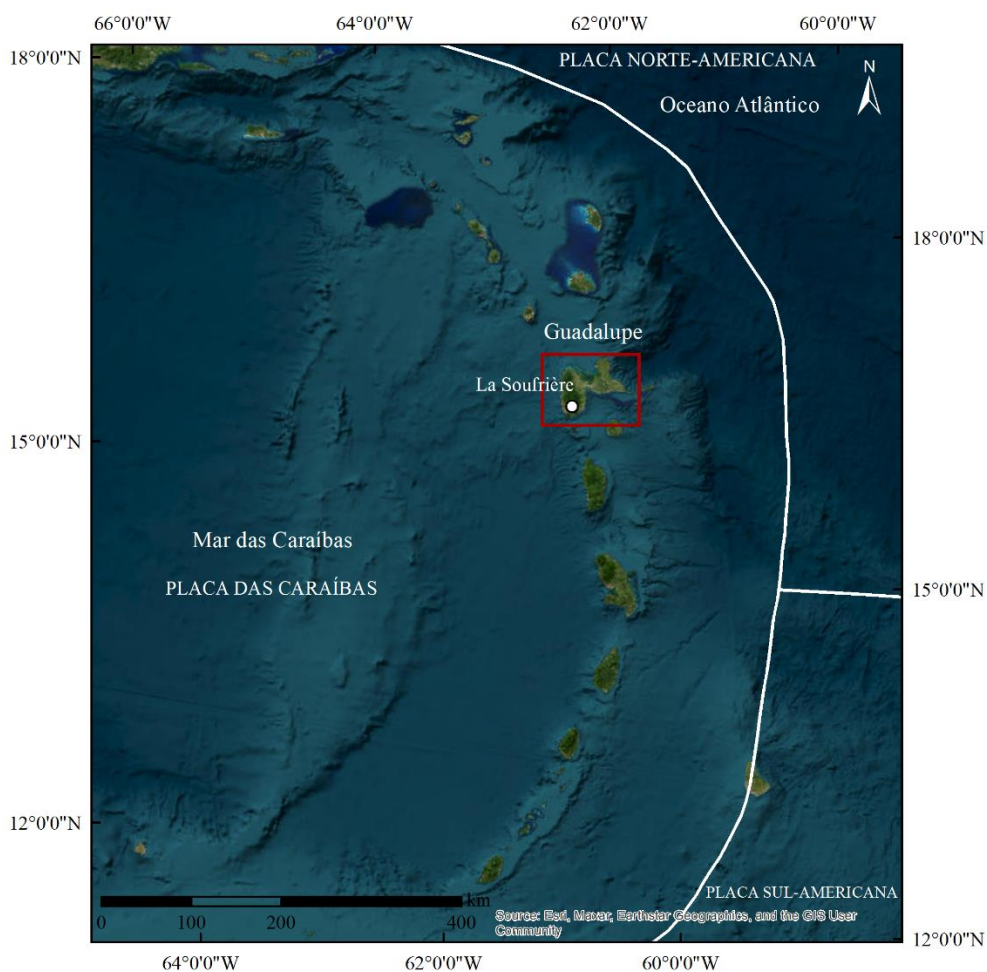


Figura 1.6. Localização geográfica do vulcão La Soufrière. Base: *World Imagery ESRI*©, 2023, Projeção Mercator.

A designada ilha de Guadalupe é constituída por duas ilhas, a ilha Basse-Terre, localizada a ocidente e com uma área de 848 km², e a ilha Grande-Terre, localizada a oriente e com uma área de 588 km². O vulcão La Soufrière é o maior vulcão de Pequenas Antilhas, com 1 467 m de altitude e está localizado a S de Basse-Terre.

O vulcão La Soufrière tem no registo histórico uma erupção do estilo subpliniano e seis erupções freáticas. A primeira, de carácter magmático e com VEI 2-3, datada de 1530 e associada ao colapso estrutural, foi a última erupção de carácter magmático ocorrida no vulcão. Após este evento seguiram-se várias erupções freáticas, a primeira em 1690, seguida dos eventos de 1797, 1812, 1836, 1956, sendo a última em 1976-1977 (Chenet *et al.*, 2014). De seguida, a última crise eruptiva de 1976-1977 do vulcão La Soufrière será descrita e analisada em mais detalhe.

Em 1976 verificou-se um incremento da atividade sísmica no vulcão La Soufrière. No dia 8 de julho do mesmo ano deu-se a primeira erupção freática da crise vulcânica de

1976-1977, tendo o vulcão La Soufrière permanecido em atividade por nove meses, com libertação de cinzas e de gases vulcânicos, totalizando 26 erupções freáticas (Loughlin *et al.*, 2015).

Durante esta crise as autoridades decidiram evacuar a população próxima do vulcão La Soufrière em consequência das evidências do aumento da pressão no interior do mesmo, o que gerou incertezas quanto à possibilidade de uma transição para uma erupção magmática do estilo subpliniano.

A crise de 1976-1977 ficou marcada pela discórdia entre cientistas; por um lado acreditava-se que seriam apenas erupções freáticas e por outro lado que o vulcão estava na iminência de uma erupção do estilo subpliniano (Loughlin *et al.*, 2015).

Na tabela 1.9. estão enunciados os principais eventos ocorridos durante a história eruptiva do vulcão La Soufrière e a resposta dos intervenientes na crise.

Tabela 1.9. Desenvolvimento da crise vulcânica de 1976-1977 no vulcão La Soufrière (adaptado de: Heiken *et al.*, 1980; Feuillard *et al.*, 1983; Komorowski *et al.*, 2005, Chenet *et al.*, 2014; Hincks *et al.*, 2014; Loughlin *et al.*, 2015).
Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.

Data	Evento	Impacto/Danos	Resposta
Julho de 1975	Incremento da atividade sísmica (1.º exame sísmico); 1 sismo sentido	-	-
Novembro a dezembro de 1975	2.º Exame sísmico	-	-
Janeiro a março de 1976	Diminuição da atividade sísmica	Contaminação da atmosfera com gases ácidos e cinza fina; Contaminação das nascentes de água potável; Corrosão de cabos de telefone e de tubos de distribuição de água; Alteração do pH da água.	-
Março a junho de 1976	3.º Exame sísmico		-
8 de julho de 1976	1.ª e maior erupção freática; Nova fratura com 400 m; Reativação de três fraturas no setor SE; <i>Lahars</i> ; Emanações gasosas; Emissão de <i>lapilli</i> e cinzas com diâmetro médio de 10 a 40 mm; 20 sismos sentidos.		Evacuação espontânea de 25 000 residentes
9 de julho de 1976	Emissão de gás (H ₂ S, SO ₂); Sismicidade.		Evacuação de hospitais e prisões (~1 400 pessoas) para a zona N da ilha de Basse-Terre

Tabela 1.9. (Continuação).

9 de agosto de 1976	Erupção freática		-
13 de agosto de 1976	Erupção freática; Dispersão de cinzas; Sismicidade.		Predição de iminência de erupção magmática Evacuação da população no S de Basse-Terre (~33 600 pessoas)
15 de agosto de 1976	-		Nível 2 do plano de contingência Evacuação de ~ 76 000 pessoas
30 de agosto de 1976	Erupção freática; Nova fratura a S-SE do flanco do vulcão; Emissão de <i>lapilli</i> e cinzas com diâmetro médio de 10 a 40 mm.		-
31 de agosto de 1976	-		Retorno da população durante o horário de trabalho diurno
14 de setembro de 1976	Erupção freática; Emissão de <i>lapilli</i> e cinzas com diâmetro médio de 10 a 40 mm.		-
22 de setembro de 1976	Erupção freática (Figura 1.7)		-
2 de outubro de 1976	Erupção freática; <i>Lahars</i> ; Sismicidade.		-
30 de outubro, 1 e 6 de novembro 1976	Erupções freáticas		-
15 a 18 de novembro de 1976	Diminuição da sismicidade e da emissão de cinzas		Comité científico declara baixa probabilidade de erupção do estilo subpliniano no vulcão; Retorno progressivo de toda a população
1 de dezembro de 1976	-		Fim da evacuação
15 de dezembro de 1976	-		Retorno dos ~ 76 000 evacuados
29 de janeiro de 1977	Erupção freática; Emissão de <i>lapilli</i> e cinzas com diâmetro médio de 10 a 40 mm.		-
1 de março de 1977	Última erupção freática		-
15 de junho de 1977	Sem explosões; Sem emissão de cinza Diminuição da sismicidade.		Fim oficial da erupção; Reabertura dos hospitais e das clínicas

Inicialmente a evacuação de La Soufrière foi bem aceite, contudo, a incerteza do diagnóstico científico acabou por gerar um clima social negativo. Adicionalmente, a população descreveu a falta de controlo no tráfego rodoviário e de informação dos pontos de refúgio (Chenet *et al.*, 2014). No geral, salientam-se dois aspetos, a falta de monitorização do vulcão até 1976, que gerou incerteza no rigor científico, e a falta de gestão de uma crise vulcânica, que instalou a desorganização entre as autoridades e a população (Loughlin *et al.*, 2015).

Adicionalmente, a análise dos produtos vulcânicos resultantes das erupções freáticas e o aumento na concentração de F^- e Cl^- em nascentes termais perto do vulcão levaram à controvérsia na possibilidade de representarem os primeiros sinais de magma novo no reservatório magmático e da consequente transição para uma erupção vulcânica do estilo subpliniano. Esta polémica gerou conflito entre os cientistas e colocou em questão se seria necessário proceder a uma evacuação (Heiken *et al.*, 1980; Feuillard *et al.*, 1983; Komorowski *et al.*, 2005).

Por outro lado, a evacuação demonstrou como o papel da estação de rádio local foi importante na reunião de familiares separados durante o processo de evacuação e a solidariedade dos restantes habitantes de Guadalupe, que ofereceram alojamento gratuito e mantimentos (Chenet *et al.*, 2014).



Figura 1.7. Erupção do vulcão La Soufrière (22 de setembro de 1976) (fotografia de M. Feuillard/IPGP).

1.3.4. Casos de evacuação no arquipélago dos Açores

As ilhas açorianas estão localizadas no meio do Oceano Atlântico, na interseção de três placas tectónicas. Estas ilhas têm registo de atividade sísmica e vulcânica desde o seu povoamento. Em seguida serão apresentados dois exemplos de evacuação em resposta a uma erupção vulcânica e à reativação de um sistema vulcânico.

a. Vulcão dos Capelinhos (Ilha do Faial)

A ilha do Faial é uma das cinco ilhas que integram o grupo central do arquipélago dos Açores. Esta ilha tem uma área de cerca de 170 km², um comprimento de 21 km e 14 km de largura. Desde o povoamento da ilha há registo de duas erupções basálticas históricas. A primeira em 1672-73, a erupção do Cabeço do Fogo, e a segunda em 1957-58, a erupção do Vulcão dos Capelinhos (Coutinho *et al.*, 2010; Gaspar *et al.*, 2015a).

A erupção dos Capelinhos, ocorrida entre 1957-58, iniciou-se a NW da Península do Capelo com atividade surtseiana, que passou a atividade estromboliana. Na tabela 1.10 evidenciam-se os principais momentos da erupção e os períodos de evacuação da população.

Tabela 1.10. Desenvolvimento dos processos eruptivos do Vulcão dos Capelinhos (adaptado de: Castello Branco *et al.* (1959), Cole *et al.* (1996; 2001), Machado (1958, 1959), Zbyzewski *et Veiga* (1959), Zybzewski (1960), Machado *et al.* (1962), Scarth e Tanguy (2001), Lobão (2008), Coutinho *et al.* (2010)). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.

Data	Evento	Impactos/Danos	Resposta
6 de setembro a 7 de novembro de 1957	Primeira fase da atividade surtseiana		
27 de setembro de 1957	Incremento da atividade sísmica;	-	Baleeiros e familiares que residem no Porto do Comprido são evacuados
6 a 7 de outubro de 1957	Erupção hidromagmática; Queda de cinzas e <i>lapilli</i> ; Edificação de um cone de tufos a W dos Capelinhos.	Colapso de telhados devido à queda de cinzas	Evacuação pedonal das freguesias do Canto, do Capelo e do Norte Pequeno para freguesias vizinhas (~1 500 pessoas)
28 de outubro de 1957		-	~1 700 pessoas evacuadas até à data
4 e 5 de novembro de 1957	Edificação de um cone removido pelo mar	-	-
7 de novembro a 29 de dezembro de 1957	Segunda fase da atividade surtseiana		
7 de novembro de 1957	Edificação de um novo cone de tufos	-	-

Tabela 1.10. (Continuação).

12 de novembro de 1957	União do cone de tufos à ilha do Faial	-	-
Dezembro de 1957	Edificação de um segundo cone de tufos a W dos Capelinhos	-	-
16 de dezembro de 1957	Atividade estromboliana	Danos em edifícios Colapso de telhados	-
29 de dezembro de 1957	Colapso parcial do cone	-	-
29 de dezembro de 1957 a 12 de maio de 1958	Terceira fase da atividade surtseiana e início da atividade estromboliana		
Fevereiro e março de 1958	Queda de cinzas	Depósitos de cinzas cobrem quase por completo a Península do Capelo; Queda de cinzas afeta toda a ilha.	-
20 de abril de 1958	Atividade surtseiana e estromboliana	-	-
12 a 14 de maio de 1958	Mais de 450 sismos; Sismo de intensidade X	508 edifícios danificados e 273 edifícios destruídos (Praia do Norte, Ribeira Funda e Espalhafatos)	-
14 de maio de 1958	Explosão seguida de atividade fumarólica no interior do Vulcão da Caldeira	-	-
24 de outubro de 1958	Fim da atividade vulcânica		
1958 a 1960	40 % da população da ilha do Faial emigrou, maioritariamente para os EUA		
1960	Retorno e reconstrução das vilas do Capelo e Praia do Norte		

A erupção vulcânica do vulcão dos Capelinhos levou à evacuação da população residente nas freguesias mais afetadas para freguesias vizinhas. Adicionalmente, a população afetada contou também com o apoio do, na altura, Senador John Kennedy que permitiu a entrada nos EUA de 1 500 famílias. Além disso, numa fase inicial, houve o encorajamento da evacuação para Angola, no entanto apenas 25 famílias emigraram para o continente Africano (Lobão, 2008). Em consequência da erupção dos Capelinhos (Figura 1.8), a ilha do Faial recebeu ainda donativos para apoio aos residentes das freguesias mais afetadas (Coutinho *et al.*, 2010).

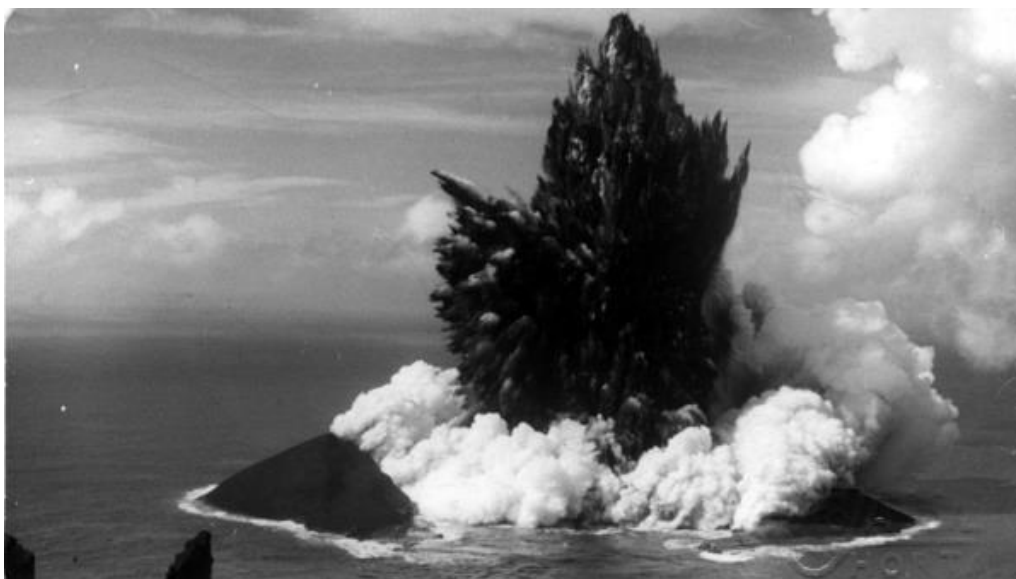


Figura 1.8. Erupção do Vulcão dos Capelinhos (fotografia do arquivo do Diário de Notícias).

b. Crises sismovulcânicas de São Jorge

A ilha de São Jorge integra o grupo central do arquipélago dos Açores. Esta ilha tem cerca de 246 km² de área, aproximadamente 55 km de comprimento e 7 km de largura. Historicamente na ilha de São Jorge há registo de duas erupções vulcânicas subaéreas, a primeira em 1580 e a segunda em 1808, ambas erupções fissurais basálticas (Zanon e Viveiros, 2019). Além destas, em 1964 terá decorrido uma erupção vulcânica submarina ao largo das Velas, concomitante com a crise sísmica registada nesse ano (Gaspar *et al.*, 2015b). Na tabela 1.11 estão evidenciadas as fases decorrentes do desenvolvimento da crise sismovulcânica de 1964 na ilha de São Jorge.

Tabela 1.11. Desenvolvimento da crise sismovulcânica de 1964 na ilha de São Jorge (adaptado de: Zbyszewski e Rosa, 1977; Decreto-Lei n.º 45 685, de 27 de abril; Decreto-Lei n.º 45 687, de 27 de abril). Nota: “-” significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.

Data	Evento	Impactos/Danos	Resposta
15 de fevereiro de 1964	Incremento da atividade sísmica; Sismo de intensidade VII e VIII		
18 de fevereiro de 1964	Emanações gasosas	Fendas em casas nas freguesias de Velas e Rosais;	Evacuação por via marítima de ~ 5 000 pessoas para as ilhas Terceira, Pico e Faial (por um período não superior a 1 mês)
20 de fevereiro de 1964	Atividade sísmica, com sismos sentidos nas freguesias de Urzelina, Manada e Norte Grande Sismo de intensidade VIII; Emanações gasosas.	~900 habitações danificadas, das quais ~400 totalmente destruídas	

Tabela 1.11 (Continuação).

24 de fevereiro de 1964	-	Fendas em casas das freguesias a NE da ilha	
26 de fevereiro de 1964	-		
23 de abril de 1964	Manchas brancas observadas na superfície do mar	-	-
Abril e maio de 1964	Regresso da população evacuada.		

A crise sismovulcânica de 1964 na ilha de São Jorge incentivou a emigração para os EUA e para colónias africanas. Os sismos sentidos durante o decorrer desta crise deixaram marcas profundas no edificado da ilha (Figura 1.9).



Figura 1.9. Destruição dos edifícios durante a crise sismovulcânica de 1964 na ilha de São Jorge (Fotografia do arquivo da RTP).

Passados 58 anos, a ilha de São Jorge voltou a ser palco de atividade sismovulcânica intensa. Milhares de sismos foram registados após as 16:00 locais do dia 19 de março de 2022, numa zona compreendida entre as freguesias de Urzelina e Velas (concelho de Velas). Como consequência desta atividade no Sistema Vulcânico Fissural de Manadas foram acionados níveis de alerta sismovulcânicos pela comunidade científica (Tabela 1.12).

Tabela 1.12. Evolução da crise sismovulcânica de 2022 a 2023 na ilha de São Jorge (CIVISA,2022; 2023 e SRPCBA, 2022; 2023). Nota: “-“ significa ausência de fenómenos/ações e/ou falta de informação.

Data	Evento	Impactos/Danos	Resposta
19 de março de 2022	Atividade sísmica com registo de centenas de sismos; Sismo sentido na freguesia de Manadas (intensidade III)	-	-
20 de março de (00h40) de 2022	Incremento da sismicidade	-	A comunidade científica define nível de alerta V2 para o Sistema Vulcânico Fissural de Manadas
20 de março (02h40) de 2022	Contínuo incremento da sismicidade	-	Alerta V3
21 de março de 2022	-	-	Ativação dos planos de emergência de proteção civil dos municípios de Velas e de Calheta
22 de março de 2022	-	-	Aplicação de medidas preventivas, nomeadamente, evitar frequentar as fajãs
23 de março (15h30) de 2022	Elevada atividade sísmica Deformação crustal	-	Alerta V4 Ativação do Plano Regional de Emergência de Proteção Civil dos Açores
25 de março de 2022	-	-	Evacuação de 85 utentes da casa de repouso de Velas para a Calheta
26, 27 e 28 de março de 2022	Condições meteorológicas adversas	-	Evacuação da população das fajãs do concelho de Velas Acesso interdito às fajãs do concelho de Velas
29 de março de 2022	Sismo mais energético registado durante a crise sismovulcânica (3,8 na escala de Richter)	-	-
1 de abril de 2022	-	-	Acesso interdito (pedonal e de viaturas) a partir da vigia da baleia ao farol dos Rosais
7 de abril de 2022	Total de 28 029 sismos, dos quais 237 sentidos	-	-
9 de junho de 2022	Diminuição da atividade sísmica; Ausência de valores anómalos de deformação e de emissão de gases vulcânicos.	-	Alerta V3
Julho de 2022 a julho de 2023	Diminuição da atividade sísmica, intercalada com períodos curtos de maior frequência sísmica e de maior libertação de energia.		

A ocorrência desta crise sismovulcânica levou à implementação de um Plano Especial de Emergência de Proteção Civil para o Risco Sismovulcânico na Ilha de São Jorge (PEEPCRS-ISJ). Este plano procura responder a situações de acidente grave ou catástrofe associadas ao risco sismovulcânico, mediante a organização da coordenação institucional e das organizações integrantes do Sistema Integrado de Operações de Proteção e Socorro da Região Autónoma dos Açores (SIOPS-RAA) (PEEPCRS-ISJ, 2023).

CAPÍTULO II – ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Nota Prévia

A área de estudo desta dissertação é a freguesia de Arrifes, localizada no concelho de Ponta Delgada na ilha de São Miguel. A escolha desta área deveu-se maioritariamente à sua extensão territorial (25,36 km²) e à sua localização no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (SVFP).

Paralelamente, face à sua proximidade a Ponta Delgada, a freguesia de Arrifes apresenta um grande desenvolvimento em todas as áreas, destacando-se a agricultura como a principal atividade económica da freguesia, que detém a maior bacia leiteira dos Açores.

No que concerne à localização geográfica, a freguesia de Arrifes está localizada no setor W do SVFP e o setor N da freguesia encontra-se no limite entre este sistema vulcânico vulcanológica e o Vulcão das Sete Cidades.

A freguesia de Arrifes poderá ser afetada por uma futura erupção havaiana/estromboliana com origem no SVFP ou no flanco E do Vulcão das Sete Cidades e/ou uma erupção do tipo pliniana/subpliniana de um dos vulcões centrais da ilha de São Miguel (Sete Cidade, Fogo e Furnas). Trabalhos anteriores (Queiroz *et al.*, 2008) demonstraram que em caso de erupção nas Sete Cidades, o cenário mais provável seria uma erupção de natureza basáltica nos flancos do vulcão. Nesta dissertação foram abordados apenas os cenários de erupção havaiana/estromboliana, com origem no flanco E do Vulcão das Sete Cidades ou no setor W do SVFP. De facto, embora a freguesia de Arrifes possa ser afetada por erupções subplinianas ou plinianas dos vulcões centrais ativos da ilha de São Miguel, a atividade havaiana/estromboliana deverá corresponder ao cenário mais provável de uma erupção vulcânica afetar a freguesia de Arrifes (Gaspar *et al.*, 2015a).

Assim sendo, ao longo deste capítulo enquadram-se os sistemas vulcânicos que podem afetar a área de estudo em caso de erupção vulcânica efusiva ou pouco explosiva, bem como a população afetada, a rede de transportes e as infraestruturas essenciais, das quais se salientam o Aeroporto João Paulo II e o Hospital Divino Espírito Santo, que apesar de estarem fora da área, encontram-se próximos do limite da freguesia.

2.2. Localização Geográfica

O arquipélago dos Açores é composto por nove ilhas de origem vulcânica localizadas no oceano Atlântico entre as latitudes 37° e 40° N e as longitudes 25° e 31° W. Subdivide-se em três grupos: o grupo Oriental formado pelas ilhas Santa Maria e São Miguel, o grupo Central constituído pelas ilhas Terceira, Graciosa, São Jorge, Pico e Faial e o grupo Ocidental que engloba as ilhas Flores e Corvo (Figura 2.1).

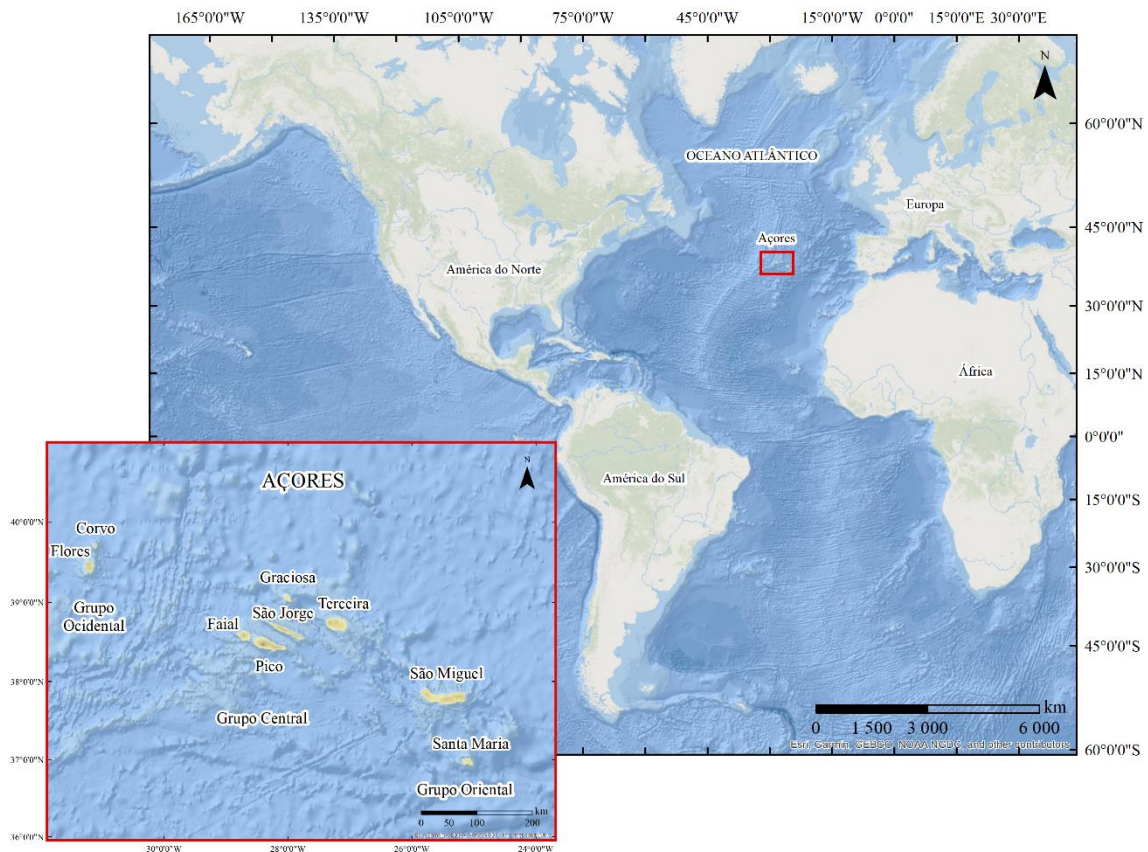


Figura 2.1. Localização do arquipélago dos Açores no Oceano Atlântico e detalhe da localização geográfica das ilhas do arquipélago. Base: *Oceans Esri*©, 2023, Projeção Mercator.

2.3. Enquadramento Geodinâmico dos Açores

O arquipélago dos Açores localiza-se sobre a Plataforma dos Açores ao longo de uma faixa de cerca de 500 km, segundo a direção WNW-ESE, definida pela linha batimétrica dos 2 000 m (Needham e Francheteau, 1974; Pacheco *et al.*, 2013).

A área que engloba o arquipélago corresponde à zona de junção tripla das placas litosféricas Norte-Americana, Euroasiática e Núbica (Searle, 1980) (Figura 2.2). A separação entre a Placa Norte-Americana e as placas Euroasiática e Núbica é feita pela

Crista Média Atlântica. A Zona de Fratura Açores-Gibraltar corresponde ao limite entre as placas Euroasiática e Núbica e engloba as estruturas tectónicas *Rift* da Terceira e Falha Gloria (Pacheco *et al.*, 2013).

As ilhas estão alinhadas segundo a direção WNW-ESE, intersetando diagonalmente a Crista Média Atlântica. O grupo Ocidental está edificado sobre a placa Norte-Americana e as ilhas dos grupos Central e Oriental dispersam-se ao longo da faixa referente ao *Rift* da Terceira (Pacheco *et al.*, 2013; Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015).

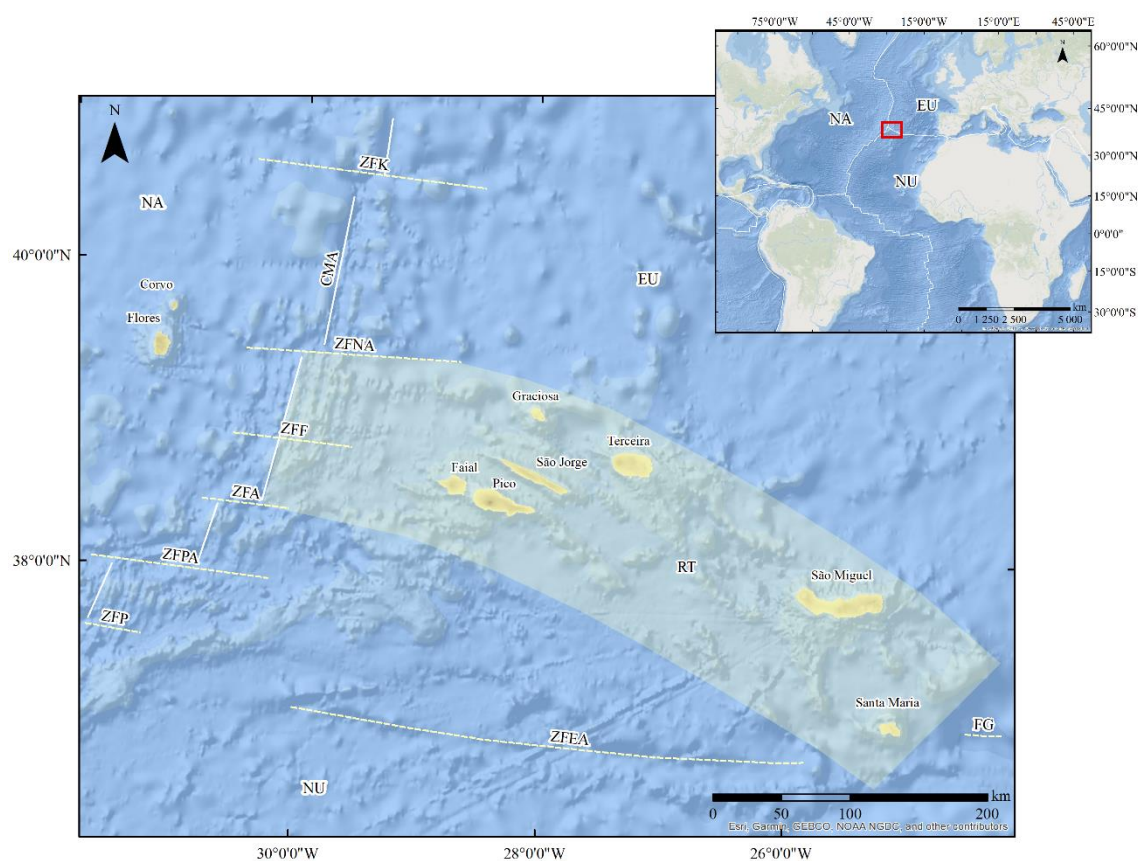


Figura 2.2. Enquadramento tectónico do arquipélago dos Açores e principais estruturas (Carmo, 2013; Silva *et al.*, 2021). Legenda: NA – Placa Norte-Americana; EU – Placa Euroasiática; NU – Placa Núbica (=Africana); CMA – Crista Média Atlântica; ZFK – Zona de Fratura Kurchatov; ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFF – Zona de Fratura do Faial; ZFA – Zona de Fratura Açor; ZFPA – Zona de Fratura Princesa Alice; ZFP – Zona de Fratura do Pico; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; RT – *Rift* da Terceira e FG – Falha Gloria. Base: *Oceans Esri*©, 2023, Projeção Mercator e *Tectonic_Plate_Boundaries* do *ArcGIS Online*.

O contexto onde se insere o arquipélago dos Açores condiciona a importante atividade sísmica e vulcânica na região.

2.4. Atividade geológica histórica

Desde do povoamento das ilhas açorianas que há registo de perigos geológicos com impactos na sociedade, como sismos, erupções vulcânicas, tsunamis, movimentos de vertente e emissões gasosas (Gaspar *et al.*, 2015b).

Nos últimos 600 anos há registo de 15 grandes sismos e 16 crises sísmicas, o que perfaz um total de 31 eventos sísmicos com impacto. O primeiro sismo destruidor terá tido epicentro em terra, a N de Vila Franca do Campo, na ilha de São Miguel. O evento ocorreu na madrugada do dia 22 de outubro de 1522 e foi avaliado com intensidade máxima de X na Escala Macrossísmica Europeia de 1998 (EMS-98). Este sismo desencadeou vários movimentos de vertente, tendo os eventos causado cerca de 5 000 mortes (Silveira *et al.*, 2003; Marques *et al.*, 2009; Carmo, 2013; Gaspar *et al.*, 2015b).

Salienta-se que o evento ocorrido no dia 22 de outubro de 1522 deu início ao primeiro registo de um tsunami na região. Entre 1522 e 2020, no arquipélago dos Açores, contabilizaram-se 31 tsunamis e 17 vítimas mortais (Cabral, 2020).

No que diz respeito ao vulcanismo histórico, desde o povoamento, há registo de pelo menos 28 erupções vulcânicas, das quais 15 localizadas em terra, nas ilhas de São Miguel, Terceira, São Jorge, Pico e Faial. A primeira erupção de que há registo histórico está datada de 1439/43 e ocorreu no Vulcão das Furnas, na ilha de São Miguel. O evento está associado a uma erupção subpliniana e freatomagmática no interior da caldeira das Furnas e terminou com a extrusão de um domo traquítico (Queiroz *et al.*, 1995; 2015).

Entre 1439 e 2001 foram registadas aproximadamente 250 fatalidades em consequência não só das erupções vulcânicas, mas também de fenómenos associados, como emanações gasosas e movimentos de vertente (Gaspar *et al.*, 2015b).

Em relação às emanações gasosas, além dos gases libertados durante períodos eruptivos, existem relatos de vítimas mortais em períodos de repouso de um sistema vulcânico. É o caso da morte de dois portugueses por asfixia a 6 de agosto de 1992 no interior da Furna do Enxofre, uma cavidade vulcânica existente na ilha Graciosa. Nesse dia mediram-se níveis de CO₂ superiores a 15 % vol. perto do lago existente no interior da gruta (Gaspar *et al.*, 1998; Viveiros, 2003).

2.5. Ilha de São Miguel

A ilha de São Miguel localiza-se no setor SE do *Rift* da Terceira, estando afetada pelo sistema de falhas regional com direção NW-SE. No Vulcão das Sete Cidades e no Vulcão

do Fogo as estruturas distensivas de direção NW-SE que atravessam as caldeiras, o *Graben* dos Mosteiros e o *Graben* da Ribeira Grande, respetivamente, evidenciam a influência das falhas ativas deste sistema. Além disso, nos sistemas vulcânicos fissurais dos Picos e do Congro observam-se alinhamentos de cones de escórias com a mesma direção (Queiroz *et al.*, 1995; Wallenstein, 1999; Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013; Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015).

O enquadramento da ilha fundamenta o registo da atividade sísmica e vulcânica dos últimos 600 anos. A ilha de São Miguel foi palco de seis sismos destruidores e 11 erupções vulcânicas históricas, em terra e nas regiões submarinas envolventes (Carmo, 2013).

Gaspar *et al.* (2015a) distinguem sete unidades vulcanológicas para a ilha de São Miguel, nomeadamente o Vulcão das Sete Cidades, o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, o Vulcão do Fogo, o Sistema Vulcânico Fissural do Congro, o Vulcão das Furnas, o Vulcão da Povoação e o Sistema Vulcânico do Nordeste (Figura 2.3).

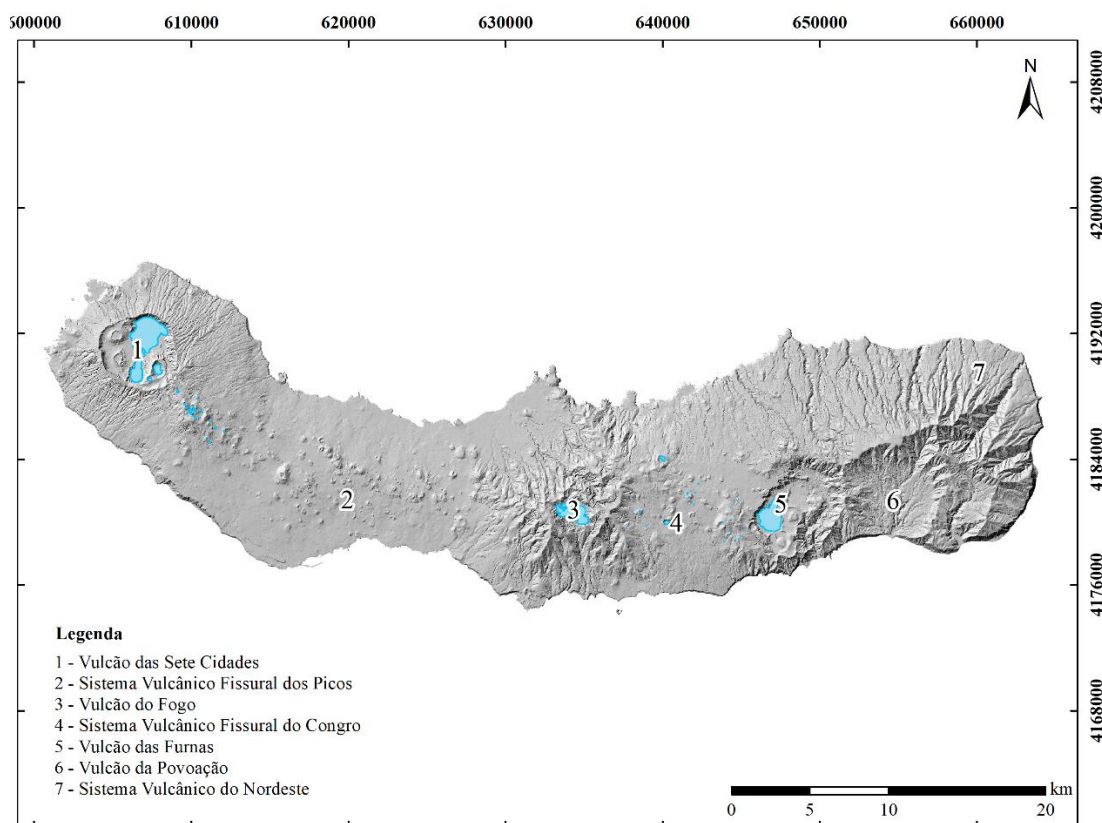


Figura 2.3. Unidades vulcanológicas da ilha de São Miguel. Legenda: 1 – Vulcão das Sete Cidades; 2 – Sistema Vulcânico Fissural dos Picos; 3 – Vulcão do Fogo; 4 – Sistema Vulcânico Fissural do Congro; 5 – Vulcão das Furnas; 6 – Vulcão da Povoação; 7 – Sistema Vulcânico do Nordeste (Gaspar *et al.*, 2015a). Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

O Vulcão da Povoação e o Sistema Vulcânico do Nordeste correspondem à parte mais antiga e inativa da ilha de São Miguel, com uma datação aproximada de 0,1 a 4,1 milhões de anos (Abdel-Monem *et al.*, 1975; Fernandez, 1980; Moore, 1990; Johnson *et al.*, 1998).

O Vulcão do Fogo tem aproximadamente 280 mil anos e há registo de atividade vulcânica nos últimos 10 000 anos, inclusivamente em tempos históricos (1563 e 1564), pelo que é um dos três vulcões centrais ativos na ilha (McGraw, 1976; Wallenstein, 1999; Pacheco *et al.*, 2013; Wallenstein *et al.*, 2015). O Vulcão das Sete Cidades tem aproximadamente 250 mil anos e o Vulcão das Furnas aproximadamente 95 mil anos, ambos vulcões centrais ativos (Moore, 1991; Queiroz *et al.*, 1995; Pacheco *et al.*, 2013). No caso do Vulcão das Furnas, este também foi palco de duas erupções vulcânicas desde o povoamento: uma em 1439/43, tal como referido anteriormente, e outra em 1630. Ambas as erupções foram subplinianas culminando na formação de um domo traquítico (Guest *et al.*, 1999, 2015).

Relativamente aos Sistemas Vulcânicos Fissurais dos Picos e do Congro, ambos são ativos, estando o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos datado de cerca de 50 000 anos (Moore, 1991; Pacheco *et al.*, 2013).

Segundo Gaspar *et al.* (2015a), em São Miguel, o intervalo de recorrência para erupções basálticas do estilo havaiano/estromboliano é de 139 anos para o setor W, que engloba o Vulcão das Sete Cidades, o SVFP e o flanco W do Vulcão do Fogo, e de 2 500 anos para o setor E, que inclui o Sistema Vulcânico Fissural do Congro e o setor E do Vulcão do Fogo (Wallenstein *et al.* 2015; Gaspar *et al.*, 2015a).

A recorrência de erupções plinianas e subplinianas na ilha, tem um intervalo de 294 anos no Vulcão das Sete Cidades, de 833 anos no Vulcão do Fogo e de 500 anos no vulcão das Furnas (Gaspar *et al.*, 2015a). Adicionalmente, para os vulcões do Fogo e das Furnas, o cenário mais provável é o de uma erupção subpliniana (Wallenstein *et al.*, 2015; Kueppers *et al.*, 2019). Para o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, as erupções mais prováveis serão do estilo havaiano/estromboliano (Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015).

O estudo de erupções vulcânicas ocorridas no passado permite modelar os perigos vulcânicos e, conseqüentemente, analisar as áreas suscetíveis a cada perigo. Os resultados obtidos constituem uma importante ferramenta para o planeamento de emergência (Gaspar *et al.*, 2015b).

A área de estudo a analisar nesta dissertação é a freguesia de Arrifes, inserida no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos. Esta freguesia poderá ser afetada por produtos

provenientes de qualquer um dos sistemas vulcânicos ativos da ilha de São Miguel. No entanto, o cenário a desenvolver tem por base o caso mais provável de uma erupção havaiana/estromboliana no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos ou no flanco E do Vulcão das Sete Cidades.

2.6. Caracterização do Vulcão das Sete Cidades

2.6.1. Geomorfologia

O Vulcão das Sete Cidades é um vulcão central ativo com caldeira, localizado na parte NW da ilha de São Miguel. Encontra-se envolto pelo oceano em três dos seus flancos, com arribas a variar entre os 50 e os 220 m de altura, e pelo SVFP no flanco SE (Queiroz, 1997; Ferreira *et al.*, 2015; Queiroz *et al.*, 2015).

A caldeira do Vulcão das Sete Cidades tem um diâmetro médio de 12 km e o ponto mais alto corresponde ao Pico da Cruz, a 845 m acima do nível médio do mar. O Vulcão das Sete Cidades resulta da acumulação de depósitos piroclásticos e escoadas lávicas, cuja evidência revela erupções de diversos estilos, magnitude e duração (Queiroz *et al.*, 2015).

Este vulcão ocupa uma área aproximada de 110 km² e um volume de 45 km³. No interior da caldeira observam-se quatro lagoas e vários cones secundários (domos e *maars*) (Figura 2.4) (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2015).

A W e a SE do vulcão central destacam-se cones de escória resultantes de erupções havaianas/estrombolianas. De salientar que em Queiroz (1997) as estruturas a SE encontram-se dentro dos limites do Vulcão das Sete Cidades e que em Ferreira (2000) estas estruturas pertencem ao limite do SVFP.

No interior da caldeira do Vulcão das Sete Cidades destacam-se três edifícios monogenéticos, o cone de pedra-pomes de Seara, a Caldeira dos Alferes e a Caldeira Seca, sendo que esta última apresenta caráter hidromagmático (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2015).

No Vulcão das Sete Cidades é comum observarem-se *maars* e cones de tufos, caracterizados pela presença de água no momento da sua formação. As Lagoas de Santiago e do Canário são ambos exemplos de *maars* localizados a SE do vulcão, no interior da caldeira e no flanco, respetivamente (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2015).

No que concerne à tectónica do Vulcão das Sete Cidades, observam-se escarpas de falha, falhas identificadas, falhas prováveis, falhas ocultas e falhas ocultas prováveis (Carmo, 2013).

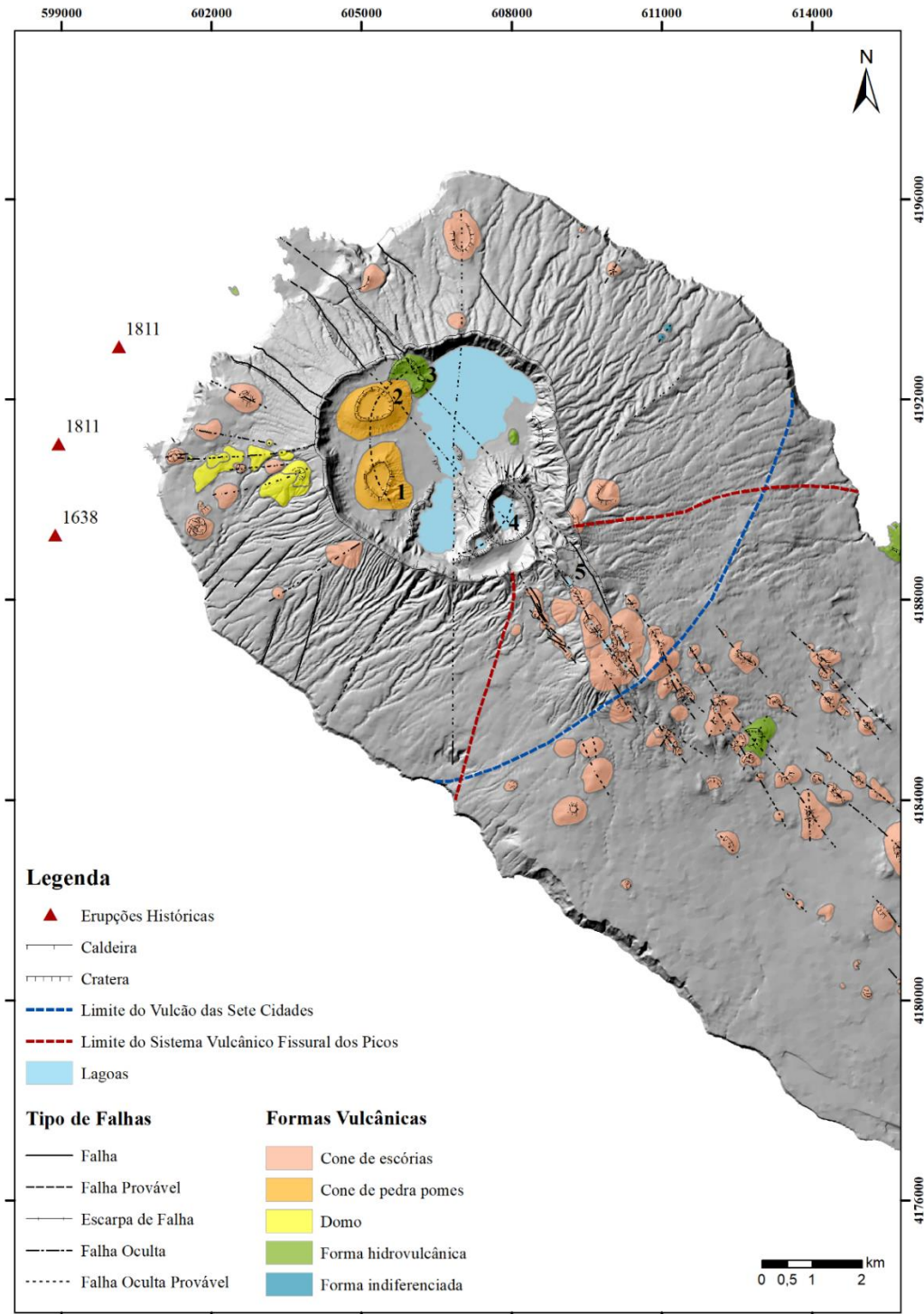


Figura 2.4. Mapa do Vulcão das Sete Cidades – tectónica (Carmo, 2013), morfologia (Queiroz, 1997; Carmo, 2013); erupções históricas, limite do Vulcão das Sete Cidades (Queiroz, 1997) e limite do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Ferreira, 2000). 1 – Caldeira Seca; 2 – Caldeira dos Alferes; 3 - Seara; 4 - Lagoa do Santiago; 5 - Lagoa do Canário. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

2.6.2. História Eruptiva

A estratigrafia do Vulcão das Sete Cidades divide-se em dois grupos, o Grupo Inferior, constituído por depósitos indiferenciados, e o Grupo Superior, subdividido em seis unidades (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

O Grupo Inferior corresponde à fase subárea de edificação do vulcão central, representativa de uma fase efusiva com predominância de escodas lávicas basálticas e traquíticas. Este grupo engloba todos os depósitos com idade superior a 36 000 anos, contudo, a escassez da exposição associada à alteração dos depósitos, leva à dificuldade em estabelecer correlações estratigráficas (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

O grupo Superior representa a história do Vulcão das Sete Cidades nos últimos 36 000 anos e subdivide-se em seis unidades estratigráficas. Conta com a formação da atual caldeira, cuja evolução se associa a três eventos paroxismais (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

A primeira unidade, designada por Formação do Risco, corresponde a um episódio paroxismal de formação da caldeira ocorrido há aproximadamente 35 740 anos, seguido de um período marcado pela emissão de produtos piroclásticos resultantes de erupções de menor magnitude (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

A Formação da Bretanha, datada de aproximadamente 28 750 anos, corresponde ao segundo evento paroxismal que levou ao alargamento para NW da caldeira inicial, ao qual se segue um novo período dominado por produtos piroclásticos (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

O último evento paroxismal ocorreu há 15 740 anos e levou ao alargamento do setor NE da caldeira, dando origem à forma que se observa atualmente. Este episódio corresponde à Formação de Santa Bárbara, um dos melhores níveis de referência estratigráfica para o Vulcão das Sete Cidades (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

A Formação das Lagoas corresponde ao período mais recente do Vulcão das Sete Cidades, englobando os depósitos dos últimos 16 000 anos, resultantes de erupções predominantemente explosivas. A alteração na natureza da atividade eruptiva, de maioritariamente magmática para predominantemente hidromagmática, levou à subdivisão da unidade em dois membros: Membro do Cascalho Negro e Membro da Pepom. A divisão entre ambos os membros é condicionada pela posição estratigráfica do

depósito do Fogo A datado de 5 000 anos (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

O Membro da Pepom, com menos de 5 000 anos, inclui depósitos de 17 erupções explosivas intracaldeira. Esta observação evidencia o Vulcão das Sete Cidades como o sistema vulcânico com maior frequência eruptiva nos últimos 5 000 anos (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

A última erupção localizada no Vulcão das Sete Cidades foi há cerca de 600 anos. Esta erupção foi explosiva, ocorreu no interior da caldeira, e da mesma resultou a edificação do cone de pedra-pomes da Caldeira Seca (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013).

Queiroz *et al.* (2008) utilizaram um modelo probabilístico (análise em árvore ou *event tree*) para averiguar o estilo de erupção esperado para o Vulcão das Sete Cidades. Este estudo demonstrou que um futuro evento no vulcão terá provavelmente lugar nos flancos e será de natureza basáltica, sugerindo uma possível erupção estromboliana.

2.6.3. Erupções Históricas

No que concerne a erupções históricas, o Vulcão das Sete Cidades foi palco de três erupções submarinas, no entanto, não há registo de erupções subaéreas. A primeira erupção submarina ocorreu em 1638, com uma duração de 25 dias e deu origem a um edifício com 120 metros de altura, o qual foi erodido devido à sua composição. No ano de 1811 registaram-se duas erupções submarinas espaçadas de quatro meses, ambas de carácter semelhante à anterior e cujos depósitos produzidos foram erodidos pela ação do mar (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

2.6.4. Vulcanismo Secundário

No Vulcão das Sete Cidades, além da desgaseificação difusa (Viveiros *et al.*, 2015) identificaram-se nascentes termais junto à costa, nomeadamente nos Mosteiros e na Ponta da Ferraria (Ferreira, 2000; Viveiros, 2003).

Andrade *et al.* (2019) apresentam resultados de medições de fluxo de CO₂ na Lagoa das Sete Cidades, contudo concluem que a emissão desse gás deverá estar associada a uma fonte biogénica. No caso das emissões de CO₂ na Lagoa de Santiago, não se pode excluir contribuição profunda, de acordo com os estudos de Andrade *et al.* (2019).

2.7. Caracterização do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos

2.7.1. Geomorfologia

Segundo Ferreira (2000), o Sistema Vulcânico Fissural dos Picos corresponde a uma extensão de 23 km entre a zona SW da caldeira das Sete Cidades e o flanco W do Vulcão do Fogo (Figura 2.5). Esta faixa é caracterizada pelo alinhamento de cones de escórias e fissuras eruptivas alinhadas predominantemente com orientação NW-SE (Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015).

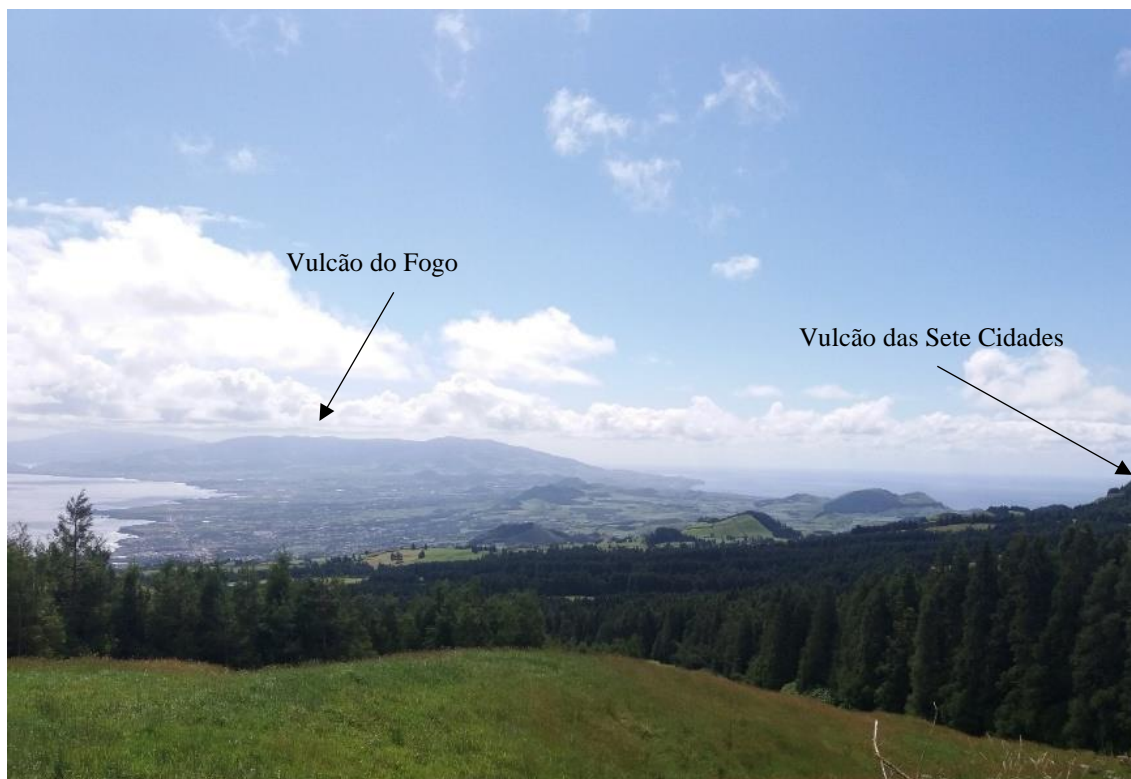


Figura 2.5. Fotografia do enquadramento do SVFP entre o Vulcão do Fogo e o Vulcão das Sete Cidades (22/05/2021).

Na figura 2.6 observa-se a predominância de edifícios monogenéticos associados a erupções de estilo havaiano/estromboliano. Por vezes estes surgem sob forma alongada devido ao desenvolvimento ao longo de fissuras (Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015).

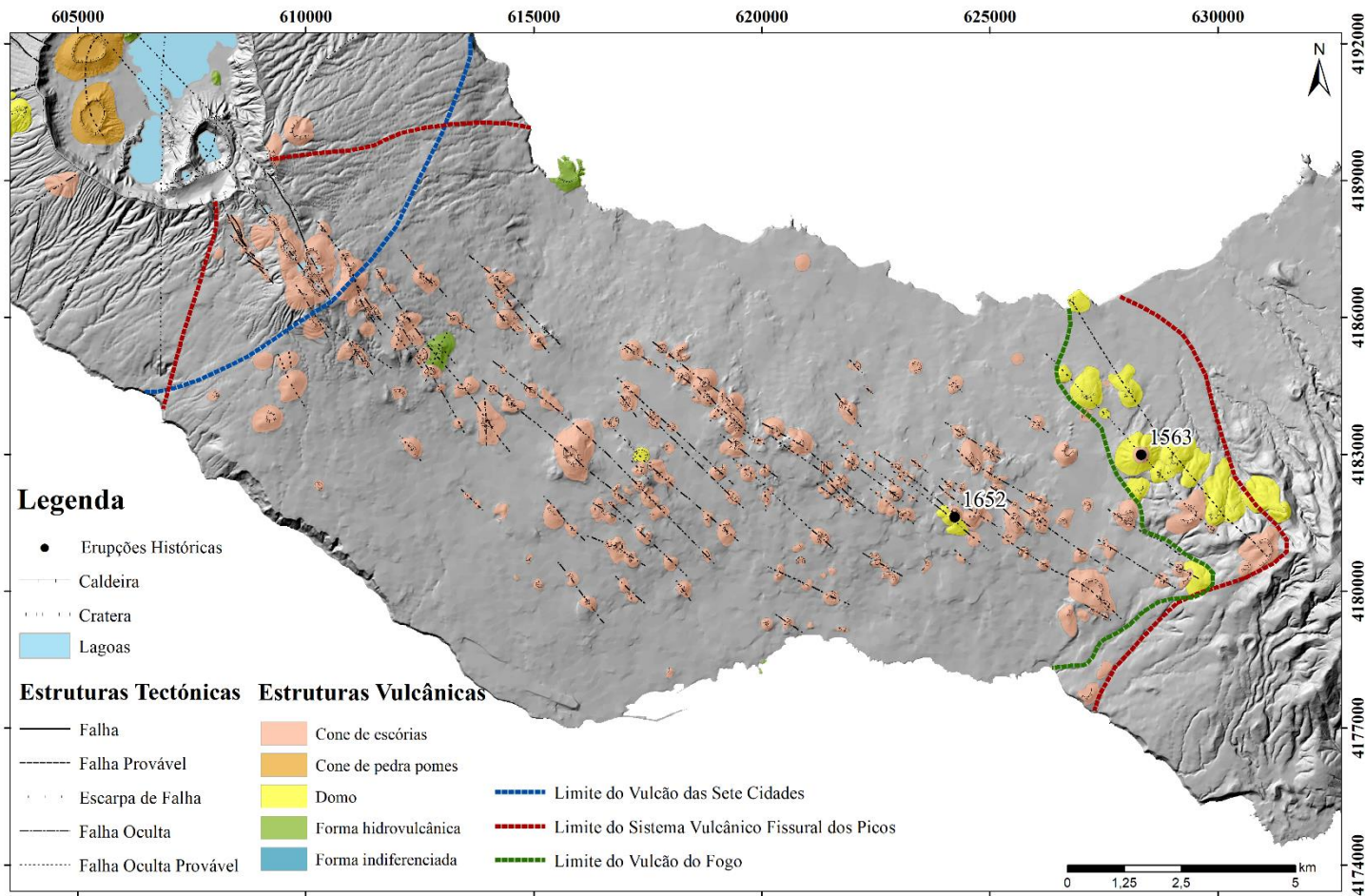


Figura 2.6. Mapa do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos – tectónica (Carmo, 2013), morfologia (Ferreira, 2000; Carmo, 2013); Erupções históricas (1563 e 1652), limite do Vulcão das Sete Cidades (Queiroz, 1997), limite do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (Ferreira, 2000) e limite do Vulcão do Fogo (Wallenstein, 1999). Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

O SVFP é dominado pela presença de cones de escórias e atualmente reconhecem-se mais de 270 destas estruturas. A W, no flanco do Vulcão das Sete Cidades, o Pico das Éguas é o ponto de maior altitude deste sistema, a 874 metros acima do nível médio do mar. No centro do SVFP destaca-se a Serra Gorda, a 485 metros acima do nível médio do mar, e a E o ponto mais alto é um cone (sem denominação) com 673 metros acima do nível médio do mar, que se situa no flanco W do Vulcão do Fogo. Além dos cones de escórias observam-se cones de *spatter*, caracterizados por pequenas dimensões e encostas íngremes (Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015).

A natureza desta unidade vulcanológica torna frequente as escoadas lávicas do tipo *aa* e, embora em menor quantidade, também se observam escoadas lávicas do tipo *pahoehoe*. Contudo, a cobertura vegetal e a ocupação antrópica dificultam a observação das escoadas lávicas em diversas zonas (Head & Wilson 1989; Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2015).

2.7.2. História Eruptiva

O SVFP é a unidade vulcanológica mais recente da ilha de São Miguel. A datação dos afloramentos mais antigos é de aproximadamente 50 000 anos. Esta unidade preencheu a área submarina entre o Vulcão das Sete Cidades e o Vulcão do Fogo (Moore, 1991; Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015).

No início ocorreram erupções submarinas e hidromagmáticas, características de uma fase emergente passando a atividade a subaérea do tipo fissural, com predominância de estilos havaiano e estromboliano (Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013).

Ferreira (2000) utilizou a relação entre os centros eruptivos e respetivos produtos vulcânicos com o depósito do Fogo A como critério estratigráfico do SVFP. A subunidade mais antiga é a Subunidade de Ponta Delgada, que engloba os centros eruptivos e os produtos vulcânicos desde a emergência até aos 5 000 anos. Esta subunidade tem maior expressão entre as freguesias de Feteiras e Ponta Delgada.

Os centros eruptivos e produtos vulcânicos datados dos últimos 5 000 anos correspondem à Subunidade do Pinhal da Paz. A distribuição dos focos eruptivos dessa unidade desenvolve-se maioritariamente segundo duas cristas vulcanotectónicas e a relação estratigráfica com os produtos provenientes do Membro da Pepom permitiu o reconhecimento de 30 erupções subaéreas nos últimos 5 000 anos (Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013).

A freguesia de Arrifes integra-se na subunidade de Ponta Delgada, contudo, a parte N da freguesia conta com erupções datadas dos últimos 5 000 anos, bem como a Serra Gorda, estrutura localizada a E do centro da freguesia (Figura 2.7). Salienta-se que a Serra Gorda é o cone de escórias maior da ilha de São Miguel e que resultou da erupção estromboliana de maior magnitude dos últimos 5 000 anos da ilha (Booth *et al.*, 1978; Ferreira, 2000).

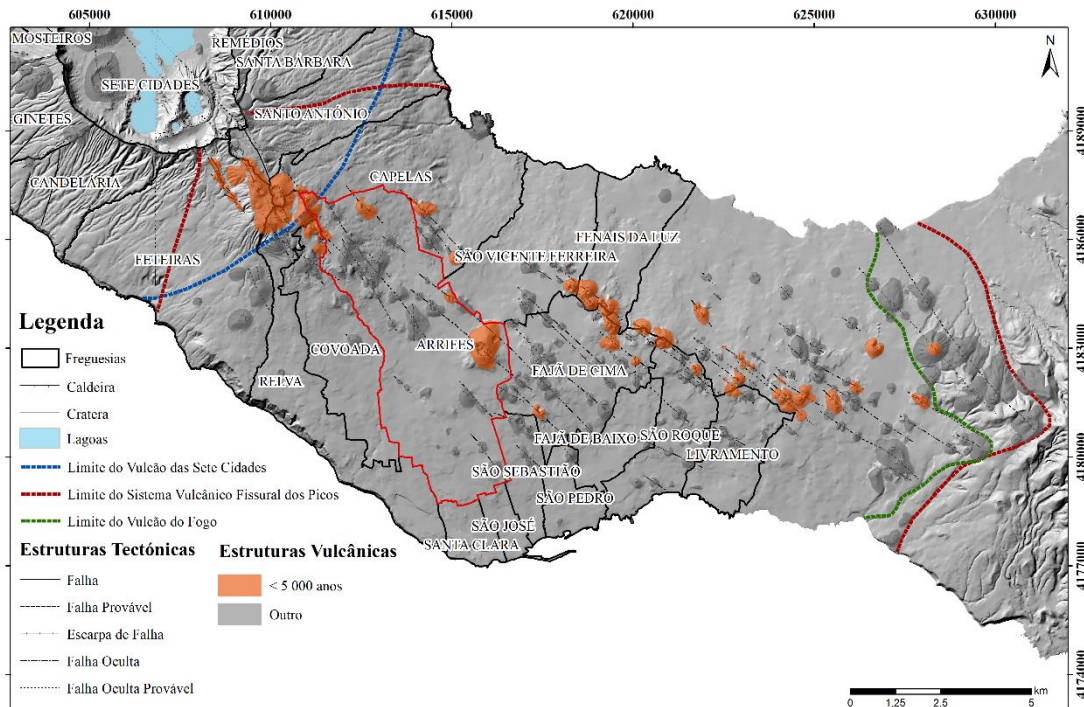


Figura 2.7. Localização dos centros eruptivos com idade inferior a 5 000 anos (adaptado de Ferreira *et al.*, 2015). Realce da freguesia de Arrifes a vermelho. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

2.7.3. Erupções Históricas

O SVFP conta com duas erupções históricas, a primeira ocorrida no ano de 1563 e a segunda no ano de 1652. A erupção de 1563 sucedeu a um evento traquítico centrado na caldeira do Vulcão do Fogo (Weston, 1964; Wallenstein, 1999; Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015).

Em junho de 1563 registou-se uma reativação do Vulcão do Fogo, com incremento da atividade sísmica e vulcânica, da qual se desenvolveu uma erupção subpliniana no interior da caldeira. Após quatro dias, teve início uma erupção efusiva de natureza basáltica de estilo havaiano num domo traquítico localizado no flanco N do Vulcão do

Fogo, o Pico Queimado ou Pico do Sapateiro. A ascensão do magma ocorreu ao longo de uma falha com direção NW-SE e deu origem a duas escoadas lávicas. A primeira escoada lávica seguiu o trajeto da ribeira e dias depois, de uma nova fonte, surgiu uma escoada que foi canalizada ao longo da linha de fratura com direção N-S (Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015; Zanon, 2015).

Os produtos resultantes da erupção do Pico Queimado têm natureza basáltica, a mesma natureza que apresenta a grande maioria do SVFP (Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015).

A erupção de 1652 teve início a 19 de outubro no Pico do Fogo, a N da cidade da Lagoa. O evento desenvolveu-se em três focos eruptivos alinhados segundo a direção NW-SE. Registaram-se fases vulcanianas com emissão de cinzas e piroclastos de queda, e escoadas lávicas viscosas. Decorridos oito dias de erupção, esta findou com a edificação de três domos lávicos traquíticos (Ferreira, 2000; Pacheco *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015).

2.7.4. Vulcanismo Secundário

No SVFP não há registos de manifestações de vulcanismo secundário (Ferreira, 2000), não tendo sido desenvolvidos até ao momento estudos de detalhe de desgaseificação difusa.

2.8. Elementos de Vulnerabilidade

A ilha de São Miguel engloba seis dos 19 concelhos existentes no arquipélago dos Açores, os concelhos de Ponta Delgada, de Lagoa, de Vila Franca do Campo, de Nordeste, de Povoação e de Ribeira Grande. O concelho de Ponta Delgada abrange uma área de 233,68 km², sendo limitado pelos concelhos de Lagoa e Ribeira Grande a E, e cobrindo toda a parte poente da ilha, com um total de 24 freguesias (Revisão do Plano Diretor Municipal de Ponta Delgada (PDMPDL), 2007).

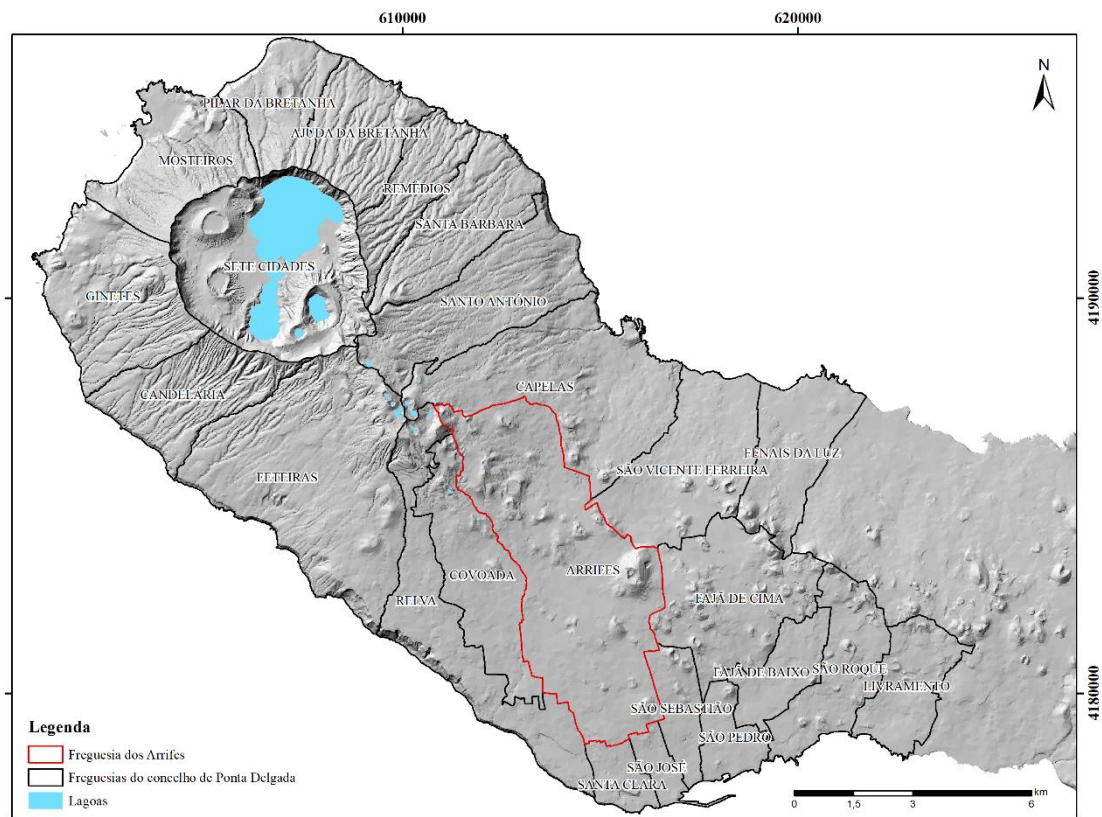


Figura 2.8. Freguesias do concelho de Ponta Delgada, com destaque para a freguesia de Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Na figura 2.8 observa-se a distribuição das freguesias pelo concelho de Ponta Delgada.

A freguesia de Arrifes, zona alvo de estudo, corresponde a uma freguesia interior. Na figura 2.8 verifica-se que o setor N corresponde à área de maior altitude com presença de estruturas vulcânicas e que no setor S o declive atenua e os cones de escórias surgem em menor quantidade.

Na tabela 2.1 observam-se os dados da área de cada freguesia do concelho de Ponta Delgada.

Tabela 2.1. Área em km² das freguesias do concelho de Ponta Delgada.

Freguesia	Área
Ajuda da Bretanha	7,08 km ²
Arrifes	25,36 km²
Candelária	8,68 km ²
Capelas	16,86 km ²
Covoada	9,03 km ²
Fajã de Baixo	4,06 km ²
Fajã de Cima	11,89 km ²
Fenais da Luz	7,66 km ²
Feteiras	23,51 km ²
Ginetes	12,27 km ²
Mosteiros	9,16 km ²
Pilar da Bretanha	6,12 km ²
São José	1,68 km ²
São Pedro	2,94 km ²
São Sebastião	3,34 km ²
Relva	12,08 km ²
Remédios	5,60 km ²
Rosto de Cão (Livramento)	5,59 km ²
Rosto de Cão (São Roque)	7,20 km ²
Santa Bárbara	8,72 km ²
Santa Clara	2,25 km ²
Santo António	11,76 km ²
São Vicente Ferreira	11,43 km ²
Sete Cidades	19,19 km ²

A freguesia de Arrifes conta com uma área de 25,36 km², o que a torna a freguesia com maior extensão territorial do concelho de Ponta Delgada. Seguem-se as freguesias de Feteiras e Sete Cidades, com 23,51 km² e 19,19 km², respetivamente.

2.8.1. População

De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE), em 2021, no concelho de Ponta Delgada residiam 67 229 habitantes, 32 385 homens e 34 844 mulheres.

A distribuição da população desenvolve-se maioritariamente junto à linha de costa, onde as freguesias correspondentes à cidade de Ponta Delgada detêm um terço da população do concelho, sendo o povoamento realizado abaixo da linha de cota dos 250 m (PMEPCPD, 2014).

No que concerne à densidade populacional, o concelho conta com 287,70 hab./km², o que supera a média regional (100,77 hab./km²) e nacional (112,11 hab./km²). No entanto, a distribuição interna é heterogénea, variando entre 2 549 e 37 hab./km², que corresponde à densidade da freguesia de São Pedro e da freguesia de Sete Cidades, respetivamente (INE, 2021).

Na tabela 2.2. observa-se a distribuição da população pelas freguesias, indicando o total de habitantes, o total de habitantes de ambos os géneros e a densidade populacional.

Tabela 2.2. Distribuição da população e densidade populacional do concelho de Ponta Delgada (Instituto Nacional de Estatística, 2021).

Freguesia	Total de habitantes	Total de habitantes homens	Total de habitantes mulheres	Densidade Populacional (hab./km ²)
Ajuda da Bretanha	652	328	324	92,09
Arrifes	7 294	3 506	3 788	287,61
Candelária	976	479	497	112,44
Capelas	3 981	1 961	2 020	236,12
Covoada	1 223	605	618	135,44
Fajã de Baixo	4 924	2 393	2 531	1212,81
Fajã de Cima	3 293	1 604	1 689	276,96
Fenais da Luz	2 227	1 135	1 092	290,73
Feteiras	1 557	766	791	66,23
Ginetes	1 184	586	598	96,50
Mosteiros	1 021	499	522	111,46
Pilar da Bretanha	576	296	280	94,12
São José	5 756	2 507	3 249	3426,19
São Pedro	7 495	3 542	3 953	2549,32
São Sebastião	4 050	1 894	2 156	1212,57
Relva	2 890	1 415	1 475	239,24
Remédios	809	396	413	144,46
Rosto de Cão (Livramento)	4 307	2 096	2 211	770,48
Rosto de Cão (São Roque)	4 590	2 257	2 333	637,50
Santa Bárbara	846	446	400	97,02
Santa Clara	2 804	1 320	1 484	1246,22
Santo António	1 574	761	813	133,84
São Vicente Ferreira	2 499	1 246	1 253	218,64
Sete Cidades	701	347	354	36,51
Total	67 229	32 385	34 844	287,70

A análise da tabela reforça que a população se encontra distribuída de forma heterogénea. As freguesias junto à costa S da ilha são mais densamente povoadas, com uma variação aproximada entre os 4 000 e os 7 500 indivíduos.

A freguesia de Arrifes, cuja extensão territorial é a maior do concelho, conta com uma densidade populacional de 287,61 hab./km², o que se aproxima da média do concelho, no entanto, as freguesias mais densamente povoadas ultrapassam os 1000 hab./km² e têm extensão territorial inferior a 5 km².

No que concerne à distribuição da população por faixa etária, na figura 2.9 observa-se que o grupo com mais indivíduos corresponde à faixa entre os 25 e os 64 anos, representando 57,36 % da população total da freguesia. Segue-se a faixa dos zero aos 14 anos, com 16,62 % da população. As faixas etárias dos 15 aos 24 anos e dos mais de 65,

são os grupos com menos indivíduos, correspondendo cada faixa a 13,33 % e 12,70 %, respetivamente, da população da freguesia de Arrifes.

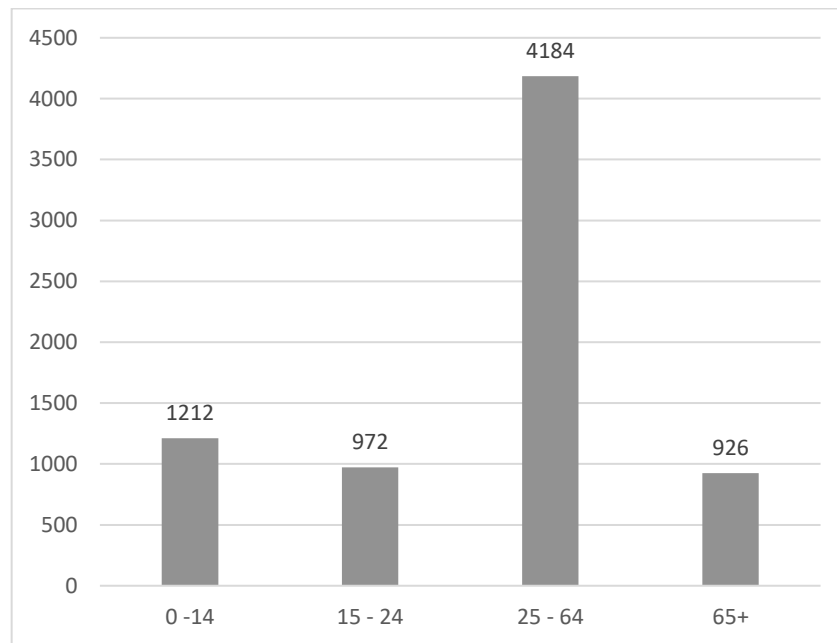


Figura 2.9. Gráfico da distribuição da população de Arrifes pelas faixas etárias (INE, 2022).

De salientar que a freguesia de Arrifes é interior, os limites são outras freguesias do concelho, e que a distribuição da população residente é espacialmente heterogénea. A malha urbana centra-se maioritariamente a S da freguesia. Na figura 2.10 observa-se a diferença na urbanização a N e a S da freguesia de Arrifes.

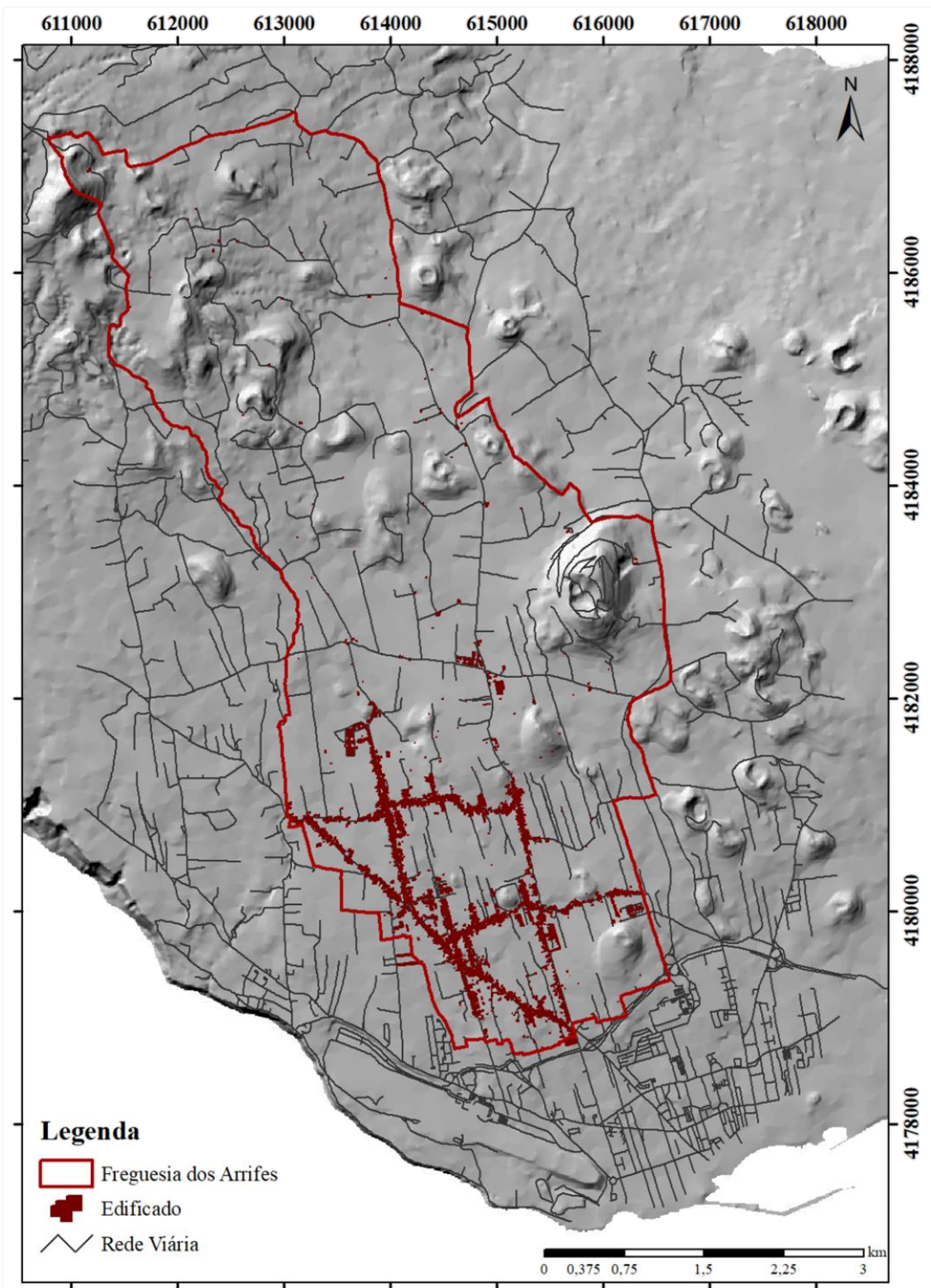


Figura 2.10. Edificado da freguesia de Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

2.8.2. Edificado

No que concerne ao edificado da Região Autónoma dos Açores, de Ponta Delgada, bem como da freguesia de Arrifes, conclui-se, pela análise das tabelas 2.3 a 2.6, que os edifícios são predominantemente construções anteriores ao ano 2000 e com 2 pisos. Salienta-se o facto de serem apresentados neste trabalho apenas os edifícios residenciais, ou seja, o edificado referente aos serviços não está contemplado nas análises. Uma vez que o cenário é uma evacuação noturna e com origem nas habitações, o facto de não estarem representados os serviços não é um entrave, contudo, em trabalhos futuros devem ser tidos em consideração.

Tabela 2.3. Época de construção do edificado do arquipélago dos Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia de Arrifes (INE, 2021).

Época de Construção	Localização		
	Açores	Ponta Delgada	Arrifes
Antes de 1919	6 225	1 034	137
1919 - 1960	20 853	5 920	471
1961 -2000	50 431	11 778	1 174
2001 - 2010	18 647	3 175	313
2011 - 2021	4 322	798	106
Total	100 478	22 705	2 201

Na tabela 2.3. observa-se que a freguesia de Arrifes, à semelhança do verificado no arquipélago e no concelho em que está inserida, tem mais de 50 % do edificado construído entre os anos de 1961 e 2000. Note-se que os intervalos de anos de construção não são homogéneos.

Na freguesia de Arrifes, dos 2 201 edifícios, apenas 106 foram construídos num espaço de 10 anos, entre 2011 e 2021, e cerca de 137 edifícios foram construído antes de 1919.

Tabela 2.4. Número de pisos do edificado do arquipélago dos Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia de Arrifes (INE, 2021).

Número de Pisos	Localização		
	Açores	Ponta Delgada	Arrifes
1 Piso	37 485	6 338	689
2 Pisos	53 969	13 300	1 292
3 Pisos	7 159	2 243	157
4 Pisos	1 372	565	43
5 Pisos	406	186	17
6 Pisos	43	31	2
7 ou mais Pisos	44	42	1
Total	100 478	22 705	2 201

Em relação ao número de pisos dos edifícios, uma vez mais, a freguesia de Arrifes representa um comportamento semelhante ao verificado em geral no arquipélago e no concelho, com um maior número de edifícios com 2 pisos.

Verifica-se ainda que a freguesia em análise conta com 689 edifícios de 1 piso, 1 292 edifícios com 2 pisos, o que corresponde a mais de 50 % do total de edificado, 157 edifícios com três pisos e apenas 1 com sete ou mais pisos.

No que concerne à tipologia do edificado, alerta-se que os valores enunciados na tabela 2.5 correspondem a informação do Instituto Nacional de Estatística de Portugal (2021) e que referem exclusivamente os edifícios que contém parte de habitação, ou seja, excluí os edifícios unicamente de serviços.

Tabela 2.5. Tipo de utilização do edificado do arquipélago dos Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia de Arrifes (INE, 2021).

Utilização	Localização		
	Açores	Ponta Delgada	Arrifes
Exclusivamente Residencial (100 %)	100 066	22 501	2 195
Residencial (50 % e 99 %)	382	188	6
Não Residencial (até 49 %)	30	16	0
Total	100 478	22 705	2 201

Pela análise da tabela verifica-se que na freguesia de Arrifes apenas seis edifícios tem uma utilização entre 50 – 99 % residencial, os restantes 2 195 são exclusivamente residenciais.

Tabela 2.6. Ocupação do edificado do arquipélago do Açores, do concelho de Ponta Delgada e da freguesia de Arrifes (INE, 2021).

Ocupação	Localização		
	Açores	Ponta Delgada	Arrifes
Residência Habitual	85 074	23 924	2 405
Residência Secundária	14 084	1 784	24
Vago para renda/Arrendamento	7 214	1 460	98
Vago por outros motivos	6 787	1 982	155
Total	113 159	29 150	2 682

Relativamente à ocupação do edificado da região, do concelho e da freguesia, verifica-se que mais de 50 % tem como finalidade a residência permanente. Na freguesia de Arrifes destaca-se que 24 edifícios são de residência secundária e 253 estão vagos para arrendamento ou por outros motivos.

Alerta-se para o facto de os dados apresentados nas tabelas anteriores referirem números exatos do Instituto Nacional de Estatística de Portugal (INE) (2021), ao passo que nos próximos capítulos serão apresentados cálculos com o edificado vetorizado da carta militar da ilha de São Miguel à escala 1:25 000 do ano de 2002, concedida pelo Instituto Geográfico do Exército (IGeoE). Utilizou-se a informação vetorizada uma vez que a informação do INE (2021) não tem representação gráfica e no decorrer da metodologia é fundamental ter a distribuição da população pela freguesia. Salienta-se que os dados de ambas as fontes são suficientemente próximos para serem representativos no estudo desenvolvido.

2.8.3. Rede viária

Segundo o Plano Regional de Emergência de Proteção Civil dos Açores (PREPCA) (2019), o arquipélago conta com uma rede viária densa, na qual se integram as redes regionais, municipais, florestais, agrícolas e/ou rurais.

No anexo III e no anexo IV observa-se a rede viária regional da ilha de São Miguel e as vias públicas de comunicação terrestre com respetivas características estabelecidas pelo PREPCA (2019).

A freguesia de Arrifes é delimitada a S pela Estrada Regional – ER N.º 1-1ª, a E pela Estrada Municipal – M501 e a W pela Estrada Regional - ER N.º 9-2.ª. A N da freguesia são comuns os caminhos rurais e/ou agrícolas.

Salienta-se que a malha urbana está concentrada nas rodovias: Rua da Saúde, Rua dos Afonsos, Rua Amaro Dias, Rua do Outeiro e Rua da Piedade, e ainda, nas travessas da Piedade e dos Milagres, que correspondem a caminhos municipais a S da freguesia.

Na figura 2.11 observa-se a rede viária utilizada no presente estudo, evidenciando-se as redes regional, municipal e rural/agrícola. Salienta-se que as estradas utilizadas correspondem à cartografia de base, concretamente à vectorização à escala 1:25 000, da carta militar da ilha de São Miguel do ano de 2002, concedida pelo Instituto Geográfico do Exército (IGeoE), tendo a toponímia sido atualizada com recurso ao PREPCA, ao PDMPDL e ao *Google Maps*.

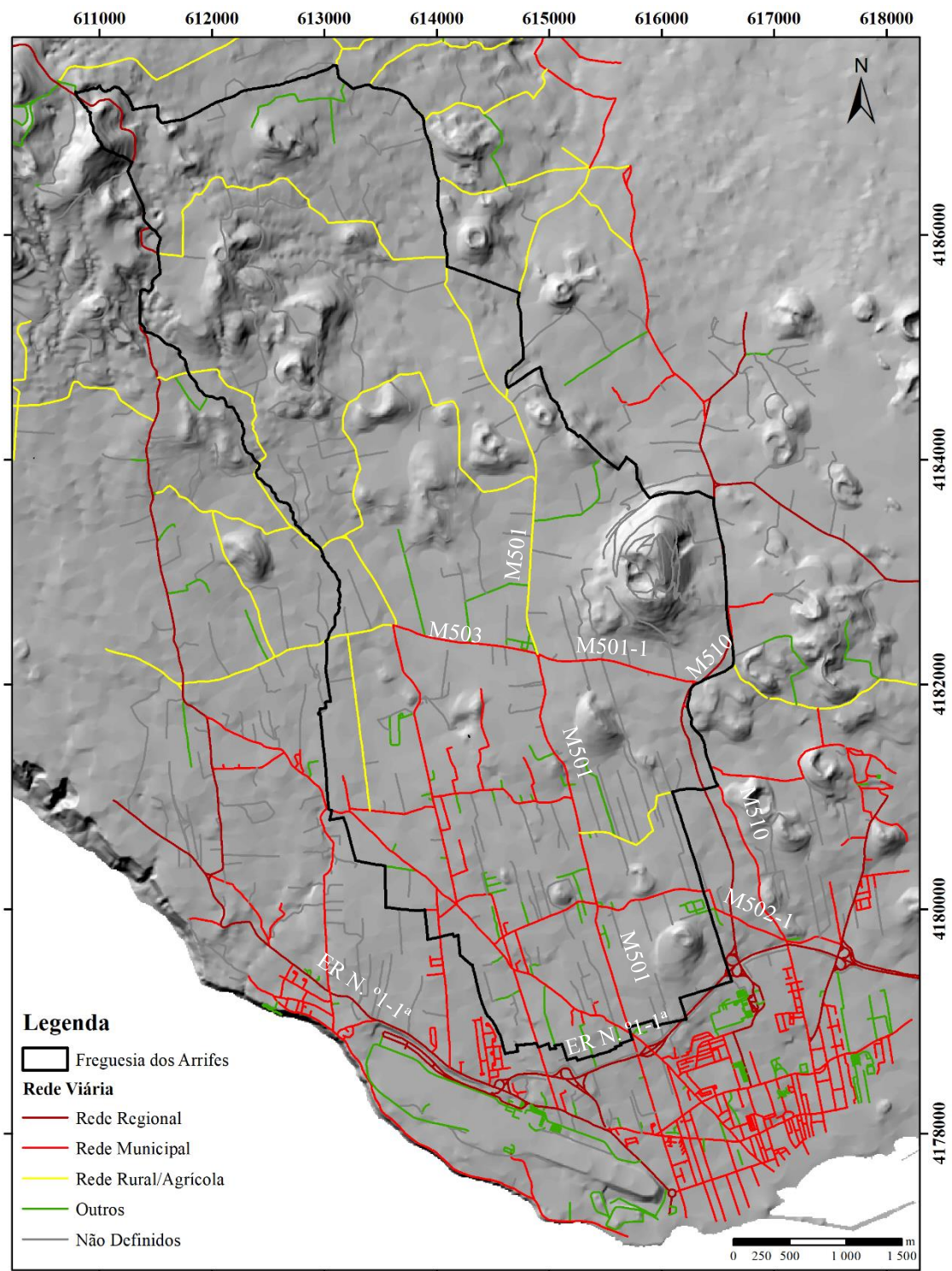


Figura 2.11. Rede Viária da freguesia de Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

2.8.4. Transportes

O parque automóvel da Região Autónoma dos Açores conta com um total de 171 087 veículos, distribuídos pelas categorias apresentadas na tabela 2.7 (Autoridade de Supervisão de Seguros e Fundos de Pensões –ASF, 2021).

Tabela 2.7. Parque Automóvel da Região Autónoma dos Açores e do concelho de Ponta Delgada em 2021 (ASF).

Parque Automóvel	Açores (2021)	Ponta Delgada (2021)
Agrícolas	7 526	1 946
Ciclomotor	3535	899
Ligeiros	143 127	42 923
Motociclos	8 862	2 625
Máquinas Industriais	807	187
Outros Veículos	249	100
Pesados	2 859	975
Reboques	3 539	649
Quadriciclo	575	69
Triciclo	8	2
Total	171 087	50 375

No que concerne à distribuição de veículos por ilha, São Miguel detinha 88 860 veículos em 2021, o que perfaz 51,94 % do parque automóvel total da região.

No concelho de Ponta Delgada existiam 50 375 veículos no ano de 2021, dos quais 42 923 eram veículos ligeiros, o que corresponde a 85% do parque automóvel do concelho (ASF, 2021).

Em relação ao transporte coletivo de passageiros, na ilha de São Miguel este é realizado por três companhias sediadas no concelho de Ponta Delgada: Caetano Raposo e Pereiras (CRP), Auto Viação Micaelense e Varela, CA (*sítio* www.cm-pontadelgada.pt). A empresa CRP conta com uma frota de 53 autocarros de transporte coletivo de passageiros (*sítio*: www.crp-caetanoraposopereiras.pt) e a companhia Varela com 74 autocarros. Para a empresa Auto Viação Micaelense, não foi possível determinar o número de autocarros. Adicionalmente, a Câmara Municipal de Ponta Delgada dispõe de 1 autocarro.

2.8.5. Infraestruturas essenciais

As infraestruturas essenciais ou críticas correspondem à “componente, sistema ou parte deste situado em território nacional que é essencial para a manutenção de funções vitais para a sociedade, a saúde, a segurança e o bem-estar económico ou social, e cuja perturbação ou destruição teria um impacto significativo, dada a impossibilidade de continuar a assegurar essas funções” (Decreto Lei n.º 62/2011, de 9 de maio).

A elaboração desta dissertação conta com uma análise às infraestruturas essenciais existentes na Região Autónoma dos Açores e em particular na freguesia de Arrifes, em

Ponta Delgada. Parte-se do pressuposto que em caso de emergência devem ser conhecidas as estruturas de apoio e as infraestruturas que requerem uma atenção especial, como as escolas e os centros de idosos (Figura 2.15).

2.8.5.1. Aeroportos, Heliportos e Portos

Na Região Autónoma dos Açores existe uma rede de aeroportos e heliportos, que conta com 12 estruturas. Cada uma das ilhas do arquipélago tem um aeródromo e nas ilhas de São Miguel e Terceira existem heliportos (PREPCA, 2019).

No concelho de Ponta Delgada estão localizados 1 aeroporto e 2 heliportos, 1 heliporto certificado instalado no Hospital do Divino Espírito Santo (Figura 2.12), e um heliporto não certificado sediado no Comando Operacional dos Açores (COA), na freguesia de Arrifes (Figura 2.13) (PRECPA, 2019).



Figura 2.12. Heliporto sediado no COA na freguesia de Arrifes (07/05/2023).



Figura 2.13. Heliporto sediado no Hospital Divino Espírito Santo em Ponta Delgada (07/05/2023).

No que concerne à rede portuária, esta abrange todas as ilhas do arquipélago, classificada segundo a dimensão e função dos portos. A Classe A corresponde aos portos

com funções de entreposto comercial com fundo de cota mínima de 7,00 ZH (zettahenry) e cais acostável de pelo menos 400 metros; a Classe B engloba os portos com funções comerciais com fundo de cota mínima de 4,00 ZH e cais acostável de pelos menos 160 metros; a Classe C corresponde a portos de funções mistas de pequeno comércio, transporte de passageiros e pescas; a Classe D engloba os portos destinados à pesca; e a Classe E corresponde a portos de menor dimensão e sem funções específicas (Decreto Legislativo Regional n. 17/94/A, de 18 de maio).

Os portos comerciais das classes A, B e C existem em todas as ilhas, sendo em algumas ilhas apenas um e são geridos pela entidade Portos dos Açores. A Classe D, por vezes observada em núcleos dentro das Classes A, B e C, é gerida pelo departamento do governo regional com competência em matéria de pescas. Os portinhos são geridos pelo departamento do governo regional com competência em matéria de mar (PREPCA, 2019).

Na ilha de São Miguel, no concelho de Ponta Delgada está localizado um dos dois maiores portos em termos de capacidade da região, capaz de receber navios de todas as dimensões (PREPCA, 2019).

A freguesia de Arrifes, por ser uma freguesia interior, não tem portos, no entanto uma eventual erupção vulcânica nesta freguesia poderá afetar a operacionalidade do porto.

2.8.5.2. Rede de Telecomunicações

Em matéria de telecomunicações, uma publicação da Autoridade Nacional de Comunicações (Matos, 2017) refere que existem a operar nos Açores nove operadores de serviços telefónico fixo, oito operadores de internet fixa, quatro operadores de TV por subscrição, dois operadores de redes de alta velocidade e dois operadores do serviço telefónico móvel. O serviço fixo cobre todo o território, tal como o serviço móvel, existindo algumas zonas pouco povoadas com limitação na cobertura.

Em caso de emergência, a região está dotada de uma Rede Integrada de Telecomunicações de Emergência da Região Autónoma dos Açores (RITERAA), propriedade do Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores (SRPCBA) (PREPCA, 2019).

A RITERAA assenta no *standard* DMR (Digital Mobile Radio), composta por uma Rede de Acesso designada por Estações Base/Repetidores, cujos terminais acedem para processar a comunicação, e uma Rede de Transmissão, que interliga as Estações Base. A

exploração deste sistema é feita de forma fixa, por exemplo nos hospitais, de forma móvel, pelos veículos de emergência, embarcações ou aeronaves, ou de forma portátil, por exemplo pelas equipas especiais (PREPCA, 2019).

Esta rede entrou em funcionamento em setembro de 2016 e utiliza radiofrequência com 30 estações base e seis canais em cada e cobre 95% do território açoriano e 98% da população (Dias, 2016; Silva, 2022).

2.8.5.3. Hospitais e Centros de Saúde

No que concerne ao sistema de saúde, a região tem uma rede de unidades de saúde em todas as ilhas, contando com três hospitais públicos, localizados nos concelhos de Angra do Heroísmo (Terceira), Horta (Faial) e Ponta Delgada (São Miguel). As Unidades de Saúde de cada ilha funcionam como unidades básicas de urgência (PREPCA, 2019).

Na ilha de São Miguel foi inaugurado em março de 2021 o Hospital Internacional dos Açores de gestão privada, localizado no concelho da Lagoa. No total, na ilha existem atualmente dois hospitais e seis centros de saúde.

O Hospital do Divino Espírito Santo em Ponta Delgada está localizado no limite entre a freguesia de Arrifes e a freguesia de São Sebastião, por esta razão é importante salientar que uma erupção que afete a freguesia de Arrifes poderá também afetar o único hospital público da ilha.

Na freguesia de Arrifes existe uma unidade de saúde sediada na junta de freguesia, qua funciona das 8h30 às 16h30 de segunda a sexta-feira.

2.8.5.4. Serviços Municipalizados de Água e Saneamento Básico

Os Serviços Municipalizados de Água e Saneamento da Câmara Municipal de Ponta Delgada visam garantir o fornecimento de água com qualidade e o tratamento de águas residuais (*sítio*: www.smaspdl.pt).

Atualmente no concelho de Ponta Delgada existem 46 nascentes e quatro furos, dos quais dois localizados na freguesia de Arrifes, o furo de captação da Lagoa do Conde 1 e o furo de captação da Lagoa do Conde 2. Adicionalmente, existem cerca de 61 reservatórios na ilha, estando quatro localizados na freguesia de Arrifes. Na figura 2.14 observa-se o reservatório da Carreira nos Arrifes (*sítio*: www.smaspdl.pt).



Figura 2.14. Reservatório da Carreira na freguesia de Arrifes (07/05/2023).

Valente *et al.* (2022), defendem que em caso de erupção subpliniana no Vulcão das Sete Cidades, o sistema de abastecimento de água do concelho será parcial ou totalmente interrompido. E acrescentam, ainda, que as localizações das captações de água colocam impedimentos adicionais à prevenção e mitigação do impacto de uma erupção sobre o sistema de abastecimento de água do concelho.

A freguesia de Arrifes tem furos de captação de água, reservatórios e tubagens de abastecimento, o que deve ser incluído aquando do planeamento de emergência para a área, uma vez que esta rede é suscetível de ser afetada por uma erupção vulcânica do Vulcão das Sete Cidades e/ou do SVFP. Nos cenários elaborados para a área de estudo o reservatório da Carreira é totalmente afetado.

2.8.5.5. Infraestruturas de armazenamento e produção de energia e de combustíveis

a) Energia elétrica

Nos Açores a produção de energia elétrica advém, essencialmente, de fontes fósseis (fuelóleo e gasóleo) e de fontes de energia renovável, nomeadamente geotérmica, hídrica e eólica. Em 2019, cerca de 37,5 % da energia produzida na ilha de São Miguel, foi energia geotérmica, a qual dominou em termos de energias renováveis, seguida de 5,3 % de energia hídrica e 4 % de energia eólica (*sítio*: www.portaldaenergia.azores.gov.pt).

Na área de estudo, atualmente não se encontram centrais de produção de energia elétrica, nem uma eventual erupção vulcânica na freguesia de Arrifes deverá afetar a produção energética.

b) Combustíveis

Em 2017, existiam cerca de 27 estabelecimentos de armazenamento de combustíveis licenciados na região, dos quais quatro em São Miguel, três sediados no concelho de Ponta Delgada, a Armazenagem e Comércio de Combustíveis (Bencom) – que armazena essencialmente gasóleo e fuelóleo, a Produtos Petrolíferos dos Açores (Petroaçores) – que armazena gasolinhas, a Jet A1, petróleo, gasóleo e misturas, e a Sociedade Açoreana de Armazenamento de Gás (SAAGA) – com armazenamento de gás butano (PREPCA, 2019).

Na freguesia de Arrifes não existem estabelecimentos de armazenamento de combustíveis. No entanto os três armazenamentos existentes do concelho de Ponta Delgada estão sediados na freguesia de Santa Clara, que é uma freguesia fronteiriça à freguesia em análise.

2.8.5.6. Estabelecimentos de Ensino

No arquipélago dos Açores, o sistema educativo é assegurado por entidades públicas e privadas. A rede pública conta com 40 unidades, das quais 17 escolas do Ensino Básico, oito do Ensino Secundário, 13 do Ensino Básico e Secundário, uma escola Profissional e um Conservatório (Secretaria Regional da Educação e dos Assuntos Culturais, 2022).

De acordo com as estatísticas da educação para o ano letivo 2020/2021 da Secretaria Regional da Educação e dos Assuntos Culturais, na Região Autónoma dos Açores estavam matriculados 38 941 alunos. Estes dados incluem a educação pré-escolar, o ensino básico e o ensino secundário. O concelho de Ponta Delgada no ano letivo 2020/2021 contava com um total de 12 259 alunos matriculados (Secretaria Regional da Educação e dos Assuntos Culturais, 2022).

Na freguesia de Arrifes, existem: quatro escolas de ensino básico, a EB1/JI Cardeal Humberto Medeiros, a EB1/JI de Milagres, a EB1/JI de Outeiro e a EB1/JI Engenheiro José Cordeiro; uma escola básica de 2º e 3º ciclo, a Escola Básica 2/3 de Arrifes e uma escola profissional, a EPROSEC – Escola Profissional do Sindicato dos Profissionais de

Escritório, Comércio, Indústria, Turismo, Serviços e Correlativos da Região Autónoma dos Açores (*sítio* www.arrifes.pt).

No ano letivo de 2020/2021, estavam matriculados na escola pública da freguesia, a Escola Básica 2/3 de Arrifes, cerca de 843 alunos (Secretaria Regional da Educação e dos Assuntos Culturais, 2022). Os dados relativos às escolas privadas não estão disponíveis para consulta pública.

Desde outubro de 2012 que existe nesta freguesia uma instituição particular de solidariedade social, o Centro Social e Paroquial de Arrifes. Este centro é utilizado como infantário – O Anjo da Guarda, e como centro de atividades livres. Com capacidade para 80 crianças, este centro visa promover e integrar a população jovem residente na freguesia. Com o mesmo objetivo existe ainda um núcleo ativo do Corpo Nacional de Escuteiros, o agrupamento 433 (*sítio* www.arrifes.pt).

2.8.5.7. Outros Edifícios Públicos

Os edifícios públicos a referir são infraestruturas com potencialidade para agregar elevado número de pessoas, se assim for necessário, em caso de emergência, como escolas e pavilhões desportivos.

As instalações desportivas na freguesia de Arrifes localizam-se: 1) na EB 2/3 de Arrifes – um pavilhão interior e dois campos de cimentos exteriores; 2) no Campo de Futebol da Águia Clube Desportivo – um campo sintético; 3) no Jardim D. Leonor Afonso – jardim polidesportivo com um campo de cimento; 4) no Regimento n.º 2 – um campo relvado e um campo de cimento; 5) na EPROSEC – um pavilhão interior, um campo sintético e um jardim; 6) na Travessa dos Milagres – campos de cimento e 7) no COA – um campo relvado (Gabinete de Apoio ao Desporto, 2013).

Para além das escolas e polidesportivos acima referidos, as instituições religiosas também podem constituir locais de agregação de população. Assim sendo, na freguesia de Arrifes existem três igrejas: a Igreja de Nossa Senhora da Saúde, a Igreja de Nossa Senhora da Piedade e a Igreja de Nossa Senhora dos Milagres (*sítio* www.arrifes.pt).

2.8.6. Infraestruturas Essenciais de apoio à Gestão da Crise

Durante a gestão de uma crise são várias as infraestruturas que podem ser mobilizadas, consoante o nível associado à gravidade da situação (Figura 2.15). Destaca-se o Serviço

Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores e o Serviço Municipal de Proteção Civil de Ponta Delgada.

Salienta-se que os agentes de proteção civil com atribuições próprias nos Açores são o Corpo de Bombeiros, as Forças de Segurança, as Forças Armadas, as Autoridades Marítima e Aeronáutica e os serviços de saúde (*sítio*: www.proci.v.azores.gov.pt/).

2.8.6.1. Infraestruturas de Força e de Segurança

Em Portugal são três as forças de segurança com abrangência nacional, a Guarda Nacional Republicana (GNR) – cuja missão, no âmbito nacional de segurança e proteção, é a de assegurar a legitimidade democrática, garantir a segurança interna e os direitos dos cidadãos e, ainda, colaborar na execução da política de defesa nacional, segundo a Constituição (*sítio*: www.gnr.pt). A Polícia de Segurança Pública (PSP) – que visa, em situações de normalidade, desenvolver atividades da política de segurança interna e em situações de exceção (estado de sítio e estado de emergência), agir segundo a legislação da defesa nacional (*sítio*: www.psp.pt). A Polícia Marítima (PM) – à qual compete a coordenação das atividades a executar pela Marinha, pela Direção Geral da Autoridade Marítima (DGAM) e pelo Comando Geral da Polícia Marítima (CGPM), nos espaços públicos e marítimos sob soberania e jurisdição nacional (*sítio*: www.amn.pt/).

Na Região Autónoma dos Açores operam as três forças de segurança, a GNR, com um destacamento territorial por ilha e com a sede do Comando Territorial dos Açores em Ponta Delgada, a PSP que se encontra repartida por 28 unidades territoriais, sendo que 13 estão localizadas na ilha de São Miguel, das quais cinco no concelho de Ponta Delgada (1 - Relva, 2 - São Sebastião, 1 - São Pedro e 1 - Capelas), e por último, existem seis comandos locais da PM nos Açores, um na ilha de São Miguel, no concelho de Ponta Delgada (São José).

Salienta-se que nas ilhas de São Miguel, Terceira, Faial e Santa Maria localizam-se, ainda, instalações das Forças Armadas, das quais se destaca o Comando Operacional dos Açores (COA) na freguesia de Arrifes em Ponta Delgada, que visa ligar as Forças Armadas (nos seus três ramos: exército, marinha e força aérea) com as restantes entidades de Proteção Civil, e o Regimento n.º 2 de Guarnição de Arrifes, unidade do exército português, criada em 1993 como resultado da fusão entre o Regimento de Infantaria de Ponta Delgada e o Grupo de Artilharia de Guarnição N.º 1 (*sítio*: www.exercito.pt).

Além das forças armadas e de segurança apresentadas anteriormente, cada município pode ser dotado de uma estrutura vocacionada para funções de polícia administrativa, a Polícia Municipal. A esta cabe fiscalizar, na área da sua jurisdição, o cumprimento das leis e dos regulamentos que disciplinam matérias relativas às atribuições do município e à competência dos seus órgãos (Decreto Lei n.º 19/2004, de 20 de maio).

No concelho de Ponta Delgada, na freguesia de São Sebastião, localiza-se o posto da Polícia Municipal que conta atualmente com 25 ativos.

Destaca-se ainda a existência de guardas-florestais no arquipélago dos Açores, que, apesar de ter sido uma carreira dissolvida no estatuto da GNR no continente português, nas regiões autónomas integra o Governo Regional com competência em matéria florestal. Os polícias florestais visam “assegurar as ações de polícia em matéria florestal, de caça e pesca em águas interiores, baldios e caminhos florestais e rurais, bem como funções de gestão do perímetro e património florestal, caminhos florestais, rurais e imóveis e reservas florestais de recreio (...)” (Decreto Legislativo Regional n.º 23/2020/A).

2.8.6.2. Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores

O Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores (SRPCBA) visa orientar, coordenar e fiscalizar, a nível regional, as atividades de Proteção Civil e dos Corpos de Bombeiros. Este serviço está localizado no concelho de Angra do Heroísmo, na ilha Terceira (*sítio*: www.prociv.azores.gov.pt).

O Corpo de Bombeiros é responsável pelas ações de combate a incêndios, busca e salvamento, apoio e transporte de doentes, devendo colaborar na evacuação primária, na construção de postos de triagem e de postos de comando, e ainda dar apoio logístico à população e às outras forças intervenientes (PREPCA, 2019).

Na Região Autónoma dos Açores existem 17 quartéis de bombeiros, cinco dos quais na ilha de São Miguel, distribuídos pelos concelhos de Ponta Delgada, Ribeira Grande, Vila Franca do Campo, Povoação e Nordeste (PREPCA, 2019).

A freguesia de Arrifes não tem quartel de bombeiros, estando o mais próximo localizado a aproximadamente 6 km a SE dos limites administrativos, na rua de São Gonçalo na freguesia da Fajã de Baixo. Ou seja, uma eventual erupção vulcânica na freguesia não deverá afetar o quartel de bombeiros do município.

2.8.6.3. Segurança e Proteção Civil no concelho de Ponta Delgada

No concelho de Ponta Delgada, fazem parte da segurança e da proteção civil o Serviço Municipal de Proteção Civil, o Comando Municipal de Operações de Emergência de Proteção Civil (CMOEPC) e a Polícia Municipal. O Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPDL) e as Medidas de Autoproteção são ferramentas para auxílio à segurança e à atividade da Proteção Civil (*sítio*: www.cm-pontadelgada.pt).

O Serviço Municipal de Proteção Civil de Ponta Delgada visa assegurar no município o funcionamento da proteção civil, desenvolvendo atividades de planeamento e preparação para situações de normalidade e de emergência. Conforme consta no PMEPCPDL (2014), o CMOEPC é ativado em caso de acidente grave, catástrofe ou calamidade no município.

O Serviço Municipal de Proteção Civil de Ponta Delgada está localizado na freguesia de São Pedro, no entanto, salienta-se o facto de existir uma “Unidade Local de Proteção Civil” na freguesia de Arrifes desde 2017. Esta unidade está associada à Junta de Freguesia e funciona em parceria com o Serviço Municipal de Proteção Civil de Ponta Delgada. O objetivo principal é o de assinalar situações do âmbito da proteção civil e auxiliar situações de emergência.

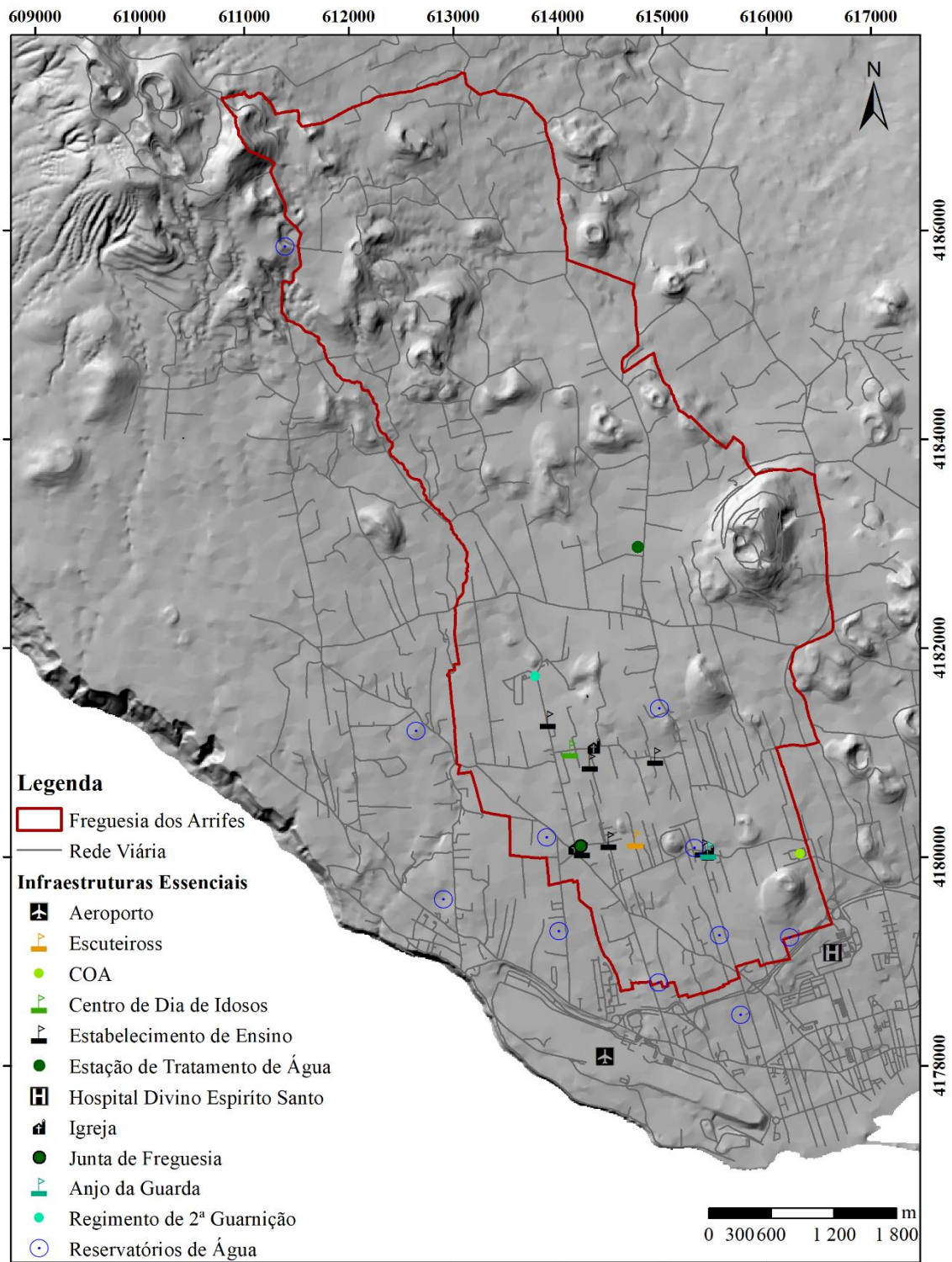


Figura 2.15. Infraestruturas Essenciais da freguesia de Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

2.8.7. Usos do Solo

Um aspeto a considerar é a diferente utilização do solo que, conseqüentemente, representa diferentes vulnerabilidades. No anexo V observa-se o Plano Diretor Municipal de Ponta

Delgada, destacando-se a freguesia de Arrifes. Neste é passível identificar as áreas florestais e áreas agrícolas, averiguando-se que correspondem a mais de metade da freguesia.

A freguesia de Arrifes é composta por aproximadamente 13 % de solo urbano e 87 % de solo rural, subdividindo-se este em solo florestal (~19 %) e em solo agrícola (~68%). Como referido anteriormente, o solo urbano concentra-se na zona S da freguesia, a qual será o alvo de análise deste trabalho (PDMPDL, 2007).

CAPÍTULO III – METODOLOGIA

3.1. Estudos Anteriores

A evacuação é a mais comum resposta a uma emergência e representa uma estratégia eficiente quando a suscetibilidade a um perigo coloca a população próxima em risco (Moriarty *et al.*, 2007). A importância de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) durante uma emergência, nomeadamente no acesso a dados atualizados, permite auxiliar uma resposta apropriada, essencialmente na fase de evacuação (Cole *et al.*, 2005).

Nos últimos anos têm sido apresentados vários estudos que demonstram a resposta da população a cenários de crises sismovulcânicas, nomeadamente incluindo modelação de ações de evacuação (*eg.* Cole *et al.*, 2005; Jumadi *et al.*, 2017.).

A integração do SIG para auxiliar a decisão tem tido um papel relevante ao longo dos anos. Diversos são os trabalhos e modelos apresentados que fundamentam o impacto positivo do SIG (*eg.* Pareschi *et al.*, 2000; Yeh e Chow, 1996). Na tabela 3.1 apresentam-se os autores e os respetivos modelos de discussão da aplicabilidade do SIG a cenários reais.

Tabela 3.1. Modelos de aplicação dos SIG, nomeadamente na modelação da população perante perigos e na seleção ótima de localizações importantes para cada estudo. *Modelo que gera interações entre diferentes agentes autónomos, simulando o comportamento de um sistema.

Autor	Modelo	
	Input em SIG	Output
Yeh e Chow (1996)	<ul style="list-style-type: none">• Distribuição da População• Distribuição de Espaços ao ar livre (existentes e em planeamento)• Ferramenta <i>Location-Allocation</i>• <i>Software ArcInfo</i>	<ul style="list-style-type: none">• Localização ótima para novos espaços ao ar livre
Cole <i>et al.</i> (2005)	<ul style="list-style-type: none">• Cenário (história eruptiva e direção do vento)• Rede Rodoviária• Zonas de Evacuação (primária e secundária)• Distribuição da População• Transportes Privados e Públicos• Pontos de Encontro• Centros de Realojamento• Natureza, número e distribuição dos grupos vulneráveis	<ul style="list-style-type: none">• Mapas de perigosidade• Rotas de Evacuação• Base de dados (recursos, população, transportes e de serviços públicos)
Tomsen <i>et al.</i> (2014)	<ul style="list-style-type: none">• Cenário (história eruptiva)• Distribuição da População (noturna e diurna)• <i>ArcGIS (spatial analysis e vulnerability analysis)</i>	<ul style="list-style-type: none">• Distribuição e quantificação da população a evacuar (dia e noite)• Distribuição e quantificação da população de baixa mobilidade• Acesso da população à rede de transportes públicos

Tabela 3.1. Continuação.

	<ul style="list-style-type: none"> • Rede Rodoviária (<i>network dataset e transportation network</i>) • <i>Software TransCAD</i> • Zonas de Evacuação • Pontos de Encontro • Centros de Realojamento • Pontes 	<ul style="list-style-type: none"> • Vulnerabilidade das pontes e importância do transporte marítimo • Zonas de baixo ou de elevado índice de capacidade de evacuação • Impacto das deslocações diurnas da população na evacuação • Evacuação intrarregional e evacuação inter-regional
Jumadi et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Cenário (história eruptiva) • Limites Administrativos • Usos do Solo • Distribuição da População • Rede Rodoviária • Pontos de Encontro • Centros de Realojamento • <i>Software Anylogic</i> • Modelo <i>Agent Based-Model (ABM)*</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidade da população em risco • Resultados da simulação de diferentes cenários (Índice de explosividade vulcânica e duração da crise) • Densidade/congestionamento das estradas • Distribuição dos evacuados • Tempo de evacuação • Dinâmica da evacuação
Jumadi et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Cenário (história eruptiva) • Alertas Vulcânicos • Zonas de risco vulcânico • Centros de Realojamento • Limites Administrativos • Uso do Solo • Rede de Transportes • Distribuição da População • Questionários para perceção do comportamento da população fase uma evacuação • Modelo <i>Agent Based Model (ABM)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição espacial e temporal da população • Dinâmica e evolução do cenário • Concentração do Congestionamento
Qasim et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Rede Rodoviária • Quantidade de transportes públicos e privados • <i>Software TransCAD</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de tráfego rodoviário • Capacidade de Transporte • Concentração do congestionamento
Wild et al. (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • Cenário (história eruptiva) • Zonas de evacuação, rede de comunicação e responsabilidades durante a evacuação • Distribuição da População • Comportamento da população • Quantidade de indivíduos com veículos privados • Capacidade do transporte público • Capacidade das estradas • Rede de Transportes 	<ul style="list-style-type: none"> • Número e distribuição da população a evacuar • Número e distribuição da população que necessita de transporte público para evacuar • Tempo total da evacuação • Distribuição espacial do tempo de evacuação

No presente trabalho destacam-se as metodologias utilizadas por Tomsen *et al.* (2014) e Wild *et al.* (2021), os quais pretendem responder ao tempo necessário para uma evacuação decorrer face a um cenário vulcânico.

Tomsen *et al.* (2014) tiveram por objetivo estudar a capacidade de evacuação de Auckland (Nova Zelândia) e analisar a capacidade da rede de transporte. Para tal,

salientaram quatro componentes para o planeamento de uma evacuação: as condições que levam à necessidade de evacuar; a população que estará em risco; as rotas de evacuação e os destinos; e o tempo e os recursos necessários para evacuar a população em risco.

A metodologia desenvolvida por Tomsen *et al.* (2014), inicia com a análise das quatro componentes, seguida da adaptação do modelo de definição de zonas de evacuação de Sandri *et al.* (2012), para o limite das zonas a evacuar, e da recolha de dados estatísticos da população e de dados geoespaciais das estradas de Auckland, fornecido pelo Governo Regional de Auckland.

Os autores constroem uma área de estudo e analisam a quantidade populacional a evacuar. Para a área de estudo adaptam a delimitação de Lindsay (2010), que reflete a continuidade da geologia subjacente ao campo vulcânico de Auckland e reconhecem a possibilidade de ocorrerem erupções fora do mesmo. Contudo, Tomsen *et al.* (2014) adaptaram o modelo para uma elipse, em vez de um retângulo como sugerido por Lindsay (2010), justificando que os campos vulcânicos normalmente têm uma forma mais oval.

Para a população a evacuar, Tomsen *et al.* (2014) recorrem aos dados estatísticos da Nova Zelândia (censos), de onde tiram a informação da população residente. Os movimentos pendulares permitem a análise da população durante as duas fases do dia, a população diurna e a população noturna. A população noturna é a registada pelos censos, enquanto a população diurna resulta dos movimentos pendulares, ou seja, dos trabalhadores e dos estudantes que entram na área de estudo e dos trabalhadores e estudantes que saem da área de estudo, o que resulta na seguinte equação (Equação 3.1):

$$\begin{aligned} \text{População Diurna} = & \text{População Noturna (censos)} + \text{Trabalhadores na Área} + \\ & \text{Estudantes na Área} - \text{Trabalhadores fora da Área} - \\ & \text{Estudantes fora da Área} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.1.})$$

A densidade populacional de cada bairro foi determinada preliminarmente e transformada em valores populacionais recorrendo ao *software ArcGIS* (2009). Adicionalmente, nem toda a população tem acesso a veículo privado, optando Tomsen *et al.* (2014), por um levantamento da população sem veículo por cada bairro, calculado segundo as equações 3.2 e 3.3:

$$\begin{aligned} \text{População de Baixa Mobilidade (diurna)} = & \text{Edifícios sem Veículos} * \\ & \text{Média da Habitação} \end{aligned} \quad (\text{Eq 3.2.})$$

e

$$\text{População de Baixa Mobilidade (noturna)} = (\text{Edifícios sem Veículos} * \text{Média da Habitação}) + \text{Matrículas Escolares} \quad (\text{Eq. 3.3.})$$

Estas estimativas permitiram analisar a população que necessita de transporte público para evacuar. As crianças surgem na equação pelo facto de se assumir que durante o dia nenhuma criança procede à evacuação por veículo privado.

Tomsen *et al.* (2014) utilizam as ferramentas da *Network Analysis (software ArcGIS)* para determinar a geografia entre diferentes centros de transporte e o destino da evacuação e, ainda, para analisar a vulnerabilidade das pontes principais de autoestradas contidas integralmente em Auckland.

Para a elaboração da *Network Dataset*, utilizaram todas as estradas e caminhos exclusivos a pé e a informação da população diurna e da população noturna por bairro. Além destes dados, incluíram as paragens de transportes públicos, os acessos a barcos, marinas e as instalações de saúde. Determinando nos cálculos que os evacuados deveriam se encontrar a 30 minutos no máximo, entre a sua localização e o ponto de partida (paragens de autocarros ou portos) (Tomsen *et al.*, 2014).

Tomsen *et al.* (2014) utilizaram a *Vulnerability Analysis* para estudar a vulnerabilidade das pontes com base na probabilidade de qualquer uma das estruturas se encontrar dentro do raio de evacuação designado. Isto para averiguar qual a probabilidade de uma ponte ser afetada pela erupção e, portanto, não poder ser utilizada durante a evacuação.

O último passo da metodologia de Tomsen *et al.* (2014) corresponde à análise a microescala e a macroescala da vulnerabilidade de evacuação. A avaliação da microescala é obtida com base em índices de população a dividir pela capacidade de saída, uma adaptação de Cova e Church (1997). Além disto, foram contruídos modelos *TransCAD* (programa em SIG especializado na modelação de transportes, criado por *Caliper Corporation*) para avaliar a viabilidade dos movimentos ao longo da rede viária regional de Auckland e para determinar o grau de impacto no período de evacuação, testando várias variáveis independentes em macroescala.

Assim, em Tomsen *et al.* (2014), o desenvolvimento da metodologia levou à demonstração da considerável quantidade populacional a evacuar em caso de erupção vulcânica e a dimensão dos impactes na população e/ou nas infraestruturas, o que requer um planeamento considerável.

Na sequência de Tomsen *et al.* (2014), Wild *et al.* (2021), desenvolveram um modelo de suporte para a gestão e planeamento de uma crise vulcânica e ilustraram como o mesmo pode ser aplicado para uma erupção no campo vulcânico de Auckland. Para isso, recorreram ao Exercício Ruamoko (2008) (Auckland Region CDEM Group, 2008) como cenário do estudo e a Tomsen *et al.* (2014) para caracterizar as zonas de evacuação, a população diurna e noturna a evacuar, as rotas e os transportes definidos. Adicionalmente, utilizaram métodos de análise espacial para avaliar a exposição da população discriminando a população com transporte privado e as áreas que requerem apoio de transportes públicos para evacuar.

Enquanto o estudo de Tomsen *et al.* (2014) prevê um cenário ideal, ou seja, não conta com os tempos de decisão de evacuação, de notificação da população e preparação para evacuar, a metodologia de Wild *et al.* (2021) acrescenta a avaliação da população exposta e o conceito de tempo antes de desencadear a evacuação.

O modelo de trabalho aplicado em Wild *et al.* (2021), segue o esquema apresentado na tabela 3.2:

Tabela 3.2. Modelo de trabalho para definição de evacuação segundo Wild *et al.* (2021).

Geral	Específico para Auckland
Contexto do Perigo	Cenário Provável
Procedimentos e Políticas Oficiais	Plano de Contingência (zonas de evacuação, comunicações operacionais, responsabilidades e papéis de cada entidade)
População	Dados Estatísticos de Auckland
Meios de Transporte	Comportamentos da população em erupções anteriores
Estradas de Evacuação	Dados da Capacidade das Estradas
Fases Temporais de Evacuação	Estudos das três primeiras fases de evacuação de acordo com análises de eventos anteriores.

Com esta informação, Wild *et al.* (2021), analisaram a exposição da população, o acesso a transportes e o tempo de evacuação. Para a análise da população exposta avaliaram a variabilidade espacial do número de pessoas dentro da zona de evacuação primária e zona de evacuação secundária. Utilizaram o *multibuffer* de forma a limitar as zonas de evacuação, adicionando os dados da população de acordo com as estatísticas da região, e elaboraram um mapa com a urbanização.

Para a análise da população exposta acrescentaram informação sobre os dados de habitações e veículos privados, permitindo calcular o número de carros por habitação, seguindo a equação 3.2:

$$\begin{aligned} \text{Carros} = & n_{hh}(1 \text{ carro}) + n_{hh}(2 \text{ carro}) * 2 + n_{hh}(3 \text{ carro}) * 3 + n_{hh}(4 \text{ carro}) * 4 + \\ & n_{hh}(5 \text{ carro}) * 5 \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.2.})$$

n_{hh} – Total de população com n veículos.

A estimativa da população sem acesso a veículos é calculada posteriormente, segundo a equação 3.3:

$$\begin{aligned} \text{População Sem Acesso a Veículos} = & \text{Número de Habitações Sem Veículos} * \\ & \text{Ocupação Média por Habitação} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.3.})$$

Com estes dados, Wild *et al.* (2021) apresentaram mapas com a distribuição de veículos em Auckland e, ainda, mapas com a soma da população com veículos e a população estimada sem veículos dentro da zona a evacuar.

A análise do tempo de evacuação compreende o somatório de quatro períodos: tempo de decisão das autoridades para declarar evacuação, tempo de notificação à população da necessidade de evacuar, tempo de preparação e tempo de viagem. Sendo que, para as três primeiras fases o tempo é calculado de forma análoga a evacuações anteriores. Contudo, este método apresenta uma limitação, a carência de exemplos de evacuação vulcânica em outros países desenvolvidos, que sejam semelhantes a nível de quadros legislativos, acesso a veículos e transportes públicos (Wild *et al.*, 2021).

Segundo Wild *et al.* (2021), o tempo total para evacuar resulta das seguintes fases:

1ª Fase - Tempo de Decisão

O tempo de decisão corresponde ao período temporal entre o alerta dos cientistas às autoridades da deteção do período de instabilidade e as autoridades declararem a necessidade de evacuar. Deve ser registada reativação do sistema vulcânico, através da monitorização, e proceder a uma correta gestão de emergência.

Contudo, existe pouca informação sobre o tempo da tomada de decisão por parte das autoridades e, portanto, o tempo estimado para cada decisão publicada foi atribuído por Wild *et al.* (2021) dentro de uma distribuição exponencial por meio de análise contra factual, o que resultou na equação 3.4:

$$P(T \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{Eq. 3.4.})$$

λ – Tempo calculado a partir do evento mediano

P – Probabilidade

T – Início da reativação do sistema vulcânico

t – Decisão de evacuar

2ª Fase – Tempo de Notificação

O tempo de notificação corresponde ao período temporal entre a decisão de evacuação ser tomada pelas autoridades e a população ser notificada da notícia. Wild *et al.* (2021) utilizaram o modelo de Lindell (2008) para calcular o tempo que decorre até à população ser notificada. Este estudo engloba métodos de transmissão formais e informais. A notificação pode também ser realizada por várias vias (rádio, televisão, mensagem, email, redes sociais, entre outros), o que destaca um aumento no período inicial de notificação.

Para a elaboração desta metodologia e com base em Lindell (2008), ficou estabelecido que 75 % da população era notificada na primeira hora.

3ª Fase – Tempo de Preparação

O tempo de preparação representa o período entre receber a notificação e preparar para evacuar, nomeadamente, juntar mantimentos básicos, comida, água, medicamentos, pertences pessoais de maior valor, assim como desligar a eletricidade, a água e o gás, e obter informação de quais pontos de encontro a que se devem dirigir e que rotas tomar.

Nesta fase consideram-se duas opções, designadamente evacuações, “de casa” e “do trabalho”. Wild *et al.* (2021), adotaram a metodologia de Lindell *et al.* (2020), os quais mediante análise de um questionário realizado à população evacuada durante outra tipologia de perigos naturais, fundamentaram a preferência na evacuação a partir de casa. A população, quando alertada da evacuação, prefere passar primeiro em casa para recolha de familiares, medicamentos, dinheiros, bens e/ou suplementos, e só depois se dirigir para o ponto de encontro estipulado (Lindell *et al.*, 2020).

4ª Fase – Tempo de Viagem

Nesta fase estuda-se o tempo de evacuação espacial, dado estar dependente do número de pessoas, do meio de transporte utilizado e do número de rotas de saída disponíveis.

A preferência por evacuar por transporte privado é tida em consideração, analisando-se a população que necessitaria de transporte público. Para este cálculo é averiguada a proximidade, a pé, da população às estações de serviços e a quantidade de autocarros disponíveis para evacuar.

Wild *et al.* (2021), defendem que a população em Auckland com acesso a um veículo privado é de 62,7 % e que a população com acesso a mais de um veículo privado é de 33,7 %, pelo que quem não tiver acesso a meio de transporte privado, é evacuado por transporte público, nomeadamente, por autocarro.

O total de autocarros necessários é estimado com base no total da população sem acesso a veículo próprio e o número médio de assentos de todos os autocarros, assumindo uma ocupação de 50 %.

O número de autocarros é somado ao número de veículos pessoais, para, posteriormente, ser calculado no tempo de viagem.

Outro aspeto mencionado por Wild *et al.* (2021), é a capacidade de carga das estradas, calculada com base no número de veículos por hora e por pista que uma estrada suporta em fluxo livre, considerando que na análise das estradas não entram as vias de acesso menores, apenas as estradas principais, as vias arteriais, regionais e nacionais.

Cada tipologia de estrada tem uma capacidade de carga menor ou maior, sendo que em condições de evacuação, a rede de estradas assume operar, perto ou no máximo, da capacidade de carga. Consequentemente, o tempo de viagem foi calculado pelo somatório dos veículos na zona de evacuação a dividir pelo somatório da capacidade de veículos a evacuar em cada rota de saída, como mostra a equação 3.5. abaixo, assumindo que o constrangimento ao tempo de viagem é ditado pela capacidade das estradas que atravessam os limites externos das zonas de evacuação:

$$tr = \frac{\Sigma \text{Veículos em Zona de Evacuação}}{\Sigma \text{Capacidade de Veículos em Cada Rota de Saída}} \quad (\text{Eq. 3.5.})$$

Um limite ao cálculo apresentado, é o facto de se assumir que as rotas de saída têm um fluxo livre, ou seja, não estão congestionadas. Todavia, durante uma evacuação o congestionamento das estradas é uma variável a considerar, pelo que Wild *et al.* (2021), consideraram um congestionamento das estradas a 2/3 e a 1/3.

A totalidade do tempo para evacuar resulta da equação 3.6 que corresponde ao somatório dos diferentes tempos descritos:

$$t_T = t_D + t_N + t_P + t_E \quad (\text{Eq. 3.6})$$

em que:

t_T – tempo total para a evacuação de um indivíduo ou agregado familiar

t_D – tempo de decisão, até ser declarada a necessidade de evacuar

t_N – tempo até receber a notificação para evacuar

t_P – tempo de preparação

t_E – tempo de deslocação para evacuação

A fase do tempo de viagem corresponde à componente dependente da dimensão da população, da sua distribuição espacial, do seu modo de evacuação e da rede viária, sendo somada à pré-viagem para produzir um modelo espacial do tempo total de evacuação (Wild *et al.*, 2021).

3.2. Metodologia aplicada

As metodologias dos estudos de Tomsen *et al.* (2014) e de Wild *et al.* (2021) foram apresentadas na íntegra, contudo, o trabalho atual só se foca no tempo de deslocação entre a população a evacuar e os pontos de encontro para os quais se deve dirigir.

A metodologia adotada destina-se a estudar a evacuação em caso de emergência vulcânica, nomeadamente (1) analisar a população localizada na zona afetada, que terá de evacuar, as condições para a sua deslocação e o respetivo tempo de trânsito, (2) definir as melhores rotas de evacuação para cada ponto da zona afetada e (3) estimar as capacidades necessárias nos diversos pontos de encontro.

Neste estudo não foram considerados os tempos correspondentes às fases pré-viagem.

3.2.1. Seleção do cenário

De modo a testar a metodologia, optou-se por um cenário decorrente de uma crise vulcânica com impacto numa área bem circunscrita de modo a permitir um maior controlo e conhecimento dos parâmetros de entrada e condicionantes de uma evacuação. Assim, definiu-se um cenário decorrente de uma erupção havaiana ou estromboliana com centro no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (SVFP), a decorrer durante a noite por forma a simplificar a análise da população a evacuar, obviando a consideração dos movimentos pendulares da população.

3.2.2. Seleção da área de estudo e simulações de atividade vulcânica

A seleção da área de estudo recaiu sobre a freguesia de Arrifes (Ponta Delgada) por ser a segunda mais populosa e com uma grande área de cobertura, que faz com que a população se encontre dispersa e, conseqüentemente, constitua um desafio adicional para a evacuação.

Neste contexto, um ponto importante da metodologia foi a seleção da área de evacuação dentro da freguesia de Arrifes, face à potencial progressão de escoadas lávicas de uma erupção vulcânica basáltica do estilo havaiano/estromboliano. Neste sentido utilizaram-se as estruturas tectónicas e vulcânicas de Carmo (2013) para auxiliar na seleção de uma zona com maior probabilidade de ocorrer uma erupção vulcânica. De modo a simplificar os testes à metodologia, optou-se por considerar apenas a parte S da freguesia, por ser a zona com maior concentração de população. Assim, com recurso à foto aérea, definiram-se as zonas com maior probabilidade de ocorrerem centros eruptivos na freguesia de Arrifes. Definiram-se três zonas, uma central (a amarelo), cujos centros eruptivos poderiam gerar lavas com capacidade para afetar os setores N e S da freguesia, outra a N (a verde) onde os centros eruptivos gerariam lavas que apenas fluem para N, e outra a S (a azul) onde os centros eruptivos gerariam lavas que apenas fluem para S (Figuras 3.1, 3.2 e 3.3) (fiadas 11 e 12 do ano de 2001- Anexo VI).

Para as simulações realizadas no *software ArcGIS 2009*, utilizou-se a ferramenta *Volcanic Risk Information System 2.0 (VORIS)*. O modelo VORIS corresponde a um modelo de declive máximo, em que a trajetória do fluxo de lava é determinada pela topografia (Felpeto *et al.*, 2007).

Este modelo permite simular a trajetória de uma escoada lávica com base na topografia e no algoritmo de Monte Carlo. Através da repetição iterativa do processo, o logaritmo calcula o caminho para a escoada lávica a partir de um foco. A probabilidade em cada célula é dada em função do número de vezes que é atravessada pelo fluxo (Felpeto *et al.*, 2007).

Os parâmetros utilizados para os testes de validação das zonas delimitadas em foto aérea, foram adaptados dos parâmetros utilizados por Gomes (2013) para a ilha de São Miguel, designadamente uma topografia com base num Modelo Digital de Terreno com células de 50 m de lado, 12 000 m para o comprimento das escoadas lávicas, 10 m para a espessura das lavas e 5 000 iterações.

A área que corresponde à delimitação da zona a evacuar é a S da freguesia, nomeadamente, contornada a azul e limitada superiormente pela faixa central amarela, como se observa nas figuras 3.1 à 3.3.

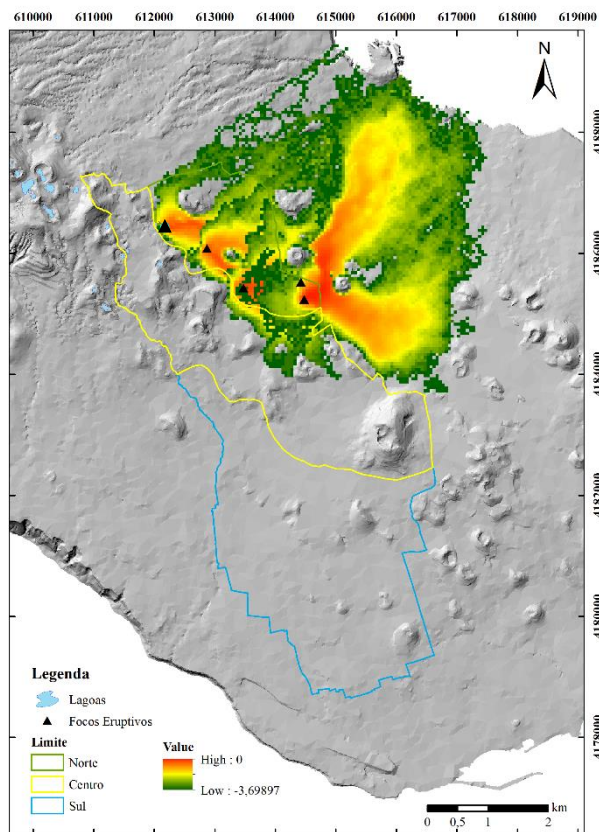


Figura 3.1. Sobreposição das cinco simulações individuais realizadas para a faixa N. No anexo VII observam-se as simulações individualmente. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

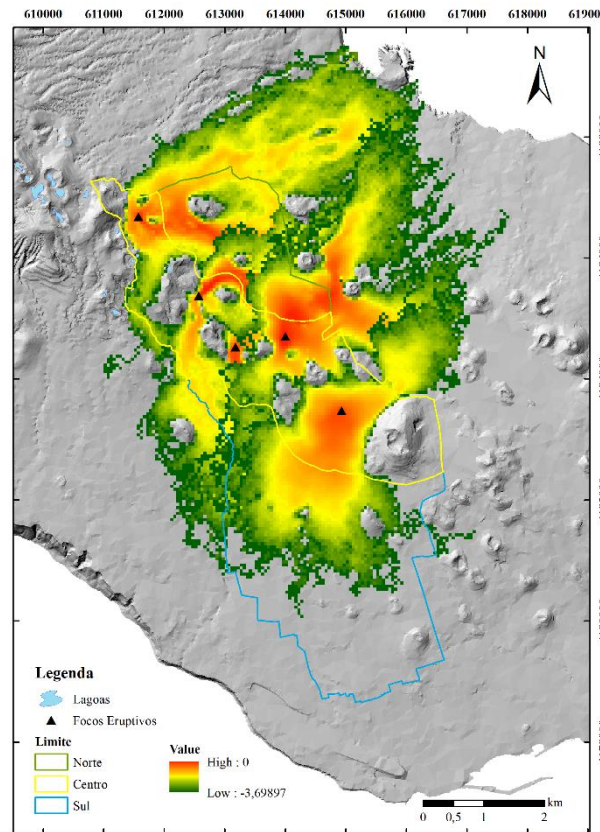


Figura 3.2. Sobreposição das cinco simulações individuais realizadas para a faixa central. No anexo VIII observam-se as simulações individualmente. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

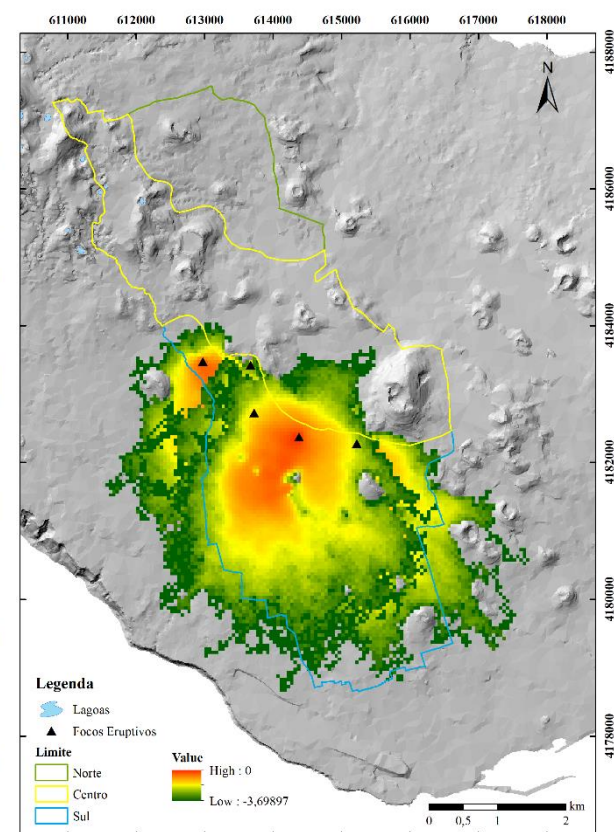


Figura 3.3. Sobreposição das cinco simulações individuais realizadas para a faixa S. No anexo IX observam-se as simulações individualmente. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

3.2.3. População exposta

Para a análise da população exposta, recorreu-se aos dados do Instituto Nacional de Estatística, nomeadamente, aos censos 2021 e à cartografia de base, concretamente à vetorização do edificado à escala 1:25 000, da carta militar da ilha de São Miguel do ano de 2002, concedida pelo Instituto Geográfico do Exército (IGeoE).

Atendendo a que a situação em análise é um cenário noturno, não se consideram as ocupações dos edifícios públicos, comerciais e industriais e assumiu-se que toda a população estaria na sua residência habitual.

Assim, de modo a determinar a distribuição espacial da população nos Arrifes optou-se por considerar a distribuição de residentes pelos edifícios de alojamento da freguesia (Eq. 3.7.) (Tabela 3.3):

$$\text{Habitantes por alojamento} = \frac{\text{Total de habitantes}}{\text{Total de alojamentos}} \quad (\text{Eq. 3.7.})$$

Tabela 3.3. Dados estatísticos da distribuição da população pelo edificado na freguesia de Arrifes. (1) - dados dos censos de 2021, Instituto Nacional de Estatística (INE); (2) - cartografia de 2002.

	Total de Habitantes ⁽¹⁾	Total de Edifícios ⁽¹⁾	Total de Alojamentos ⁽¹⁾	Total de Habitações ⁽²⁾	Média Habitante por Alojamento
Arrifes	7 294	2 201	2 405	2 212	3

O total de edifícios descritos pelo INE (2021) corresponde ao número concreto de edificado da freguesia, subdividido em 100 % residencial e 50 % a 99 % residencial, e inclui os edifícios multifamiliares. Em contrapartida, o total de alojamentos corresponde ao número de residências efetivas na freguesia de Arrifes, pelo que o total de alojamentos é superior ao total de edifícios, e um edifício pode ter mais que uma residência.

De modo a processar esta informação na subsequente análise de redes, a informação do edificado foi convertida em pontos e na sua tabela de atributos adicionou-se um campo com a densidade populacional média.

3.2.4. Transportes

Para a análise da capacidade dos transportes disponíveis, procedeu-se à estimativa da capacidade de transporte com base nos veículos disponíveis, à sua distribuição por habitação e às características da rede viária. Recorreu-se, para o efeito, aos dados da

Autoridade de Supervisão de Seguros e Fundos de Pensões (ASF) (2021) e do Instituto Nacional de Estatística (INE), nomeadamente, aos censos 2021.

3.2.4.1. Veículos disponíveis

Optou-se por considerar apenas os veículos privados, não se considerando os transportes públicos ou outros veículos a destacar para ações de evacuação. Atendendo à indisponibilidade de informação relativa ao número de veículos na freguesia de Arrifes, optou-se pelos dados da Autoridade de Supervisão de Seguros e Fundos de Pensões (ASF) para o concelho de Ponta Delgada, extrapolando-os para a freguesia de Arrifes.

Tabela 3.4. Total de alojamentos e total de veículos ligeiros no concelho de Ponta Delgada segundo o INE (2021) e a Autoridade de Supervisão de Seguros e Fundos de Pensões, respetivamente. Nota: veículos por alojamento = veículos por n.º de residências efetivas.

Total de Alojamentos	23 924
Total de veículos (ligeiros)	42 923
Veículos por Alojamentos	1,79

Assumindo para os Arrifes uma razão de veículos por alojamento semelhante ao verificado para o concelho de Ponta Delgada, verifica-se um valor de cerca de 1,79. Considerando um total de alojamentos para a freguesia de 2 405 (INE, 2021), o total de veículos na freguesia seria de 4 305.

3.2.4.2. Distribuição de veículos ligeiros por habitação

Atendendo à estimativa de veículos disponíveis é possível inferir que todas as habitações têm, pelo menos, um veículo ligeiro. Para efeitos de modelação, assumiu-se que, mesmo que um dado agregado familiar disponha de mais do que um veículo a evacuação decorreria em apenas um.

3.2.5. Rede viária

Para a caracterização da rede viária utilizou-se a carta militar da ilha de São Miguel de 2002 à escala 1:25 000 do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE). Além dos dados vetoriais das estradas, foram adicionados novos campos à sua tabela de atributos (Figura 3.4), necessários para a implementação da metodologia aplicada. Foram estes o nome da

rodovia, a velocidade limite, a hierarquia, o sentido das estradas e o tempo que demora a ser percorrida (Tabela 3.5).

Tabela 3.5. Parâmetros da classificação das estradas.

Parâmetro	Descrição	Finalidade
Nome da Rodovia	Conciliação de trabalho de campo com <i>Google Maps</i> .	Auxiliar na localização e direção.
Velocidade	Varia com o tipo de estradas: Localidades – 50 km/h; Entroncamento – 20 km/h; Estrada sem saída – 20 km/h; Via rápida – 80 a 100 km/h.	Cálculo do tempo de viagem.
Sentido das estradas	Estradas com dois sentidos ou estradas com sentido único “TF” – <i>To From</i> , ou “FT” – <i>From To</i> .	Condicionar a direção de fluxo no modelo.
Tempo de Viagem	Tempo de viagem = Comprimento da Estrada / Velocidade	Analisar a rota mais rápida.

O nome da rodovia tem por finalidade auxiliar o desenvolvimento da rede através da localização e direção, e exigiu uma harmonização entre a verificação de campo e o registo no *Google Maps*. A velocidade, fundamental para o cálculo do tempo de viagem, varia de acordo com o tipo de estrada, ou seja, dentro das localidades o limite definido foi de 50 km/h; no caso de um entroncamento, uma estrada sem saída ou um beco, a velocidade limite definida foi de 20 km/h e em vias rápidas o valor varia entre os 80 e os 100 km/h, estes valores estão de acordo com a Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR) (Anexo X).

O sentido da estrada é um fator relevante, uma vez que as estradas de sentido único influenciam o trajeto dos veículos. Assim, adicionou-se um campo denominado de “OneWay”, cuja informação nula corresponde às estradas que seguem em ambos os sentidos e as estradas com “TF” – *To From*, ou “FT” – *From To*, correspondem às estradas de sentido único.

A análise deste parâmetro requer conhecimento prévio sobre a vectorização inicial, se o sentido da estrada é o mesmo da vectorização ao campo dá-se a informação de “FT”, caso o sentido seja oposto, dá-se a informação “TF”.

Por último, foi adicionado um campo com o tempo de viagem, para que seja possível analisar qual a rota mais rápida (Figura 3.4). Neste parâmetro é possível observar uma estimativa do tempo que demora a percorrer cada segmento de reta, calculado segundo a equação 3.8.

OBJECTID *	Shape *	TYPE	Name	Velocity	Hierarchy	OneWay	Length	Time Travel
1638	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	M503	80	1	<Null>	0,858384	0,643788
1672	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	M503	80	1	<Null>	1,101732	0,826299
1836	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	M503	80	1	<Null>	0,055302	0,041476
1897	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	M503	80	1	<Null>	0,278885	0,209164
1778	Polyline	Estrada >= 5,5 m com piso dur	M510	80	1	<Null>	0,184028	0,138021
1779	Polyline	Estrada >= 5,5 m com piso dur	M510	80	1	<Null>	0,780361	0,585271
174	Polyline	Acesso Auto/Arruamento	Praceta do Papa Terra	20	3	<Null>	0,099425	0,298274
166	Polyline	Acesso Auto/Arruamento	Rua Almirante Botelho de Sousa	20	3	<Null>	0,0882	0,2646
1646	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	Rua Amaro Dias	50	2	<Null>	0,21946	0,263352
1647	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	Rua Amaro Dias	50	2	<Null>	0,520323	0,624387
1648	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	Rua Amaro Dias	50	2	<Null>	0,512208	0,61465
1649	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	Rua Amaro Dias	50	2	<Null>	0,226601	0,271921
1650	Polyline	Estrada < 5,5 m com piso duro	Rua Amaro Dias	50	2	<Null>	0,011102	0,013323
223	Polyline	Acesso Auto/Arruamento	Rua António Borges	20	3	TF	0,161827	0,48548
226	Polyline	Acesso Auto/Arruamento	Rua António Borges	20	3	TF	0,073111	0,219333
290	Polyline	Acesso Auto/Arruamento	Rua António Borges	20	3	TF	0,090113	0,270339
701	Polyline	Acesso Auto/Arruamento	Rua António Resendes Tavares	20	3	<Null>	0,200061	0,600183
22	Polyline	Acesso Auto/Arruamento	Rua Arcanjo Lar	20	3	<Null>	0,054883	0,164649

Figura 3.4. Parcela da tabela de atributos do *layer* das estradas.

$$Tempo = \frac{\text{Comprimento do Segmento de Reta}}{\text{Velocidade}} \quad (\text{Eq. 3.8.})$$

3.2.6. Evacuação

Para efeito de simulação da evacuação recorreu-se ao Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada e às Medidas de Autoproteção disponibilizadas pela Câmara Municipal de Ponta Delgada.

3.2.6.1. Pontos de encontro

Foram considerados os pontos de encontro constantes no Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada na freguesia de Arrifes e nas freguesias adjacentes, para onde seria provável evacuar a população (Figura 3.5).

3.2.6.2. Centros de realojamento

Foram considerados os centros de realojamento constantes no Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada para a freguesia de Arrifes e freguesias adjacentes, para onde seria provável realojar a população evacuada (Figura 3.5).

Salienta-se que neste estudo a evacuação é noturna, pelo que a população será evacuada a partir de casa. Foi considerado que a evacuação seria realizada para os pontos de encontro fora da área a evacuar, com intuito da população ser depois reencaminhada para os centros de alojamento fora da zona de perigo.

3.2.6.3. Cálculo do Tempo de Evacuação

O cálculo do tempo da evacuação, nomeadamente do tempo decorrido no percurso entre todas as habitações e os respetivos pontos de encontro, foi calculado tendo por base a equação 3.9.:

$$T_n = t_n + [E * (c_n - 1)] \quad (\text{Eq. 3.9.})$$

T_n – tempo total do percurso, em minutos, até ao ponto de encontro n ;

t_n – tempo máximo do percurso, em minutos, até ao ponto de encontro n ;

E – espaçamento, em segundos;

c_n – número de carros com destino ao ponto de encontro n .

O espaçamento é calculado com base em Green e Kenneth (2020), que estabelecem uma capacidade 600 veículos por hora (v/h) para zonas residenciais, nomeadamente, estradas com veículos ocasionalmente estacionados. As estradas da freguesia de Arrifes encontram-se, normalmente, lotadas com automóveis estacionados, particularmente num período noturno, pelo que para efeitos de cálculo admitiu-se que a capacidade de veículos em cada rota de saída, de forma geral, era de 600 v/h.

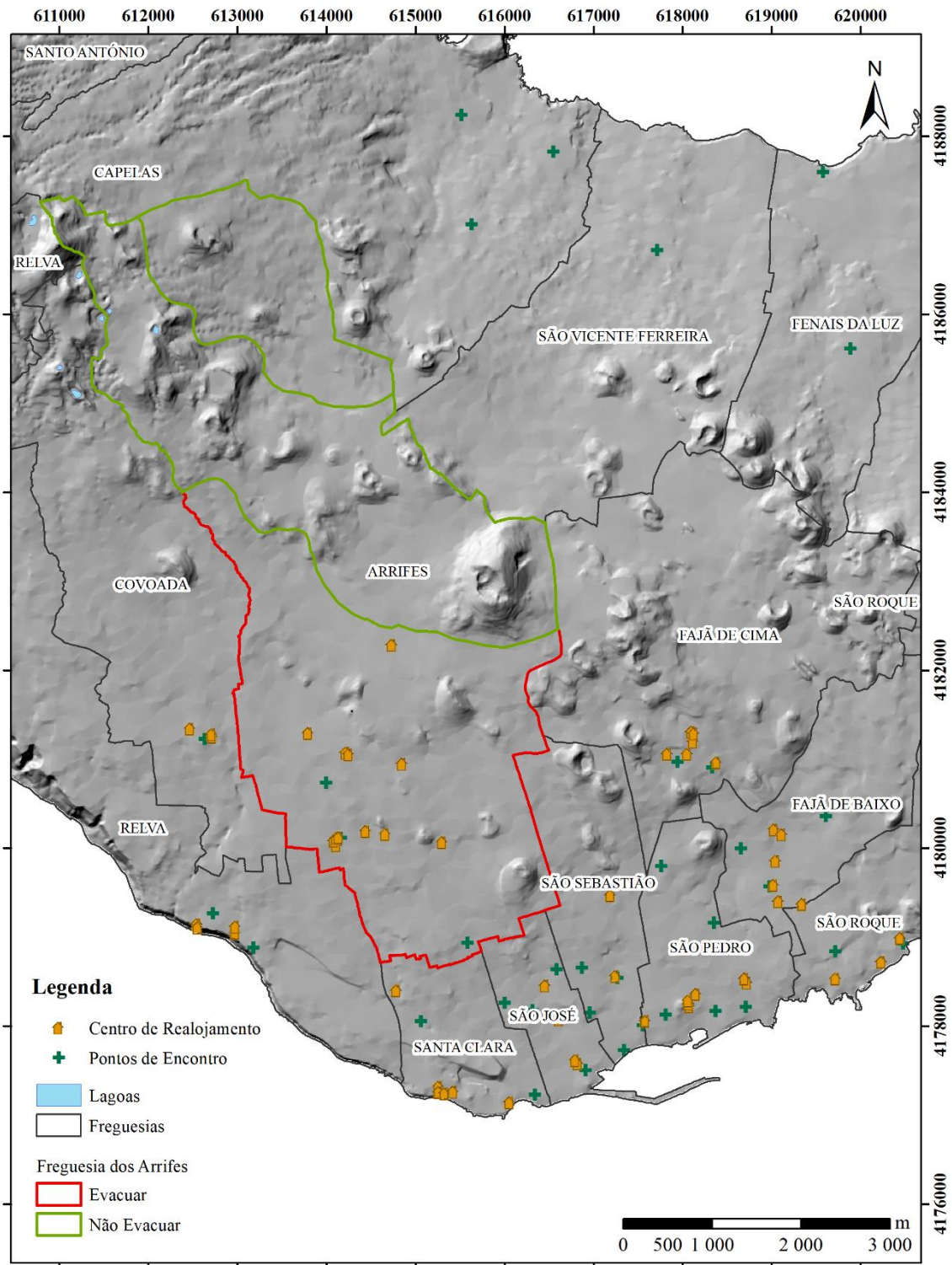


Figura 3.5. Localização dos pontos de encontro e centros de realojamento, de acordo com o Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPD). Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

3.2.6.4. Modelação

A modelação dos processos de evacuação foi desenvolvida em *ArcGIS*, tendo sido inicialmente gerada em *ArcCatalog*, um dos componentes do *software*, uma *geodatabase*

com a informação exposta anteriormente, seguida de uma *feature dataset*, onde será desenvolvida a *network dataset*.

A teoria apresentada no ponto seguinte relativamente à *network dataset* teve por base o estudo do *ArcGIS Desktop*, consultado a 6 de janeiro de 2022, no portal oficial da ESRI –que permite analisar informação relacionada com todas as ferramentas que compõem o *software ArcGIS*.

3.2.7. Modelo de Transporte

3.2.7.1. Network Dataset

Um *network dataset* é um conjunto de dados adequados para modelar redes de transporte. No caso em estudo esta foi criada a partir de camadas vetorizadas que armazenam a informação de conectividade apresentada no tópico Rede Viária.

Esta *network dataset* integra:

- *Feature Dataset* - para posteriormente gerar a rede de transportes. É obrigatório ter pelo menos uma *feature* de linhas, neste caso as estradas de Arrifes, e uma *feature* de pontos, que neste trabalho foi gerada automaticamente e que corresponde às junções entre os segmentos de estradas;
- *Network Dataset*,
 - Atributos que geram as condições colocadas à rede, ou seja, onde se esclarece os campos de hierarquia das rodovias, tempo de viagem, distância percorrida e sentido das estradas. Pode ser uma restrição, como no caso do sentido das estradas, ou um custo, como o tempo de viagem e a distância. Nestes casos é acumulado o valor ao atravessar o elemento da rede.
 - Modo de viagem que corresponde ao conjunto de atributos que definem como será a movimentação ao longo da *network*. Esta pode variar, entre a pé, de carro, de motociclo, ou outro. Para o estudo presente utilizou-se apenas o carro, impondo-se que a evacuação será feita por completo em veículos ligeiros.

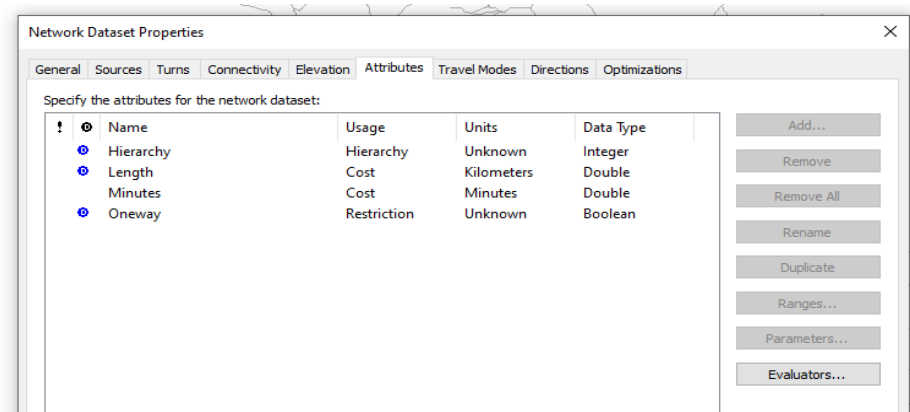


Figura 3.6. Janela das propriedades da *Network Dataset*.

A figura 3.7 mostra as linhas que resultam da *network dataset* e sobre a qual foram desenvolvidos os vários cenários de teste das ferramentas.

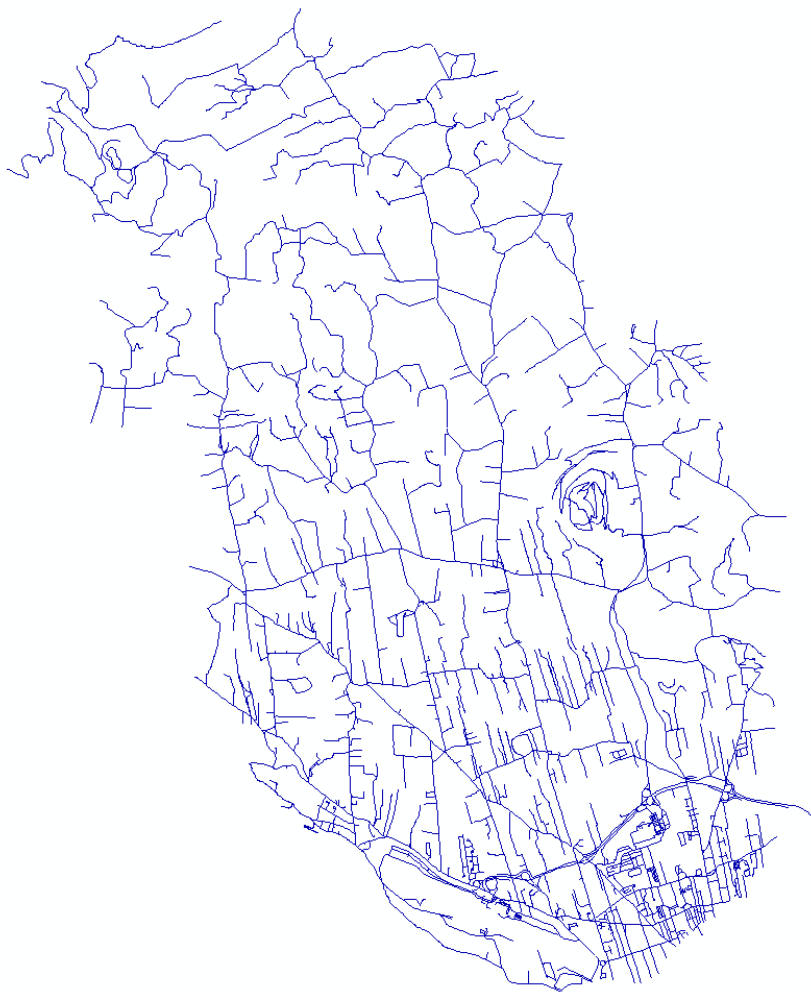


Figura 3.7. *Network Dataset*: Linhas da rede de transporte com informação guardada.

3.2.7.2. Análise de Redes

Com o modelo de transporte gerado, em *ArcMap* foi criado um novo projeto que congrega toda a informação relevante em diversos *layers* (camadas), nomeadamente:

- o Ortofotomapa da ilha de São Miguel de 2005, à escala 1:5000;
- a Carta Militar de São Miguel do ano de 2002, à escala 1:25000, concedida pelo Instituto Geográfico do Exército (IGeoE).;
- as estradas vetorizadas com base na carta militar, à escala 1:25000;
- o edificado, convertido em pontos, com base na carta militar, à escala 1:25000;
- os pontos de encontro segundo o PMEPCPD;
- as áreas consideradas como zona de estudo;
- as principais estruturas tectónicas e vulcânicas (Carmo, 2013).

Para utilizar a ferramenta *network analysis*, ou seja, a ferramenta que testa o modelo das estradas realizado numa fase preliminar, houve a necessidade de se converter o edificado em pontos, uma vez que os dados de entrada devem estar em formato de pontos ou linhas. Além disso, na tabela de atributos do edificado, adicionou-se um campo com a densidade populacional média de modo a transpor os dados de edifícios para habitantes.

Com os dados dos edifícios, dos pontos de encontro e das estradas adicionados ao projeto, entra-se na fase de análise com a ferramenta *network analysis*.

A *network analysis* contém uma memória interna que guarda a informação dos dados de entrada, das propriedades e dos resultados da análise à rede. Esta ferramenta deve ser sempre trabalhada sobre uma *network dataset*.

Existem seis tipos de *network analysis*:

- a) *New Route Analysis*, ou seja, nova análise de rota;
- b) *Closest Facility Analysis*, ou seja, análise da instalação mais próxima;
- c) *Service Area Analysis*, ou seja, análise da área de serviço;
- d) *OD Cost Matrix Analysis*, ou seja, análise da matriz de custo;
- e) *Vehicle Routing Problem Analysis*, ou seja, análise de um problema com a rota de um veículo;
- f) *Location-Allocation Analysis*, ou seja, análises locação-alocação.

Em cada tipo de análise enumerado existem campos de entrada e campos de saída, sendo possível adicionar informação de *stops*, de barreiras e de instalações. No entanto, aos campos de saída não é possível adicionar qualquer tipo de informação, estes são

resultado automático da análise feita à rede de transportes e aos dados adicionados. Por exemplo, quando se pretende analisar uma rota, escolhem-se dois ou mais pontos, carregados diretamente na ferramenta ou desenhados no momento da execução da mesma. Após a análise, os dados dos resultados são ilustrados no mapa e armazenados na camada das rotas.

Assim, para resolver um problema do tipo “encontrar o melhor percurso entre uma localização e outra ou entre várias localizações” utiliza-se a *New Route Analysis*. Note-se que o melhor percurso depende da análise a ser feita, ou seja, pode-se escolher o caminho mais rápido ou o mais curto. Para tal define-se na célula *impedance* (impedância) – medida da quantidade de resistência ou custo necessário para percorrer um caminho numa rede - o tempo ou a distância, tendo em consideração que a relação entre a ferramenta e a rede de transportes gerada obriga a que na impedância se escolha um parâmetro com a utilidade *cost* (custo).

Esta análise mostra a rota pretendida, o tempo e a distância entre os pontos, sendo possível fazer-se uma análise semelhante para cada segmento de reta, desde tempo e distância à visualização gráfica do local.

A ferramenta *Closest Facility* encontra a rota preferencial, respondendo a questões do género: “Quais as rotas preferenciais entre um incidente e os pontos de encontro ou hospitais a menos de 15 minutos de viagem?”. É possível especificarem-se quantas instalações se pretende encontrar e se a direção da viagem é para a instalação ou a partir desta. Os dados de saída mostram a melhor rota. À semelhança da ferramenta anterior, pode-se especificar a impedância, neste caso impedância *cutoff*, ou seja, particularizar o tempo ou a distância de viagem máxima para a procura da melhor rota.

Com a ferramenta *Service Areas* é possível encontrar áreas de serviços perto de uma localização na rede. Procura dar resposta a questões como: “Quantas pessoas residem a menos de 10 minutos de carro de um ponto de encontro?”. Ou seja, abrange todas as ruas com acesso a uma instalação, com uma impedância específica. Entenda-se que o acesso a uma instalação pode ser medido em tempo, distância ou outro parâmetro aceite na impedância. Nesta ferramenta podem-se gerar ainda multiáreas, representativas de intervalos de acessibilidade.

A *OD Cost Matrix* permite que se gere uma matriz de origem-destino de múltiplas origens para múltiplos destinos. Esta ferramenta fornece uma tabela de atributos onde se encontra a informação pretendida e especificada na impedância. Visualmente gera um conjunto de linhas retas, contudo, na tabela de atributos dessas mesmas linhas, é possível

analisar o percurso realizado em estrada. Esta ferramenta permite responder a questões como: “Para quais pontos de encontro se deve direcionar a população a evacuar de forma a que o tempo máximo de percurso seja de 10 minutos?”.

As ferramentas *Closest Facility* e *OD Cost Matrix* são semelhantes. A diferença está no resultado gráfico e na velocidade de processamento. A *OD Cost Matrix* não mostra a verdadeira forma da estrada, nem permite solucionar as direções das rotas, ao contrário da *Closest Facility*. Contudo, a informação é devolvida rapidamente quando comparado à ferramenta *Closest Facility*. No que concerne à informação da tabela de atributos, é a mesma em ambas as ferramentas.

A ferramenta *Vehicle Routing Problem* é utilizada quando se pretende organizar uma frota de veículos, cujo objetivo é fornecer um nível elevado de serviço. Cada veículo tem uma capacidade de carga e existem intervalos temporais a cumprir entre as demais instalações, pelo que através desta ferramenta é possível dar resposta a problemas como: “Quais as rotas preferenciais para uma frota de veículos, de forma a que acedam a uma série de pontos críticos (como abastecimento de recursos em campos de realojamento) eficientemente e cujo intervalo de tempo, as pausas do condutor e a capacidade dos veículos sejam asseguradas?”.

A última ferramenta da *Network Analysis* é a *Location-Allocation*. Esta ferramenta auxilia a escolha das instalações operacionais com base no potencial de interação com os pontos. Permite dar resposta a questões do tipo: “Onde deve ser constituído um ponto de encontro ou uma base operacional, que dê uma melhor resposta tempo/distância para a comunidade?”.

Esta ferramenta é muito completa permitindo objetivar a resposta face à questão que se pretende solucionar, podendo solucionar problemas dos tipos: *Minimize Impedance*, *Maximize Coverage*, *Maximize Capacitated Coverage*, *Minimize Facilities*, *Maximize Attendance*, *Maximize Market Share* ou *Target Market Share*.

Algumas destas ferramentas são relevantes para a realidade deste estudo (tabela 3.6).

Tabela 3.6. Subdivisão da ferramenta *Location-Allocation*.

Ferramenta	Descrição	Exemplo
<i>Minimize Impedance</i> (Minimizar a Impedância)	Escolhe instalações cuja soma das impedâncias seja minimizada.	Localizar centros de logística para providenciar resposta à emergência, reduzindo os custos gerais de transporte de recursos.
<i>Maximize Coverage</i> (Maximização de Cobertura)	Escolhe instalações com uma determinada impedância e cuja cobertura sobre os pontos de procura seja a máxima possível.	Localizar estações de bombeiros ou da polícia, uma vez que a chegada a uma emergência requer um tempo limite.
<i>Maximize Capacitated Coverage</i> (Maximizar a Capacidade de Cobertura)	Escolhe instalações localizadas de tal forma que tantos pontos de procura quanto possíveis sejam alocados aos pontos solução com uma específica impedância e que a procura alocada a uma instalação não exceda a capacidade desta.	Localizar pontos de encontro ou centros de realojamento de capacidade limitada, em número suficiente para responder à necessidade da população a evacuar.
<i>Minimize Facilities</i> (Minimizar as Instalações)	Escolhe instalações de modo que o maior número possível de pontos de procura esteja dentro da impedância das instalações e que o número de instalações necessárias para cobrir todos estes pontos seja minimizado.	Localizar os pontos de encontro ou centros de realojamento com menor custo tempo/distância e, simultaneamente, minimizar a quantidade de pontos selecionados para cobrir a população a evacuar.
<i>Maximize Attendance</i> (Maximizar o atendimento)	Escolhe instalações cujo maior peso de procura consiga ser alocado a estas, assumindo que o peso diminui com a distância.	Localizar os pontos de encontro ou centros de realojamento com menor custo de viagem, uma vez que com o aumento da distância, menor será a tendência para se dirigir àquele ponto.

Para a realização desta dissertação, foram utilizadas três das seis ferramentas da *Network Analysis* descritas anteriormente. A primeira foi a *Closest Facility*, pretendendo-se responder à questão: “Quais as estradas a utilizar e qual o custo tempo/distância entre os edifícios localizados dentro da área de evacuação e os pontos de encontro?”

Para tal, começou-se por selecionar os edifícios de habitação dentro da área. De seguida, incluíram-se esses edifícios na ferramenta *Closest Facility* como sendo os *Incidents* (incidentes). O mesmo foi feito para os pontos de encontro que se encontravam fora do limite da evacuação, que foram selecionados como sendo as *Facilities* (instalações).

Houve a necessidade de ter em atenção as propriedades da ferramenta, pelo que na impedância se escolheu o tempo, de forma a minimizar o tempo percorrido entre cada incidente e o ponto de encontro mais próximo. Outro aspeto, foi a ordem de viagem do incidente para a instalação e não o oposto, como definido automaticamente pelo programa.

A segunda ferramenta utilizada foi a *location-allocation*, com objetivo de responder à mesma questão, no entanto, colocando uma restrição: a de capacidade máxima de cada ponto de encontro. As figuras 3.8 e 3.9 ilustram as propriedades mencionadas para cada análise realizada.

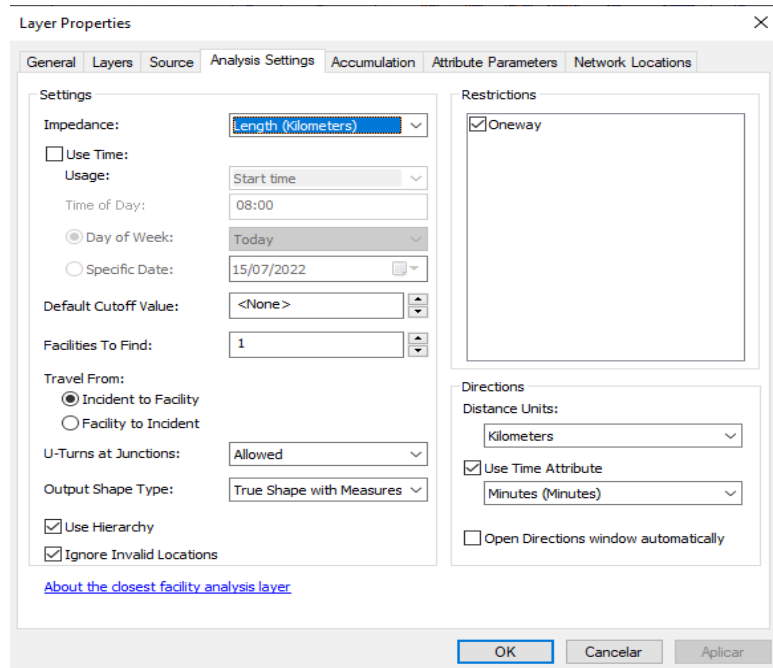


Figura 3.8. Propriedades da ferramenta *Closest Facility*.

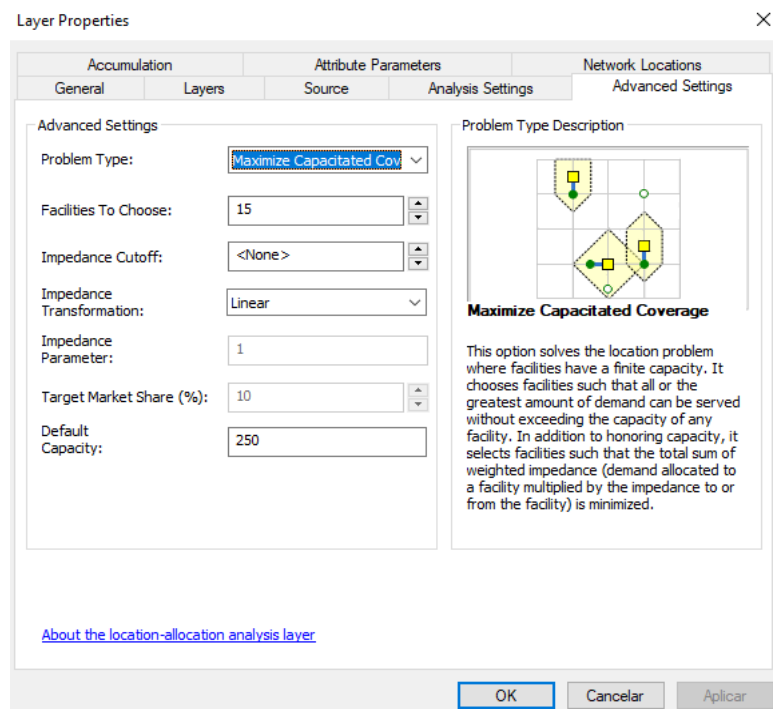


Figura 3.9. Configurações avançadas da ferramenta *Location-Allocation*.

Um entrave à aplicação da ferramenta *Location-Allocation* é o facto de não serem registadas rotas de evacuação, apenas linhas retas (Figura 3.10) com a informação armazenada em tabela de atributos (Figura 3.11). Para resolver esta limitação e se poderem observar graficamente as estradas utilizadas, recorreu-se a uma terceira ferramenta da *Network Analysis*, a *New Route Analysis*.

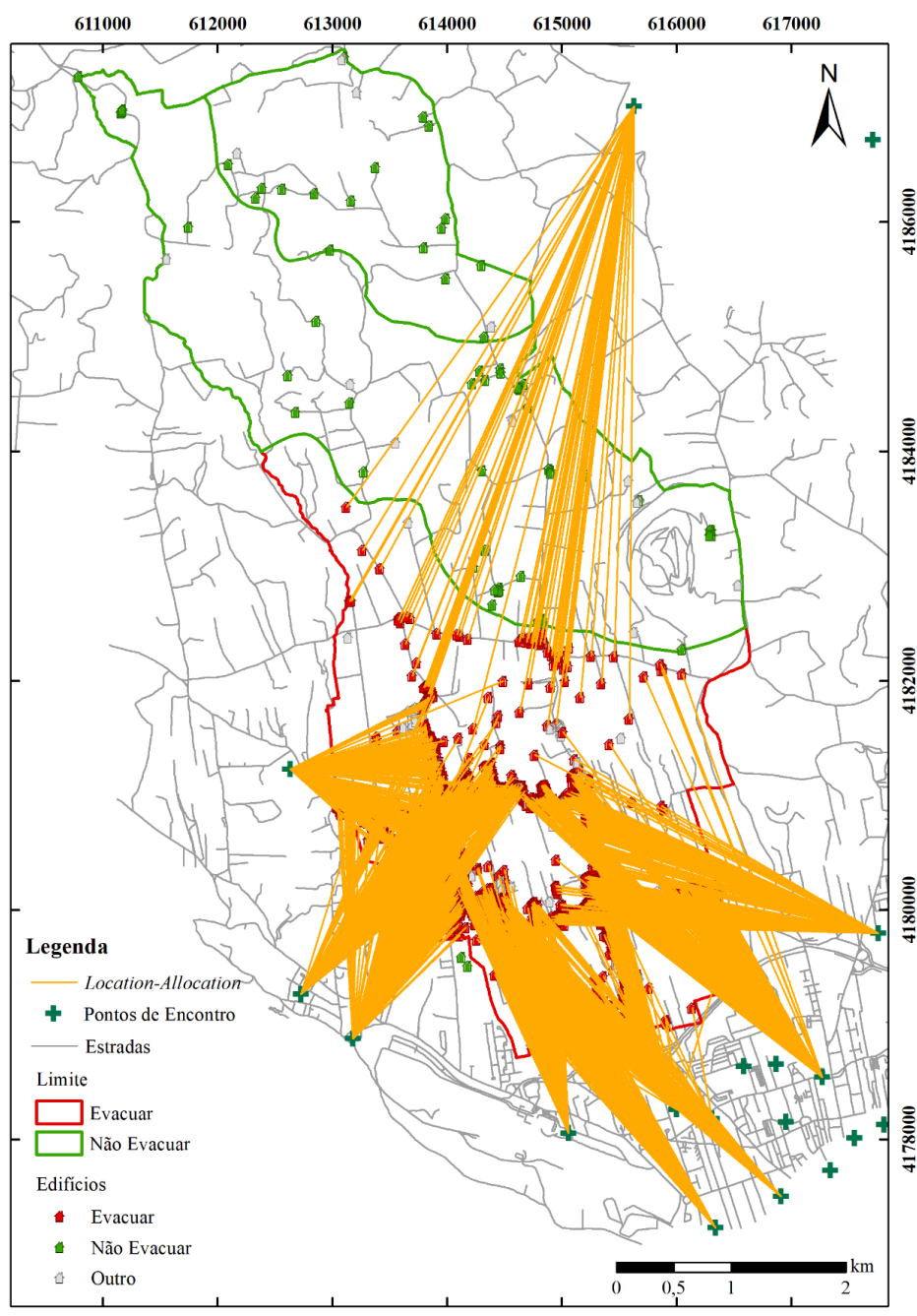


Figura 3.10. Exemplo *Location-Allocation*. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

ObjectID	Shape	FacilityID	Facility	Name	IncidentCurbApproach	FacilityCurbApproach	IncidentID	Total Time	Total Length
1	Polyline M	1	1	Location 1 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	1	0.076908	4.591575
2	Polyline M	1	1	Location 2 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	2	0.057434	3.092385
3	Polyline M	1	1	Location 3 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	3	0.057434	3.092385
4	Polyline M	1	1	Location 4 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	4	0.065539	4.023106
5	Polyline M	1	1	Location 5 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	5	0.061212	3.806763
6	Polyline M	1	1	Location 6 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	6	0.0509	3.280979
7	Polyline M	1	1	Location 7 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	7	0.057236	3.794534
8	Polyline M	1	1	Location 8 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	8	0.056918	3.769127
9	Polyline M	1	1	Location 9 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	9	0.05148	3.334023
10	Polyline M	1	1	Location 10 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	10	0.050361	3.244578
11	Polyline M	1	1	Location 11 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	11	0.050295	3.239261
12	Polyline M	1	1	Location 12 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	12	0.073102	4.631533
13	Polyline M	1	1	Location 13 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	13	0.067195	4.512022
14	Polyline M	1	1	Location 14 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	14	0.070458	4.578655
15	Polyline M	1	1	Location 15 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	15	0.071353	4.596568
16	Polyline M	1	1	Location 16 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	16	0.077	4.709499
17	Polyline M	1	1	Location 17 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	17	0.081589	4.80128
18	Polyline M	1	1	Location 18 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	18	0.064561	4.38056
19	Polyline M	1	1	Location 19 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	19	0.069507	4.559633
20	Polyline M	1	1	Location 20 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	20	0.071068	4.590869
21	Polyline M	1	1	Location 21 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	21	0.074423	4.65796
22	Polyline M	1	1	Location 22 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	22	0.068751	4.544513
23	Polyline M	1	1	Location 23 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	23	0.070252	4.574541
24	Polyline M	1	1	Location 24 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	24	0.071741	4.604322
25	Polyline M	1	1	Location 25 - Location 1	Left side of vehicle	Right side of vehicle	25	0.072031	4.79134
26	Polyline M	1	1	Location 26 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	26	0.071866	4.964932
27	Polyline M	1	1	Location 27 - Location 1	Right side of vehicle	Right side of vehicle	27	0.058184	3.870386
28	Polyline M	1	1	Location 28 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	28	0.074064	2.909869
29	Polyline M	1	1	Location 29 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	29	0.016818	0.657248
30	Polyline M	1	1	Location 30 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	30	0.015329	0.627477
31	Polyline M	1	1	Location 31 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	31	0.015402	0.628923
32	Polyline M	1	1	Location 32 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	32	0.014788	0.616655
33	Polyline M	1	1	Location 33 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	33	0.011626	0.553417
34	Polyline M	1	1	Location 34 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	34	0.011501	0.550915
35	Polyline M	1	1	Location 35 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	35	0.010853	0.542636
36	Polyline M	1	1	Location 36 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	36	0.011213	0.560645
37	Polyline M	1	1	Location 37 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	37	0.011339	0.566942
38	Polyline M	1	1	Location 38 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	38	0.011534	0.576683
39	Polyline M	1	1	Location 39 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	39	0.011735	0.586726
40	Polyline M	1	1	Location 40 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	40	0.012136	0.606821
41	Polyline M	1	1	Location 41 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	41	0.014145	0.707263
42	Polyline M	1	1	Location 42 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	42	0.014397	0.719855
43	Polyline M	1	1	Location 43 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	43	0.015833	0.770814
44	Polyline M	1	1	Location 44 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	44	0.015863	0.77143
45	Polyline M	1	1	Location 45 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	45	0.016417	0.820828
46	Polyline M	1	1	Location 46 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	46	0.01715	0.797164
47	Polyline M	1	1	Location 47 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	47	0.018852	0.942611
48	Polyline M	1	1	Location 48 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	48	0.022802	1.094634
49	Polyline M	1	1	Location 49 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	49	0.026177	1.162129
50	Polyline M	1	1	Location 50 - Location 1	Right side of vehicle	Left side of vehicle	50	0.020801	1.040074
51	Polyline M	1	1	Location 51 - Location 1	Left side of vehicle	Left side of vehicle	51	0.021877	1.076132

Figura 3.11. Tabela de atributos resultante da aplicação da ferramenta *Location-Allocation*.

Criar uma nova rota permitiu avaliar qual o caminho escolhido entre um edifício e um ponto de encontro de forma a que o custo de tempo e distância seja o menor (Figura 3.12). Assim, selecionaram-se todas as rotas cujo destino era o mesmo ponto de encontro e fez-se uma amostragem de edifícios abarcando desde a zona mais proximal à zona mais distal criando-se as rotas entre estes edifícios e o ponto de encontro comum. A união de todas as rotas entre cada um dos edifícios selecionados e o ponto de encontro comum gerou um modelo gráfico com as estradas preferenciais de evacuação para aquele ponto de encontro. O mesmo processo foi repetido para cada um dos restantes pontos de encontro.

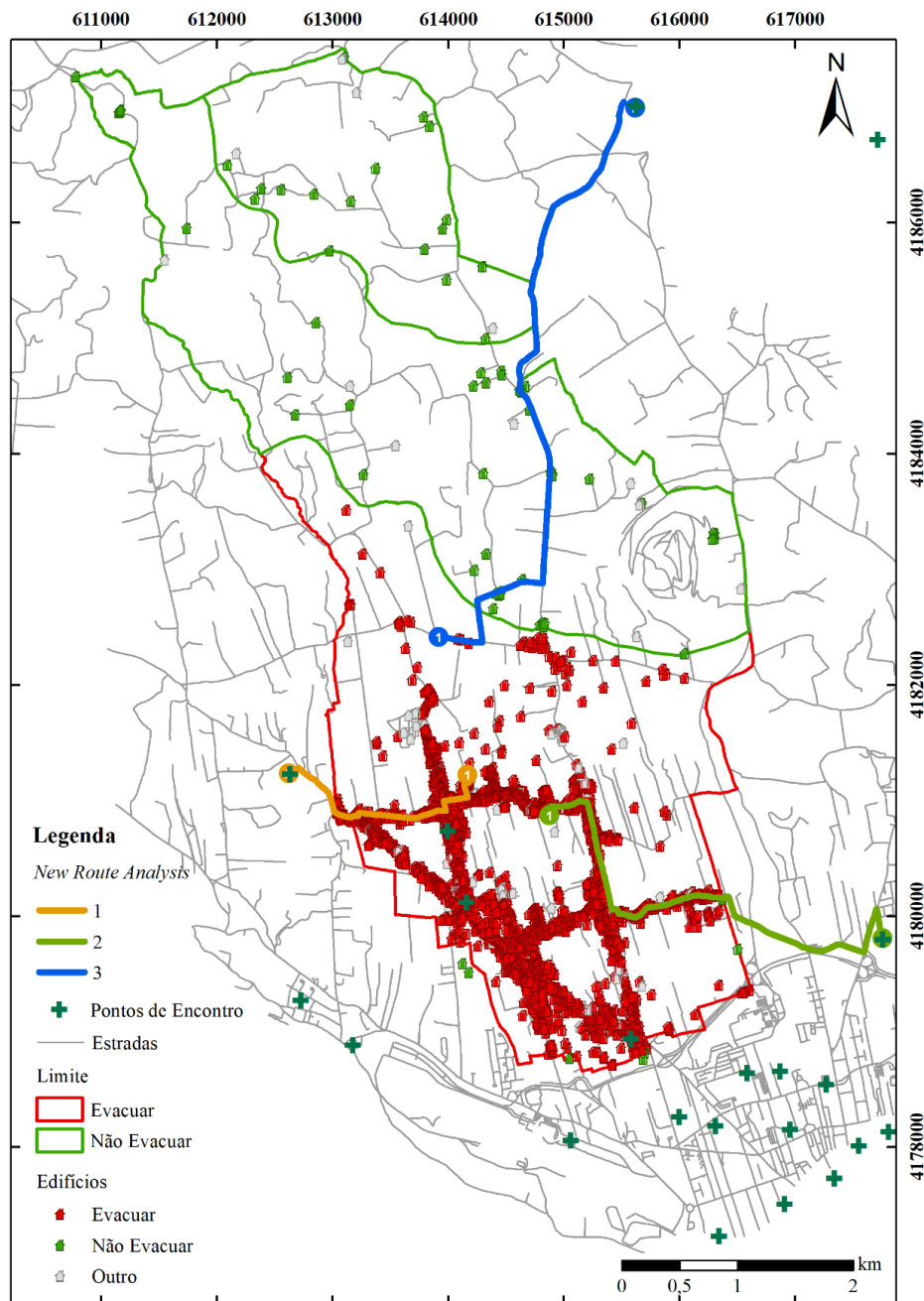


Figura 3.12. Exemplos de *New Route Analysis*. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Os dados fornecidos pelas tabelas de atributos de cada campo de linhas das demais ferramentas aplicadas, foram exportados para tabelas e gráficos, nomeadamente, os valores de tempo mínimo, máximo e médio, e a distância mínima, máxima e média.

À semelhança do descrito em Wild *et al.* (2021), a questão do congestionamento das estradas foi tida em consideração, pelo que foram aplicados os mesmos valores de congestionamento das vias, considerando-se os tempos e as distâncias para um congestionamento da via a 2/3 e a 1/3.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS

4.1. População

A freguesia de Arrifes conta com 7 294 habitantes de acordo com os últimos dados do INE (2021). A distribuição da população evidencia uma grande concentração na parte S da freguesia, o que, no caso do cenário em estudo (erupção estromboliana ou havaiana na zona S da freguesia) levaria a que a maioria da população (96,6 %) residente na freguesia tivesse de ser evacuada (Figura 4.1).

De facto, o cenário em análise levaria à evacuação de 2 144 habitações e 6 432 pessoas, admitindo que só seriam evacuadas as pessoas a residir no S da freguesia de Arrifes (Tabela 4.1).

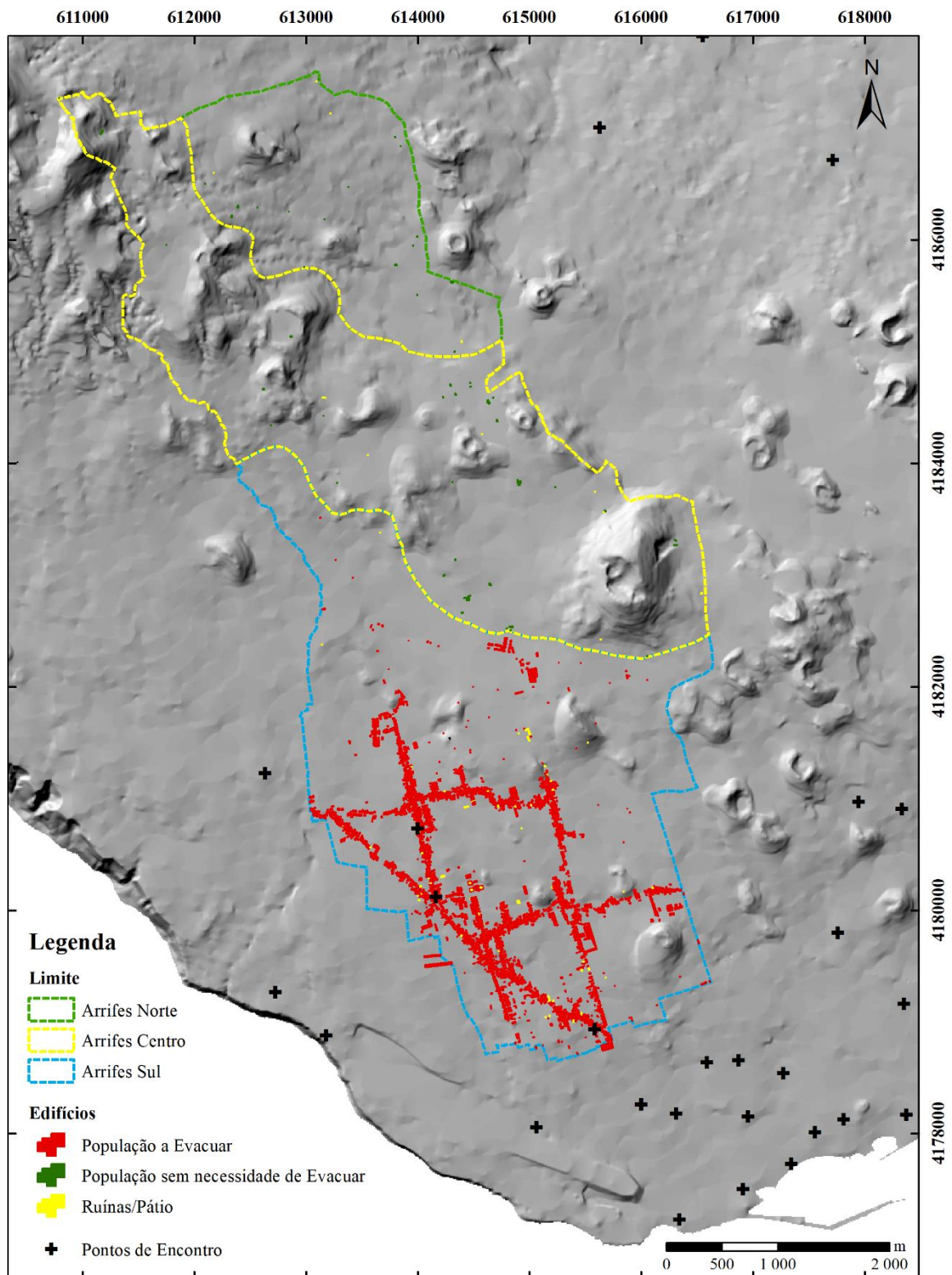


Figura 4.1. Distribuição do edificado a evacuar na freguesia de Arrifes num cenário de erupção estromboliana/havaiana na zona S da freguesia de Arrifes. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Tabela 4.1. Total de edifícios e habitantes a evacuar na freguesia de Arrifes, em caso de uma erupção vulcânica do estilo havaiano ou estromboliano na zona S da freguesia de Arrifes.

	Total de Habitantes	Total de Habitações	Média Habitante por Alojamento
Zona S da freguesia de Arrifes	6 432	2 144	3

Alerta-se para o facto de não ser possível quantificar o número de alojamentos na zona S da freguesia de Arrifes, uma vez os dados de alojamentos por freguesias são fornecidos pelo INE (2021), que tem a freguesia como última subdivisão. Pelo que foi utilizada a média para a freguesia com base na população total e nos alojamentos da freguesia (INE, 2021). Note-se que a média de habitantes por alojamento é a mesma que a média de habitantes por edifício (censos 2021) e por habitação (cartografia 2002).

Assim, a média de habitantes por edifício habitacional é uma aproximação com base no número de edifícios e não no número de residencias habituais, no entanto, foram calculadas ambas as médias e o valor é suficientemente próximo para ser utilizado.

4.2. Transportes

Os dados disponíveis não permitem estimar nem a quantidade, nem a localização da população que não tem acesso a veículo próprio, pelo que não foi possível calcular a necessidade de transporte público. Não obstante, e considerando apenas o transporte em veículos privados, foi possível estimar a totalidade de veículos disponíveis, a sua distribuição por edifício e a quantidade de veículos envolvidos na evacuação (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Média de veículos por alojamento e total de veículos envolvidos na evacuação da zona S da freguesia de Arrifes.

	Total de Habitações ⁽¹⁾	Média de Veículos por Alojamentos	Total de Veículos	Total de Veículos durante a Evacuação
Zona S da freguesia de Arrifes	2 144	1,79	3 837	2 144

4.3. Rotas

O primeiro cenário incluiu a análise do ponto de encontro mais próximo (*Closest Facility*) e permite obter as rotas com menor “custo” em tempo e distância para todos os edifícios dentro da zona definida para evacuação e os pontos de encontro, localizados na zona exterior à mesma. Salienta-se que cada edifício conta com uma média de três habitantes

e que por este método não é possível aplicar uma restrição quantitativa à capacidade dos pontos de encontro.

Dessa análise, definiram-se quatro pontos de encontro e respectivas rotas preferenciais (Figura 4.2) para receber 2 144 agregados familiares (correspondentes aos edifícios habitacionais). A distribuição dos residentes por ponto de encontro resultou numa distribuição heterogénea, com pontos de encontro a receber entre 198 e 3 186 residentes (Figura 4.3).

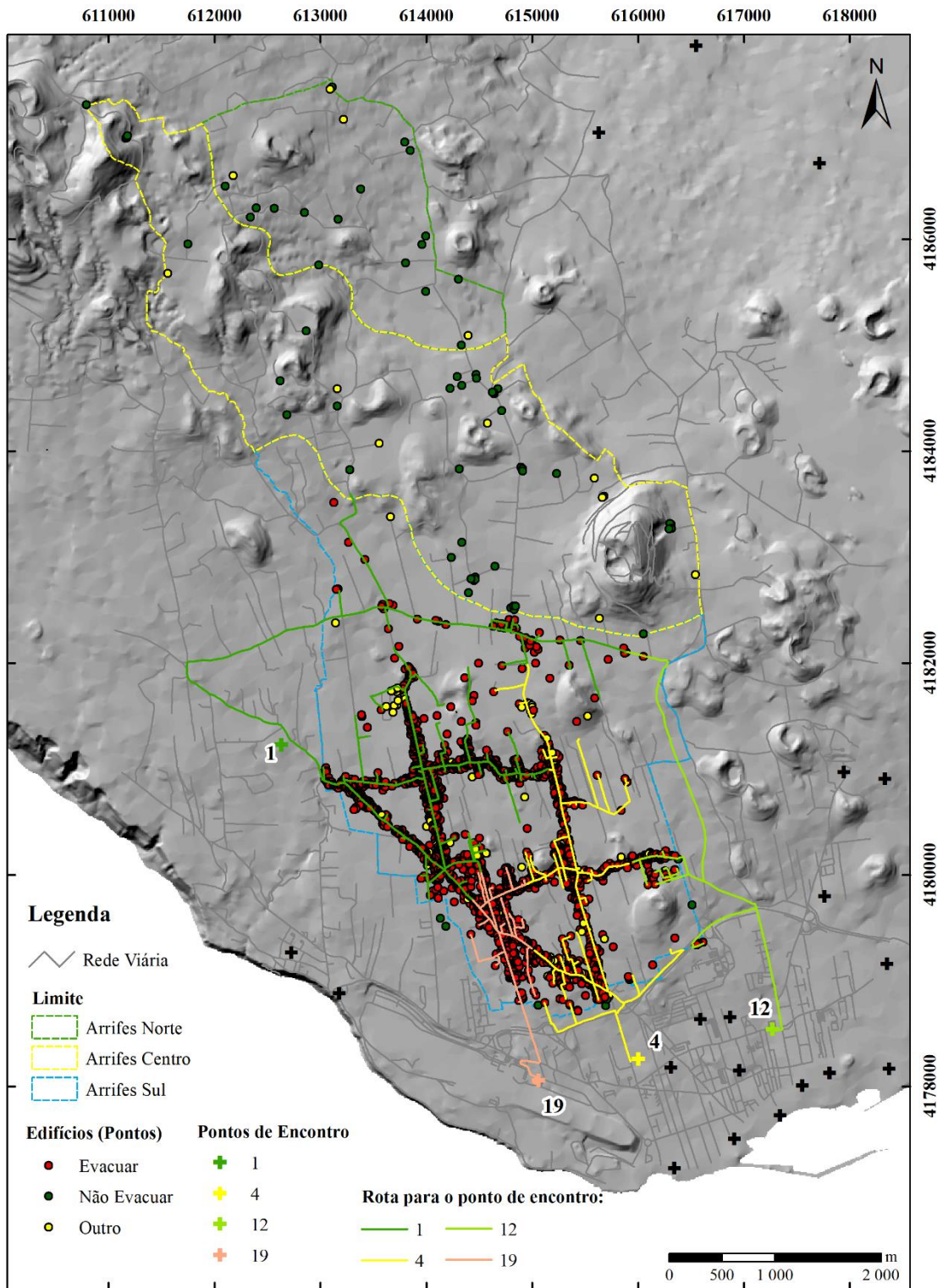


Figura 4.2. Mapa com as rotas definidas pela aplicação da ferramenta *Closest Facility*. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

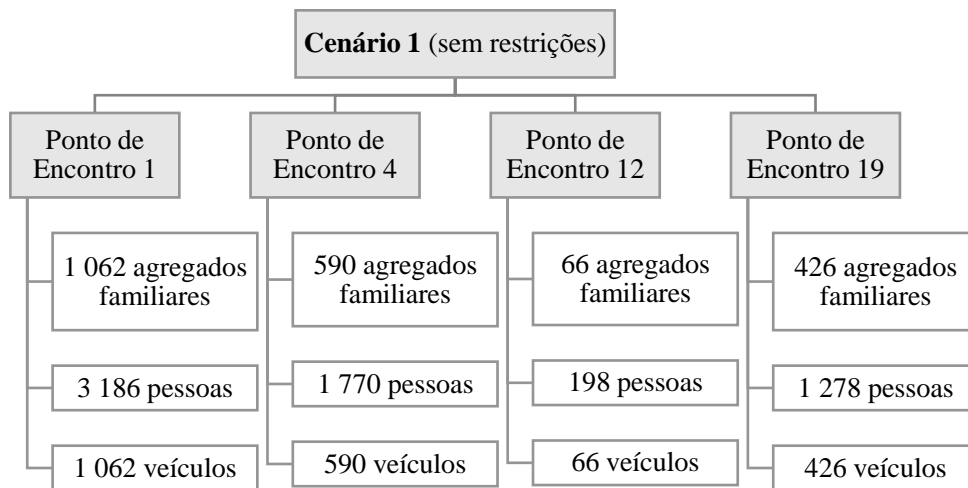


Figura 4.3. Distribuição da população e dos veículos pelos pontos de encontro, de acordo com a análise do ponto mais próximo.

Este cenário destaca a necessidade de se analisar a distribuição da população em caso de evacuação, uma vez que a disparidade na quantidade de evacuados a acolher em cada ponto de encontro é significativa, sendo passível de gerar constrangimentos em alguns pontos de encontro que não tenham capacidade para acolher números tão elevados de população e veículos.

Outro aspeto a salientar, para além dos pontos de encontro selecionados, são as rodovias preferenciais para a deslocação para fora da área a evacuar.

Da análise do ponto mais próximo destacam-se seis estradas pelas quais a evacuação é maioritariamente realizada (Figura 4.4). As rotas de evacuação para o ponto de encontro 1 são a estrada M503, a Rua Amaro Dias e a Rua da Nossa Senhora da Ajuda, a rota para o ponto de encontro 4 é a Rua da Saúde, para o ponto de encontro 12 as rotas são a estrada M510 e a Rua da Grotinha e para o ponto de encontro 19 a rota preferencial é a Avenida João Paulo II (Anexo XI).

Esta análise demonstra que algumas destas estradas ficam expostas a uma grande sobrecarga, pelo que a sua eficácia está sobrevalorizada pois o “gasto” de tempo/distância seria largamente ultrapassado pelo congestionamento da mesma.

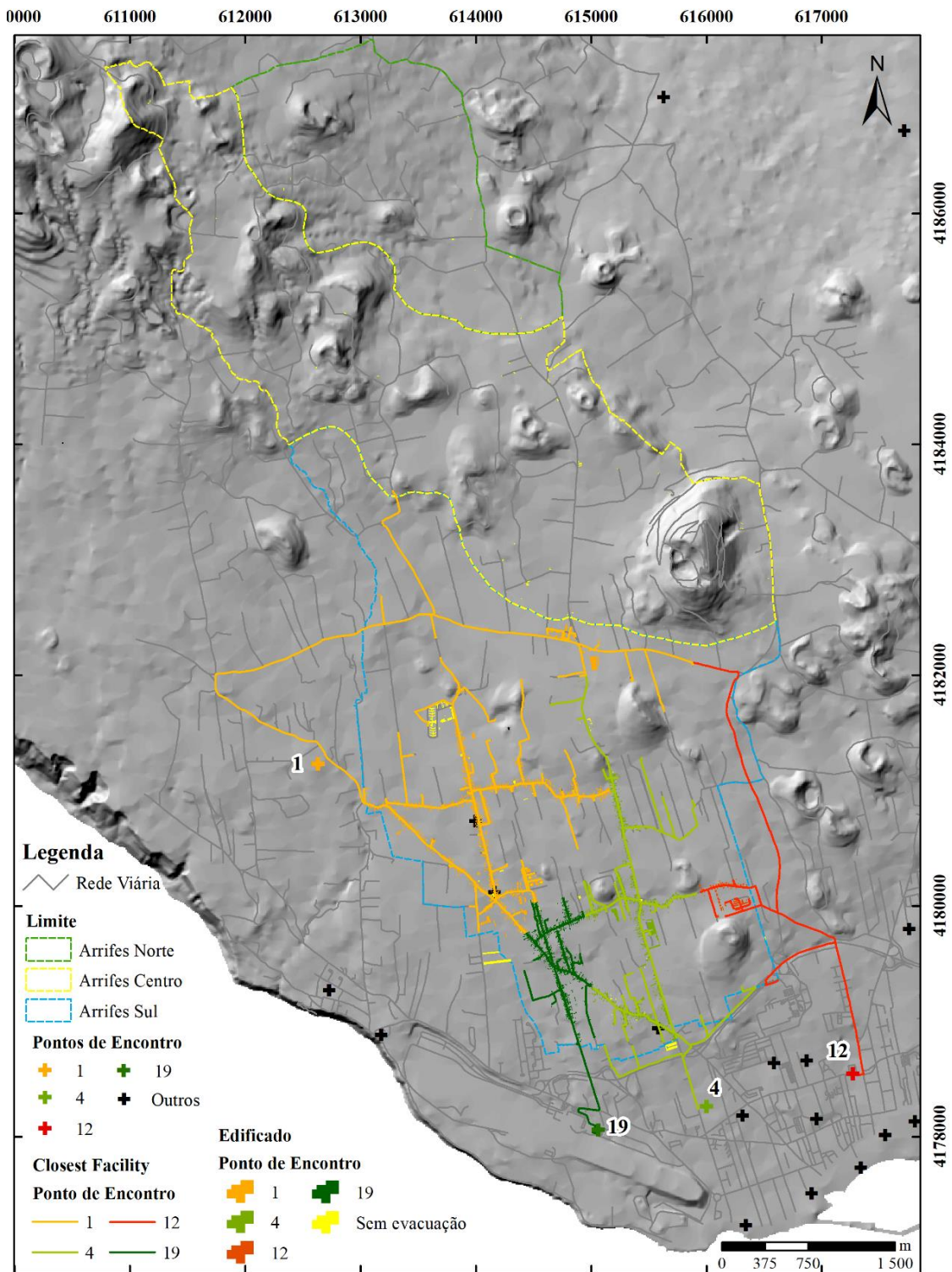


Figura 4.4. Mapa do edificado a evacuar e as respetivas rotas a seguir. Nota: os edifícios estão na mesma cor as rotas pelas quais devem seguir para chegar ao ponto de encontro que, por sua vez, tem a mesma tonalidade que o edificado. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Esta limitação pode ser ultrapassada ao restringir a alocação de evacuados a cada ponto de encontro, impondo-se a necessidade de distribuir a população por um leque maior de pontos de encontro. A aplicação da ferramenta *Location-Allocation* com uma

restrição de 250 incidentes por ponto de encontro (Figura 4.5) resulta num máximo de 750 evacuados e 250 veículos num ponto de encontro.

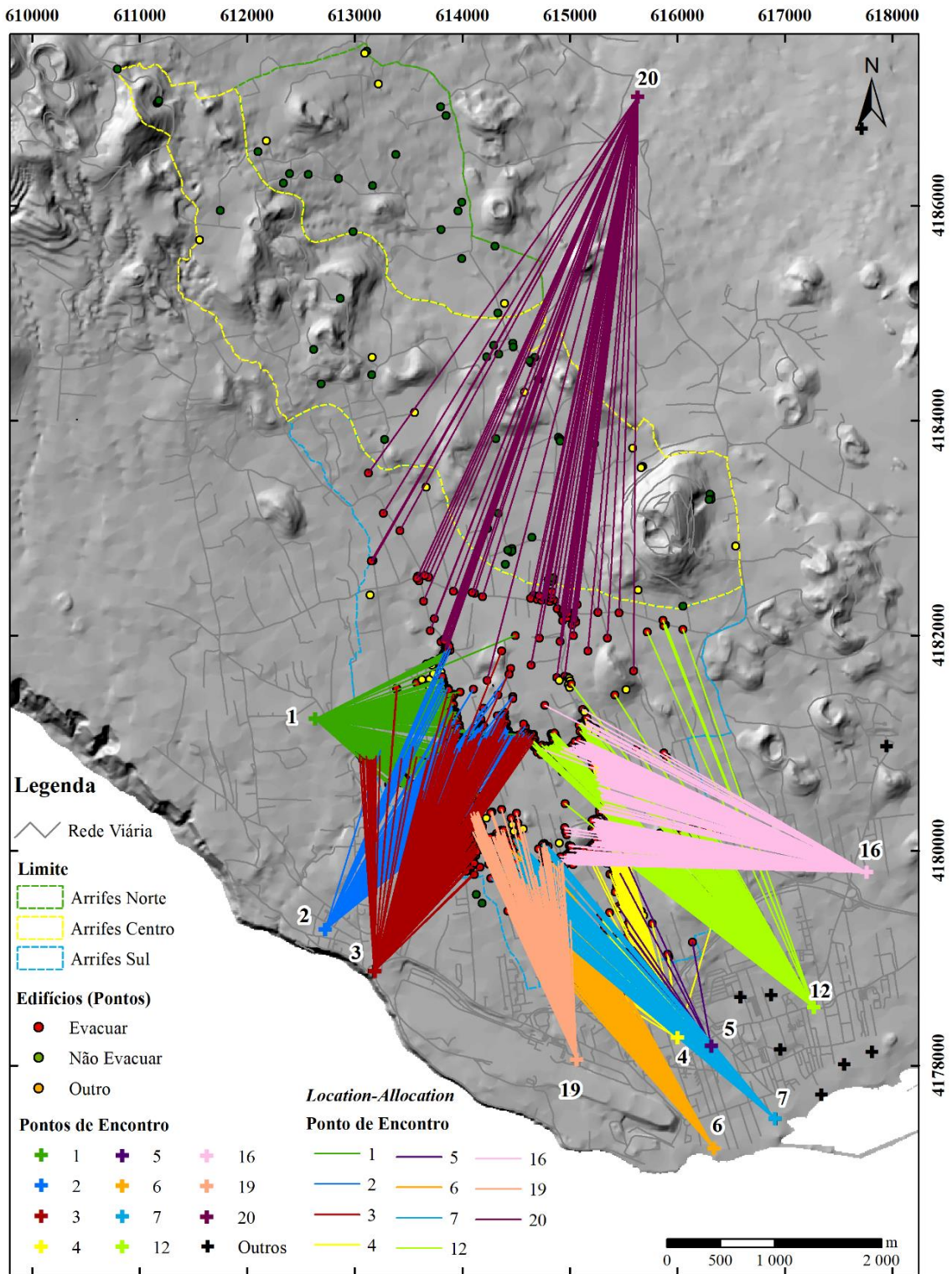


Figura 4.5. Mapa resultante da aplicação da ferramenta *Location-Allocation*, com restrição de 250 incidentes por ponto de encontro. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Neste caso, são utilizados onze pontos de encontro distintos para albergar os habitantes a evacuar. Verifica-se que as quatro localizações anteriores recebem o máximo de agregados familiares, às quais se juntam as localizações 2, 3 e 6.

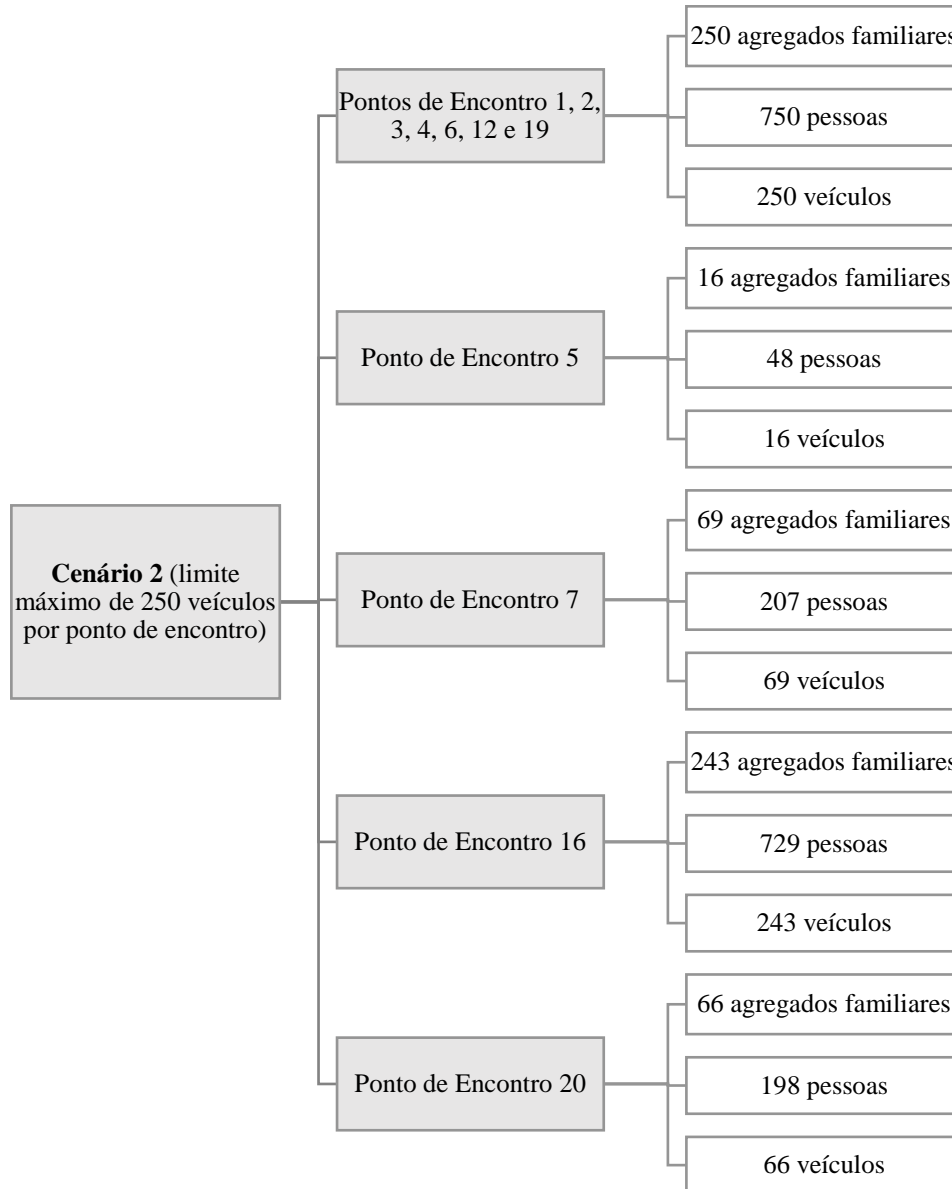


Figura 4.6. Distribuição da população e dos veículos pelos pontos de encontro com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.

A figura 4.6 discrimina a distribuição dos evacuados pelos onze pontos de encontro selecionados com a restrição de 250 edifícios habitacionais por ponto de encontro.

Aplicando a análise de novas rotas, são determinadas as rotas entre os edifícios habitacionais e os pontos de encontro para os quais se devem dirigir em caso de

evacuação. A análise das novas rotas, mostra que para sair da área delimitada são nove as estradas preferenciais (Figura 4.7).

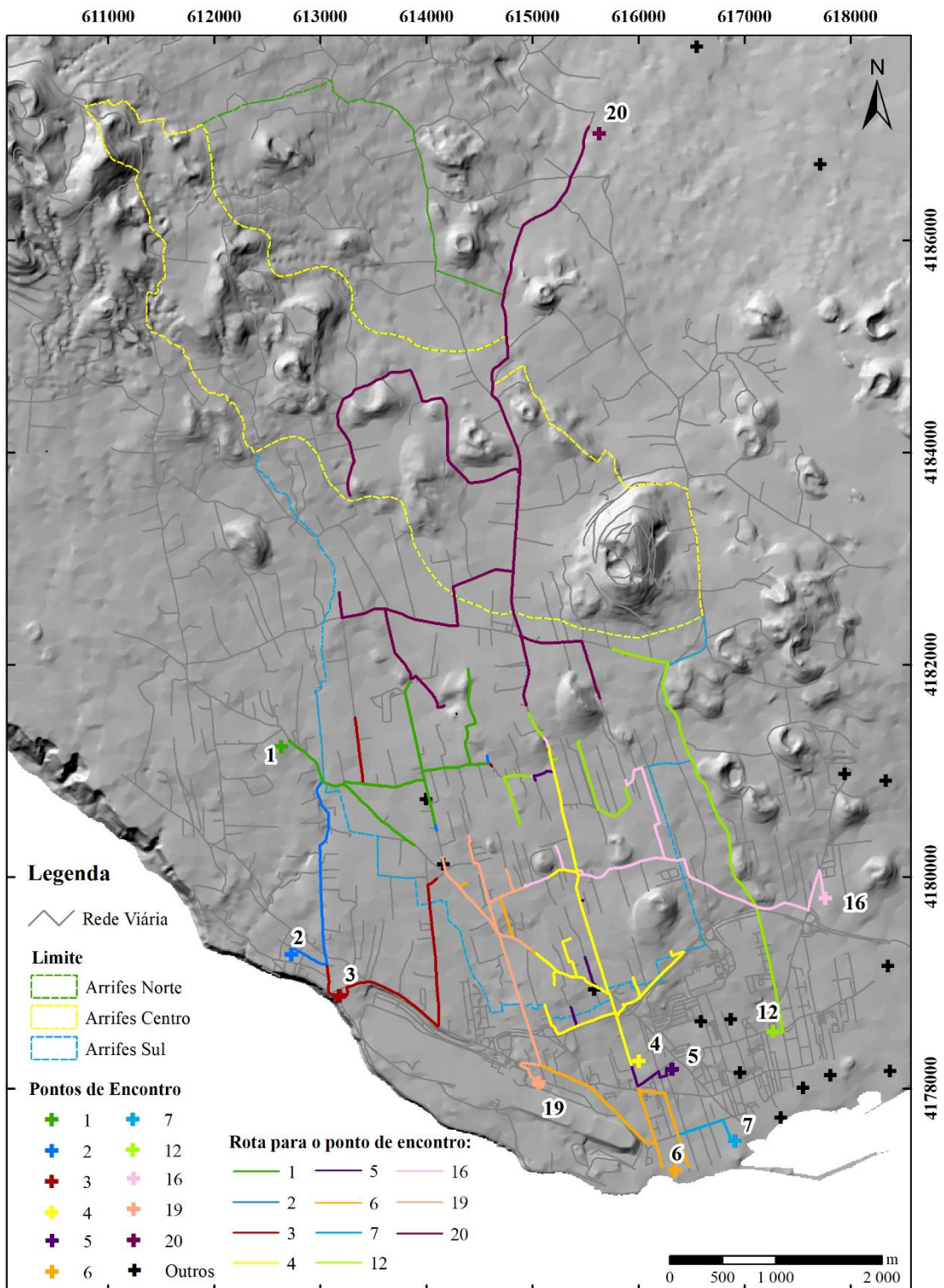


Figura 4.7. Mapa das rotas entre os edifícios e os pontos de encontro, com a restrição de 250 veículos por ponto de encontro, utilizando a ferramenta *New Route*. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Esta análise evidencia ainda que existe um conjunto de estradas partilhadas entre as rotas de evacuação para diversos pontos de encontro. Para a localização 1 e para a localização 2 a estrada de saída da área a evacuar é a mesma, a Rua Amaro Dias, que na bifurcação seguem na Rua da Nossa Senhora da Ajuda os evacuados para a localização 1 e seguem na Rua da Nossa Senhora da Graça os evacuados para a localização 2.

A Rua dos Valados é exclusiva para o conjunto de agregados que deve optar pela localização 3. Em contrapartida, a saída pela Rua da Piedade que liga à Rua do Paim é a escolha para a população que se desloca para qualquer um dos pontos de encontro 4, 5, 6, 7 e 19. Sendo que para esta última localização podem seguir evacuados da Avenida João Paulo II.

Para as localizações 12 e 16 as estradas de evacuação são as mesmas, a primeira é da Rua da Grotinha à M502-1 e a segunda é a M510. Os evacuados que devem seguir para a localização 20 seguem pela M501 para sair da área limite (Anexo XI).

Na figura 4.8 é passível de se observar o edificado com a mesma tonalidade dos pontos de encontro para os quais devem seguir, o que facilita a perceção da população para o local para o qual se devem dirigir.

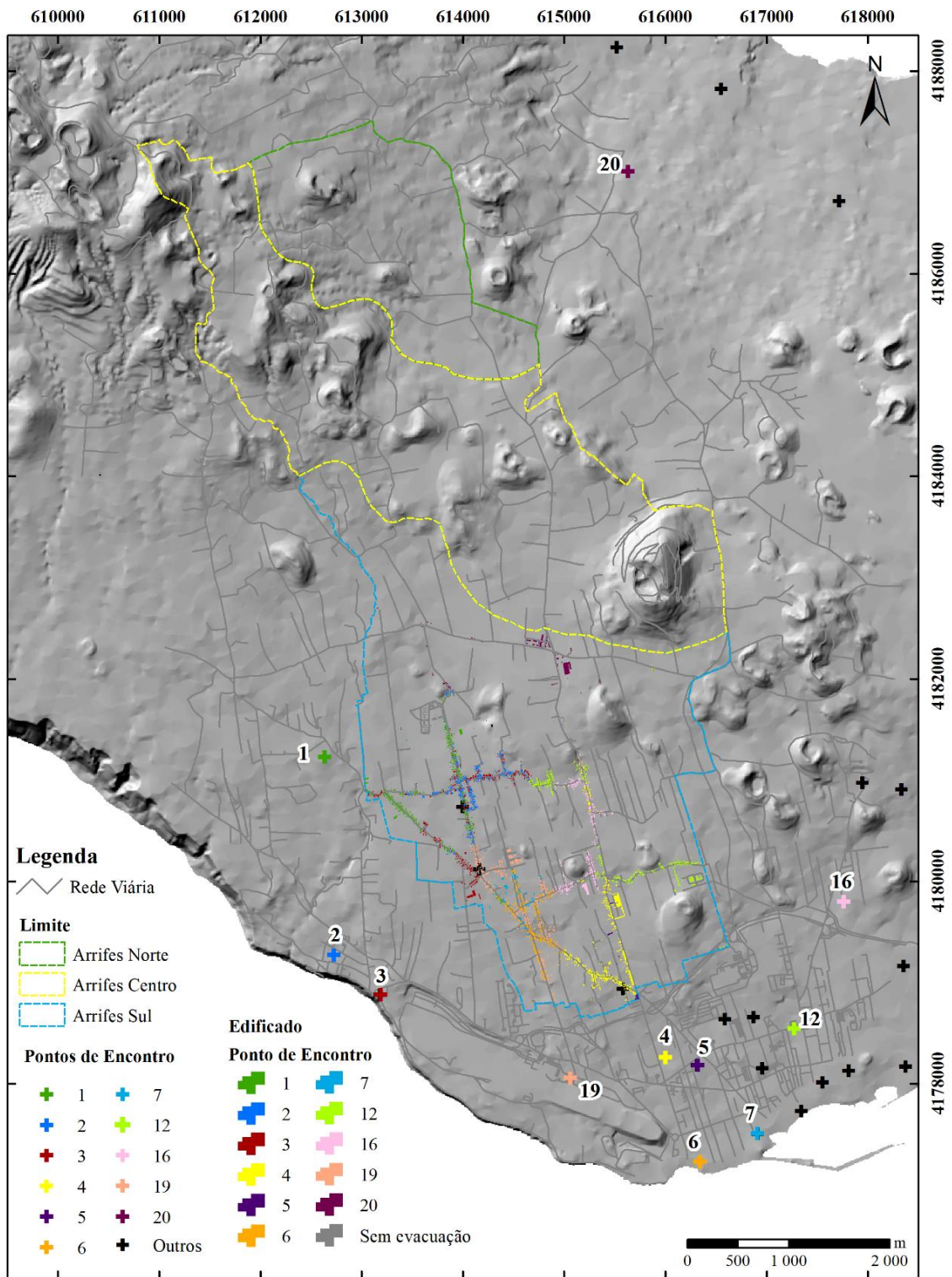


Figura 4.8. Mapa com a discriminação dos edifícios a evacuar, de acordo com o ponto de encontro para o qual os respetivos agregados familiares se devem dirigir, considerando um limite de 250 edifícios por ponto de encontro. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

A mesma análise foi realizada com uma restrição de 150 incidentes por ponto de encontro para averiguar a sensibilidade da evacuação às restrições dos pontos de encontro (Figura 4.9).

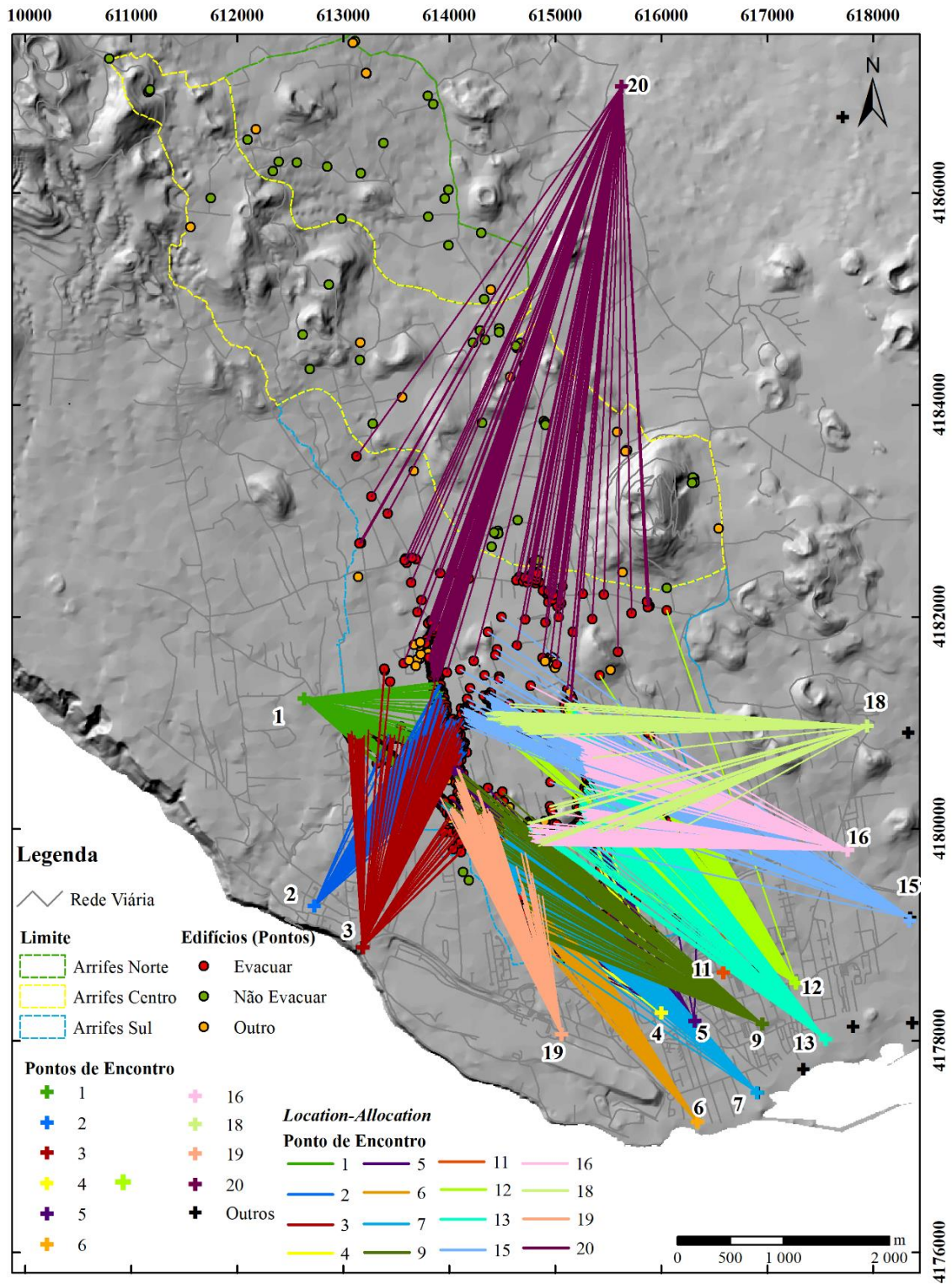


Figura 4.9. Mapa resultante da aplicação da ferramenta *Location-Allocation*, com restrição de 150 incidentes por instalação. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Neste caso, os pontos de encontro aumentaram para 16 de forma a dar resposta aos 2 144 incidentes e sobreveio o recurso a um ponto de encontro a N da freguesia de Arrifes.

A distribuição dos agregados familiares por cada ponto de encontro mostrou-se uniforme, com apenas um valor fora do esperado, ou seja, com reduzido número de agregados familiares (Figura 4.10). Os pontos de encontro preferenciais para os cenários anteriores mantiveram-se como sendo os pontos de encontro que atingem a capacidade limite. Assim as localizações que contam com 150 incidentes são as localizações 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 16, 18 e 19. A localização 20 recebe 120 incidentes e a localização 15 recebe 140 incidentes. As localizações que recebem menor quantidade de incidentes são os pontos de encontro 9 e 11, com 80 e 4 agregados familiares, respetivamente.

A análise da figura 4.10 mostra a distribuição de veículos e da população pelos pontos de encontro circundantes à área a evacuar, considerando a restrição de 150 agregados familiares por ponto de encontro.

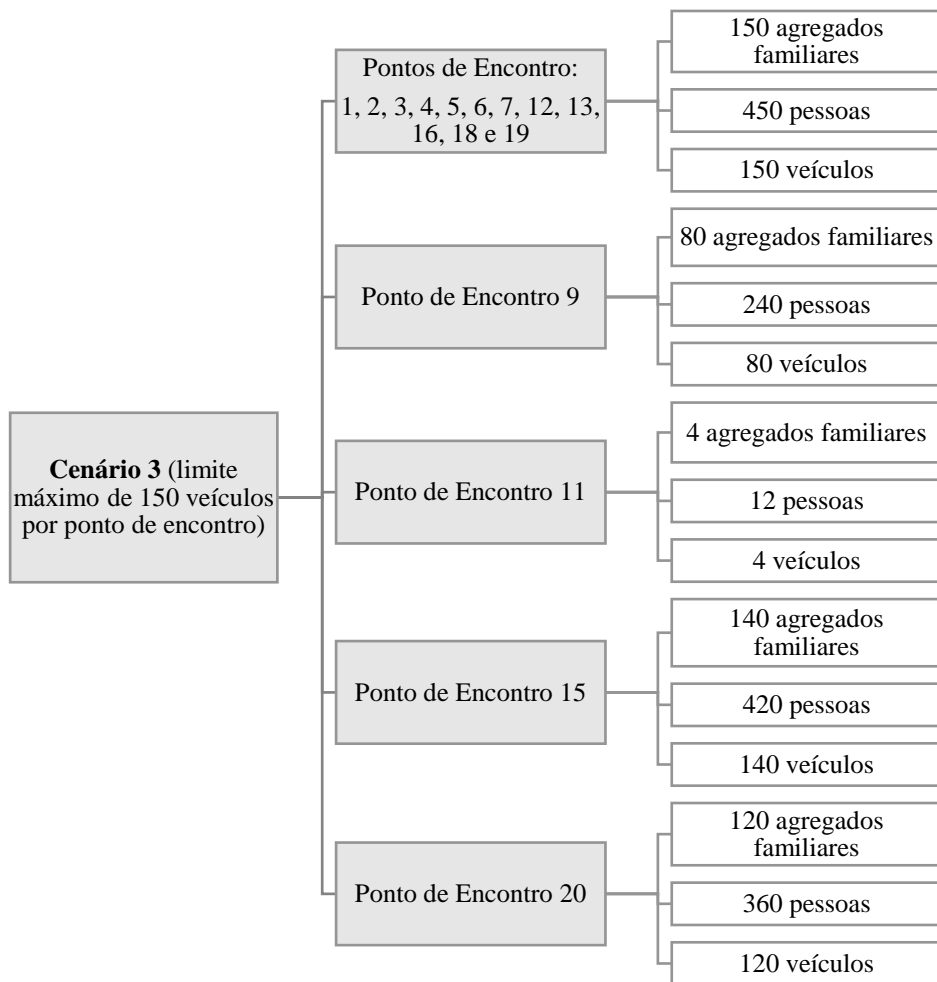


Figura 4.10. Distribuição da população e dos veículos pelos pontos de encontro, com restrição de 150 incidentes.

A figura 4.11 mostra as rotas entre os agregados familiares e os pontos de encontro para as quais se devem deslocar, utilizando a ferramenta *New Route*.

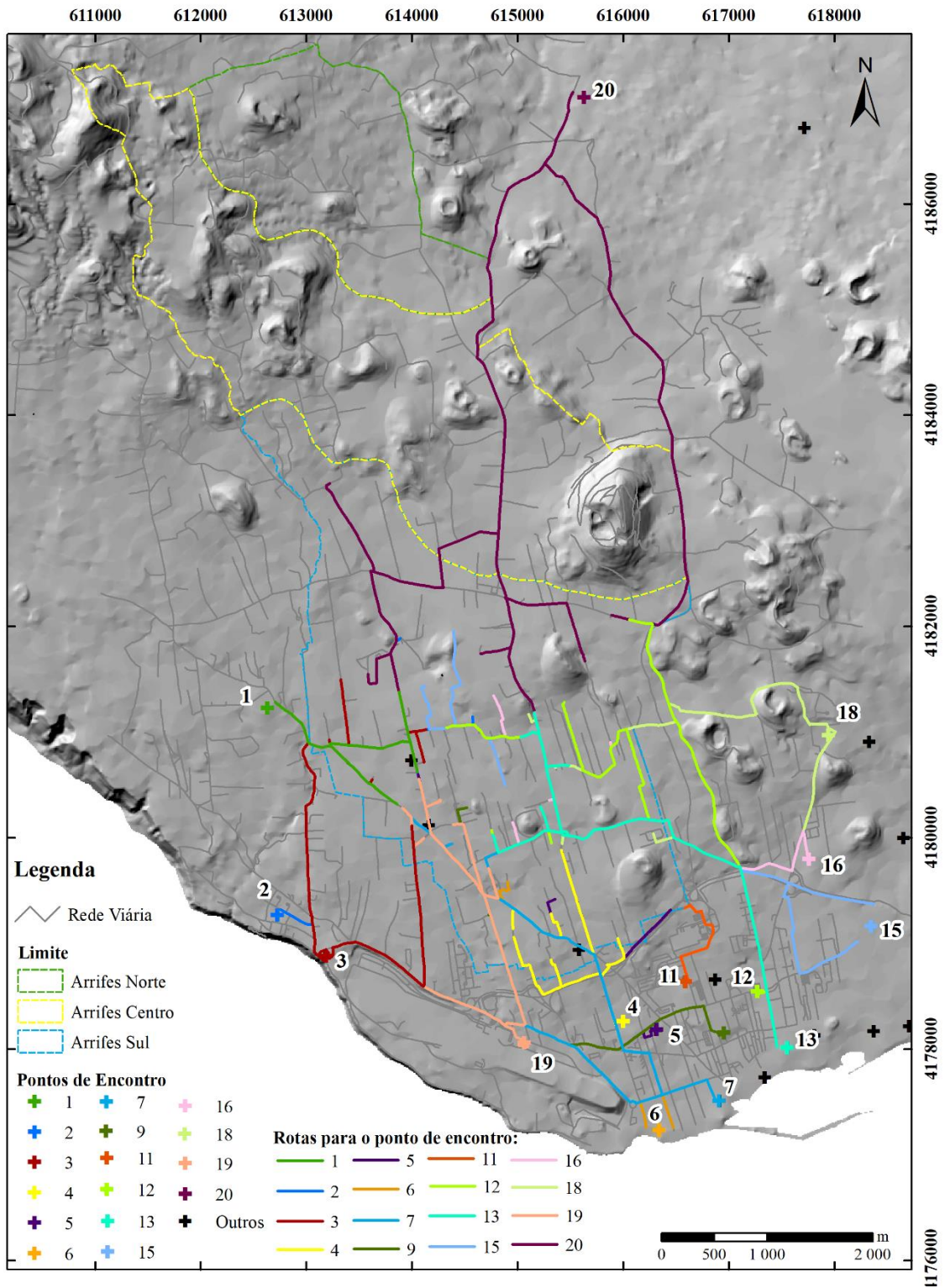


Figura 4.11. Mapa das rotas entre os edifícios e os pontos de encontro, com a restrição de 150 veículos por ponto de encontro, utilizando a ferramenta *New Route*. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

Pela análise da figura, observa-se que as estradas para sair do limite da evacuação são as mesmas que foram utilizadas para o cenário anterior. A diferença encontra-se na partilha de estradas, uma vez que as estradas utilizadas para alcançar o ponto de encontro

19 são as mesmas que para alcançar os pontos de encontro 3 e 2, mudando a direção na bifurcação após a saída da zona limite. Para além disso, a localização 20 passou a contar com elementos provenientes de duas rotas distintas, sendo a segunda o Caminho da Serra Gorda (Anexo XI). Destaca-se, ainda, que o ponto de encontro 11, apesar de próximo da zona de evacuação, tem uma utilização nula ou muito reduzida, claramente diferente dos restantes. Isto deve-se ao facto de o ponto de encontro estar localizado numa zona de estrada de sentido único, o que faz com que o percurso até este seja mais demorado que para outros pontos de encontro.

Na figura 4.12 observa-se a distribuição do edificado pelos pontos de encontro através da tonalidade de cada edifício e do ponto de encontro correspondente.

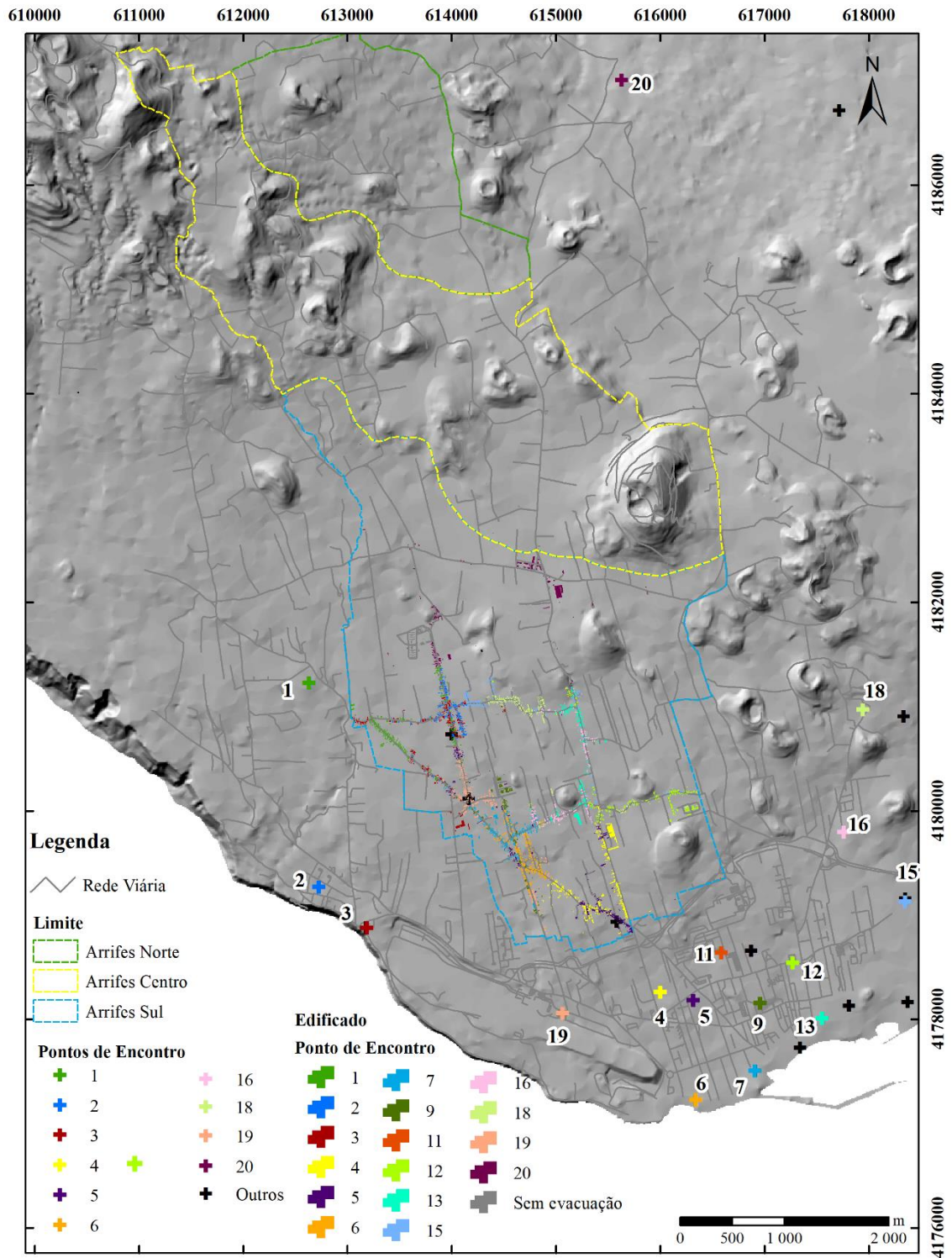


Figura 4.12. Mapa com a discriminação dos edifícios a evacuar, de acordo com o ponto de encontro para o qual os respetivos agregados familiares se devem dirigir, considerando um limite de 150 edifícios por ponto de encontro. Projeção UTM, Zona 26S; Datum WGS84.

4.4. Tempo da Evacuação

A análise das rotas definidas pelo método do ponto de encontro mais próximo permite calcular o tempo de percurso máximo, mínimo e médio entre os agregados familiares e os pontos de encontro para os quais se devem dirigir.

Tabela 4.3. Tempo mínimo, máximo e médio em minutos dos percursos entre os agregados familiares e os pontos de encontro, sem qualquer tipo de restrição.

Ponto de encontro mais próximo			
Ponto de Encontro	Tempo Mínimo (minutos)	Tempo Máximo (minutos)	Tempo Médio do Percurso (minutos)
Localização 1	0,65	6,15	2
Localização 4	1,84	5,49	2,95
Localização 12	2,72	4,79	3,22
Localização 19	1,88	4,23	2,92

Observa-se que na tabela 4.3 o tempo de trânsito mínimo entre um dado edifício e o ponto de encontro 1 corresponde a menos de um minuto e que o tempo médio do percurso é de cerca de dois minutos. A localização 12 é a que representa, neste cenário, a localização com maior tempo médio de percurso, com uma média de cerca de 3 minutos. O tempo máximo de deslocação de cada veículo para o respetivo ponto de encontro varia entre os quatro minutos e os seis minutos. No entanto, esta análise mostra apenas o tempo necessário para um único veículo se dirigir do ponto de origem até ao ponto de encontro, e esse tempo é diferente do necessário se múltiplos veículos estiverem a percorrer o mesmo percurso.

Outro aspeto passível de ser analisado é a distância entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro para as quais se deslocam. Na tabela 4.4 registam-se as distâncias mínimas, máximas e médias entre os agregados familiares e cada um dos quatro pontos selecionados.

Tabela 4.4. Dados estatísticos da distância mínima, máxima e média em quilómetros entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro, sem considerar qualquer tipo de restrição.

Ponto de encontro mais próximo			
Ponto de Encontro	Distância Mínima (quilómetros)	Distância Máxima (quilómetros)	Distância Média (quilómetros)
Localização 1	0,54	5,73	2,01
Localização 4	0,81	4,12	2,08
Localização 12	2,06	4,45	2,52
Localização 19	1,27	2,80	2,24

A distância média entre os edifícios a evacuar e os quatro pontos de encontro é sempre inferior a três quilómetros. A distância mínima é de meio quilómetro para os agregados familiares que se dirigem para o ponto de encontro 1 e a distância máxima é de menos de quatro quilómetros e meio para os agregados que se dirigem para a localização 12.

Salienta-se que neste cenário não há congestionamento das estradas, ou seja, a capacidade das estradas permite o fluxo previsto para cada ponto de encontro, pelo que a estrada deve dar resposta ao escoamento dos 1 062 automóveis ligeiros previstos para a deslocação entre os edifícios e o ponto de encontro 1.

Para reduzir o número de evacuados e de automóveis a chegar a cada ponto de encontro, foram realizados dois testes com restrições de capacidade de cada ponto de encontro. Na tabela 4.5 destacam-se os parâmetros temporais entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro, utilizando a restrição de 250 veículos por ponto de encontro.

Tabela 4.5. Tempo mínimo, máximo e médio em minutos dos percursos entre os agregados familiares e os pontos de encontro, com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.

Ponto de encontro mais próximo (limite de 250 veículos)			
Ponto de Encontro	Tempo Mínimo (minutos)	Tempo Máximo (minutos)	Tempo médio de Percurso (minutos)
Localização 1	0,67	5,44	1,80
Localização 2	3,60	7,04	4,92
Localização 3	2,81	7,32	4,21
Localização 4	1,84	4,40	2,56
Localização 5	3,77	5,66	4,70
Localização 6	3,00	5,34	4,02
Localização 7	4,14	5,70	4,92
Localização 12	2,72	6,72	4,24
Localização 16	4,39	6,60	4,83
Localização 19	1,88	4,96	3,20
Localização 20	5,24	8,52	6,16

A análise da tabela permite identificar os pontos de encontro com menor tempo médio de percurso que, para este cenário são as localizações 1 e 4, destacando-se por um tempo médio inferior aos três minutos, seguidos da localização 19 com uma média inferior a três minutos e meio. A localização com maior tempo médio é o ponto de encontro 20 que ultrapassa os seis minutos. As restantes enquadram-se num leque entre os quatro e os cinco minutos.

No que concerne ao tempo máximo, verifica-se que varia entre 4 e 9 minutos, que corresponde aos tempos de percurso entre os agregados familiares e os pontos de encontro

4 e 20, respetivamente. O tempo mínimo mantém-se para o percurso entre os agregados familiares e o ponto de encontro 1, com menos de 1 minuto.

À semelhança da análise anterior, na tabela 4.6 estão registadas as distâncias mínimas, máximas e médias entre os edifícios e o respetivo ponto de encontro, com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.

Tabela 4.6. Dados estatísticos da distância mínima, máxima e média em quilómetros entre os edifícios a evacuar e os

Ponto de encontro mais próximo (limite de 250 veículos)			
Ponto de Encontro	Distância Mínima (quilómetros)	Distância Máxima (quilómetros)	Distância Média (quilómetros)
Localização 1	0,55	3,06	1,48
Localização 2	2,43	4,37	3,49
Localização 3	2,27	4,69	3,26
Localização 4	0,81	3,20	1,56
Localização 5	1,44	3,82	1,91
Localização 6	2,24	3,72	3,20
Localização 7	3,54	4,37	4,05
Localização 12	2,06	5,19	3,57
Localização 16	3,32	4,90	3,78
Localização 19	1,27	3,13	2,48
Localização 20	5,26	7,82	6,18

pontos de encontro, com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.

Na tabela anterior verifica-se que em média os pontos de encontro 1, 4 e 5 estão localizados a menos de dois quilómetros dos agregados familiares que vão receber. Sendo a localização 20 a mais distante, com os agregados familiares a uma distância média de seis quilómetros. As restantes localizações encontram-se numa média de distância entre os dois e os quatro quilómetros.

Verifica-se ainda, que a distância máxima é de 7,8 quilómetros e que corresponde ao percurso entre os agregados familiares e o ponto de encontro 20. A distância mínima mantém-se inferior a 1 quilómetro e corresponde à distância entre os agregados e o ponto de encontro 1.

Para o terceiro cenário, o processo realizado foi o mesmo, uma análise estatística dos dados temporais e espaciais para a deslocação entre os agregados familiares e os pontos de encontro. Na tabela 4.7 estão especificados os tempos mínimos, máximos e médios do percurso, no caso de se restringir um máximo de 150 veículos por ponto de encontro.

Tabela 4.7. Tempo mínimo, máximo e médio em minutos dos percursos entre os agregados familiares e os pontos de encontro, com restrição de 150 veículos por ponto de encontro.

Ponto de encontro mais próximo (limite de 150 veículos)			
Ponto de Encontro	Tempo Mínimo (minutos)	Tempo Máximo (minutos)	Tempo médio de Percurso (minutos)
Localização 1	0,69	2,48	1,47
Localização 2	3,71	5,71	4,71
Localização 3	2,81	5,26	3,9
Localização 4	1,85	4,3	2,54
Localização 5	3,7	6,97	4,8
Localização 6	3,03	5,07	4,02
Localização 7	3,6	5,42	4,73
Localização 9	4,92	7,65	6,13
Localização 11	3,27	3,43	3,37
Localização 12	2,81	6,62	4,01
Localização 13	4,58	5,72	5,05
Localização 15	3,97	9,69	6,63
Localização 16	3,24	6,6	4,84
Localização 18	4,05	6,56	5,88
Localização 19	1,88	4,12	3,33
Localização 20	5,24	8,82	6,64

O ponto de encontro 1 mantém-se com uma média de tempo de percurso mais baixa, sendo que neste cenário é a única localização que se encontra em média a menos de dois minutos dos agregados familiares. Segue-se a localização 4 com uma média de dois minutos e meio, estando os restantes pontos de encontro a uma média entre três e sete minutos.

Além disso, o tempo mínimo mantém-se inferior a 1 minuto e corresponde à deslocação até ao ponto de encontro 1. O tempo máximo é de nove minutos e corresponde ao tempo de percurso entre os agregados familiares e o ponto de encontro 15.

A tabela 4.8 permite analisar as distâncias mínimas, máximas e médias entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro, com uma restrição de 150 veículos por ponto de encontro.

Tabela 4.8. Dados estatísticos da distância mínima, máxima e média em quilómetros entre os edifícios a evacuar e os pontos de encontro, com restrição de 150 veículos por ponto de encontro.

Ponto de encontro mais próximo (limite de 150 veículos)			
Ponto de Encontro	Distância Mínima (quilómetros)	Distância Máxima (quilómetros)	Distância Média (quilómetros)
Localização 1	0,55	2,01	1,22
Localização 2	2,58	3,69	3,33
Localização 3	2,27	3,77	3,08
Localização 4	0,85	2,14	1,42
Localização 5	1,43	4,04	2,55
Localização 6	2,28	3,67	3,16
Localização 7	2,84	4,59	3,98
Localização 9	3,47	5,22	4,46
Localização 11	1,09	1,35	1,23
Localização 12	2,25	5,27	3,30
Localização 13	3,82	4,89	4,34
Localização 15	3,31	6,97	5,74
Localização 16	2,31	4,90	3,74
Localização 18	2,96	5,79	5,14
Localização 19	1,27	3,25	2,63
Localização 20	5,26	7,93	6,72

Novamente, o ponto de encontro 1 encontra-se a uma distância média inferior, seguindo-se as localizações 11 e 4, as três com uma distância inferior a dois quilómetros. O ponto de encontro 20 encontra-se a uma distância média de quase sete quilómetros, seguido do ponto de encontro 15 com quase seis quilómetros de distância média entre os agregados familiares e o ponto de encontro.

Pode ser observado, ainda, que a distância mínima é atribuída ao ponto de encontro 1, com meio quilómetro e que a distância máxima corresponde ao ponto de encontro 20, com quase oito quilómetros. Verifica-se também que o percurso mais longo espacialmente nem sempre corresponde ao mais longo temporalmente, isto porque a ferramenta tem em conta as velocidades aplicadas em cada estrada, bem como o(s) sentido(s) da mesma.

Por exemplo, neste cenário, a distância máxima corresponde à distância entre os agregados e o ponto de encontro 20, no entanto o tempo de percurso mais longo corresponde à deslocação entre os agregados familiares e o ponto de encontro 15.

Contudo, a análise da tabela 4.9 permite verificar que com a restrição imposta, o percurso entre os agregados familiares a evacuar e os pontos de encontro de destino ficam a menos de oito quilómetros e de dez minutos.

No que concerne à evacuação total, para cada ponto de encontro foi aplicada a equação 3.9 descrita no capítulo 3, que de forma conservadora permite o cálculo do tempo total para evacuar todos os agregados familiares até aos respetivos pontos de encontro, através da relação entre o tempo de percurso máximo até cada ponto de encontro, o número de veículos com destino ao ponto de encontro e uma capacidade da estrada de 600 veículos/hora, ou seja, à taxa de 1 veículo a cada seis segundos.

Tabela 4.9. Cálculo do tempo total, em horas, para evacuação de toda a população para os respetivos pontos de encontro, sem congestionamento.

	Evacuação Total Sem Congestionamento (horas)		
	Ponto mais próximo	Máximo de 250 veículos	Máximo de 150 veículos
Localização 1	1 hora e 52 minutos	30 minutos	17 minutos
Localização 2	-	31 minutos	20 minutos
Localização 3	-	32 minutos	20 minutos
Localização 4	1 hora e 4 minutos	29 minutos	19 minutos
Localização 5	-	7 minutos	21 minutos
Localização 6	-	30 minutos	19 minutos
Localização 7	-	12 minutos	20 minutos
Localização 9	-	-	15 minutos
Localização 11	-	-	3 minutos
Localização 12	11 minutos	31 minutos	21 minutos
Localização 13	-	-	20 minutos
Localização 15	-	-	23 minutos
Localização 16	-	30 minutos	21 minutos
Localização 18	-	-	21 minutos
Localização 19	46 minutos	30 minutos	19 minutos
Localização 20	-	15 minutos	21 minutos

A tabela 4.9 apresenta os cálculos efetuados para a evacuação completa para cada um dos pontos de encontro, em cada cenário, no caso de não haver congestionamento.

Através da análise da tabela, observa-se que no primeiro cenário seria necessária 1 hora e 52 minutos para completar a evacuação. No segundo cenário seriam necessários 36 minutos para evacuar, e no terceiro cenário, em 23 minutos os evacuados estariam todos nos respetivos pontos de encontro.

Salienta-se que, quanto maior é a dispersão dos pontos de encontro, mais serão os locais para aceder e transportar a população para centros de realojamento, ou seja, será sempre necessária uma análise que pondere o custo da dispersão de recursos.

4.5. Congestionamento

O congestionamento foi analisado de forma semelhante a Wild *et al.* (2021), aplicando uma obstrução de cada estrada de um terço e de dois terços, ou seja, caso haja um congestionamento de um terço significa que a estrada mantém dois terços da sua capacidade de escoamento e se houver um congestionamento de dois terços significa que se mantém apenas um terço da capacidade da estrada.

Os cálculos tiveram como base os dados temporais de cada cenário. A tabela 4.10 demonstra os dados do congestionamento imposto ao tempo máximo entre a população a evacuar e os pontos de encontro.

Tabela 4.10. Dados temporais, em horas, dos congestionamentos da estrada a um terço e a dois terços para o cenário 1.

Ponto mais próximo		
Ponto de Encontro	Congestionamento da estrada em 1/3	Congestionamento da estrada em 2/3
	Máximo (horas)	Máximo (horas)
Localização 1	2,49	3,12
Localização 4	1,43	1,79
Localização 12	0,25	0,31
Localização 19	1,04	1,30

Pela análise da tabela observa-se que, para um terço da estrada congestionada, o percurso com rumo ao ponto de encontro 1 tem um aumento de 37 minutos, e no caso da estrada estar dois terços congestionada o aumento é de 1 hora e 20 minutos. Os restantes percursos variam temporalmente entre 15 minutos e 1 hora e 25 minutos, para um terço do congestionamento da estrada, e entre 18 minutos e 1 hora e 47 minutos para dois terços do congestionamento da estrada. A ordem de chegada aos respetivos pontos de encontro é proporcional à quantidade de veículos que cada ponto de encontro recebe.

O cálculo do congestionamento pode ser aplicado às restantes análises. Na tabela 4.11 observa-se a aplicação de congestionamento aos dados provenientes da restrição de 250 veículos por ponto de encontro.

Tabela 4.11. Dados temporais, em horas, dos congestionamentos da estrada a um terço e a dois terços, com restrição máxima de 250 veículos por ponto de encontro.

Ponto de encontro mais próximo (limite de 250 veículos)		
Ponto de Encontro	Congestionamento da estrada em 1/3	Congestionamento da estrada em 2/3
	Máximo (horas)	Máximo (horas)
Localização 1	0,67	0,84
Localização 2	0,71	0,89
Localização 3	0,72	0,90
Localização 4	0,65	0,81
Localização 5	0,16	0,20
Localização 6	0,67	0,84
Localização 7	0,28	0,35
Localização 12	0,70	0,88
Localização 16	0,68	0,86
Localização 19	0,66	0,83
Localização 20	0,33	0,42

A análise da tabela permite averiguar que o ponto de encontro 3 corresponde ao ponto com mais tempo de percurso, independentemente do congestionamento. Apesar de o ponto de encontro 3 se encontrar a menor distância que o ponto de encontro 16, a quantidade de veículos é superior, pelo que levará mais tempo a concluir a evacuação para o ponto de encontro 3. Aplicando o congestionamento da estrada a um terço e a dois terços, o aumento é de 11 e 22 minutos, respetivamente.

A localização 5 corresponde ao ponto de encontro com menor número de veículos, pelo que a evacuação será mais célere, com um máximo de 9 e de 12 minutos para um terço e dois terços de congestionamento, respetivamente.

No que concerne o congestionamento para o cenário com restrição máxima de 150 veículos por ponto de encontro, o tempo máximo é de 31 minutos em caso de um terço de congestionamento e de 39 minutos no caso de dois terços de congestionamento (Tabela 4.12).

Tabela 4.12. Dados temporais, em horas, dos congestionamentos da estrada a um terço e dois terços, com uma restrição máxima de 150 veículos por ponto de encontro.

Ponto de encontro mais próximo (limite de 150 veículos)		
Ponto de Encontro	Congestionamento da estrada em 1/3	Congestionamento da estrada em 2/3
	Máximo (horas)	Máximo (horas)
Localização 1	0,39	0,48
Localização 2	0,46	0,57
Localização 3	0,45	0,56
Localização 4	0,43	0,53
Localização 5	0,49	0,61
Localização 6	0,44	0,55
Localização 7	0,45	0,56
Localização 9	0,35	0,43
Localização 11	0,08	0,10
Localização 12	0,48	0,60
Localização 13	0,46	0,57
Localização 15	0,52	0,66
Localização 16	0,48	0,60
Localização 18	0,48	0,60
Localização 19	0,42	0,53
Localização 20	0,46	0,58

Neste cenário, o ponto de encontro com mais tempo de viagem é a localização 15, com uma diferença de mais 8 minutos em caso de um terço de congestionamento da estrada e mais 16 minutos em caso de dois terços de congestionamento em relação ao valor em fluxo livre (23 minutos).

No que concerne à sequência dos pontos de encontro, observa-se que o tempo máximo de evacuação varia conforme o número de veículos que o ponto de encontro espera receber, pelo que nem sempre a localização mais próxima apresenta o menor tempo de percurso.

De forma a facilitar a interpretação do congestionamento nas três fases analisadas, elaboraram-se as tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13. Evacuação total, em horas, com congestionamento da estrada a um terço, para os três cenários desenvolvidos (sem restrição, com 250 veículos de restrição e com 150 veículos de restrição).

	Evacuação Total Com Congestionamento da Estrada a 1/3		
	Ponto mais próximo	Máximo de 250 veículos a evacuar	Máximo de 150 veículos a evacuar
Localização 1	2 hora e 29 minutos	40 minutos	23 minutos
Localização 2	-	42 minutos	27 minutos
Localização 3	-	43 minutos	27 minutos
Localização 4	1 hora e 25 minutos	39 minutos	25 minutos
Localização 5	-	9 minutos	29 minutos
Localização 6	-	40 minutos	26 minutos
Localização 7	-	16 minutos	27 minutos
Localização 9	-	-	21 minutos
Localização 11	-	-	4 minutos
Localização 12	15 minutos	42 minutos	28 minutos
Localização 13	-	-	27 minutos
Localização 15	-	-	31 minutos
Localização 16	-	40 minutos	28 minutos
Localização 18	-	-	28 minutos
Localização 19	1 horas e 2 minutos	39 minutos	25 minutos
Localização 20	-	19 minutos	27 minutos

Tabela 4.14. Evacuação total, em horas, com congestionamento da estrada a dois terços, para os três cenários desenvolvidos (sem restrição, com 250 veículos de restrição e com 150 veículos de restrição).

	Evacuação Total Com Congestionamento da Estrada a 2/3		
	Ponto mais próximo	Máximo de 250 veículos a evacuar	Máximo de 150 veículos a evacuar
Localização 1	3 hora e 7 minutos	50 minutos	28 minutos
Localização 2	-	53 minutos	34 minutos
Localização 3	-	54 minutos	33 minutos
Localização 4	1 hora e 47 minutos	48 minutos	31 minutos
Localização 5	-	12 minutos	36 minutos
Localização 6	-	50 minutos	33 minutos
Localização 7	-	21 minutos	33 minutos
Localização 9	-	-	25 minutos
Localização 11	-	-	6 minutos
Localização 12	18 minutos	52 minutos	36 minutos
Localização 13	-	-	34 minutos
Localização 15	-	-	39 minutos
Localização 16	-	51 minutos	36 minutos
Localização 18	-	-	36 minutos
Localização 19	1 horas e 18 minutos	49 minutos	31 minutos
Localização 20	-	25 minutos	34 minutos

No que respeita o tempo de evacuação total, em caso de ser o ponto mais próximo, o tempo total varia entre duas e três horas. Quando se impõe as restrições de capacidade máxima, o tempo total de evacuação é sempre inferior a 1 hora, independentemente da restrição e do congestionamento.

CAPITULO V – DISCUSSÃO

5.1. Discussão

Num cenário de potencial erupção vulcânica no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (SVFP) poderá ser necessária a evacuação da população de uma ou mais freguesias. Sendo assim, revela-se de particular importância este tipo de estudo que poderá constituir uma ferramenta fulcral durante a gestão de uma crise, neste caso, vulcânica. No sentido de testar metodologias para a análise da eficácia de uma evacuação, utilizou-se o caso de estudo da freguesia de Arrifes, na perspectiva de que as metodologias testadas poderão depois ser aplicadas às restantes freguesias do concelho de Ponta Delgada e mesmo da região.

A área de estudo incidiu na freguesia de Arrifes devido à sua extensão territorial e densidade populacional. Optou-se por um cenário de erupção vulcânica havaiana e/ou estromboliana com desenvolvimento de escoadas lávicas, por ser um cenário com elevada probabilidade de ocorrência no SVFP.

A análise da população a evacuar teve por base as estatísticas de 2021 do Instituto Nacional de Estatística de Portugal (INE), nomeadamente o total da população a residir na freguesia de Arrifes. Neste estudo não foram considerados os movimentos pendulares, uma vez que foi estudada a evacuação num cenário noturno, por forma a simplificar a aplicação da metodologia.

Inicialmente dividiu-se a freguesia em três parcelas, (1) a zona N corresponde à secção onde as escoadas lávicas fluem somente para N, (2) a zona central corresponde à secção onde as escoadas lávicas fluem para os lados N e S da freguesia e (3) a zona S corresponde à secção onde as escoadas lávicas fluem apenas para S. Optou-se por um cenário de erupção na zona S da freguesia de Arrifes, por ser a secção de maior densidade populacional. Utilizaram-se os dados da carta militar da ilha de São Miguel, à escala 1:25 000 de 2002, para conhecer a distribuição do edificado e das estradas da freguesia de Arrifes e testaram-se os pontos de encontro estabelecidos no Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPD), como pontos de destino das rotas de evacuação, utilizando-se diferentes metodologias refletindo diferentes condições de evacuação. Contudo, neste estudo não se efetuou uma análise crítica dos pontos de encontro definidos no PMEPCPD. Apenas se efetua a testagem relativamente à sua localização em relação ao edificado e rotas possíveis.

O primeiro cenário testado considerou uma evacuação sem constrangimento do número de evacuados/veículos em cada ponto de encontro e em que cada evacuado apenas procura o seu ponto de encontro mais próximo. Pela análise dos resultados concluiu-se que seriam escolhidos quatro pontos de encontro para receber os 6 437 habitantes, sendo que o ponto de encontro 1 seria o escolhido de 3 186 residentes, ou seja, de 1 062 veículos. Em seguida calculou-se o tempo de evacuação de todos os veículos para cada ponto de encontro. Conclui-se que neste cenário existe uma grande discrepância entre a chegada do primeiro e do último veículo ao ponto de encontro 1 (cerca de 1 hora e 52 minutos), devendo-se à grande afluência a este ponto de encontro. A menor diferença no tempo entre a chegada do primeiro e do último veículo corresponde ao ponto de encontro 12, que representa o ponto de encontro que recebe menos veículos, cerca de 66 (Figura 5.1).

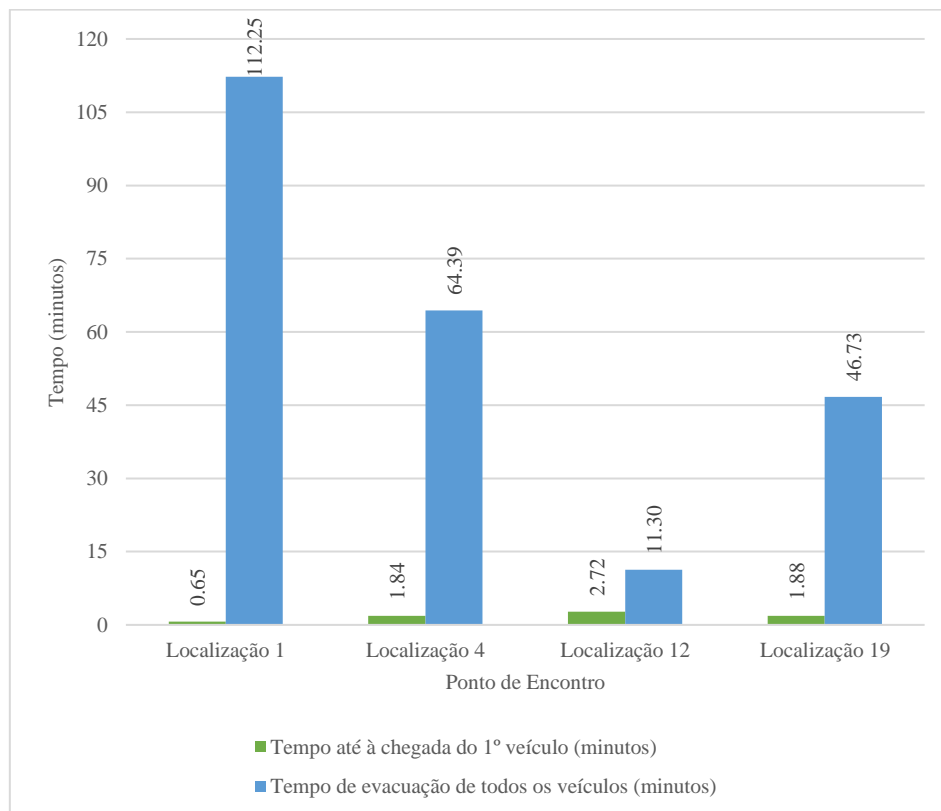


Figura 5.1. Tempo, em minutos, até à evacuação do primeiro veículo e de todos os veículos para os respetivos pontos de encontro, num cenário sem restrições.

No geral seria necessário 1 hora e 52 minutos para concluir a evacuação da zona S de Arrifes, em fluxo livre. Em caso de congestionamento a um terço e a dois terços da estrada, o tempo total para concluir a evacuação seria de 2 horas e 29 minutos e de 3 horas e 7 minutos, respetivamente (Figura 5.2).

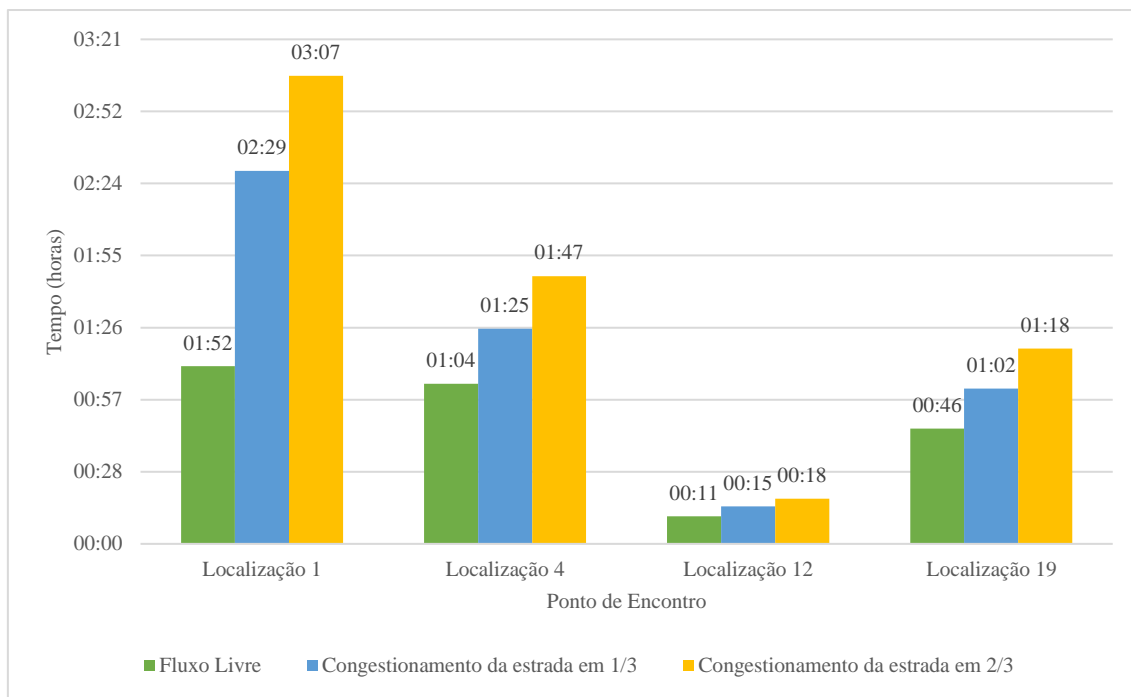


Figura 5.2. Tempo total, em horas, para completar a evacuação para os respectivos pontos de encontro num cenário sem restrições.

No segundo cenário considerou-se uma evacuação coordenada em que os veículos foram orientados para o seu ponto de encontro mais próximo, mas respeitando uma capacidade máxima de 250 veículos por cada ponto de encontro, o que aumentou o número de pontos de encontro solicitados. Neste caso, a distribuição da população foi repartida por 11 pontos de encontro, com um limite máximo correspondente a 750 pessoas. Observou-se que o tempo até à chegada do primeiro carro à localização 1 manteve-se inferior a 1 minuto, no entanto, o tempo até à evacuação de todos os veículos diminuiu para aproximadamente 30 minutos em relação ao primeiro cenário. Globalmente o tempo para evacuação de todos os veículos diminuiu, variando entre os 7 e os 32 minutos, que correspondem ao tempo de evacuação de todos os veículos para os pontos de encontro 5 e 3, respetivamente (Figura 5.3).

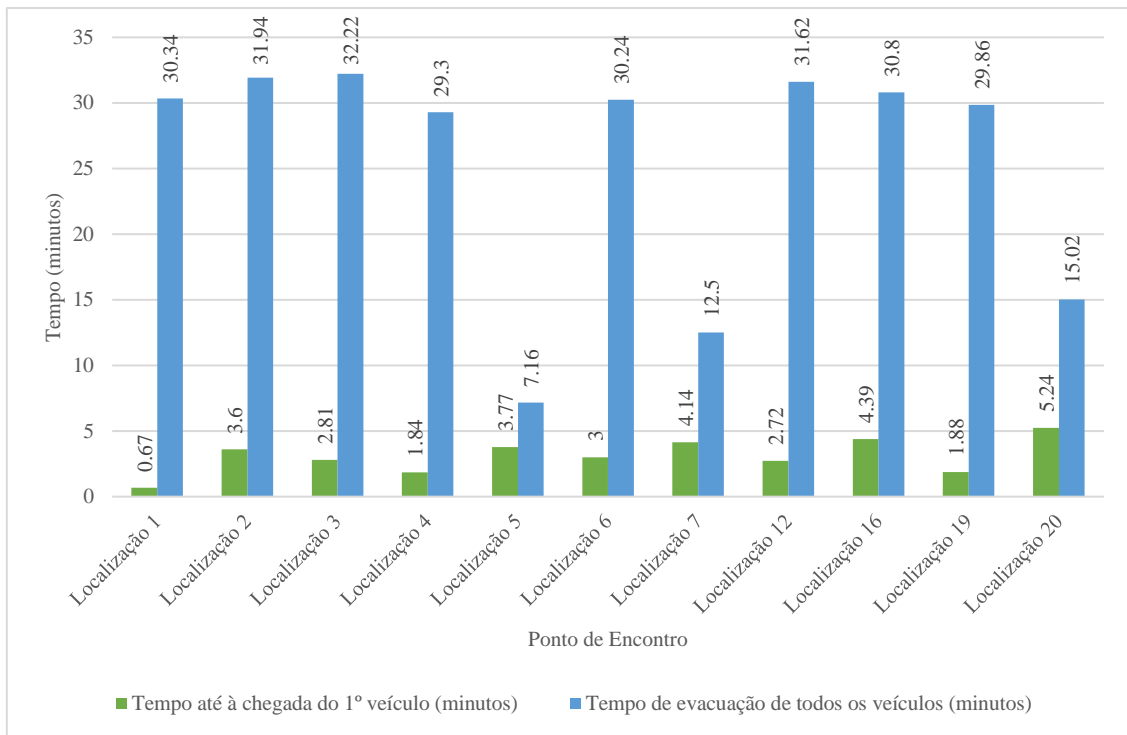


Figura 5.3. Tempo, em minutos, até à evacuação do primeiro veículo e de todos os veículos para os respetivos pontos de encontro, num cenário com restrição de 250 veículos por ponto de encontro.

Verificou-se, ainda, que os pontos de encontro que recebem o limite da sua capacidade têm uma diferença de aproximadamente 24 minutos, entre a chegada do primeiro veículo e a chegada do último veículo. Adicionalmente, verifica-se que o tempo total de evacuação de todos os veículos em fluxo livre diminuiu para 32 minutos e para 43 e 54 minutos em caso de congestionamento da estrada a um terço e dois terços, respetivamente (Figura 5.4).

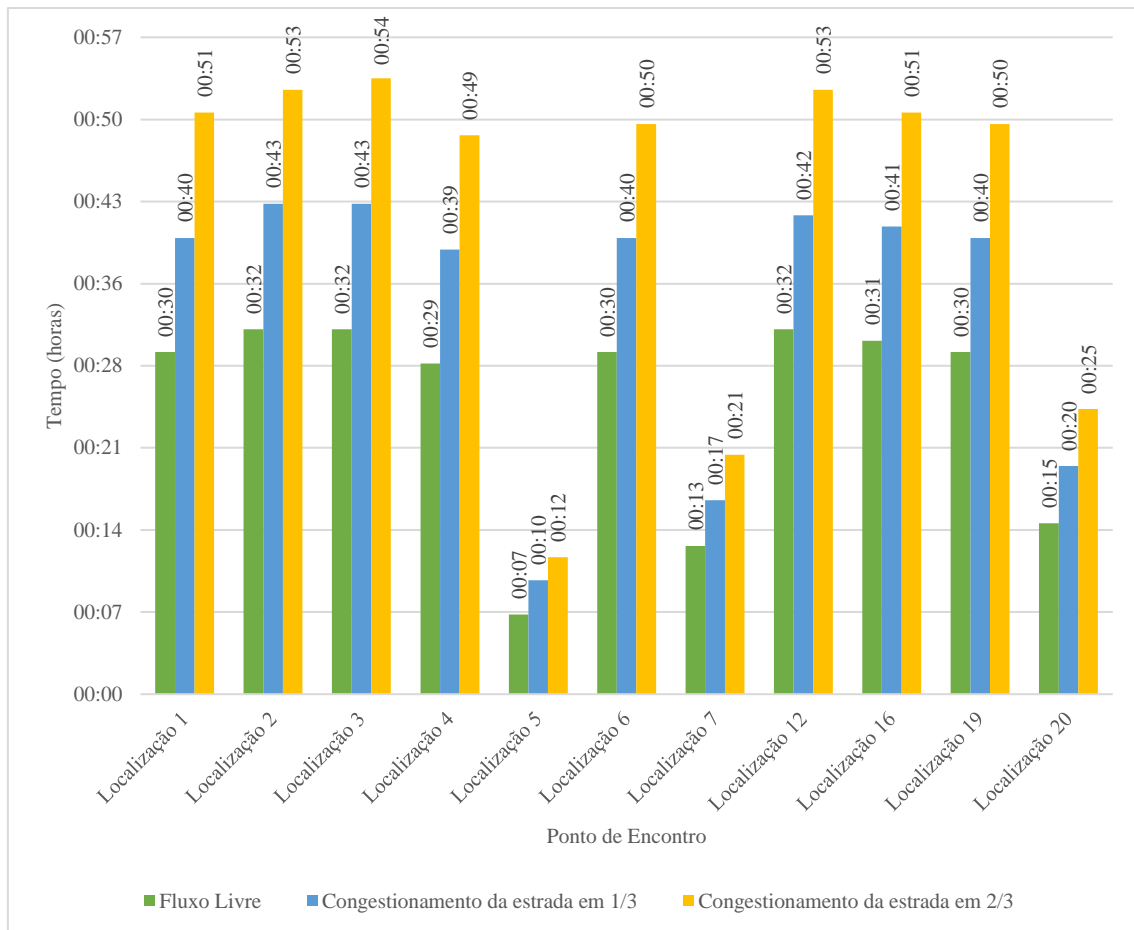


Figura 5.4. Tempo total, em horas, para completar a evacuação num cenário com limitação de 250 veículos por ponto de encontro, em fluxos livre e com congestionamento da estrada a um terço e dois terços.

O terceiro cenário pretendeu testar a sensibilidade do sistema a um maior controle na distribuição dos evacuados pelos pontos de encontro de modo a evitar a sobrecarga de alguns pontos e prevenir problemas de congestionamento nos acessos. Neste caso, considerou-se a capacidade máxima de cada ponto de encontro de 150 veículos, ou seja, 450 pessoas. A diferença entre o tempo de chegada do primeiro veículo e o tempo total de evacuação de todos os veículos diminuiu novamente, verificando-se que todos os pontos de encontro que atingem o limite da capacidade, contam com uma diferença de aproximadamente 14 minutos entre a chegada do primeiro veículo e a chegada de todos os veículos.

Além disso, verifica-se que o tempo decorrido entre a chegada do primeiro veículo e a chegada do último diminuiu para cada ponto de encontro (Figura 5.5). Ou seja, quantos mais pontos de encontro são selecionados, menor será o tempo de evacuação total dos veículos.

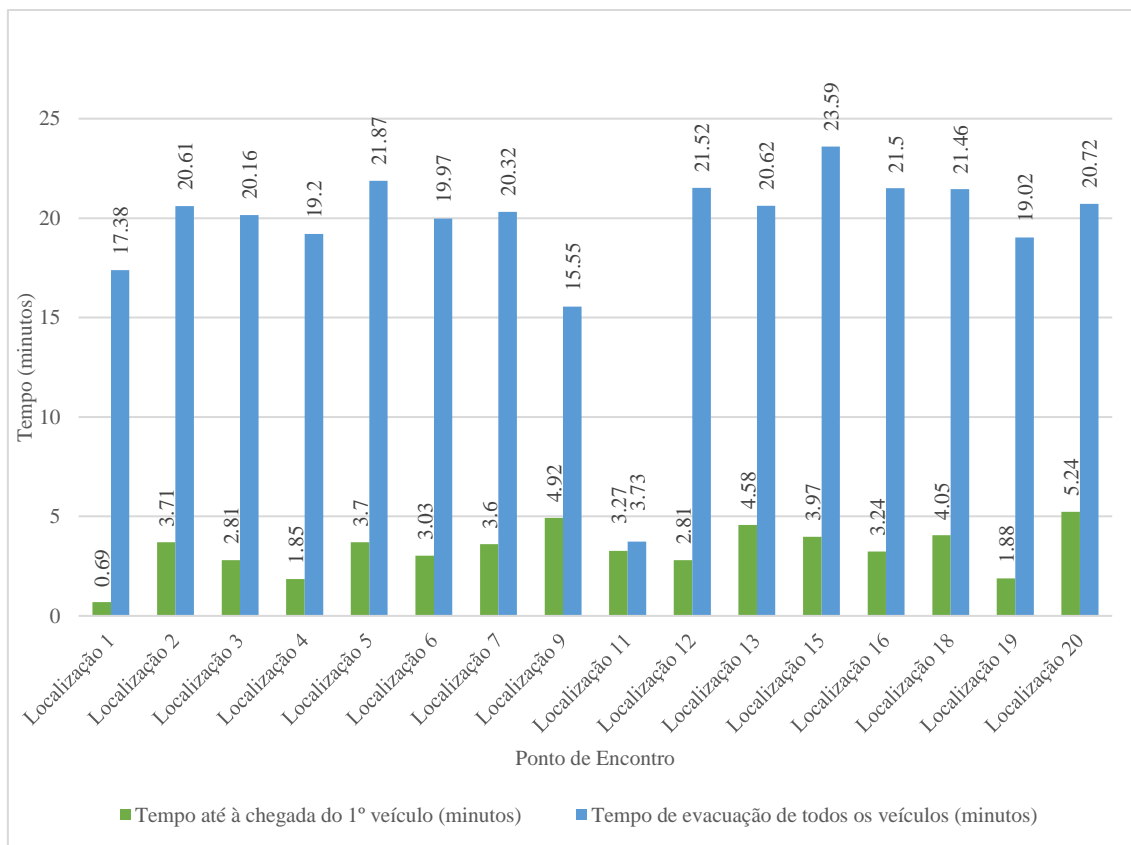


Figura 5.5. Tempo, em minutos, até à evacuação do primeiro veículo e de todos os veículos para os respetivos pontos de encontro, num cenário com restrição de 150 veículos.

Em fluxo livre, observou-se, que o tempo total de evacuação seria de 24 minutos e que, em caso de congestionamento da estrada a um terço e a dois terços, o tempo máximo de evacuação seria de respetivamente 31 e 39 minutos, o que corresponde aos tempos do percurso até ao ponto de encontro 15 (Figura 5.6).

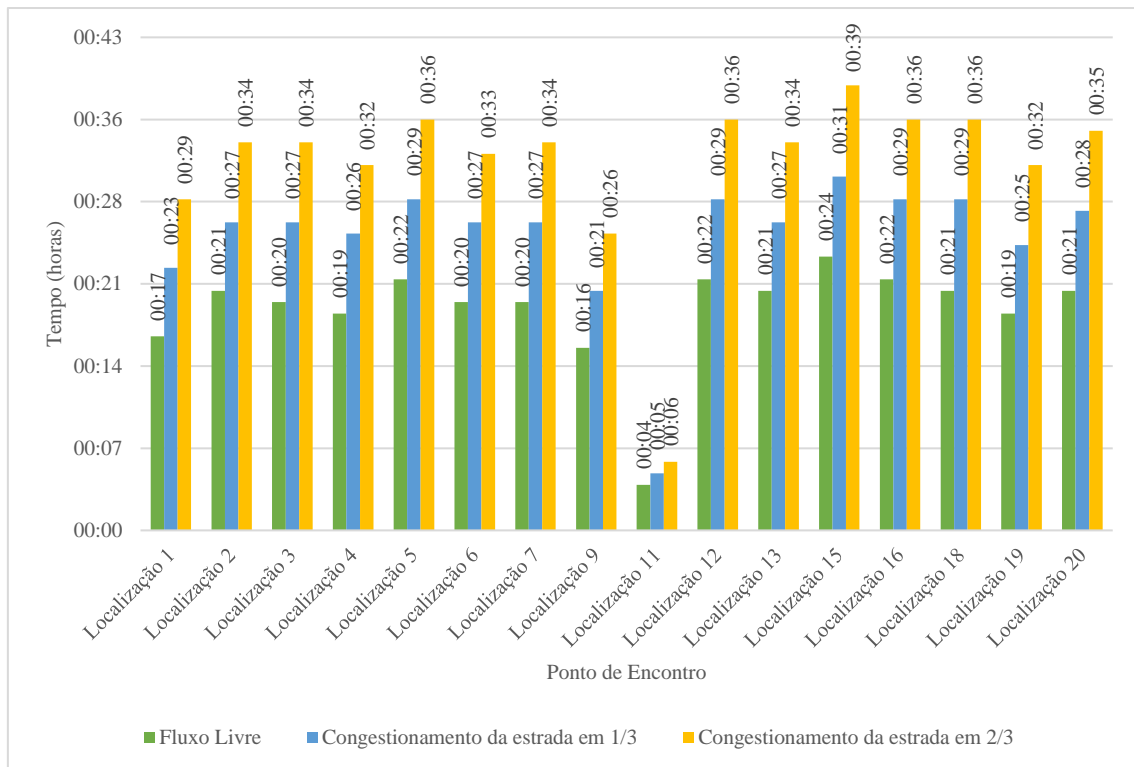


Figura 5.6. Tempo total, em horas, para completar a evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro num cenário com limitação de 150 veículos, sem congestionamento da estrada e com congestionamento da estrada a um terço e dois terços.

A análise dos resultados permitiu averiguar que o primeiro cenário seria insustentável, uma vez que o ponto de encontro 1 teria de acolher 1 062 veículos privados, o que simultaneamente promoveria o congestionamento da rota de evacuação mais representativa e solicitada. Os segundo e terceiro cenários evidenciam um maior equilíbrio no tempo necessário para a evacuação da totalidade da população, contudo, salienta-se que a análise também destaca que alguns dos pontos constantes do plano são muito pouco eficazes. De entre esses, destaca-se o ponto de encontro 11, que não chega a ser utilizado no cenário em que cada um procura o ponto mais próximo (cenário 1), nem no cenário em que se restringe a capacidade limite de cada ponto de encontro a 250 veículos (cenário 2), sendo exclusivamente solicitado quando se restringe o limite da capacidade de cada ponto de encontro em 150 veículos (cenário 3), onde apenas acolhe 4 veículos (Figura 5.7).

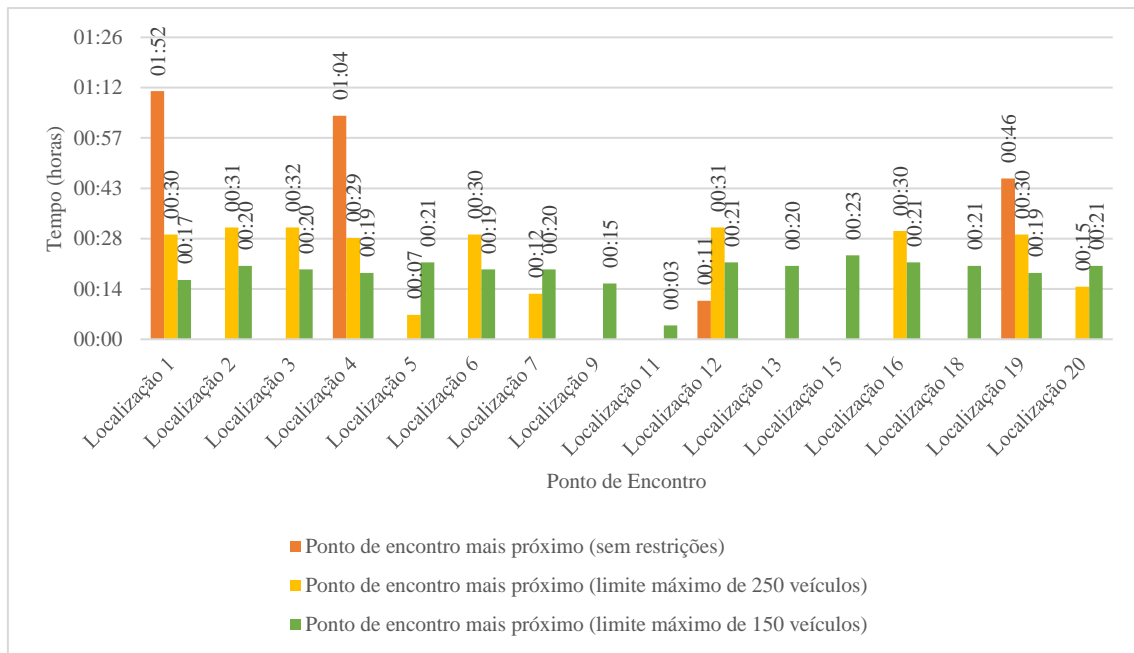


Figura 5.7. Tempo total, em horas, para evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro nos três cenários, em fluxo livre.

Os testes de congestionamento foram uma forma de simular a capacidade das estradas quando há aumento do fluxo de veículos. As variações decorrentes do congestionamento são significativas no primeiro cenário, variando entre 2 horas e 29 minutos e 3 horas e 7 minutos, no primeiro cenário, no entanto esbatem-se quando são impostos limites à capacidade dos pontos de encontro, variando entre 43 e 54 minutos no segundo cenário e entre 31 e 39 minutos no terceiro cenário. Isto revela o quanto a evacuação é sensível à capacidade de carga real das estradas e à coordenação do processo de evacuação (Figuras 5.8 e 5.9).

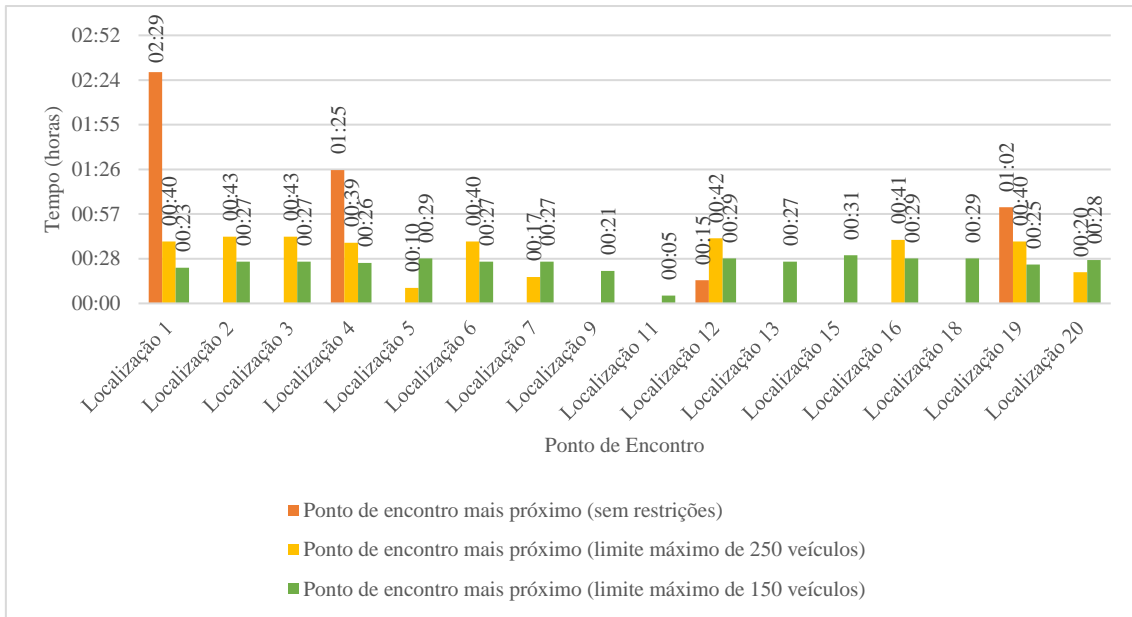


Figura 5.8. Tempo total, em horas, para evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro nos três cenários, com congestionamento de um terço da estrada.

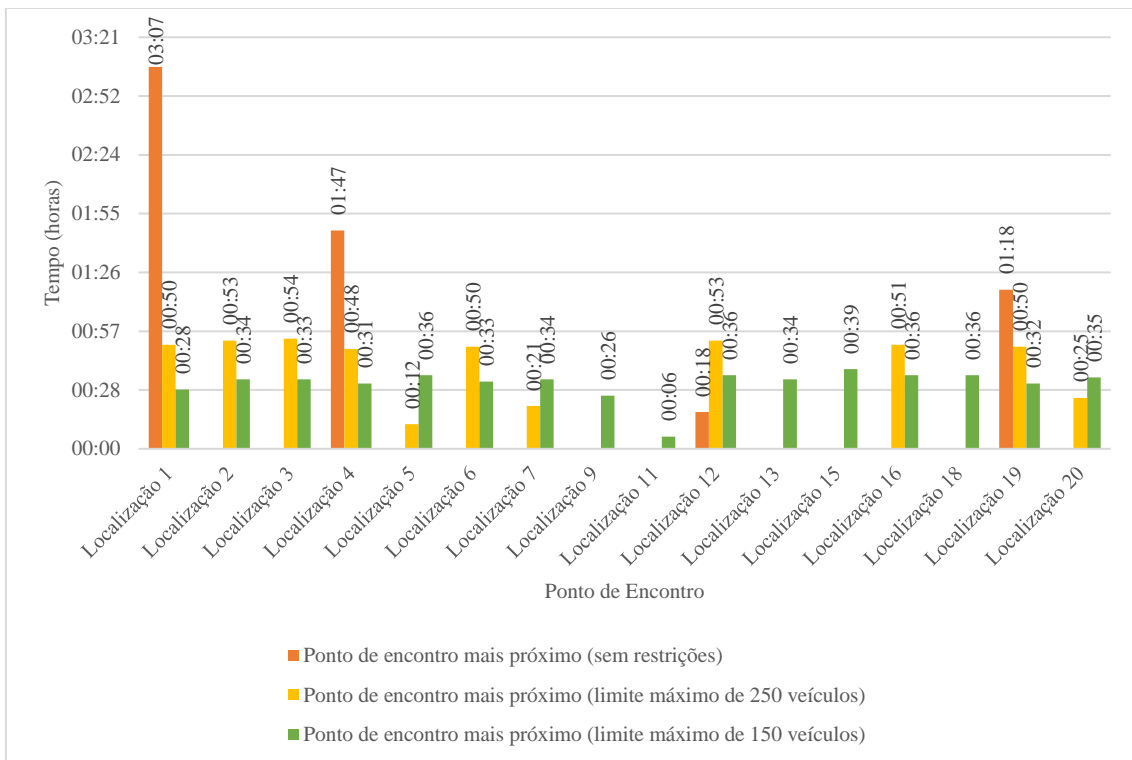


Figura 5.9. Tempo total, em horas, para evacuação de todos os veículos para os respectivos pontos de encontro nos três cenários, com congestionamento de dois terços da estrada.

No que concerne à distância máxima, a análise dos resultados permitiu averiguar que para o cenário 1 a distância máxima é de 2,8 e de 5,7 km para os pontos de encontro 19 e 1, respetivamente. Os cenários 2 e 3 evidenciam uma diminuição na distância máxima

para o ponto de encontro 1, com 3 e 2 km respetivamente, e um aumento na distância máxima no geral. Ou seja, no cenário 2 a distância máxima é de 7,8 km e corresponde ao percurso para o ponto de encontro 20 e no cenário 3 a distância máxima é de 7,9 km e corresponde igualmente ao percurso para o ponto de encontro 20.

A redução do número de evacuados a dirigir-se para o ponto de encontro 1, nos cenários 2 e 3, justifica a redução da distância máxima do percurso até este ponto, uma vez que os residentes mais distantes são encaminhados para outros pontos de encontro. Constatou-se, ainda, que o número de veículos que se dirige para um dado ponto de encontro influencia o tempo total de evacuação por esse ponto, pelo que nem sempre o caminho mais próximo representa o caminho mais rápido.

No geral, a análise efetuada permitiu concluir que a dispersão de pontos de encontro com um conseqüente aumento de percursos de evacuação tornou o processo mais eficiente. Além disso, se não forem colocadas restrições à capacidade limite dos pontos de encontro, diversos pontos poderão exceder a sua capacidade, enquanto outros nunca serão utilizados.

A restrição da capacidade limite dos pontos de encontro é um avanço em relação aos estudos anteriores e mostrou-se vantajosa na distribuição da população, na conseqüente diminuição dos tempos de evacuação total e na maior eficiência do processo. De facto, os resultados deste estudo permitem aferir a importância de se definirem limites na capacidade dos pontos de encontro e a importância de se distribuir a população a evacuar pelos pontos de encontro disponíveis. Esta informação deveria constar nos planos municipais de emergência de proteção civil, nomeadamente a capacidade limite de cada ponto de encontro e um sinal distinto para cada, por forma a que a população saiba para qual se dirigir.

Considerando a realidade do arquipélago dos Açores, este trabalho é um importante passo inicial na análise da eficiência de processos de evacuação, com capacidade para auxiliar a gestão de crises.

Contudo, durante o desenvolvimento do trabalho foram efetuadas algumas simplificações e foram detetadas limitações que condicionam o estudo apresentado. Em alguns casos, foram feitas assunções para permitir a simplificação do teste da metodologia. Destacam-se:

- A seleção de uma área de estudo limitada;
- O cenário de erupção vulcânica com impacto muito circunscrito;
- A sobreposição das rotas de evacuação;

- A equação para cálculo da evacuação total (Equação 3.9);
- O não equacionamento da evacuação de infraestruturas críticas;
- A não contabilização da população sem acesso a veículo privado;
- A desatualização dos dados.

A seleção da área de estudo incidu apenas sobre uma parte da freguesia de Arrifes, não tendo sido considerado o efeito sobre a restante freguesia ou nas freguesias limítrofes, bem como o impacto que a evacuação das freguesias limítrofes traria ao processo analisado.

O cenário eruptivo considerado foi o de uma erupção havaiana e/ou estromboliana pontual com impacto apenas na parte S da freguesia, não sendo considerada a hipótese de uma erupção vulcânica ao longo de uma fissura ou num local com impacto na totalidade da freguesia, ou mesmo a ocorrência de uma erupção noutros sistemas vulcânicos fora da freguesia, mas com impacto nos Arrifes. Este é um cenário estático e pouco realista, dado que será de esperar que uma erupção desencadeie a evacuação de mais locais do que a freguesia analisada.

Adicionalmente, este cenário prevê uma erupção que afete o lado S da freguesia, mas não prevê o impacto da erupção nas rotas de evacuação. De facto, dependendo da localização do foco eruptivo poderá ser inviável utilizar um ponto de encontro no lado N da freguesia, tal como, dependendo da progressão das escodas lávicas poderá ser inviável a utilização de algumas rotas de evacuação do lado S. A metodologia aplicada possibilita uma análise estática para avaliar a eficácia da evacuação, no entanto, em situação de crise, quando houver informação concreta sobre a fonte eruptiva, todo processo deverá ser atualizado e revisto. Por exemplo, se o evento produzir lavas que fluem para S, provavelmente alguns dos acessos agora utilizados serão inutilizados.

O segundo e terceiro cenários são resultados da aplicação e análise da ferramenta *location-allocation*, que tem como entrave o carácter aleatório. Por exemplo, escolhe-se o custo da análise e impõem-se as restrições pretendidas, no entanto, a ferramenta pode começar por preencher o ponto de encontro A ou o ponto de encontro B, o que faz com que os pontos de encontro preferenciais da análise sejam sempre escolhidos, mas que os menos relevantes sejam aleatórios, pois variam conforme a distribuição dos pontos de encontro que atingem a capacidade limite em primeiro lugar.

O estudo assentou num cenário noturno assumindo que toda a população estaria exclusivamente nas suas habitações, pelo que não foram considerados os movimentos pendulares, nem a ocupação dos edifícios públicos ou de serviços.

Outra simplificação aplicada passou pela não consideração da evacuação da população de baixa mobilidade, bem como a utilização exclusiva de transportes privados, assumindo-se que todas as habitações teriam acesso a 1 veículo ligeiro privado. No entanto, importa considerar a caracterização da população sem transporte e/ou com mobilidade reduzida, bem como a informação da disponibilidade de transportes privados e de transportes públicos. A população sem acesso a transporte deve estar assinalada nas juntas de freguesia, permitindo que se conheça de forma célere a população que necessita de transportes públicos aquando de uma evacuação, bem como a informação da disponibilidade e capacidade dos mesmos.

No que concerne ao cálculo do tempo total da evacuação, importa realçar que a equação desenvolvida assenta numa hipótese conservadora, pois utiliza o tempo máximo de chegada do último veículo para garantir que todos os veículos chegam efetivamente ao ponto de encontro. Além disso, após a chegada do primeiro veículo, estabeleceu-se um espaçamento homogéneo entre veículos para calcular o tempo de chegada dos restantes, o que, numa situação real, provavelmente não se verificará. Uma possibilidade de contornar esta situação é a utilização de tabelas de tráfego em tempo real.

As simulações efetuadas evidenciaram, ainda, uma situação de maior complexidade resultante da sobreposição de partes das rotas de evacuação para diferentes pontos de encontro, o que poderá gerar problemas de congestionamento não modelados no presente trabalho e que importa analisar em trabalhos futuros.

Outra limitação importante do estudo é a desatualização dos dados das estradas e edificado, que provem da carta militar da ilha de São Miguel (2002) e que não contemplam as construções recentes ou as alterações à rede viária. Em trabalhos futuros importa proceder a uma atualização do edificado e das estradas, permitindo maior exatidão nos resultados.

O estudo desenvolvido permitiu verificar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida, que poderá ser usada a nível do concelho ou da ilha. O cenário apresentado e os resultados ilustram o que poderá ser realizado para diversos perigos e áreas de impacto.

Em suma, a metodologia apresentada é uma inovação no campo da gestão de crises no arquipélago dos Açores, permitindo testar a eficiência dos processos de evacuação e demonstrar a importância de uma correta gestão dos pontos de encontro.

Da análise efetuada emergiram algumas questões a desenvolver ou melhorar, de entre as quais a mais crítica é a atualização das bases de dados e em particular a informação referente a estradas e edificado. Outro fator a considerar será a introdução dos movimentos pendulares da população e a afinação da população a deslocar, considerando a população com mobilidade reduzida e a utilização de transportes coletivos.

Numa fase seguinte poder-se-á também modelar a distribuição da população dos pontos de encontro para os centros de realojamento, estimando o tempo total entre o início da evacuação e o realojamento da população, bem como incorporar a análise das fases de evacuação utilizadas em Wild *et al.*, 2021, nomeadamente, o tempo até à deteção da crise, o tempo de notificação da evacuação à população e o tempo para a população se preparar.

Com vista à aplicação desta metodologia em tempo real, durante uma situação de crise, importa ainda desenvolver a automatização do processo que poderá ser realizada mediante a criação de um modelo que permita, com base em qualquer alteração à rede de transportes, desenvolver automaticamente o processo de seleção do ponto de encontro mais próximo. Num nível de maior complexidade seria também importante a integração das consequências das decisões e interações entre os vários membros da população, isto é, a modelação num ambiente composto por um número de agentes cujos parâmetros e comportamentos estão previamente definidos no tempo e no espaço (por exemplo recorrendo ao modelo *Agent-Based Model*). Ou seja, adicionar à análise a ação individual perante uma evacuação, como por exemplo a preferência da população em passar primeiro nas suas habitações, o que tem impacto na modelação da movimentação e evacuação de toda a população.

Uma forma de averiguar a eficácia da ferramenta utilizada seria a realização de simulacros, que permitirão aferir a parametrização da metodologia e a sua capacidade preditiva.

CAPITULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

A história eruptiva da ilha de São Miguel, nomeadamente do concelho de Ponta Delgada, salienta a necessidade de se estar alerta face ao perigo vulcânico, pelo facto do concelho estar assente em sistemas vulcânicos ativos.

A localização da freguesia de Arrifes e a sua extensão territorial sobressaem aquando da elaboração de cenários de erupções vulcânicas no Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (SVFP) (Ferreira *et al.*, 2015; Gaspar *et al.*, 2015b). Considerando este tipo de sistema vulcânico, a probabilidade da freguesia ser afetada por escoadas lávicas e/ou piroclastos de queda provenientes de erupções havaianas/estrombolianas é elevada.

Nesta dissertação foi estudada a evacuação da freguesia de Arrifes, com base no impacto de uma erupção vulcânica no SVFP em que as escoadas lávicas afetassem essencialmente a área S.

Estudou-se o movimento da população com base em metodologias apresentadas em trabalhos anteriores (*eg.* Tomsen *et al.*, 2014; Wild *et al.*, 2021) e recorrendo a ferramentas do *software ArcGIS*, nomeadamente as associadas à *Network Analysis* (*Closest Facility* e *Location-Allocation*). A informação relevante para aplicação da metodologia teve por base a carta militar da ilha de São Miguel (2002) à escala 1:25 000, o Plano Municipal de Emergência de Proteção Civil de Ponta Delgada (PMEPCPDL) e os dados do Instituto Nacional de Estatística de Portugal (INE).

A metodologia aplicada pretendeu responder a qual o melhor percurso de evacuação e quanto tempo seria necessário para evacuar a população a S da freguesia de Arrifes, durante a noite, em caso de erupção vulcânica. Para o efeito, recorreu-se a informação sobre o edificado da freguesia de Arrifes e aos pontos de encontro estabelecidos no PMEPCPDL (2014). As ferramentas de *Network Analysis* aplicadas permitiram efetuar a análise do percurso entre as habitações e os pontos de encontro.

A análise da informação resultante da aplicação das ferramentas permitiu o cálculo do tempo total de evacuação (da zona S da freguesia de Arrifes) e, ainda, estimar o impacto do congestionamento considerando três cenários (ponto de encontro mais próximo sem restrição, com restrição de 250 veículos e com restrição de 150 veículos). Tanto quanto se tem conhecimento, este é o primeiro estudo que aplica no arquipélago dos Açores estas ferramentas de análise de rede em cenários de crise vulcânica.

Os resultados obtidos destacam a preferência para os pontos de encontro 1, 4, 12 e 19, sendo que estes foram selecionados nos três cenários aplicados. O tempo de evacuação total da população da área de estudo, com base no tempo máximo de percurso para cada ponto de encontro, foi de 1 hora e 52 minutos, se a evacuação tiver com o único critério o ponto de encontro mais próximo. Contudo, num cenário que considere limitações à capacidade dos pontos de encontro estes valores alteram-se. Considerando uma capacidade máxima de 250 veículos por ponto de encontro, o tempo de evacuação seria de 36 minutos, e de 23 minutos se a restrição fosse de 150 veículos, num ambiente de fluxo livre.

No que concerne ao tempo de evacuação total da área de estudo em caso de congestionamento de um terço da estrada, este varia entre 2 horas e 29 minutos para o ponto mais próximo, e 43 e 31 minutos para restrições de 250 e 150 veículos, respetivamente. Para o congestionamento da estrada a dois terços, o tempo de evacuação varia entre 3 horas e 7 minutos no caso de ser escolhido o ponto mais próximo e entre 54 e 39 minutos no caso de serem impostas as restrições 250 e 150 veículos, respetivamente. A análise dos vários cenários permite concluir que, independentemente do congestionamento, a aplicação das restrições no número de veículos nos pontos de encontro permite uma evacuação total mais eficaz, em menos de 1 hora.

A análise do primeiro cenário desenvolvido destaca a necessidade de se imporem restrições à capacidade de cada ponto de encontro, isto porque, neste cenário cerca de 1 062 veículos dirigiram-se ao ponto de encontro 1, o que perfaz um total de 3 186 pessoas. A aplicação dos segundo e terceiro cenários surgiu para atenuar a saturação dos pontos de encontro e equilibrar a afluência a cada ponto. Apesar de se manter preferência pelo ponto de encontro 1, quando este atinge o limite da sua capacidade, são escolhidos outros pontos de encontro que satisfazem a necessidade e reduzem o tempo total de evacuação da área de estudo.

Dos cenários considerados, o mais eficaz é o que impõe maiores restrições à capacidade dos pontos de encontro, porque promove uma maior dispersão da população, diminuindo o tempo total de evacuação (máximo de 23 minutos) e, conseqüentemente, o congestionamento. Este cenário evidencia, no entanto, que alguns dos pontos de encontro solicitados podem ter pouca relevância, como é o caso do ponto 4 que recebe apenas 4 veículos. Outra situação evidenciada pelos cenários com restrições à capacidade dos pontos de encontro é a solicitação de pontos mais distantes ou em posições eventualmente inviáveis, dependendo da localização do centro eruptivo ou da progressão das lavas, como

o ponto de encontro 20 a N da freguesia ou alguns pontos a S, eventualmente afetados pelas lavas.

Neste contexto, a metodologia desenvolvida possibilita uma análise estática que permite avaliar a eficácia da evacuação, caracterizar as diversas rotas de evacuação e as respetivas cargas, quantificar as solicitações dos diferentes pontos de encontro e estimar a importância ou irrelevância de alguns desses pontos.

Para além da calibração de planos de emergência, esta metodologia permite também dar respostas durante uma crise, sendo para tal será necessário produzir uma análise dinâmica que incorpora as variações decorrentes da crise em curso e adaptar a resposta a essas variações.

Em suma, a metodologia desenvolvida constitui uma ferramenta útil quer durante as fases de preparação de emergências quer nas fases de reposta, garantindo a eficácia e a otimização do processo de evacuação. Estas ferramentas podem, ainda, dar resposta a outros problemas relacionados com a gestão de crises (por exemplo, localizar quartéis de bombeiros ou comandos de polícia num raio de 15 minutos de carro e localizar centros de realojamento com menor custo de viagem), o que reforça a importância de complementar a gestão de crises com os Sistemas de Informação Geográfica.

6.2. Trabalhos futuros

No âmbito da análise crítica da metodologia desenvolvida reconheceram-se diversas simplificações e lacunas que importa colmatar em trabalhos futuros e identificaram-se alguns desafios para melhorar a resposta:

- Caracterizar a população diurna (com recurso aos movimentos pendulares);
- Analisar o desejo da população se deslocar às suas habitações para recolher pertences;
- Integrar a distribuição da população com acesso a transporte privado e/ou público pela zona de estudo;
- Integrar a disposição da população de baixa mobilidade (crianças, idosos e doentes) pela zona de estudo;
- Incorporar a distribuição do parque automóvel pela zona de estudo;
- Incluir as rotas entre os pontos de encontro e os posteriores centros de realojamento, assim como os recursos humanos e materiais que possam ser necessários;

- Analisar a capacidade real das estradas;
- Averiguar as estradas de acesso a dois ou mais pontos de encontro;
- Incorporar o tempo de notificação da evacuação à população;
- Aplicar a metodologia a diferentes perigos (por exemplo, cheias e acidentes no transporte de matérias perigosas) e cenários (por exemplo, efeito cascata de eventos);
- Automatizar o processo.

Realça-se a importância de se desenvolver um método de relação do congestionamento com a tipologia e com o estado das estradas, bem como, de se atualizar as bases de dados das rodovias e do edificado, introduzindo a informação necessária para a construção de uma rede de transportes robusta. Adicionalmente, a análise de outros meios de transporte, nomeadamente dos autocarros, e dos movimentos pendulares permitiria uma resposta mais eficaz, tornando possível incorporar a população de baixa mobilidade e o respetivo meio de transporte de evacuação, bem como a população diurna a frequentar a área de estudo.

Outro aspeto a salientar é a necessidade de se automatizar o processo, permitindo que num evento real se possa utilizar a metodologia e dar apoio à resposta das autoridades, por exemplo mediante a disponibilização da informação dos pontos de encontro que cada indivíduo deve optar e das estradas mais congestionadas.

As ferramentas da *Network Analysis* permitem, ainda, adicionar tabelas de tráfego diário ou incorporar os dados de trânsito do *Google Maps*®, que seria uma vantagem na análise em tempo real do fluxo de veículos e do congestionamento da estrada, potenciando uma informação mais precisa dos tempos necessários para remover toda a população da zona afetada.

Adicionalmente, seria importante cruzar a localização dos pontos de encontro estabelecidos no PMEPCPDL com a sua suscetibilidade aos vários perigos naturais. Esta análise permitiria discriminar a adequabilidade dos vários pontos não só em função do plano de evacuação, mas também do perigo em questão. E ainda, deveriam constar nos planos municipais de emergência de proteção civil, a capacidade limite de cada ponto de encontro e uma sinalética distinta para cada, facilitando o conhecimento da população sobre o ponto de encontro para qual se dirigir.

A aplicabilidade das ferramentas desenvolvidas neste trabalho, bem como a posterior construção de modelos de evacuação, tornaria possível a expansão do trabalho para outros

perigos quer naturais quer antrópicos (por exemplo, cheias e inundações, movimentos de vertente ou acidentes no transporte de mercadoria perigosa), assim como se considera imperativo que as mesmas sejam alargadas às restantes freguesias do concelho de Ponta Delgada.

BIBLIOGRAFIA

- Abdel-Monem A.A., Fernandez L.A. e Boone G.M. (1975) - K-Ar ages from the eastern Azores group (Santa Maria, São Miguel and the Formigas Islands). *Lithos*, 8, 247–254.
- Alexander, D. (2002) - *Principles of Emergency Planning and Management*. Terra Publishing. ISBN 978-1-903544-10-5.
- Andrade, C., Cruz, J.V., Viveiros, F. e Coutinho, R. (2019) – CO₂ flux from volcanic lakes in the Western Group of the Azores Archipelago (Portugal). *Water*, 11(3): 599.
- Armijos, M. T., Phillips, J., Wilkinson, E., Barclay, J., Hicks, A., Palacios, P., Mothes, P. e Stone, J. (2017) – Adapting to changes in volcanic behaviour: Formal and informal interactions for enhanced risk management at Tungurahua Volcano, Ecuador. *Global Environmental Change*, Volume 45. 217-226.
- ASF (2021) – Autoridade de Supervisão de Seguros e Fundos de Pensões. *Parque Automóvel Seguro Anual*, 8.
- Auckland Region CDEM Group (2008) - Final Exercise Report. Exercise Ruaumoko '08. Ministry of Civil Defence and Emergency Management, Auckland, New Zealand.
- Auker, M. R., Sparks, R. S. J., Siebert, L., Crossweller, H. S. e Ewert, J. (2013) - A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, 2, 2.
- Bagni, M., Bignami, C., Boichu, M., Bosi, V., Buongiorno, F., Costantini, L., Faria, B., Fonseca, J., Hidayati, S., Jenkins, S., Jousset, P., Le Cozannet, G., Marchetti, E., Oppenheimer, C., Pereira, R. L., Prata, F., Ripepe, M., Silva, F., Spinetti, C., Sumarti, S., Surono e Vazão, T. (2012) – Living with a volcano: Scientific and Operational Aspects. In: Bignami, Bosi, Costantini, Cristiani, Lavigne, Thierry (eds.) *Handbook for Volcanic Risk Management, prevention, crisis management, resilience*. Miavita team, Orleans. Chapter 3. 45 – 90.
- Barclay, J., Few, R., Armijos, M. T., Phillips, J. C., Pyle, D. M., Hicks, A., Brown, S. K. e Robertson, R. E. A. (2019) - Livelihoods, Wellbeing and the Risk to Life during Volcanic Eruptions. *Frontiers in Earth Science*, 7, 205.
- Baubron, J. C., Allard, P., Sabroux, J., Tedesco, D. e Toutain, J. P. (1991) – Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *Journal of the Geological Society*, London, 148, 571-576.

- Blundy, J. e Cashman, K. (2008) – Petrologic Reconstruction of Magmatic System Variables and Processes. *Mineralogy and Geochemistry*, 69. 179-239.
- Bonfils, L., Bosi, V., Costantini, L., Fontaine, M., Hidayati, S., Cozannet, G. L., Sumarti, S., Surono, Thierry, P., Vaccari, P. e Vagner, A. (2012) – Living with a volcano: Increasing preparedness. In: Bignami, Bosi, Costantini, Cristiani, Lavigne, Thierry (eds.) *Handbook for Volcanic Risk Management, prevention, crisis management, resilience*. Miavita team, Orleans, Chapter 4, 91 – 128.
- Booth, B., Croasdale, R. e Walker, G. (1978) - A quantitative study of five thousand years of volcanism on S.Miguel, Azores. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 228, 271-319.
- Boundon, G., Komorowski, J-C, Villemant, B. e Semet, M. P. (2008) - A new scenario for the last magmatic eruption of La Soufrière of Guadeloupe (Lesser Antilles) in 1530 A.D. Evidence from stratigraphy radiocarbon dating and magmatic evolution of erupted products. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 474-490.
- Brown, S. K., Loughlin, S. C., Sparks, R. S. J., Vye-Brown, C., Barclay, J., Calder, E., Jolly, G., Komorowski, J-C., Mandeville, C., Newhall, C., Palma, J., Potter, S. e Valentine, G. (2015) - Global volcanic hazard and risk. In: S. C. Loughlin, R. S. J. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins, e C. Vye-Brown (eds.) *Publication of an Organization Other than the U.S. Geological Survey*. Cambridge: Cambridge University Press, 81–172.
- Brown, S. K., Jenkins, S. F., Sparks, R. S. J., Odbert, H., e Auken, M. R. (2017) - Volcanic fatalities database: analysis of volcanic threat with distance and victim classification. *Journal of Applied Volcanology*, 6, 15.
- Cabral, N. (2020) - Revision of the Azorean catalogue of tsunamis. Geological Society, London, *Special Publications*, 501, doi: 10.1144/SP501-2019-107.
- Campus, P. (2004) – The IMS Infrasound network and its potential for detection of events: examples of a variety of signals recorded around the world. *InforMatics*, 6(1), 13-22.
- Carmo, R. (2013) - *Estudos de Neotectónica na Ilha de S. Miguel: Uma Contribuição para o Estudo do Risco Sísmico no Arquipélago dos Açores*. Dissertação de Doutoramento, no ramo de Geologia, especialidade em Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 307 p.
- Carmo, R., Madeira, J., Ferreira, T., Queiroz, G. e Hipólito, A. (2015) – Volcano-tectonic structures of S. Miguel Island, Azores. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 65-86, doi: 10.1144/M44.6.

- Castello Branco, A., Zbyszewski, G., Moitinho de Almedia, F. e Veiga Ferreira, O. (1959) - Rapport de la Première Mission Géologique. *Memórias Serviços Portugal* 4, 9–27.
- Chenet, M., Grancher, D. e Redon, M. (2014) - Main issues of and evacuation in case of volcanic crisis: social stakes in Guadeloupe (Lesser Antilles Arc). *Natural Hazards*, 73, 2127-2147.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B. e Marini, L. (1998) - Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13, 543-552.
- Cole, J. W., Sabel, C. E., Blumenthal, E., Finnis, K., Dantas, A., Barnard, S. e Johnston, D. M. (2005) – GIS-Based Emergency and Evacuation Planning for volcanic hazards in New Zealand. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 38, 149-164.
- Cole, P.D., Guest, J.E. e Duncan, A.M. (1996) - Capelinhos: the disappearing volcano. *Geology Today*, 12, 68–72.
- Cole, P.D., Guest, J.E., Duncan, A.M. e Pacheco, J. M. (2001) - Capelinhos 1957–1958, Faial, Azores: deposits formed by an emergent surtseyan eruption. *Bulletin of Volcanology*, 63, 204–220.
- Corsaro, R. A., Miraglia, L. e Zanon, V. (2005) - Petrologic monitoring of glasses in the pyroclastites erupted in February 2004 by the Stromboli Volcano, Aeolian Islands, Southern Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 339-343.
- Costantini, L. e Thierry, P. (2012) - Introduction to Volcanic Risk. In: Bignami, Bosi, Costantini, Cristiani, Lavigne, Thierry (eds.) *Handbook for Volcanic Risk Management, prevention, crisis management, resilience*, Miavita team, Orleans, Chapter 1, 15 – 23.
- Coutinho, R., Chester, D. K., Wallenstein, N. e Duncan, A. M. (2010) – Responses to, and the short and long-term impacts of, the 1957/58 Capelinhos volcanic eruption and associated earthquake activity on Faial, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 196 (3-4), 265-280.
- Cova, T. J. e Church, R. L. (1997) – Modelling community evacuation vulnerability using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 8, 763-784.
- CRED e UNDRR (2021) – *2020: The non-COVID year in disasters*, Brussels, Belgium, (report) 8p.
- D’Araujo, J. (2022) – *Plate Boundary and Volcano Deformation in the Azores Analysed by Satellite-based Geodetic Techniques*. Tese de Doutoramento no ramo da

Geologia, especialidade em Geodesia. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade dos Açores, 150 p.

- Dias, J. (2016) - RITERAA - Rede Integrada de Telecomunicações de Emergência da Região Autónoma dos Açores (apresentação). In Silva (2022) – *Análise à Exploração das Redes de Comunicação Utilizadas nas Operações de Socorro*. Dissertação de Mestrado em Proteção Civil, Universidade Lusófona do Porto, 138p.
- Felpeto, A., Martí, J. e Ortiz, R. (2007) - Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166, Issue 2, 106-116.
- Fernandez, L. A. (1980) - Geology and petrology of the Nordeste volcanic complex, São Miguel, Azores: Summary. *Geological Society of America Bulletin*, 91, 675-680.
- Ferreira, T. (2000) - *Caraterização da Actividade Vulcânica da Ilha de S. Miguel (Açores): Vulcanismo Basáltico Recente e Zonas de Desgaseificação. Avaliação de Riscos*. Dissertação de Doutoramento no ramo da Geologia, especialidade em Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 248 p.
- Ferreira, T., Gomes, A. Gaspar, J.L. e Guest, J.E. (2015) - Distribution and significance of basaltic eruptive centres: São Miguel, Azores. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 135-146, doi: 10.1144/M44.10.
- Feuillard, M., Allégre, C. J., Brandéis, G., Geulon, R., Le Mouel, J. L., Mercier, J. C., Pozzi, J. P. e Semet, M. P. (1983) – The 1975-1977 crisis of La Soufrière de Guadeloupe (F. W. I.) : a still-born magmatic eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 16, 317-334.
- Fischer, T. P. e Chiodini, G. (2015) – Volcanic, Magmatic and Hydrothermal Gases. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopaedia of Volcanoes*, 2nd edition, chapter 45, 779-797.
- Freymueller, J., T., Murray, J., B., Rymer, H. e Locke, C., A. (2015) -Ground Deformation, Gravity, and Magnetics In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd edition, chapter 64, 1101-1124.
- Gabinete de Apoio ao Desporto (2013) – Carta das Instalações Desportivas Artificiais. Câmara Municipal de Ponta Delgada, Parte I, 57p.
- Gaspar, J. L., Ferreira, T., Queiroz, G., Baubron, J. C. e Baxter, P. (1998) – High levels of CO₂ in the atmosphere of Furna do Enxofre lava cave (Graciosa Island, Azores): a case of public health risk. EC Advanced Study Course: Volcanic Hazard Assessment, Monitoring and Risk Mitigation.

- Gaspar, J. L., Queiroz, G. e Ferreira, T. (2012a) – Escala de Alertas Científicos para a Caraterização do Estado de Atividade Sismovulcânica na Região dos Açores. (<http://www.cvarg.azores.gov.pt/civisa/Paginas/alerta-sismovulcanico.aspx>).
- Gaspar, J. L., Ferreira, T. e Viveiros, F. (2012b) – Escala de Alertas Científicos para a Caraterização da Qualidade do Ar no Interior (CO2).
- Gaspar, J.L., Guest, J.E., Queiroz, G., Pacheco, J., Pimentel, A., Gomes, A., Marques, R., Felpeto, A., Ferreira, T., e Wallenstein, N. (2015a) - Eruptive frequency and volcanic hazards zonation in São Miguel Island, Azores. In: Gaspar J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 155-166, doi: 10.1144/M44.12.
- Gaspar, J. L., Queiroz, G., Ferreira, T., Medeiros, A. R., Goulart, C. e Medeiros, J. (2015b) - Earthquakes and volcanic eruptions in the Azores region: geodynamic implications from major historical events and instrumental seismicity. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44: 33-49, doi: 10.1144/M44.4.
- Gomes, A. (2013) – *História Eruptiva do Sistema Vulcânico Fissural dos Picos e Avaliação da Suscetibilidade a Escostas Lávicas (Ilha de São Miguel, Açores)*. Dissertação de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade em Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 546p.
- Green, D. e Kenneth, L. (2020) - *Guide to Traffic Management Part 3: Transport Study and Analysis Methods*. Austroads, Sydney, 234p.
- Gregg, C., E., Houghton, B. e Ewert, J., W. (2015) - Volcano Warning Systems. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopaedia of Volcanoes*, 2nd edition, chapter 67, 1173-1186.
- Guest, J.E., Pacheco, J.M., Cole, P.D., Duncan, A.M., Wallenstein, N., Queiroz, G., Gaspar, J.L. e Ferreira, T. (2015) - The volcanic history of Furnas Volcano, São Miguel, Azores. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44: 125-134, doi: 10.1144/M44.9.
- Guest, J., Gaspar, J.L., Cole, P.D., Queiroz, G., Duncan, A., Wallenstein, N., Ferreira, T. e Pacheco, J. (1999) - Volcanic geology of Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 1-29.
- Hall, M., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., e Monzier, M. (1999) - Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91(1), 1-21.

- Hammer, J. E., Cashman, K.V., Hoblitt, R.P. e Newman, S. (1999) - Degassing and microlite crystallization during preclimactic events of the 1991 eruption of Mt. Pinatubo, Phillipines. *Bulletin of Volcanology*, 60, 355-380.
- Head, J. e Wilson, L. (1989) – Basaltic pyroclastic eruptions: influence of gas-release patterns and volume fluxes on fountain structure and the formation of cinder cones, spatter cones, rootless flows, lava ponds and lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37, 261-271.
- Heiken, G., Crowe, B., McGetchin, T., West, F., Eichelberger, J., Bartram, Peterson, R. e Wohletz, K. (1980) – Phreatic clouds: the activity of la Soufrière de Guadeloupe (F.W.I.), August-October, 1976. *Bulletin of Volcanology*. 43-2, 383-395.
- Hincks, T.K., Komorowski, J.C., Sparks, S.R. e Aspinall, W.P. (2014) - Retrospective analysis of uncertain eruption precursors at La Soufrière volcano, Guadeloupe, 1975–77: volcanic hazard assessment using a Bayesian Belief Network approach. *Journal of Applied Volcanology*, 3, 3.
- INE (2021) - Instituto Nacional de Estatística de Portugal, Censos 2021.
- Johnson, C.L., Wijbrans, J.R., Constable, C.G., Gee, J., Staudigal, H., Tauxe, L., Forjaz, V.H. e Salgueiro, M. (1998) - $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and Azores palaeomagnetism of São Miguel lavas. *Earth Planetary Science Letters*, 160, 637-649.
- Jolly, G. e Cruz, S. (2015) - Volcano Crisis Management. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopaedia of Volcanoes*, 2nd edition, chapter 67, 1187-1202.
- Jumadi, Carver, S. e Quincey, D. (2017) - A Conceptual Design of Spatio-Temporal Agent-Based Model for Volcanic Evacuation. *Systems*, 5, 23.
- Jumadi, Heppenstall, A. J., Malleon, N. S., Carver, S. J., Quincey, D. J. e Manville, V. R. (2018) - Modelling Individual Evacuation Decisions during Natural Disasters: A Case Study of Volcanic Crisis in Merapi, Indonesia. *Geosciences*, 8, 30.
- Komorowski, J.-C., Boudon, G., Semet, M.P., Beauducel, F., Anténor-Habazac, C., Bazin, S. e Hammouya, G. (2005) - Guadeloupe. In: Lindsay, J.M., Robertson, R.E.A., Shepherd, J.B., Ali, S. (Eds.), *Volcanic Atlas of the Lesser Antilles*, Seismic Research Unit, The University of the West Indies, Trinidad, 65–102.
- Kueppers, U., Pimentel, A., Ellis, B., Forni, F., Neukampf, J., Pacheco, J., Perugini, D. e Queiroz, G. (2019) - Biased Volcanic Hazard Assessment Due to Incomplete Eruption Records on Ocean Islands: An Example of Sete Cidades Volcanos, Azores. *Frontiers in Earth Science*, 7, 122.

- La Cruz-Reyna, S.D. (1996) - Long-Term Probabilistic Analysis of Future Explosive Eruptions. In: Roberto Scarpa, Robert I. Tilling (eds.) *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, Berlin, Heidelberg. 599-629.
- Lane, L. R., Tobin, G. A. e Whiteford, L. M. (2003) - Volcanic hazard or economic destitution: hard choices in Baños, Ecuador. *Environmental Hazards*, 5(1-2), 23-34.
- Le Pennec, J-L., Samaniego, P., Eissen, J-P., Hall, M. L., Molina, I., Robin, C., Mothes, P., Yepes, H., Ramón, P., Monzier, M. e Egred, J. (2005) – Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua. Segunda edición, Serie: Los peligros volcánicos en el Ecuador. Instituto Geofísico de La Escuela Politécnica Nacional, Institut de Recherche Pour le Développement. Corporación Editora Nacional, Quito, Ecuador, 122p.
- Lindell, M. K. (2008) – EMBLEM2: An empirically based large-scale evacuation time estimate model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42 (1), 140–154, ISSN 0965-8564.
- Lindell, M. K., Sorensen, J. H., Baker, E. J. e Lehman, W. P. (2020) - Community response to hurricane threat: Estimates of household evacuation preparation time distributions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 102457, ISSN 1361-9209.
- Lindsay, J.M. (2010) - Volcanoes in the big smoke: a review of hazard and risk in the Auckland Volcanic Field. In: A.L. Williams, G.M. Pinches, C.Y. Chin, T.J. McMorran, C.I. Massey (eds.) *Geologically Active*, Proceedings of the 11th IAEG Congress, 1st edition. Auckland, New Zealand, 5-10 September 2010.
- Lobão, C. M. G. (2008) – Capelinhos, Fifty years later. The chronology of the eruption. In: Goulart, T. (Ed.) *Capelinhos, a Volcano of Synergies. Azorean Emigration to America*. Portuguese Heritage Publications of California, San Jose CA, 45-52.
- Loughlin S., C., Vye-Brown, C., Sparks, R.S.J., Brown, S.K., Barclay, J., Calder, E., Cottrell, E., Jolly, G., Komorowski, J-C., Mandeville, C., Newhall, C., Palma, J., Potter S. e Valentine, G. (2015) – An introduction to global volcanic hazard and risk. In: Loughlin, S., Sparks, S., Brown, S. K., Jenkins, S. F., e Vye-Brown, C. (eds.) - *Global Volcanic Hazards and Risk*. Cambridge: Cambridge University Press. 410 p.
- Machado, F. (1958) Actividade Vulcânica de Ilha do Faial (1957–1958). *Atlântida*, VII, 305–315.
- Machado, F. (1959) - Actividade Vulcânica de Ilha do Faial (1957–1958). Notícia preliminar relativa aos meses de Maio a Agosto de 1958. *Atlântida*, III, 40–55.
- Machado, F., Parsons, W.H., Richards, A.F. e Mulford, J.W. (1962) - Capelinhos eruption of Fayal Volcano, Azores, 1957–1958. *Journal of Geophysical Research*, 67 (9), 3519–3529.

- Marques, R., Zêzere, J. L., Gaspar, J. L. e Amaral, P. (2009) - Reconstituição e modelação probabilística da escoada detrítica de Vila Franca do Campo desencadeada pelo sismo de 22 de outubro de 1522 (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Volume VI: 175-182.
- Matos, S. (2018) - *The use of infrasound in volcano monitoring. Contribution for future application in the Azores Islands*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade dos Açores. 293p.
- McGraw, P.A. (1976) - *A petrological/geochemical study of rocks from São Miguel, Azores, Portugal*. Master's thesis, Dalhousie University, 85 p.
- McNutt, S. R., Tompson, G., Johnson, J., Angelis, S. e Fee, D. (2015) – Seismic and Infrasonic Monitoring. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd edition, chapter 63, 1071-1100.
- Moore, R.B. (1990) - Volcanic geology and eruption frequency, São Miguel, Azores. *Bulletin of Volcanology*, 52, 602-614.
- Moore, R.B. (1991) - Geology of three late Quaternary stratovolcanoes on São Miguel, Azores. *United States Geological Survey Bulletin*, 1900, 1-26.
- Moriarty, K.D., Ni, D., e Collura, J. (2007) - Modeling traffic flow under emergency evacuation situations: Current practice and future directions. *86th Transportation Research Board Annual Meeting*.
- Nakada, S. (2002) - Hazards from Pyroclastic Flows and Surges. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopaedia of Volcanoes*, 1nd edition, Part VII, 945-955.
- Needham, H. e Francheteau, J. (1974) - Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36° 48' north. *Earth and Planetary Science Letters*, 22, 29-43.
- Newhall, C. e Solidum, R. U. (2015) – Volcanic Hazard Communication at Pinatubo from 1991 to 2015. In: Fearnley, C. J., Bird, D. K., Haynes, K., McGuire, W. J. e Jolly, G. (eds.) - *Observing the Volcano World – Volcano Crisis Communication*. *Advances in Volcanology*, 189-203.
- Newhall, C. G. e Punongbayan, A. S (1996) - Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, University of Washington, Press Seattle and London 1996. 151p.
- Pacheco, J. M., Ferreira, T., Queiroz, G., Wallenstein, N., Coutinho, R., Cruz, J. V., Pimentel, A., Silva, R., Gaspar, J. L. e Goulart, C. (2013) - Notas Sobre A Geologia

- Do Arquipélago Dos Açores. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, J.C. Kullberg (Eds), *Geologia De Portugal*, Volume 2, Escolar Editora, 595-690.
- Pareschi, M. T., Cavarra, L., Favalli, M., Giannini, F. e Meriggi, A. (2000) – GIS and Volcanic Risk Management. *Natural Hazards*, 21, 361-379.
- PEEPCRS-ISJ (2023) – Plano Especial de Emergência de Proteção Civil para o Risco Sismovulcânico na Ilha de São Jorge: Consulta Pública. In: Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores. Documentos. Informação Técnica. (<https://www.prociv.azores.gov.pt/operacoes/documentos/>).
- PMEPCPDL (2014) - Plano Municipal de Emergência de Ponta Delgada: Organização e Mecanismo, vol. 2, Câmara Municipal de Ponta Delgada.
- Pyle, D. M. (2015) – Sizes of Volcanic Eruptions. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopaedia of Volcanoes*, 2nd edition, chapter 13, 257-264.
- Qasim, Z., Ziboon, A-R. and Falih, K. (2018) - TransCad analysis and GIS techniques to evaluate transportation network in Nasiriyah city. *Sciences*, 7 p.
- Queiroz, M. (1997) - *Vulcão das Sete Cidades (S. Miguel, Açores): História Eruptiva e Avaliação do Hazard*. Dissertação de Doutoramento no ramo da Geologia, especialidade em Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores. 226p.
- Queiroz, G., Gaspar, J. L., Cole, P., Guest, J. E., Wallenstein, N., Duncan, A. M. e Pacheco, J. (1995) - Erupções Vulcânicas No Vale Das Furnas (Ilha De S. Miguel, Açores) Na Primeira Metade Do Século XV. *Açoreana*, VIII (1), 159-168.
- Queiroz, G., Pacheco, J. M., Gaspar, J.L., Aspinall, W.P., Guest, J.E. e Ferreira, T. (2008) - The last 5000 years of activity at Sete Cidades volcano (São Miguel Island, Azores): Implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3), 562-573.
- Queiroz, G., Gaspar, J.L., Guest, J.E., Gomes, A. e Almeida, M.H. (2015) - Eruptive history and evolution of Sete Cidades Volcano, São Miguel Island, Azores. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 87-104, doi: 10.1144/M44.7.
- Re, G., Corsaro, R. A., D’Oriano, C. e Massimo, P. (2021) - Petrological monitoring of active volcanoes: A review of existing procedures to achieve best practices and operative protocols during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419, 13.

- Rymer, H. (2015) - Eruptions. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd edition, part II, 237-238.
- Sandri, L., Jolly, G., Lindsay, J., Howe, T., e Marzocchi, W. (2012) - Combining probabilistic hazard assessment with cost-benefit analysis to support decision making in a volcanic crisis from the Auckland volcanic field, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 74, 705–723.
- Scarth, A. e Tanguy, J. C. (2001) - *Volcanoes of Europe*. Terra Publishing, Harpenden, 243 p.
- Searle, R. (1980) - Tectonic pattern of the Azores spreading centre and triple junction. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 51, 415-434.
- Secretaria Regional da Educação e dos Assuntos Culturais (2022) – Estatísticas da Educação 2020/2021 – Região Autónoma dos Açores. Direção de Serviços Técnico-Financeiros/Divisão de Contabilidade e Estatística.
- Siebert, L., Cottrell, E., Venzke, E. e Andrews, B. (2015) - Earth's Volcanoes and Their Eruptions: An Overview. In: Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, Stix (eds.) *Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd edition, chapter 12, 239-255.
- Silva, C. A. M. (2022) – *Análise à Exploração das Redes de Comunicação Utilizadas nas Operações de Socorro*. Dissertação de Mestrado em Proteção Civil, Universidade Lusófona do Porto, 138p.
- Silva, R., Carmo, R., e Marques, R. (2021) - Characterization of the tectonic origins of historical and modern seismic events and their societal impact on the Azores Archipelago, Portugal. Geological Society, London, Special Publications, 501, doi: 10.1144/SP501-2019-106.
- Silveira, D., Gaspar, J. L., Ferreira, T. e Queiroz, & G. (2003) - Reassessment of the historical seismic activity with major impact on S. Miguel Island (Azores). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 1–8.
- Tobin, G. A., e Whiteford, L. M. (2002) - Community Resilience and Volcano Hazards: The Eruption of Tungurahua and Evacuation of Faldas in Ecuador. *Disasters*, 26(1), 28-48.
- Tomsen, E., Lindsay, J.M., Gahegan, M., Wilson, T. e Blake, D. (2014) - Evacuation planning in the Auckland Volcanic Field, New Zealand: a spatio-temporal approach for emergency management and transportation network decisions. *Journal of Applied Volcanology*, 3, 6.

- Toulkeridis, T. (2007) – The Summer 2006 Volcanic Crisis of Tungurahua, Ecuador: No Lessons Learned. *AGU Spring Meeting Abstracts*. American Geophysical Union, Spring Meeting 2007, abstract id. V34A-02.
- UNDRR (2020) – Hazard Definition and Classification review - Technical Report. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, International Science Council, 87 p.
- UNDRR (2021) – Hazard Information Profiles - Supplement to: UNDRR-ISC Hazard Definition and Classification Review – Technical Report. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, International Science Council, 827 p.
- UNGA (2016) - Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. Note by the Secretary-General. United Nations General Assembly (UNGA). Document No. A/71/644.
- UNISDR (2009) - Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction.
- Valente, F., Cruz, J. V., Pimentel, A., Coutinho, R., Andrade, C., Nemésio, J. e Cordeiro, S. (2022) - Evaluating the Impact of Explosive Volcanic Eruptions on a Groundwater-Fed Water Supply System: An Exploratory Study in Ponta Delgada, São Miguel (Azores, Portugal). *Water*, 14, 1022.
- Varnes, D. J. e IAEG-CLOMMS (International Association of Engineering Geology – Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes) (1984) – Landslide Hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO, Paris. 63p.
- Viveiros, F. (2003) – *Contribuição para o estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores no âmbito da monitorização sismovulcânica e da avaliação do risco: discriminação de factores que influenciam a variação do fluxo do CO₂*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 140p.
- Viveiros, F., Gaspar, J. L., Ferreira, T., Silva, C., Marcos, M. e Hipólito, A. (2015) - Mapping of soil CO₂ diffuse degassing at São Miguel Island and its public health implications. In: Gaspar J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 185-195. doi: 10.1144/M44.14.
- Wallenstein, N. (1999) - *Estudo da história recente e do comportamento eruptivo do Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores). Avaliação preliminar do hazard*. Tese de doutoramento no ramo de Geologia, especialidade em Vulcanologia, Universidade dos Açores, Departamento de Geociências, 266p.

- Wallenstein, N., Duncan, A.M., Guest, J.E. e Almeida, M.H. (2015) - Eruptive history of Fogo Volcano, São Miguel, Azores. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*, Geological Society of London Memoir, 44, 105-123, doi: 10.1144/M44.8.
- Weston, F.S. (1964) - List of recorded volcanic eruptions in the Azores with brief reports. *Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências de Lisboa*, 10(1), 3-18.
- Whelley, P. L., Newhall, C. G. e Bradley, K. E. (2015) – The frequency of explosive eruptions in Southeast Asia. *Bulletin of Volcanology*, 77(1), 11p.
- Wild, A., Bebbington, M., Lindsay, J.M. e Charlton, D. H. (2021) - Modelling spatial population exposure and evacuation clearance time for the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 416, 107282, ISSN 0377-0273.
- Yeh, G-O. A. e Chow, M. H. (1996) - An Integrated Gis And Location-Allocation Approach To Public Facilities Planning - An Example Of Open Space Planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 20, 339-350.
- Zanon, V. (2015) - The magmatic suite of the Azores Islands. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (eds.) *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 51-64.
- Zanon, V. e Viveiros, F. (2019) - A multi-methodological re-evaluation of the volcanic events during the 1580 CE and 1808 eruptions at São Jorge Island (Azores Archipelago, Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 373: 51-67, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.01.028.
- Zbyszewski, G. (1960) - L' eruption du Volcan de Capelinhos (Ille de Faial, Acores). *Bulletin Volcanologique, serie II, tome XXIII*, 78–100.
- Zbyszewski, G. e Veiga Ferreira, O. (1959) - Rapport de la deuxième mission géologique sur le volcanisme de L' Ille de Faial. *Serviços Geológicos de Portugal*, 4 (new series), 29–55.
- Zbyszewski, G. e Rosa, T. P (1977) – Os Sismos de 1964 na Ilha de São Jorge (Açores): Registo Diário. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, N.º 3, 33-59.

WEBGRAFIA

- Autoridade Marítima Nacional (2023) www.amn.pt/ [5 de janeiro de 2023].
- Caetano Raposo e Pereiras – Empresa (2022) www.crp-caetanoraposopereiras.pt [18 de novembro de 2022].
- Câmara Municipal de Ponta Delgada - Simulacro de incêndio no Museu Carlos Machado a 27 de novembro (2016) www.cm-pontadelgada.pt/pages/541?news_id=102 [11 de maio de 2023].
- Câmara Municipal de Ponta Delgada (2016) www.cm-pontadelgada.pt [18 de novembro de 2022].
- Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica do Açores (CIVISA) – Comunicados do CIVISA para o SRPCBA (2022 e 2023) <http://www.ivar.azores.gov.pt/sjorge/Paginas/comunicados.aspx>.
- Direção Regional da Energia (2023) www.portaldaenergia.azores.gov.pt [5 de janeiro de 2023].
- Exército (2022) www.exercito.pt [1 de novembro de 2022].
- Gabinete Autónomo Descentralizado Municipal de Banhos de Agua Santa (2019) <https://municipiobanos.gob.ec/banos/index.php/es/> [24 de julho de 2023].
- Guarda Nacional Republicana www.gnr.pt [5 de janeiro de 2023].
- International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) (2005) - Annan calls for investment in disaster prevention in year of 'profound lessons'.* <https://news.un.org/en/story/2005/10/156242> [5 de janeiro de 2023].
- Matos, J., C. (2017) - *O desenvolvimento das comunicações nos Açores - IX Jornadas Ibero-Atlânticas de Estatística Regional* <https://srea.azores.gov.pt/upl/%7Bae165805-f7b0-4251-9e2e-08111a691327%7D.pdf> [5 de janeiro de 2023].
- Neves, N. (2023, 14 de fevereiro) - Câmara pretende mais agentes e horário alargado na Polícia Municipal. Açoriano Oriental <https://www.acorianooriental.pt/noticia/camara-pretende-mais-agentes-e-horario-alargado-na-policia-municipal-3477800> [5 de maio de 2023].
- Polícia de Segurança Pública www.psp.pt [5 de janeiro de 2023].
- Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores (SRPCBA) (2020) www.prociiv.azores.gov.pt/ [3 de janeiro de 2023].

Serviços Municipalizados de Água e Saneamento da Câmara Municipal de Ponta Delgada (2023) www.smaspdl.pt [5 de janeiro de 2023].

LEGISLAÇÃO

Decreto Legislativo Regional n.º 23/2020/A, de 14 de agosto (2020) - Regime jurídico da atividade de polícia florestal da Região Autónoma dos Açores. Diário da República n.º 158/2020, Série I de 2020-08-14, 89 – 95.

Decreto Regulamentar Regional n.º 16/2007/A de 13 de agosto - Revisão do Plano Director Municipal de Ponta Delgada (PDMPSDL). Diário da República, 1.ª série — N.º 155.

Decreto-Lei n.º 19/2004, de 20 de maio - Revisão da lei-quadro que define o regime e forma de criação das polícias municipais. Diário da República n.º 118/2004, Série I-A de 2004-05-20, 3152 – 3155.

Decreto-Lei n.º 27/2006, de 3 de julho - Lei de Bases da Proteção Civil. Diário da República, n.º 126/2006, Série I de 2006-07-03.

Decreto-Lei n.º 45 685, de 27 de abril - Ministérios do Interior, das Finanças, das Obras Públicas, da Economia e da Saúde e Assistência: Secretaria de Estado da Agricultura. Diário do Governo, Série I, n.º 100, 581-584.

Decreto-Lei n.º 45 687, de 27 de abril - Ministérios do Interior, das Finanças, das Obras Públicas, da Economia e da Saúde e Assistência: Secretaria de Estado da Agricultura. Diário do Governo, Série I, n.º 100, 586.

Decreto-Lei n.º 62/2011, de 9 de maio - Estabelece os procedimentos de identificação e de proteção das infraestruturas essenciais para a saúde, a segurança e o bem-estar económico e social da sociedade nos sectores da energia e transportes e transpõe a Diretiva n.º 2008/114/CE, do Conselho, de 8 de Dezembro. Diário da República n.º 89/2011, Série I de 2011-05-09, 2624 – 2627.

Resolução do Conselho do Governo n.º 55/2019 de 16 de abril - Plano Regional de Emergência de Proteção Civil dos Açores. Jornal Oficial, série I, n.º 46.


Resolução n.º 30/2015, de 7 de maio – Aprovação de diretiva relativa aos critérios e normas técnicas para a elaboração e operacionalização de planos de emergência de proteção civil e revogação da Resolução da Comissão Nacional de Proteção Civil n.º 25/2008 de 18 de julho. Diário da República n.º 88/2015, Série II de 2015-05-07, 11179 – 11181 p.

ANEXOS

ANEXO I

Escalas de Alertas Científicos do Estado de Atividade Sismovulcânica dos Açores

Gaspar, J. L., Queiroz, G., Ferreira, T. (2012)

 ESCALA DE ALERTAS CIENTÍFICOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE ACTIVIDADE SISMOVULCÂNICA NA REGIÃO DOS AÇORES Gaspar, J.L., Queiroz, G., Ferreira, T. (2012)				
ALERTA	INDICADORES	ACTIVIDADE	ESTADO DO SISTEMA	PERIGOS GEOLÓGICOS
V0	Indicadores geofísicos, geodésicos e geoquímicos com valores normais	Actividade normal	Estado de repouso	← ← Gases Vulcânicos → →
V1	Indicadores geofísicos e/ou geodésicos e/ou geoquímicos com valores ligeiramente acima do normal e Inexistência de variações correlacionáveis entre indicadores obtidos por uma ou mais técnicas de monitorização	Sinais de fraca actividade	Estado de instabilidade	← ← Sismos → →
V2	Indicadores geofísicos e/ou geodésicos e/ou geoquímicos com valores claramente acima do normal e/ou Possível existência de variações correlacionáveis entre indicadores obtidos por uma ou mais técnicas de monitorização	Sinais de actividade moderada	Possível reactivação do sistema	← ← Movimentos de massa → →
V3	Indicadores geofísicos e/ou geodésicos e/ou geoquímicos com valores muito acima do normal e/ou Existência de variações correlacionáveis entre indicadores obtidos por uma ou mais técnicas de monitorização	Sinais de actividade elevada	Confirmação da reactivação do sistema	← ← Explosões de vapor → →
V4	Acentuado incremento dos indicadores geofísicos e/ou geodésicos e/ou geoquímicos e/ou Observação de efeitos superficiais no vulcão e/ou zonas adjacentes, incluindo explosões de vapor e erupções freáticas	Sinais de actividade pré-eruptiva	Ameaça de erupção magmática ou hidromagmática	← ← Tsunamis → →
V5	Manutenção de indicadores geofísicos, geodésicos e/ou geoquímicos continuamente elevados Impactes directos na área do vulcão e zonas adjacentes	Actividade vulcânica efusiva, moderadamente explosiva, severa,	Erupção de VEI 0 a VEI 3 em curso	Escoadas lávicas Projecteis de trajectória ballística Cinzas vulcânicas e lapilli de queda
V6	Manutenção de indicadores geofísicos, geodésicos e/ou geoquímicos continuamente elevados Impactes directos para além das zonas adjacentes ao vulcão	Actividade vulcânica catastrófica, paroxística, colossal,	Erupção de VEI 4 ou superior em curso	Fluxos piroclásticos Escoadas de lama

ANEXO II

Escala de alertas científicos para caracterização da qualidade do ar interior (CO₂).

Gaspar, J. L., Ferreira, T., Viveiros, F. (2012)

 ESCALA DE ALERTAS CIENTÍFICOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR (CO ₂) J.L. Gaspar, T. Ferreira, F. Viveiros (2012)					
ALERTA	INDICADORES	SIGNIFICADO	SINTOMAS CO ₂	TEMPO DE EXPOSIÇÃO	ACESSO
G0	0,036%-0,039% < Concentração de CO ₂ no ar atmosférico < 0.1%	Valor do ar atmosférico (0.038%)	Inexistentes	Permanente	Livre
G1	0.1% < Concentração de CO ₂ no ar atmosférico ≤ 0.5%	Limite de exposição admissível (0.5%) *	Inexistentes	8 horas	Condicionado até ao máximo de 8 horas
G2	0.5% < Concentração de CO ₂ no ar atmosférico < 2.5%	Limite inferior para a detecção de sintomas (1%)	Eventual sensação de sonolência Aceleração da respiração até 50%	n.d.	Condicionado até ao máximo de 30 minutos
G3	2.5% ≤ Concentração de CO ₂ no ar atmosférico < 3.5%	Limite de exposição num curto período (3%) **	Sensação de sonolência Aceleração da respiração até 100% Dores de cabeça Fraqueza muscular	Períodos de 15 minutos num máximo de 4 vezes ao dia com intervalos de 1 hora	Condicionado até ao máximo de 15 minutos
G4	3.5% ≤ Concentração de CO ₂ no ar atmosférico < 4.5%	Valor de perigo imediato (4%)	Aceleração da respiração de 200 a 400% Dores de cabeça Fraqueza muscular Vómitos Tonturas Ruído nos ouvidos Sonolência	Alguns minutos	Permitido exclusivamente a técnicos autorizados e com equipamento de respiração autónoma
G5	4.5% ≤ Concentração de CO ₂ no ar atmosférico < 9.5 %	Limite a partir do qual há efeito tóxico directo (5%)	Aceleração da respiração mais de 400% Intensificação rápida dos sintomas No limite, estado de inconsciência	Escassos minutos	Permitido exclusivamente em situações inadmissíveis a técnicos autorizados e com equipamento de respiração autónoma
G6	Concentração de CO ₂ no ar atmosférico ≥ 9.5%	-	Rápida inconsciência Morte	Quase imediato	Permitido exclusivamente em situações inadmissíveis a técnicos autorizados e com equipamento de respiração autónoma

ANEXO III

Portal da Direção Regional das Obras Públicas - Rede viária regional da ilha de São Miguel.



ANEXO IV

Plano Regional de Emergência de Proteção Civil dos Açores (2019) – Classificação e subclassificações da rede viária.

Rede viária	Caraterização
Rede Regional	Liga centros urbanos e económicos de maior relevância.
Rede Municipal	Permite a circulação de pessoas e veículos dentro de um espaço territorial e estabelece acesso a explorações agrícolas e pecuárias.
Rede Agrícola	Liga o perímetro agrícola.
Rede Rural e/ou Florestal	Estabelece o acesso a explorações agrícolas, pecuárias e florestais. E permite a circulação no perímetro florestal.

Rede Regional		
Classificação Estrutural	Estradas Regionais Principais	Estabelecem a ligação entre os principais centros urbanos e entre estes e os principais portos e aeroportos.
	Estradas Regionais Secundárias	Estabelecem a ligação entre as estradas regionais principais e o acesso aos centros económicos, agrícolas, rurais e turísticos de maior relevância.
Classificação Funcional	Vias Rápidas	Permitem o escoamento rápido do tráfego.
	Vias Expresso	Permitem o escoamento do tráfego.
	Vias Regulares	Permitem o escoamento de qualquer tipo de tráfego.

Rede Municipal	
Estradas Municipais	Vias que ligam o concelho às sedes de freguesia e povoações. Permite uma melhor circulação dentro da malha urbana.
Caminhos Municipais de 1. ^a	Vias que ligam povoações ou uma povoação à sede do município ou a outras vias da rede regional ou municipal.
Caminhos Municipais de 2. ^a	Vias de acesso ao espaço rural e a explorações agrícolas e pecuárias fora dos perímetros agrários e florestais.

Rede Rural/Florestal	
Caminhos Rurais	Vias exclusivas para acesso ao espaço rural e a explorações agrícolas e pecuárias fora dos perímetros agrários e florestais.
Caminhos Florestais Principais	Vias de ligação entre os povoados e os perímetros florestais. Permitem a proteção e exploração dos recursos florestais.
Caminhos Florestais Secundários	Vias que ligam os acessos aos caminhos florestais principais ou ao perímetro florestal.
Estradões Florestais	Vias desenvolvidas dentro do perímetro florestal. Visam assegurar o acesso a zonas de plantação, de exploração, de pastagens baldias ou de prevenção contra incêndios.

Rede Agrícola	
Caminhos Agrícolas Principais	Estabelecer acesso a explorações agrícolas e pecuárias, a partir de vias das redes regional, municipal ou florestal.
Caminhos Agrícolas Secundários	Estabelecer acesso a explorações agrícolas e pecuárias, a partir de vias integradas na mesma rede.

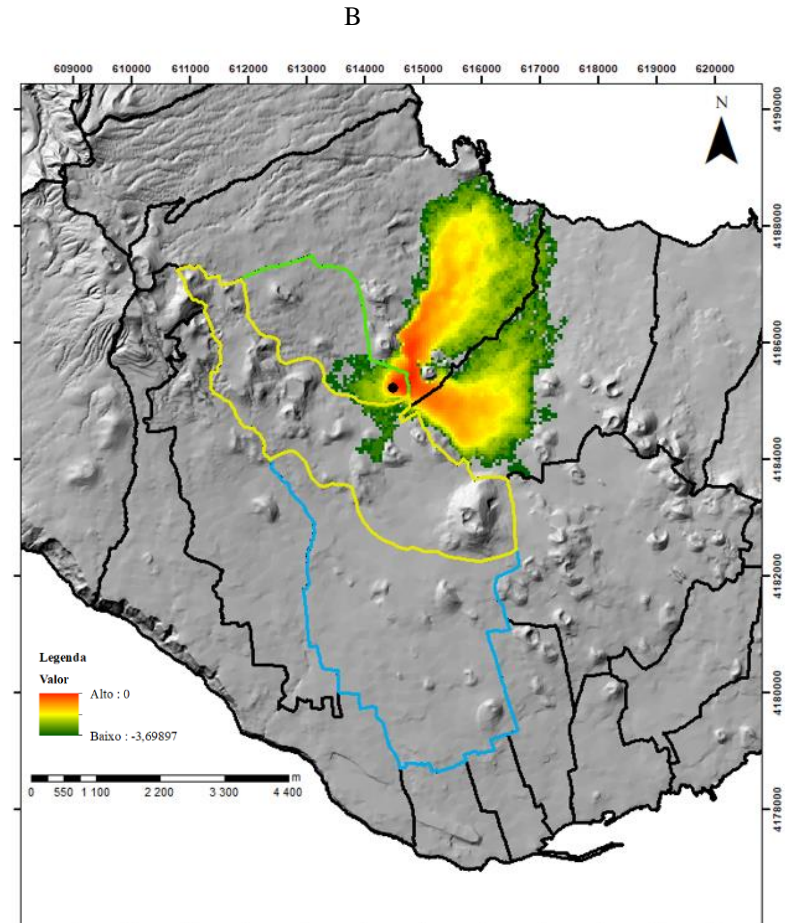
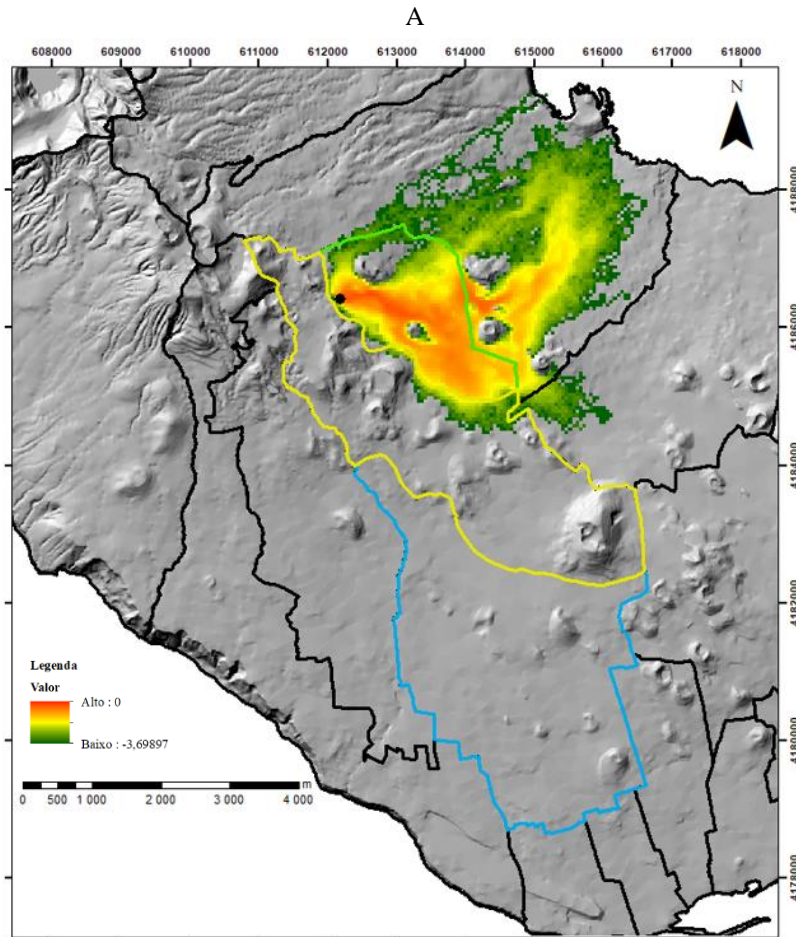
ANEXO VI

Informação da foto aérea utilizada para delimitar a freguesia de Arrifes.

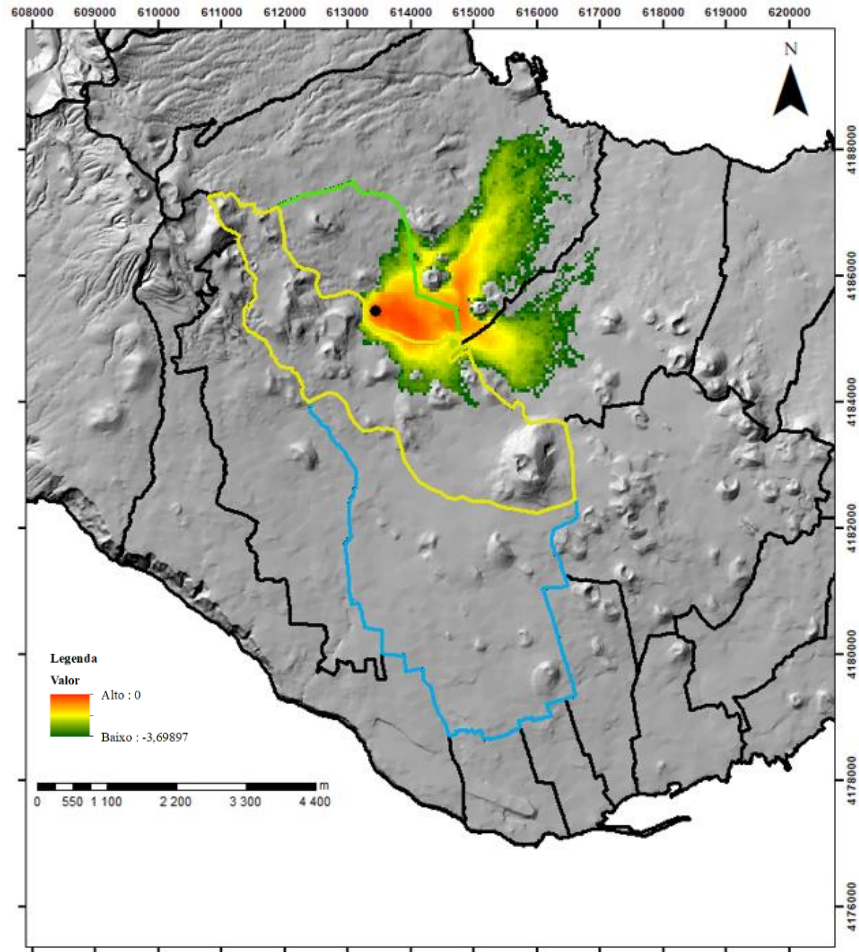
Zona	Voo	Escala	Ano	Fiada	Fotogramas
Pinhal da Paz – Pico do Carvão	09/01	1/15 000	2001	11	988 a 990
Rabo de Peixe – Pico do Carvão	09/01	1/15 000	2001	12	1020 a 1023

ANEXO VII

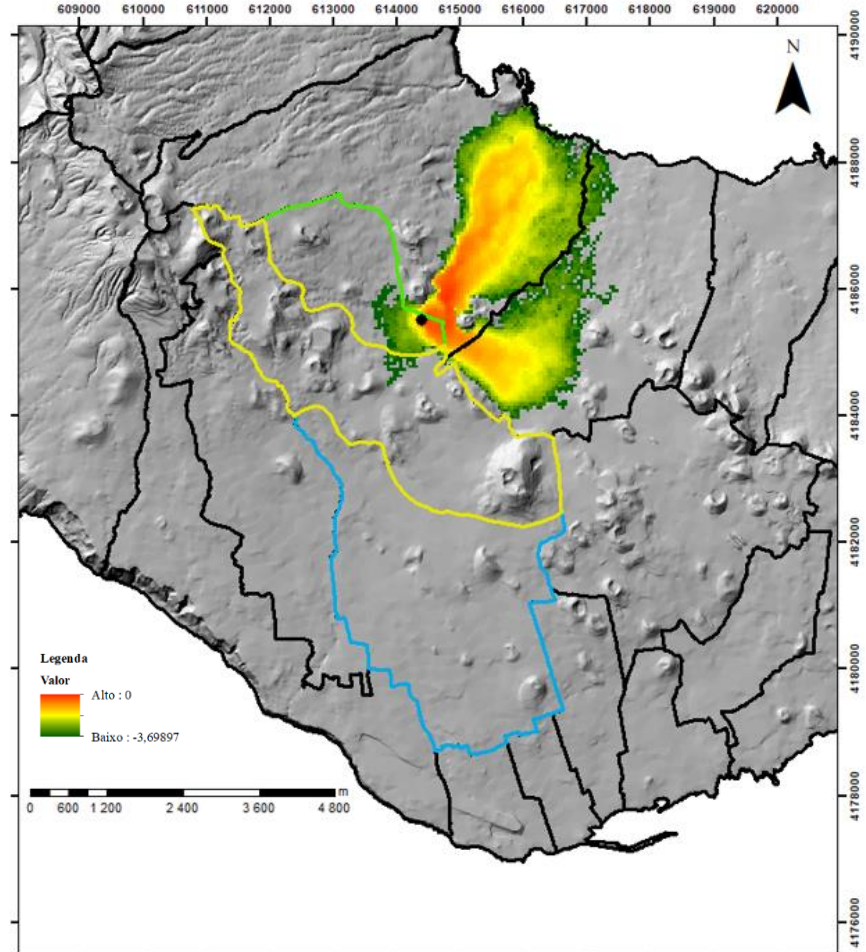
Simulações em *VORIS* de erupções vulcânicas com produção de escoada lávica com direção a N da freguesia de Arrifes.



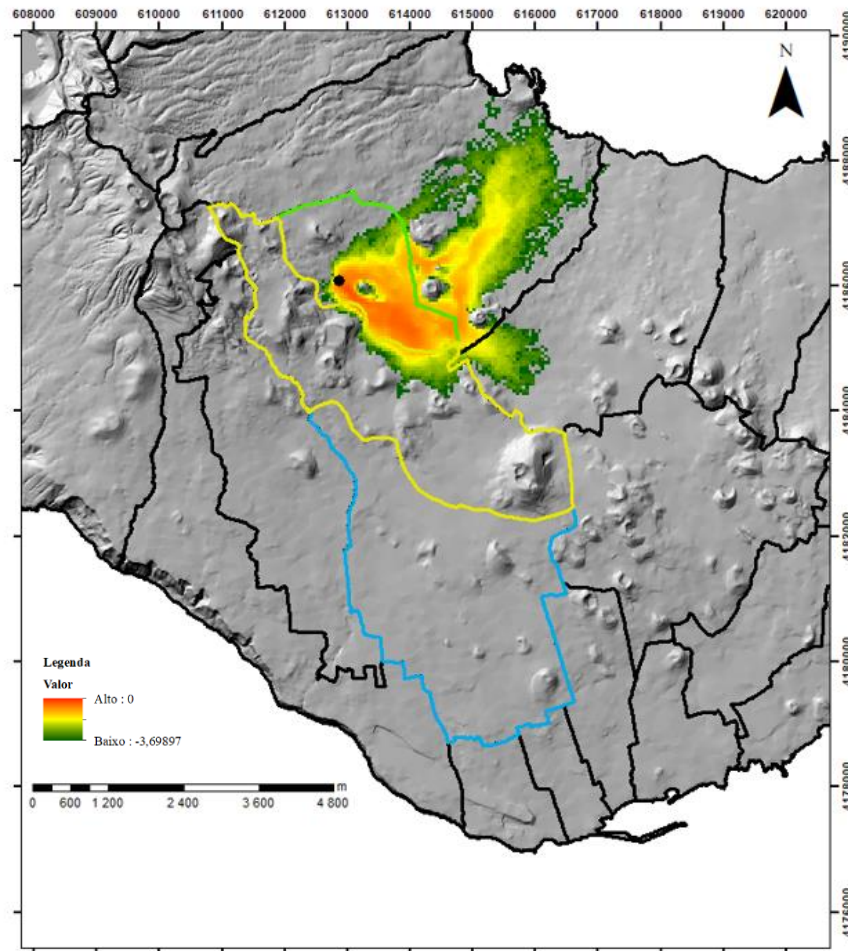
C



D



E

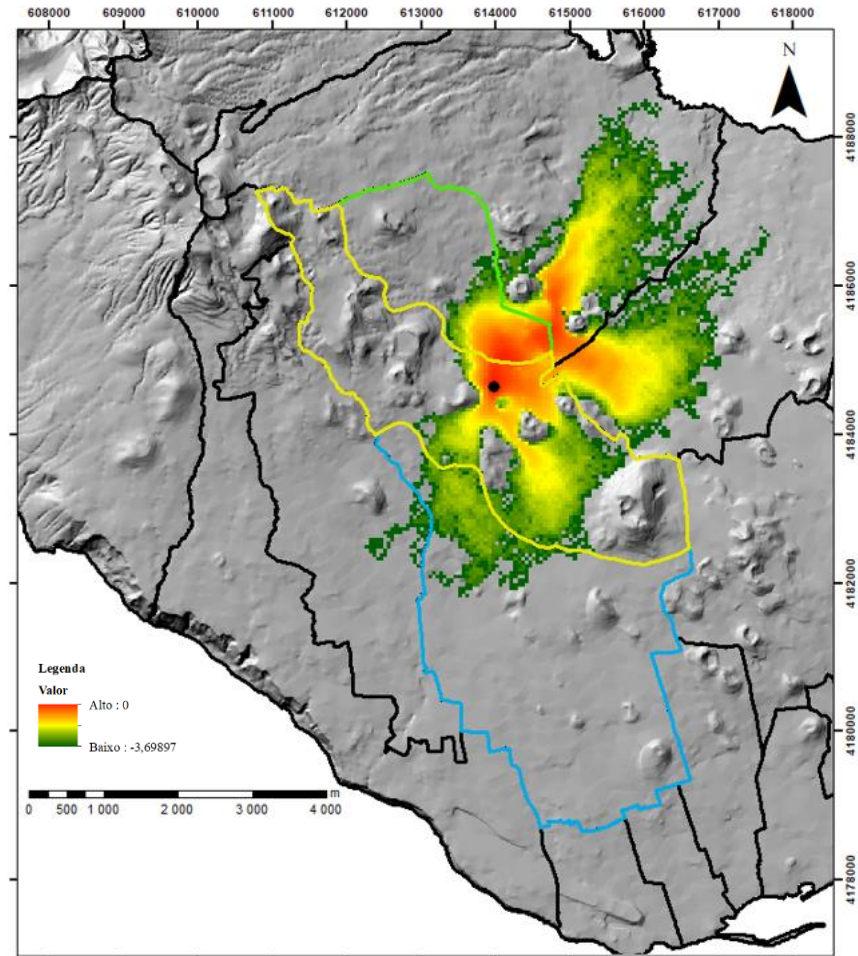
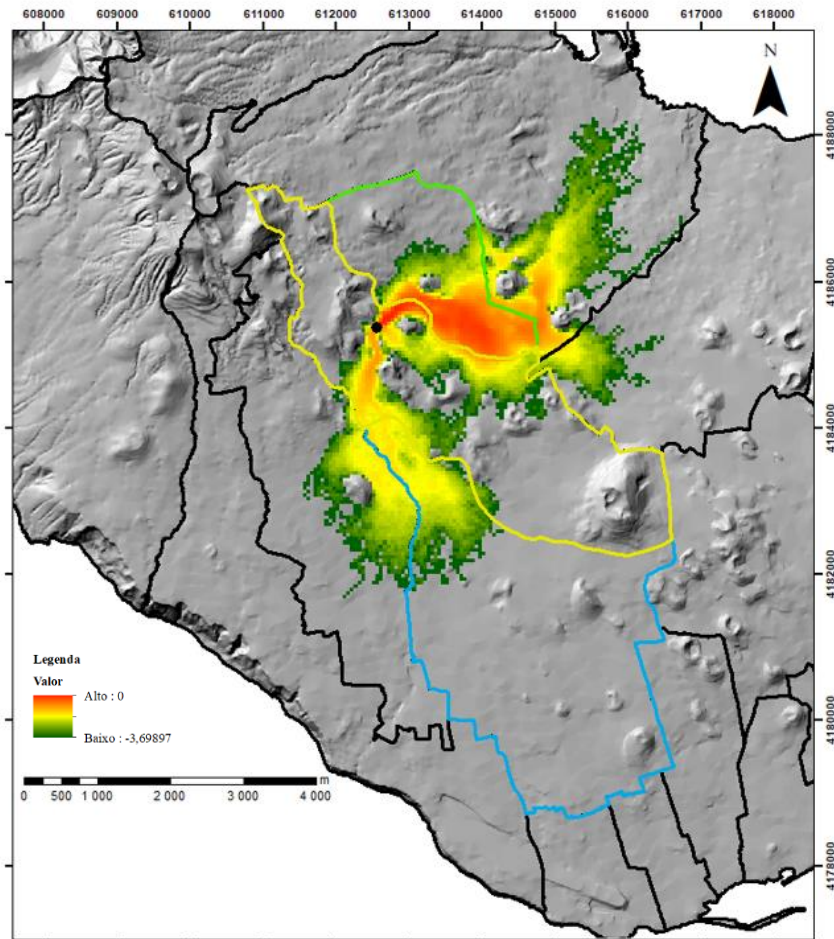


ANEXO VIII

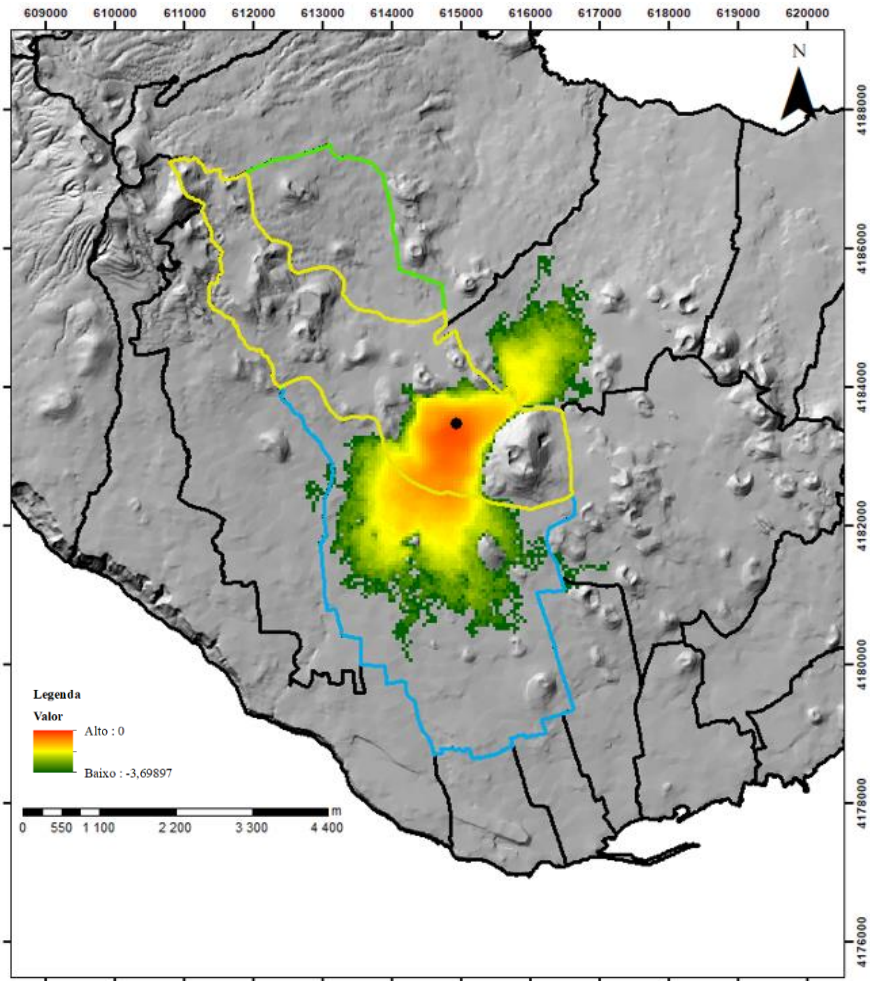
Simulações em *VORIS* de erupções vulcânicas com produção de escoada lávica com direção aos lados N e S da freguesia de Arrifes.

A

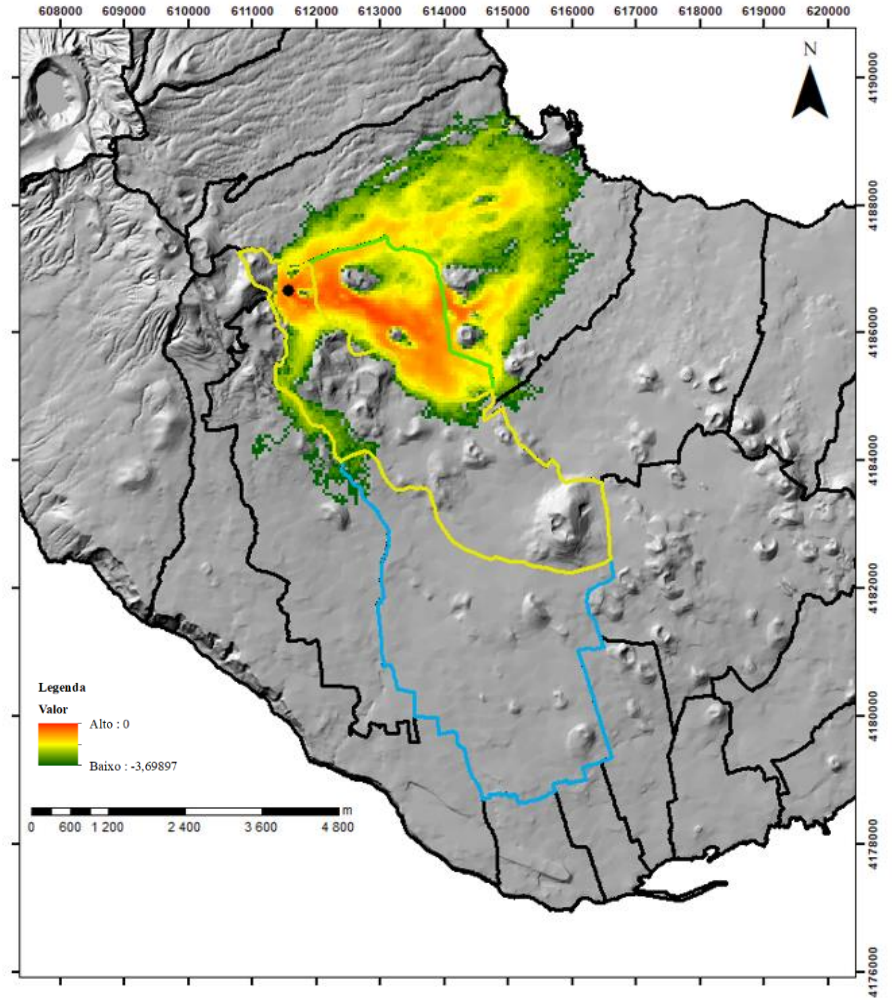
B



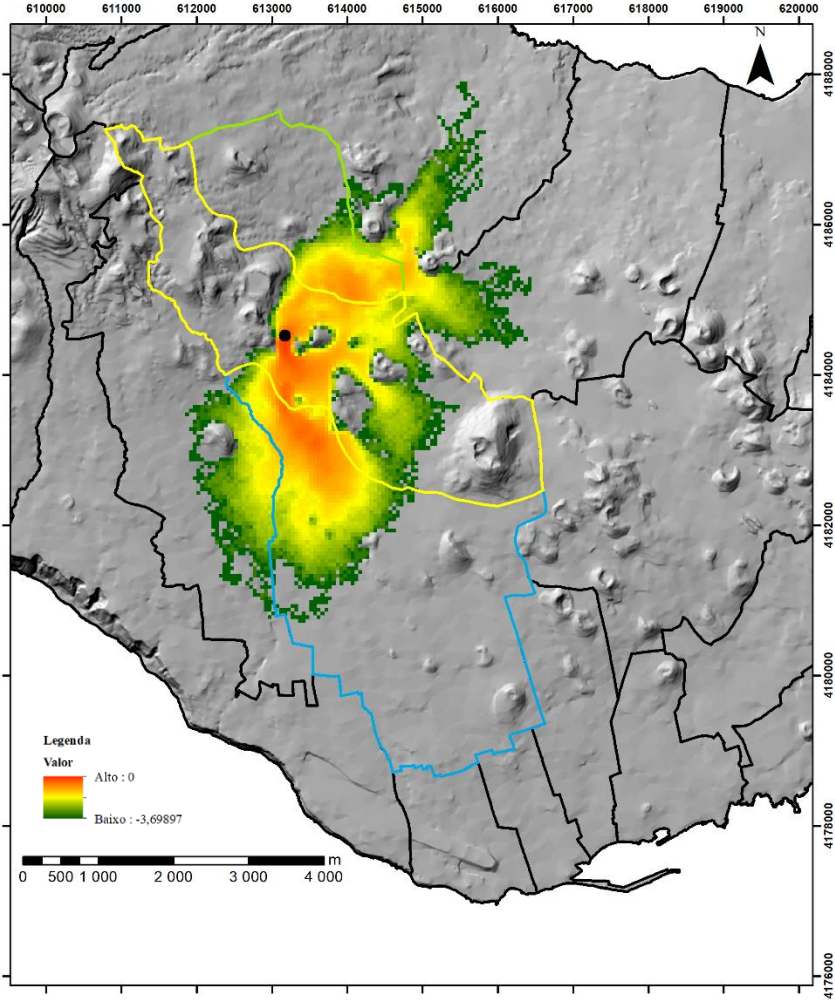
C



D



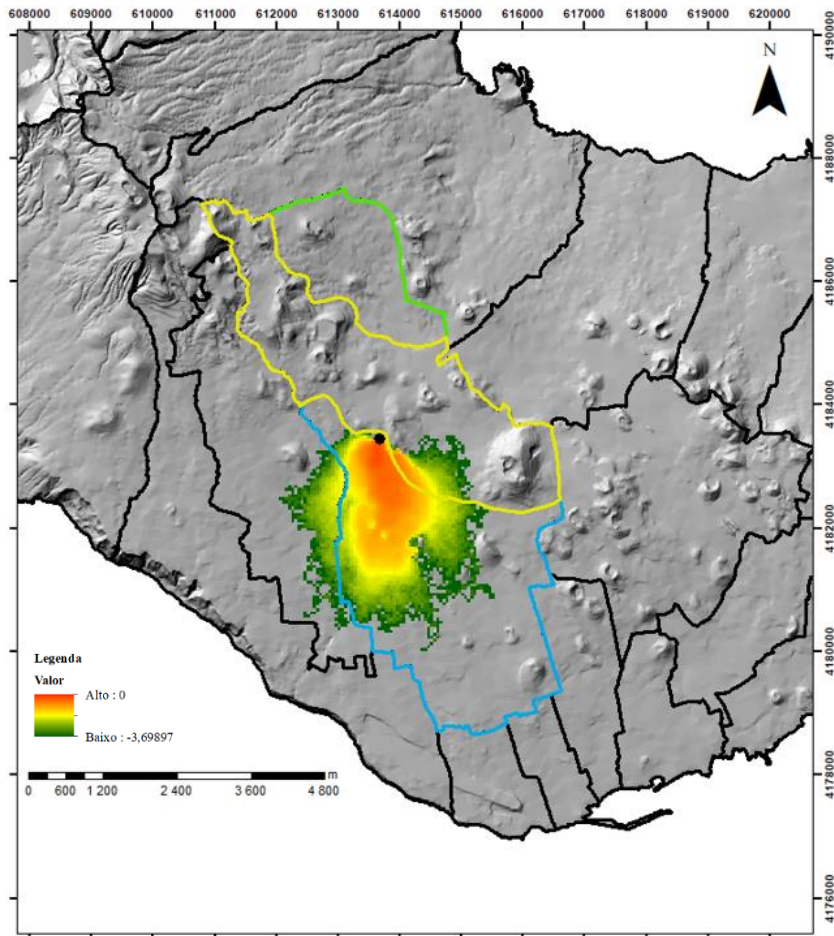
E



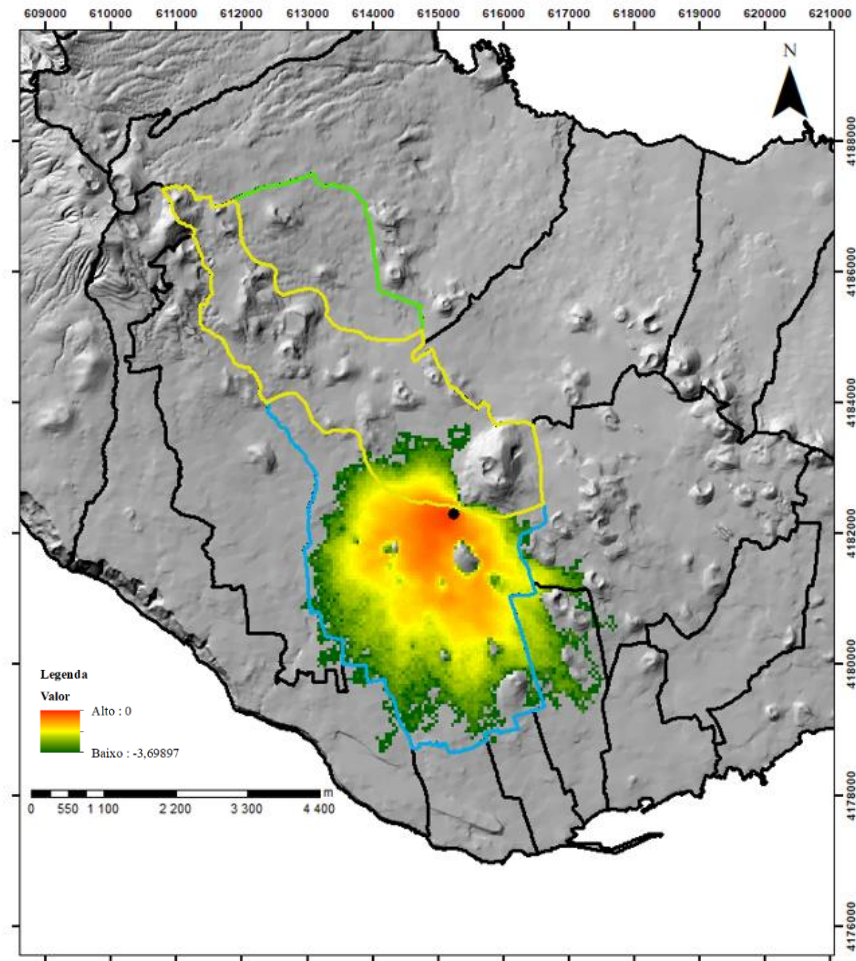
ANEXO IX

Simulações em *VORIS* de erupções vulcânicas com produção de escoada lávica com direção a S da freguesia de Arrifes.

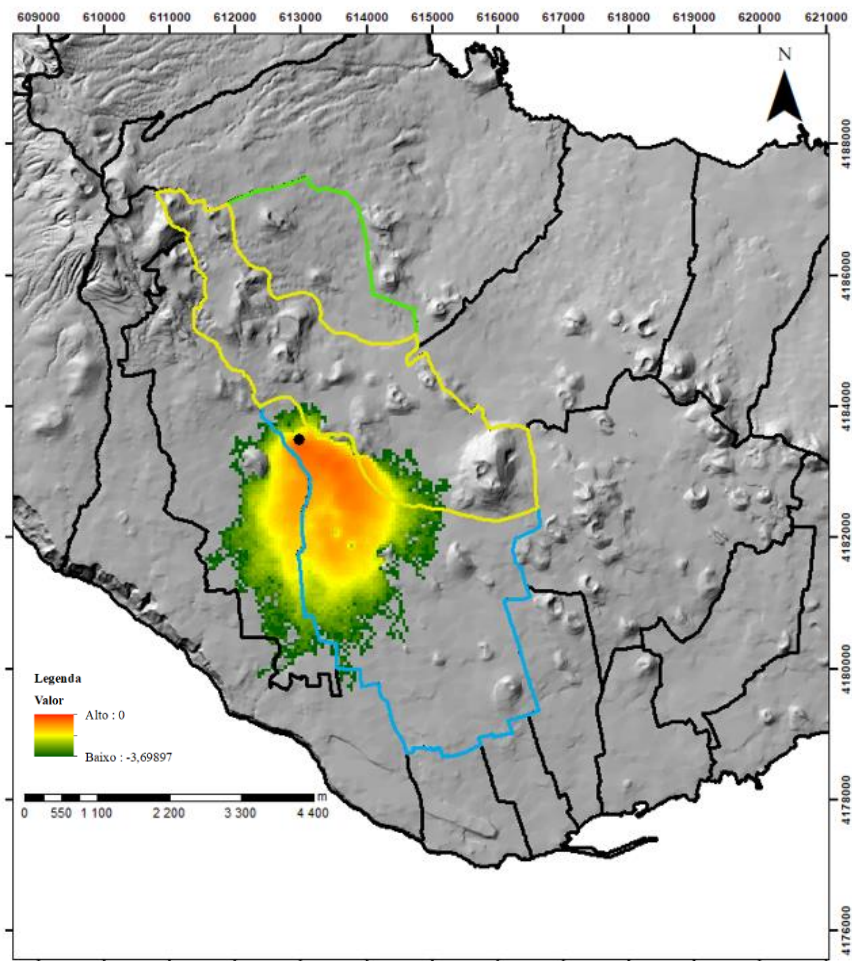
A



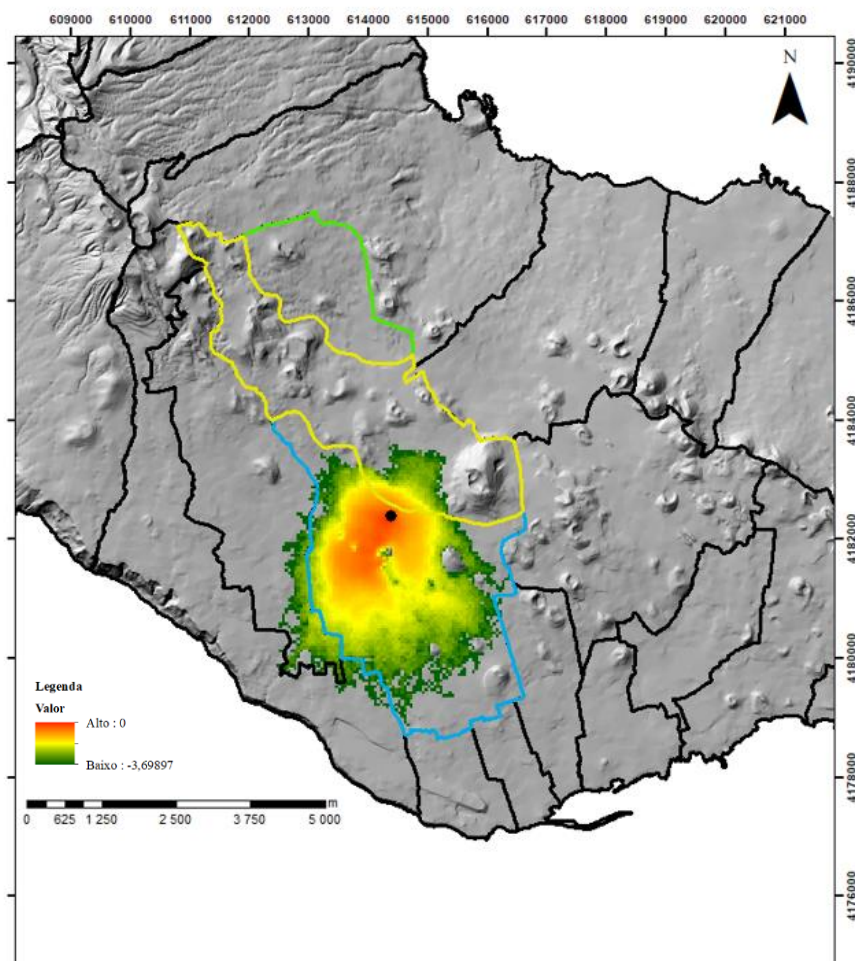
B



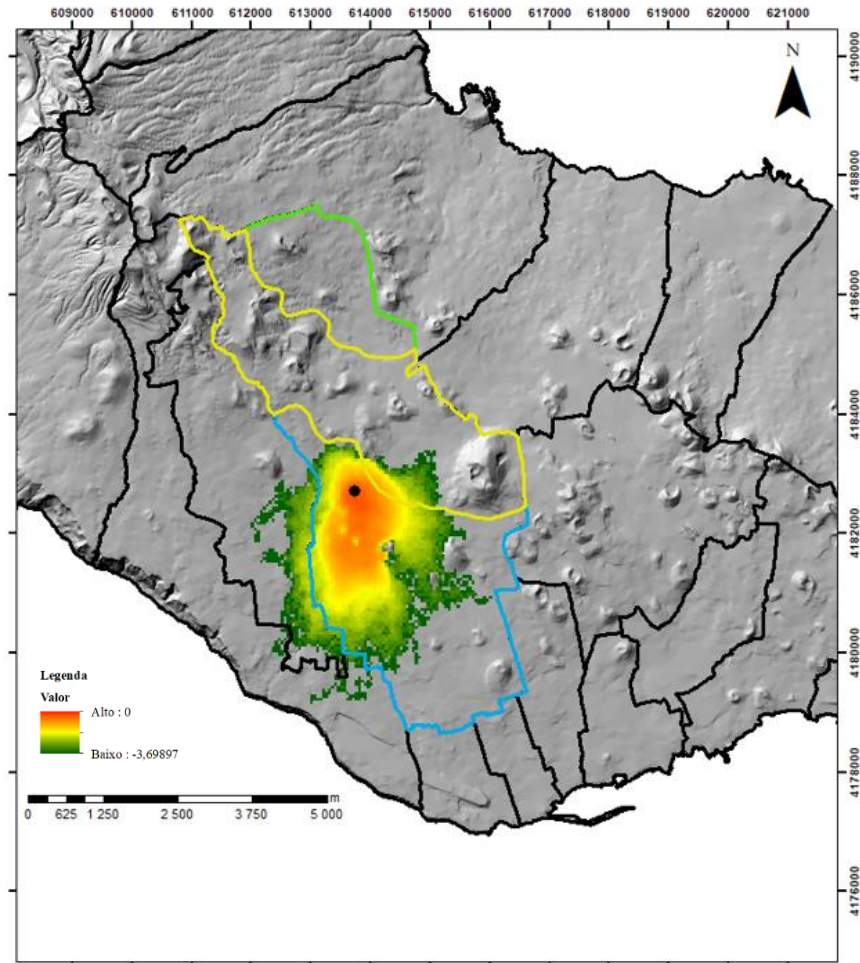
C



D



E



ANEXO X

Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária

Artigo 27.º - Limites gerais de velocidades, do anexo IV da alínea a) do artigo 14.º - Republicação do Código da Estrada, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 114/94, de 3 de maio – Código da Estrada, integrante no Decreto-Lei n.º 102-B/2020, de 9 de maio, que altera o Código da Estrada e legislação complementar, transpondo a Diretiva (UE) 2020/612.

Porque há limites máximos de velocidade?

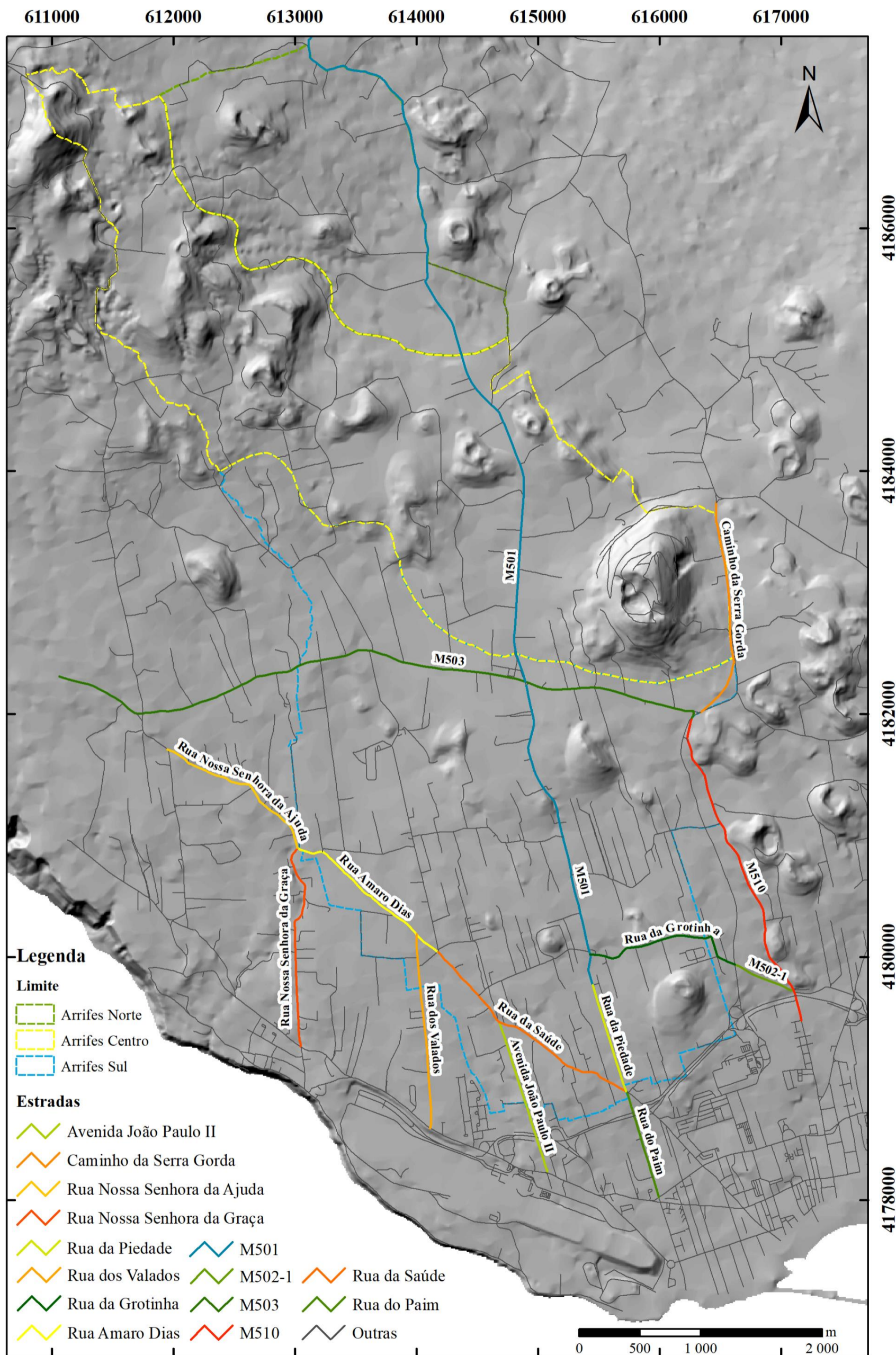
- Porque o excesso de velocidade é a primeira causa dos acidentes.
- Porque quanto mais próxima for a velocidade dos veículos que circulam no mesmo sentido, maior é a segurança da estrada e a fluidez do tráfego.
- Porque quando se duplica a velocidade praticada, quadruplica a distância de travagem, a violência do choque em caso de colisão, a força centrífuga nas curvas, as exigências de atenção e das capacidades de condução.
- Porque, acima de um certo limite de velocidade, aumenta a fadiga do condutor, o consumo de combustível, o desgaste dos pneus, travões, e da mecânica do veículo, e a poluição ambiente.

Limites Gerais Máximos de Velocidade Instantânea

	Dentro das localidades		Autoestradas	Vias Reservadas a automóveis e motociclos	Restantes vias públicas
	Zonas de coexistência	Outras zonas			
Ciclomotores e quadriciclos	20	40	--	--	45
Motociclos:					
De cilindrada superior a 50cm3 e sem carro lateral	20	50	120	100	90
Com carro lateral ou com reboque	20	50	100	80	70
De cilindrada não superior a 50cm3	20	40	--	--	60
Triciclos	20	50	100	90	80
Automóveis ligeiros de passageiros e mistos:					
Sem reboque	20	50	120	100	90
Com reboque	20	50	100	80	70
Automóveis ligeiros de mercadorias:					
Sem reboque	20	50	110	90	80
Com reboque	20	50	90	80	70
Automóveis pesados de passageiros:					
Sem reboque	20	50	100	90	80
Com reboque	20	50	90	90	70
Automóveis pesados de mercadorias:					
Sem reboque ou com semirreboque	20	50	90	80	80
Com reboque	20	40	80	70	70
Tratores agrícolas ou florestais	20	30	--	--	40
Máquinas agrícolas, motocultivadores e tratocarros	20	20	--	--	20
Máquinas industriais:					
Sem matrícula	20	30	--	--	30
Com matrícula	20	40	80	70	70

ANEXO XI

Estradas preferenciais para a evacuação da zona S da freguesia de Arrifes, nos três cenários elaborados.



UNIVERSIDADE DOS AÇORES
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Rua da Mãe de Deus
9500-321 Ponta Delgada
Açores, Portugal



2023

DM

Capacidade de resposta, transporte e evacuação em Ponta Delgada

Linda Inês Fortuna Tavares Silva