

**RITA MARIA MENDO TRIGO CHICHORRO RODRIGUES**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODESIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS  
SISTEMAS VULCANO-TECTÓNICOS E HIDROTERMAIS DO SEGMENTO  
DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA**



**DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES**

**2013**



**RITA MARIA MENDO TRIGO CHICHORRO RODRIGUES**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODESIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS  
SISTEMAS VULCANO-TECTÓNICOS E HIDROTERMAIS DO SEGMENTO  
DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À UNIVERSIDADE DOS AÇORES PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE DOUTOR NO RAMO DE GEOLOGIA, ESPECIALIDADE DE GEODESIA.

ORIENTADOR:

PROF<sup>a</sup>. DOUTORA TERESA DE JESUS LOPES FERREIRA

UNIVERSIDADE DOS AÇORES

CO-ORIENTADOR:

PROF. DOUTOR FREYSTEINN SIGMUNDSSON

UNIVERSITY OF ICELAND



**DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
UNIVERSIDADE DOS AÇORES**

**2013**



**Aos meus pais,**

*José Rodrigues  
Marília Rodrigues  
Dedico.*

**Ao meu Marido e filha,**

*Rui Mestre  
Joana Mestre  
Ofereço.*

**Aos meus irmãos,**

*José Manuel  
João Luís  
Pedro  
Ana Luísa  
Inês  
Com carinho.*



**ÍNDICE**

LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABELAS .....	XXI
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	XXVII
AGRADECIMENTOS .....	XXXI
RESUMO .....	XXXV
ABSTRACT .....	XXXIX
PREÂMBULO .....	XLIII

**CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

1.1. Motivação.....	1
1.2. Contribuição científica.....	3
1.3. Estudos anteriores .....	5

**CAPÍTULO 2 - ELEMENTOS SOBRE O ENQUADRAMENTO DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES**

2.1. Localização geográfica .....	15
2.2. Enquadramento geodinâmico .....	16
2.2.1. Modelos geodinâmicos .....	18
2.3. Actividade sísmica .....	20
2.4. Actividade vulcânica .....	24

**CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO VULCANOLÓGICA DAS ILHAS TERCEIRA, GRACIOSA E S. JORGE**

3.1. Ilha Terceira .....	27
3.1.1. Principais aspectos vulcanológicos.....	27
3.1.2. Sismicidade e vulcanismo.....	30
3.2. Ilha Graciosa.....	34
3.2.1. Principais aspectos vulcanológicos.....	34
3.2.2. Sismicidade e vulcanismo.....	39
3.3. Ilha São Jorge.....	43
3.3.1. Principais aspectos vulcanológicos.....	43

3.3.2. Sismicidade e vulcanismo .....	46
---------------------------------------	----

## **CAPÍTULO 4 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO GPS – UMA REVISÃO**

4.1. Sistema de Posicionamento Global (GPS).....	51
4.1.1. Escala de Tempo GPS.....	55
4.1.2. Sistema de coordenadas.....	55
4.1.3. Serviços internacionais de GNSS - IGS.....	56
4.2. Observáveis GPS.....	57
4.1.1. Pseudo-distância.....	57
4.1.2. Fase da portadora.....	58
4.3. Diferenças de observáveis.....	59
4.3.1. Combinação linear de observáveis.....	60
4.4. Principais problemas nas observações GPS.....	61
4.4.1. Erros nas efemérides dos satélites.....	62
4.4.2. Erros nos relógios dos satélites.....	62
4.4.3. Atraso ionosférico.....	63
4.4.4. Atraso troposférico.....	65
4.4.5. Multitrajecto.....	67
4.4.6. Erros nos relógios dos receptores.....	68
4.4.7. Ruído do receptor.....	69
4.4.8. Variação do centro de fase da antena.....	69
4.4.9. Ambiguidade da fase.....	70
4.4.10. Saltos de ciclo da fase.....	71

## **CAPÍTULO 5 - REDES DE MONITORIZAÇÃO GEODÉSICA**

5.1. Concepção e implementação de redes GPS.....	73
5.1.1. Planeamento.....	73
5.1.2. Instalação no terreno.....	76
5.2. Redes de monitorização regular.....	78
5.3. Redes de monitorização permanente.....	82
5.4. Aquisição de dados.....	89
5.4.1 – Campanhas regulares de observação GPS.....	89

**CAPÍTULO 6 - METODOLOGIA E PROCESSAMENTO DOS DADOS**

6.1. <i>Software</i> Bernese .....	95
6.1.1. Estrutura do <i>software</i> Bernese .....	96
6.2. Sequência geral do processamento .....	98
6.3. Análise de séries temporais.....	105

**CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DA DEFORMAÇÃO CRUSTAL**

7.1. Taxas de deformação horizontal.....	111
7.1.1. Terceira.....	112
7.1.2. Graciosa.....	120
7.1.3. São Jorge.....	127
7.1.4. Pico e Faial .....	133
7.2. Taxas de deformação vertical.....	140
7.2.1. Terceira.....	140
7.2.2. Graciosa.....	144
7.2.3. São Jorge.....	147
7.2.4. Pico e Faial .....	150
7.3. Tensores de deformação.....	152
7.3.1. Terceira.....	153
7.3.2. Graciosa.....	154
7.3.3. Terceira, S. Jorge e Graciosa .....	156

**CAPÍTULO 8 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

8.1. Terceira.....	157
8.2. Graciosa.....	163
8.3. São Jorge.....	167
8.4. Pico e Faial .....	172
8.5. Análise do comportamento cinemática das ilhas em estudo relativamente à zona de Fronteira Eu- Nu .....	175

**CAPÍTULO 9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 181****REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 189**

**ANEXOS**

**ANEXO I** - Listagem dos pontos observados nas campanhas da ilha Terceira. ....A1

**ANEXO II** - Listagem dos pontos observados nas campanhas da ilha Graciosa. ....A2

**ANEXOS III** - Listagem dos pontos observados nas campanhas da ilha São Jorge.....A3

**ANEXO IV** - Repetibilidades médias das componentes Norte (N), Este (E) e Vertical (U) de todas as estações observadas e processados no *software* Bernese .....A4

**ANEXOS V** - Listagem das coordenadas finais. ....A7

## LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

## Figura 2.1

Localização geográfica do arquipélago dos Açores ..... 15

## Figura 2.2

Principais estruturas tectónicas da região dos Açores. Legenda: **CMA** – Crista Média Atlântica; **ZFEA** – Zona de Fractura Este dos Açores; **ZFNA** – Zona de Fractura Norte dos Açores; **RT** – Rifte da Terceira no sentido estrito (s.s.); **FG** – Falha Glória; **ZFF** – Zona de Fractura do Faial; **ZFA** – Zona de Fractura Açor; **ZFPA** – Zona de Fractura Princesa Alice; **ZFP** – Zona de Fractura do Pico; **Eu** – placa eurasiática (Eurásia); **Nu** – placa Núbia; **NA** – placa Norte Americana. Adaptado de Hipólito (2009). Batimetria de Lourenço *et al.* (1997). ..... 17

## Figura 2.3

Carta de sismicidade do arquipélago dos Açores, com representação dos epicentros dos sismos localizados no período de 1997 a 2010 (CIVISA, 2011) ..... 21

## Figura 2.4

Localização dos epicentros dos sismos catastróficos ocorridos no arquipélago dos Açores, do período histórico até à actualidade (CIVISA, 2011) ..... 22

## Figura 2.5

Carta da actividade vulcânica histórica no arquipélago dos Açores. Legenda: ▲ - erupções históricas (modificado de Weston, 1964, com dados de Queiroz *et al.*, 1995, Queiroz, 1997 e Gaspar *et al.* 2003). ... 24

**CAPÍTULO 3****Figura 3.1**

Modelo digital de terreno da ilha Terceira, onde estão identificadas as unidades geomorfológicas. Legenda: Vulcão dos Cinco Picos (VCP); Vulcão Guilherme Moniz (VGM); Vulcão do Pico Alto (VPA); Vulcão de Santa Bárbara (VSB); Zona Fissural (ZF); Graben das Lajes (GL) (adaptado de Queiroz *et al.*, 2001 com dados de Self, 1976). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N..... 28

**Figura 3.2**

Carta Vulcanológica da ilha Terceira (adaptado de Zbyszewski *et al.*, 1971). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 29

**Figura 3.3**

Esboço da tectónica da ilha Terceira: escarpas de falha e alinhamentos tectono-vulcânicos (adaptado de Madeira, 2005). 1) *Graben* das Lajes; A) Falha das Lajes; B) Falha das Fontinhas; 2) *Graben* de Santa Bárbara. Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N..... 30

**Figura 3.4**

Localização dos sismos destruidores e erupções históricas registados na ilha Terceira e área envolvente (Localização dos epicentros de Silva, 2005 e Medeiros, 2009). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 31

**Figura 3.5**

Carta de sismicidade da ilha Terceira e área envolvente no período de 2002 – 2010 (CIVISA, 2011). .... 32

**Figura 3.6**

Vulcanismo secundário nas Furnas do Enxofre na ilha Terceira. .... 33

**Figura 3.7**

Modelo digital de terreno da ilha Graciosa, onde estão identificadas as quatro unidades geomorfológicas (adaptado de Gaspar, 1996): 1 - Maciço da Caldeira; 2 - Serra das Fontes; 3 - Maciço Centro-meridional; 4 - Plataforma NW . Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 35

**Figura 3.8**

Vista geral do Vulcão Central (Vulcão da Caldeira) onde se destaca o bordo assimétrico da caldeira que se desenvolve entre as cotas dos 250 metros, a NW, e 405 metros, a SE. .... 36

**Figura 3.9**

Mapa simplificado das principais unidades vulcanoestratigráficas da ilha Graciosa (adaptado de Gaspar e Queiroz, 1995 e Gaspar, 1996). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 37

**Figura 3.10**

Esboço da tectónica da ilha Graciosa (adaptado de Gaspar, 1995, 1996). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 38

**Figura 3.11**

Representação simplificada da morfotectónica da ilha Graciosa (Hipólito, 2009). FSSFH – Falha Saúde-Serra das Fontes-Hortelã; FSFS – Falha Serra das Fontes Sul; FSFL – Falha Serra das Fontes Leste; FSDN – Falha Serra Dormida Norte; FSDS – Falha Serra Dormida Sul. Base: Carta Militar de Portugal, Folha 21 – Stª Cruz da Graciosa, Instituto Geográfico do Exército (2001); Projecção UTM; Datum: WGS 1984. .... 39

**Figura 3.12**

Localização dos sismos destruidores históricos registados na ilha Graciosa e área envolvente (Localização dos epicentros de Medeiros 2009). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 40

**Figura 3.13**

Carta de sismicidade da ilha Graciosa e área envolvente no período de 2002 – 2010 (CIVISA, 2011). ..... 41

**Figura 3.14**

Fenómenos de vulcanismo secundário na ilha Graciosa (adaptado de Viveiros, 2003): ● - fumarolas; ● - nascentes termais; ● - desgaseificação difusa Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 42

**Figura 3.15**

Modelo de elevação do terreno da ilha S. Jorge, onde estão identificadas as duas unidades geomorfológicas: 1 – Região Ocidental; 2 – Região Oriental. Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. 43

**Figura 3.16**

Carta Vulcanológica da ilha de S. Jorge (adaptado de Forjaz *et al.*, 1970). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 44

**Figura 3.17**

Esboço da tectónica da ilha São Jorge (adaptado de Madeira, 1998). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 46

**Figura 3.18**

Localização dos sismos destrutivos e erupções históricas registados na ilha S. Jorge (localizações epicentrais de Silva, 2005; focos eruptivos tendo por base a compilação de dados de Medeiros, 2009). Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 47

**Figura 3.19**

Carta da sismicidade da ilha S. Jorge e área envolvente no período de 2002 – 2010 (CIVISA, 2011). ..... 48

**Figura 3.20**

Fenómenos de vulcanismo secundário na ilha S. Jorge (adaptado de Viveiros, 2003): ● – nascentes de água fria gaseificada. Projecção UTM; Datum: WGS84, zona 26N. .... 49

**CAPÍTULO 4**

**Figura 4.1**

Imagem do um satélite do bloco IIF (cortesia da Navigation Center: <http://www.navcen.uscg.gov>). ..... 52

**CAPÍTULO 5**

**Figura 5.1**

Fotografia aérea (escala ~1/15000) da zona da Caldeira (ilha Graciosa) ..... 75

- Figura 5.2**  
 Projecção dos pontos seleccionados na fotografia aérea sobre a carta vulcanológica. .... 75
- Figura 5.3**  
 Tipos de marcas geodésicas utilizados para a construção e implementação das redes de monitorização das ilhas. A – Tipos de marcas geodésicas. O diâmetro da marca número 2 é de aproximadamente 5 cm. O valor aproximado da altura da marca pode variar entre 12 cm (3) e 13 cm (2). Legenda: (1) Rosca, (2) e (3) Marca; B – marca instalada no terreno sobre uma escoada lávica basáltica. .... 75
- Figura 5.4**  
 Tipos de bastões, em aço inox, utilizados na aquisição de dados das redes de monitorização nas ilhas alvos de estudo. A – Exemplo de um bastão; B – exemplo de bastão colocado sobre a respectiva marca geodésica. .... 76
- Figura 5.5**  
 Realização do furo na rocha, com o auxílio de um berbequim. .... 77
- Figura 5.6**  
 Colagem e verticalização da marca com o auxílio de um tripé e um nível de bolha. .... 77
- Figura 5.7**  
 Secagem, seguindo-se a primeira aquisição de dados sobre a marca recém instalada. .... 77
- Figura 5.8**  
 Registo de informações variadas no caderno de campo. .... 77
- Figura 5.9**  
 Esquema da marca e bastão de aço inox utilizados na rede de monitorização geodésica da ilha de S. Jorge (Mendes *et al.*, 2013). Legenda: (A) marca geodésica; (B) bastão de forma hexagonal; (C) porca para ajustar o disco junto da base da antena e (D) disco de alumínio perfurado para suporte da base da antena. .... 78

<b>Figura 5.10</b>	
Localização e distribuição das marcas geodésicas pertencentes à rede de monitorização da ilha Terceira.	79
<b>Figura 5.11</b>	
Exemplos das estações de observação na zona hidrotermal das Furnas do Enxofre: A - TOUR e B – TPBM.	79
<b>Figura 5.12</b>	
Localização e distribuição das marcas geodésicas pertencentes à rede de monitorização da ilha Graciosa.	80
<b>Figura 5.13</b>	
Exemplos das estações: A - GESF e B - GTCA.	80
<b>Figura 5.14</b>	
Localização e distribuição das marcas geodésicas pertencentes à rede de monitorização da ilha S. Jorge.	81
<b>Figura 5.15</b>	
Exemplo das estações SJ09 (A) e SJ16 (B) instaladas em afloramentos rochosos.	81
<b>Figura 5.16</b>	
Detalhes da estação GPS de registo permanente NOV1, instalada em Fevereiro de 2003.	83
<b>Figura 5.17</b>	
Estação GPS de registo permanente SRPC, instalada em Fevereiro de 2003.	83
<b>Figura 5.18</b>	
Localização e distribuição das marcas geodésicas pertencentes à rede de monitorização da ilha do Faial.	84
<b>Figura 5.19</b>	
Localização e distribuição das marcas geodésicas pertencentes à rede de monitorização da ilha do Pico.	85
<b>Figura 5.20</b>	
Descrição do equipamento instalado dentro do abrigo das estações permanentes do Pico.	86

**Figura 5.21**

Aquisição de dados na rede permanente do Pico..... 87

**Figura 5.22**

Localização e distribuição das estações permanentes da rede REPRAA. .... 88

**Figura 5.23**

Equipamento utilizado durante as campanhas de aquisição de dados. .... 90

**Figura 5.24**

Distribuição espacial das estações IGS e EUREF que serviram de referência no ITRF2005 para o processamento das observações das redes em estudo. .... 93

**CAPÍTULO 6****Figura 6.1**Diagrama de fluxo funcional do processamento no *software* Bernese (adaptado de Dach *et al.*, 2007). .... 97**Figura 6.2**Organização das observações GPS por cada ano no *software* Bernese (adaptado de Dach *et al.*, 2007). .. 99**Figura 6.3**Ficheiros fundamentais para o processamento no *software* Bernese. .... 99**Figura 6.4**

Opções escolhidas para a estratégia OBS-MAX. .... 103

**Figura 6.5**

Opções para resolução das ambiguidades suportadas pelo Bernese. .... 104

**Figura 6.6**

Projeção das séries temporais obtidas a partir das componentes Norte e Este, no referencial ITRF2005, para a estação NOV1 da rede Terceira ocupada durante o período de 2003 - 2010. .... 106

**Figura 6.7**

Projeção da série temporal obtida a partir da componente vertical, no referencial ITRF2005, para a estação NOV1 da rede Terceira ocupada durante o período de 2003 - 2010. .... 106

**Figura 6.8**

Projeção das séries temporais obtidas a partir das componentes Norte e Este, no referencial ITRF2005, para a estação SRPC da rede Terceira ocupada durante o período de 2004 - 2010. .... 107

**Figura 6.9**

Projeção da série temporal obtida a partir da componente vertical, no referencial ITRF2005, para a estação SRPC da rede Terceira ocupada durante o período de 2004 - 2010. .... 107

**Figura 6.10**

Projeção das séries temporais obtidas a partir das componentes Norte e Este, no referencial ITRF2005, para a estação GPER da rede Graciosa, para o período de 2003 a 2010. .... 108

**Figura 6.11**

Projeção da série temporal obtida a partir da componente vertical, no referencial ITRF2005, para a estação GPER da rede Graciosa ocupada durante o período de 2003 – 2010. .... 108

**CAPÍTULO 7**

**Figura 7.1**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas, tendo por base o ITRF2005, para as estações da rede da ilha Terceira. Dados estimados a partir da combinação das observações GPS para o período de 2003,69 a 2010,47. .... 113

**Figura 7.2**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residual e respectivas incertezas para as estações da rede da ilha Terceira tendo como referência a Placa Nu “estável”. Dados estimados para o período de 2003,69 a 2010,47, tendo por base o modelo NUVEL-1A. .... 115

**Figura 7.3**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residual e respectivas incertezas para as estações da rede da ilha Terceira tendo como referência a Placa Eu “estável”. Dados estimados para o período de 2003,69 a 2010,47, tendo por base o modelo NUVEL-1A. .... 116

**Figura 7.4**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas considerando a estação SRPC fixa. Dados resultantes do processamento das estações da rede da ilha Terceira, para o período de 2003,69 a 2010,47. .... 118

**Figura 7.5**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas, tendo por base o ITRF2005, para as estações da rede da ilha Graciosa. Dados estimados a partir da combinação das observações GPS para o período de 2003,72 a 2010,48. .... 120

**Figura 7.6**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residual e respectivas incertezas para as estações da rede da ilha Graciosa tendo como referência a Placa Nu “estável”. Dados estimados para o período de 2003,72 a 2010,48 tendo por base o modelo NUVEL-1A. .... 122

**Figura 7.7**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residual e respectivas incertezas para as estações da rede da ilha Graciosa tendo como referência a Placa Eu “estável”. Dados estimados para o período de 2003,72 a 2010,48, tendo por base o modelo NUVEL-1A. .... 123

**Figura 7.8**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas considerando a estação GPER fixa. Dados resultantes do processamento das estações da rede da ilha Graciosa, no período de 2003,72 a 2010,48. .... 125

**Figura 7.9**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas, tendo por base o ITRF2005, para as estações da rede da ilha de S. Jorge. Dados estimados a partir da combinação das observações GPS para o período de 2008,53 a 2010,44..... 127

**Figura 7.10**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residual e respectivas incertezas para as estações da rede da ilha S. Jorge tendo como referência a Placa Nu “estável”. Dados estimados para período de 2008,53 a 2010,44, tendo por base o modelo NUVEL-1A. .... 129

**Figura 7.11**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residual e respectivas incertezas para as estações da rede da ilha S. Jorge tendo como referência a Placa Eu “estável”. Dados estimados para o período de 2008,53 a 2010,44, tendo por base o modelo NUVEL-1A. .... 130

**Figura 7.12**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas considerando a estação SJ02 fixa. Dados resultantes do processamento para as estações da rede da ilha de S. Jorge, para o período de 2008,53 a 2010,44. .... 132

**Figura 7.13**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal, e respectivas incertezas, tendo por base o ITRF2005, para as estações da rede das ilhas Pico e Faial. Dados estimados a partir da combinação das observações GPS de ambas as ilhas para o período de 2008,53 a 2010,44..... 134

**Figura 7.14**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residuais e respectivas incertezas para as estações da rede das ilhas Pico e Faial tendo como referência a Placa Nu “estável”. Dados estimados para o período de 2008,53 a 2010,44, com base no modelo NUVEL-1A. .... 136

**Figura 7.15**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal residual e respectivas incertezas para as estações da rede das ilhas Pico e Faial tendo como referência a Placa Eu “estável”. Dados estimados para o período de 2008,53 a 2010,44, com base o modelo NUVEL-1A. .... 137

**Figura 7.16**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas considerando a estação PIED fixa. Dados resultantes do processamento das estações da rede das ilhas Pico e Faial, para o período de 2008,53 a 2010,44. .... 138

**Figura 7.17**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento vertical e respectivas incertezas, com base no ITRF2005, das estações da rede da ilha Terceira. Dados estimados a partir da combinação das soluções diárias das observações GPS para o período de 2003,69 a 2010,47. .... 141

**Figura 7.18**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento verticais considerando a estação SRPC fixa e respectivas incertezas. Dados resultantes do processamento das estações da rede da ilha Terceira, no período de 2003,69 a 2010,47. .... 142

**Figura 7.19**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento verticais e respectivas incertezas, com base no ITRF2005, para as estações da rede da ilha Graciosa. Dados estimados a partir da combinação das soluções diárias das observações GPS para o período de 2003,72 a 2010,48. .... 144

**Figura 7.20**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento vertical considerando a estação GPER fixa e respectivas incertezas. Dados resultantes do processamento das estações da rede da ilha Graciosa, no período de 2003,72 a 2010,48. .... 145

**Figura 7.21**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento vertical e respectivas incertezas, com base no ITRF2005, das estações da rede da ilha S. Jorge. Dados estimados a partir da combinação das soluções diárias das observações GPS para o período de 2008,53 a 2010,44. .... 147

**Figura 7.22**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento vertical considerando a estação SJ02 fixa e respectivas incertezas. Dados resultantes do processamento das estações da rede da ilha S. Jorge, no período de 2008,53 a 2010,44. .... 148

**Figura 7.23**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento verticais e respectivas incertezas, com base no ITRF2005, para as estações da rede das ilhas Pico e Faial. Dados estimados a partir da combinação das soluções diárias das observações GPS para o período de 2008,53 a 2010,44. .... 150

**Figura 7.24**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento verticais considerando à estação PIED fixa e respectivas incertezas. Dados resultantes do processamento das estações da rede das ilhas Pico e Faial, no período de 2008,53 a 2010,44. .... 151

**Figura 7.25**

Representação da estimativa da direcção das taxas de deformação horizontal (Legenda: a azul: Vulcão de Santa Bárbara; a cinzento: Vulcão Guilherme Moniz; a branco: Vulcão do Pico Alto; a preto: Vulcão dos Cinco Picos; a verde: *Graben* das Lajes) e dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal e respectivas incertezas (a vermelho) para cada sub-rede em estudo. .... 153

**Figura 7.26**

Representação da estimativa da direcção das taxas de deformação horizontal (Legenda: a preto: Plataforma NW; a branco: Maciço da Serra das Fontes; a castanho: Falha Sul da Serra das Fontes; a verde: *Graben* Serra das Fontes - Serra Branca; a azul: Maciço Centro – Meridional; a cinzento: Vulcão da Caldeira) e dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal (a vermelho) para as sub-redes em estudo. .... 155

**Figura 7.27**

Representação da estimativa da direcção das taxas de deformação horizontal (a verde) e dos valores médios dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal (a vermelho), obtidos nos resultados do processamento diário dos movimentos relativos para as ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa, no referencial ITRF2005. .... 156

**CAPÍTULO 8****Figura 8.1**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal obtidos para as estações da rede da ilha Terceira, considerando a estação SRPC fixa. Dados conjugados com a informação tectónica (adaptada de Madeira, 2005) e com actividade sísmica registada pela rede do CIVISA, para o período de 2003 a 2010, sobre o MDT da ilha Terceira. .... 158

**Figura 8.2**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento vertical obtidos para as estações da rede da ilha Terceira, considerando a estação SRPC fixa. Dados conjugados com a informação tectónica (adaptado de Madeira, 2005) e com actividade sísmica registada pela rede do CIVISA, para o período de 2003 a 2010, sobre o MDT da ilha Terceira. .... 159

**Figura 8.3**

Comparação dos valores de velocidade obtidos para a componente horizontal e respectivas incertezas com os valores apresentados em trabalhos realizados anteriormente na ilha Terceira. .... 161

**Figura 8.4**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal obtidos para as estações da rede da ilha Graciosa, considerando a estação GPER fixa. Dados conjugados com a informação tectónica (adaptado de Gaspar, 1995, 1996) e com actividade sísmica registada pela rede do CIVISA, para o período de 2003 a 2010, sobre o MDT da ilha Graciosa. .... 164

**Figura 8.5**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento vertical obtidos para as estações da rede da ilha Graciosa, considerando a estação GPER fixa. Dados conjugados com a informação tectónica

(adaptado de Gaspar, 1995, 1996) e com actividade sísmica registada pela rede do CIVISA, para o período de 2003 a 2010, sobre o MDT da ilha Graciosa. .... 165

### **Figura 8.6**

Comparação dos valores de velocidade obtidos para a componente horizontal e respectivas incertezas com os valores apresentados em trabalhos realizados anteriormente na ilha Graciosa. .... 166

### **Figura 8.7**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal obtidos para as estações da rede da ilha S. Jorge, considerando a estação SJ02 fixa. Dados conjugados com a informação tectónica (adaptado de Madeira, 1998; Madeira e Brum da Silveira, 2003) e com actividade sísmica registada pela rede do CIVISA, para período de 2003 a 2010, sobre o MDT da ilha S. Jorge. .... 168

### **Figura 8.8**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento vertical obtidos para as estações da rede da ilha S. Jorge, considerando a estação SJ02 fixa. Dados conjugados com a informação tectónica (adaptado de Madeira, 1998; Madeira e Brum da Silveira, 2003) e com actividade sísmica registada pela rede do CIVISA, para período de 2003 a 2010, sobre o MDT da ilha S. Jorge. .... 169

### **Figura 8.9**

Comparação dos valores de velocidade obtidos para a componente horizontal e respectivas incertezas com os valores apresentados em trabalhos realizados anteriormente na ilha S. Jorge. .... 171

### **Figura 8.10**

Comparação dos valores de velocidade obtidos para a componente horizontal e respectivas incertezas com os valores apresentados em trabalhos realizados anteriormente nas ilhas Pico e Faial. .... 174

### **Figura 8.11**

Representação dos vectores de velocidade de deslocamento horizontal, obtidos pelo processamento das estações permanentes da rede REPRAA juntamente com as estações das redes: TERA, GRAC, SJOR, PICO e FAIAL. Dados conjugados com as principais estruturas tectónicas da região dos Açores. Legenda: CMA - Crista Média-Atlântica; ZFEA - Zona de Fractura Este dos Açores; FG - Falha Gloria; as áreas a

sombreado materializam de forma aproximada toda a zona de fronteira (adaptado de Hipólito, 2009). (Batimetria adaptada de Lourenço *et al.*, 1997). ..... 175

### Figura 8.12

Comportamento do deslocamento horizontal de cada ilha (tendo por base as redes de monitorização GPS: TERA, GRAC, SJOR, PICO e FAIAL) relativamente à placa Núbia “estável”, de acordo com o previsto pelo modelo NUVEL- 1A (DeMets *et al.*, 1994). As setas a vermelho indicam os deslocamentos residuais (observadas menos as previstas) para cada uma das ilhas dos grupos central e oriental consideradas no presente trabalho. As setas a preto definem a movimentação prevista para diferentes pontos da placa Eu relativamente à Nu “estável”. Legenda: CMA - Crista Média-Atlântica; ZFEA - Zona de Fractura Este dos Açores; FG - Falha Gloria; as áreas a sombreado materializam de forma aproximada toda a zona de fronteira (adaptado de Hipólito, 2009). (Batimetria adaptada de Lourenço *et al.*, 1997). ..... 177

### Figura 8.13

Comportamento do deslocamento horizontal de cada ilha (tendo por base as redes de monitorização GPS: TERA, GRAC, SJOR, PICO e FAIAL) relativamente à placa Eurásia “estável”, de acordo com o previsto pelo modelo NUVEL- 1A (DeMets *et al.*, 1994). As setas a vermelho indicam os deslocamentos residuais (observadas menos as previstas) para cada uma das ilhas dos grupos central e oriental consideradas no presente trabalho. As setas a preto definem a movimentação prevista para diferentes pontos da placa Nu relativamente à Eu “estável”. Legenda: CMA - Crista Média-Atlântica; ZFEA - Zona de Fractura Este dos Açores; FG - Falha Gloria; as áreas a sombreado materializam de forma aproximada toda a zona de fronteira (adaptado de Hipólito, 2009). (Batimetria adaptada de Lourenço *et al.*, 1997). ..... 178

## LISTA DE FIGURAS

---

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODESIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS SISTEMAS VULCANO-TECTÓNICOS E HIDROTERMAIS DO SEGMENTO DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

#### Tabela 2.1

Velocidades relativas e direcções do vector velocidade para as placas Eu e Nu relativamente à placa NA e para a Eu relativamente à placa Nu, de acordo com os modelos de cinemática global NUVEL-1A (DeMets *et al.*, 1994), REVEL (Sella *et al.*, 2002) e DEOS2K (Fernandes *et al.*, 2003). Cálculos efectuados com recurso ao *software Mirone* e UNAVCO – *plate motion calculator* (Hipólito, 2009). ..... 19

#### Tabela 2.2

Sismos catastróficos ocorridos no Grupo Central do arquipélago dos Açores, do período histórico até à actualidade. Intensidades na escala MM56 (adaptado de Coutinho, 2000 e Silva, 2005). ..... 23

#### Tabela 2.3

Erupções históricas que tiveram lugar no Grupo Central do arquipélago dos Açores (adaptado de Medeiros, 2009). ..... 26

### CAPÍTULO 5

#### Tabela 5.1

Descrição do equipamento instalado nas estações permanentes SRPC e NOV1, na ilha Terceira. .... 84

#### Tabela 5.2

Descrição do equipamento instalado nas estações permanentes de GPS da rede de monitorização da ilha do Pico. .... 85

#### Tabela 5.3

Principais características das campanhas GPS realizadas na ilha Terceira. .... 90

**Tabela 5.4**

Principais características das campanhas GPS realizadas na ilha Graciosa. .... 91

**Tabela 5.5**

Principais características das campanhas GPS realizadas na ilha São Jorge. .... 91

**Tabela 5.6**

Principais características do equipamento instalado e o resumo das ocupações diárias das estações permanentes de GPS. .... 92

**CAPÍTULO 6**

**Tabela 6.1**

Listagem dos ficheiros que fazem parte do processamento em *Bernese*. .... 100

**Tabela 6.2**

Programas utilizados para o processamento das observações GPS no *Bernese*. .... 101

**CAPÍTULO 7**

**Tabela 7.1**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) dos vectores de velocidade, e respectivas incertezas resultantes do processamento das observações obtidas para as estações da rede da ilha Terceira, relativamente ao referencial ITRF2005. .... 114

**Tabela 7.2**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  (1,3) e  $\Delta N\_VEL$  (2,4) resultantes das diferenças entre as velocidades determinadas no referencial ITRF2005 e as estimadas pelo modelo NUVEL-1A, relativamente às Placas Nu e Eu. Dados obtidos para cada uma das componentes dos vectores de velocidade da rede de pontos da ilha Terceira. .... 117

**Tabela 7.3**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  e  $\Delta N\_VEL$ , e respectivas incertezas, representando os valores residuais resultantes da remoção do valor da velocidade obtido para a estação SRPC a cada uma das componentes dos vectores de velocidade da rede de pontos da ilha Terceira. .... 119

**Tabela 7.4**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) dos vectores de velocidade, e respectivas incertezas, resultantes do processamento das observações obtidas para as estações da rede da ilha Graciosa, relativamente ao referencial ITRF2005. .... 121

**Tabela 7.5**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  (1,3) e  $\Delta N\_VEL$  (2,4) resultantes das diferenças entre as velocidades determinadas no referencial ITRF2005 e as estimadas pelo modelo NUVEL- 1A, relativamente às Placas Nu e Eu. Dados obtidos para cada uma das componentes dos vectores de velocidade da rede de pontos da ilha Graciosa. .... 124

**Tabela 7.6**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  e  $\Delta N\_VEL$ , e respectivas incertezas, representando os valores residuais resultantes da remoção do valor da velocidade obtida para a estação GPER a cada uma das componentes dos vectores de velocidade da rede de pontos da ilha Graciosa. .... 126

**Tabela 7.7**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) dos vectores de velocidade e respectivas incertezas resultantes do processamento das observações obtidas para as estações da ilha S. Jorge, relativamente ao referencial ITRF2005. .... 128

**Tabela 7.8**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  (1,3) e  $\Delta N\_VEL$  (2,4) resultantes das diferenças entre as velocidades determinadas no referencial ITRF2005 e as estimadas pelo modelo NUVEL-1A, relativamente às Placas Nu e Eu. Dados obtidos para cada uma das componentes dos vectores de velocidade das estações da rede da ilha S. Jorge. .... 131

**Tabela 7.9**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  e  $\Delta N\_VEL$ , e respectivas incertezas, representando os valores residuais resultantes da remoção do valor da velocidade obtido para a estação SJ02 a cada uma das componentes dos vectores de velocidade da rede de pontos da ilha S. Jorge. .... 133

**Tabela 7.10**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) dos vectores de velocidade, e respectivas incertezas, resultantes do processamento das observações obtidas para as estações das ilhas Pico e Faial, relativamente ao referencial ITRF2005. .... 134

**Tabela 7.11**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  (1,3) e  $\Delta N\_VEL$  (2,4) resultantes das diferenças entre as velocidades determinadas no referencial ITRF2005 e as estimadas pelo modelo NUVEL-1A, relativamente às Placas Nu e Eu. Dados obtidos para cada uma das componentes dos vectores de velocidade da rede de pontos das ilhas Pico e Faial. .... 138

**Tabela 7.12**

Componentes  $\Delta E\_VEL$  e  $\Delta N\_VEL$  e respectivas incertezas representando os valores residuais resultantes da remoção do valor da velocidade obtida para a estação PIED a cada uma das componentes dos vectores de velocidade das estações das ilhas Pico e Faial. .... 139

**Tabela 7.13**

Velocidade Vertical (VU) processada para as estações da rede da ilha Terceira e respectivas incertezas relativamente ao referencial ITRF2005. As componentes DVU\_VEL representam os valores residuais resultantes da remoção do valor da velocidade obtida para a estação SRPC a cada uma das componentes dos vectores de velocidades das estações da rede da ilha Terceira. .... 143

**Tabela 7.14**

Componente Vertical (VU) dos vectores de velocidade resultantes do processamento das estações da rede da ilha Graciosa e respectivas incertezas, relativamente ao referencial ITRF2005. As componentes DVU\_VEL representam os valores residuais resultantes da remoção do valor da velocidade obtida para a estação GPER a cada uma das componentes dos vectores de velocidade das estações da rede da ilha Graciosa. .... 146

**Tabela 7.15**

Componente vertical (VU) dos vectores de velocidade resultantes do processamento das estações da rede da ilha de S. Jorge e respectivas incertezas, relativamente ao referencial ITRF2005. As componentes DVU\_VEL representam os valores residuais obtidos após remoção do valor da velocidade obtida para a estação SJ02 a cada uma das componentes dos vectores de velocidades das estações da rede da ilha S. Jorge. .... 149

**Tabela 7.16**

Componente vertical (VU) dos vectores de velocidade resultantes do processamento para as estações da rede das ilhas Pico e Faial e respectivas incertezas, relativamente ao referencial ITRF2005. As componentes DVU\_VEL representam os valores residuais resultantes da remoção do valor da velocidade obtida para a estação PIED a cada uma das componentes dos vectores de velocidade das estações da rede das ilhas. .... 152

**Tabela 7.17**

Taxas de deformação estimadas para as sub-redes da ilha Terceira. .... 154

**Tabela 7.18**

Taxas de deformação estimadas para as sub-redes da ilha Graciosa. .... 154

**CAPÍTULO 8****Tabela 8.1**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) e respectivas incertezas dos vectores de velocidade obtidos nos diversos trabalhos realizados na ilha Terceira. .... 161

**Tabela 8.2**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) e respectivas incertezas dos vectores de velocidade obtidos nos diversos trabalhos realizados na ilha Graciosa. .... 166

**Tabela 8.3**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) e respectivas incertezas dos vectores de velocidade obtidos nos diversos trabalhos realizados na ilha S. Jorge. .... 170

**Tabela 8.4**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) e respectivas incertezas dos vectores de velocidade obtidos nos diversos trabalhos realizados anteriormente nas ilhas Pico e Faial. .... 173

**Tabela 8.5**

Componentes Este (VE) e Norte (VN) dos vectores de velocidade obtidos pelo processamento das estações permanentes da rede REPRAA, relativamente ao referencial ITRF 2005, juntamente com as estações das redes: TERA, GRAC, SJOR, PICO e FAIAL. Componente  $\Delta E\_VEL$  (1,3) e  $\Delta N\_VEL$  (2,4) resultantes das diferenças entre as velocidades determinadas no referencial ITRF 2005 e as estimadas pelo modelo NUVEL – 1A, relativamente às Placas Nu e Eu. .... 179

## LISTA DE ACRÓNIMOS

### A

- AS** anti-mistificação, *Anti-Spoofing*  
**ASCII** *American Standard Code for Information Interchange*

### B

- BIH** *Bureau International de l'Heure*

### C

- C / A** *Clear / Access* ou *Coarse / Aquisition*  
**CIVISA** Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores  
**CM** Centímetros  
**CMA** Crista Média Atlântica  
**COGEAM** Controlo Geodinâmico nos Arquipélagos dos Açores e Madeira  
**CVARG** Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos

### D

- DISPLAZOR** Controlo de deslocamentos tectónicos, vulcânicos e escorregamentos no Faial, Pico e São Jorge (Açores) utilizando a técnica GPS.  
**DoD** *Department of Defense*  
**DORIS** Radio posicionamento Integrado por satélite

### E

- E** Este  
**Eu** Eurásia, placa eurasiática  
**EUA** Estados Unidos América  
**EUREF** Reference Frame Sub-Commission for Europe

### F

- FG** Falha Glória

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODÉSIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS SISTEMAS VULCANO-TECTÓNICOS E HIDROTERMAIS DO SEGMENTO DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA

**FGF** Fundação Gaspar Frutuoso

### G

**GLONASS** Sistema de Navegação Global por Satélite Russo

**GNSS** Sistema Global de Navegação por Satélite

**GPS** *Global Positioning System*, Sistema de Posicionamento Global

**GPST** Escala de Tempo GPS

**GMG** Grupo de Monitorização Geodésica

### I

**IAU** União Astronómica Internacional

**IERS** *International Earth Rotation Service*

**InSAR** Interferometric synthetic aperture radar

**IGS** *International GNSS Service*

**ITRF** *International Terrestrial Reference Frame*

**ITRS** *International Terrestrial Reference System*

**IUGG** União Internacional de Geodesia e Geofísica

### J

**JTA** Junção Tripla dos Açores

### K

**KARMA** *Kinematics And Rheological Modelling of the Núbia-Eurasian plate boundary in the Azores*

**Km** Quilómetro

### L

**LLR** *lunar laser ranging*

### M

**M** metro

**MHz** Mega-hertz

**MM** Mercalli Modificada

**N**

<b>N</b>	Norte
<b>NA</b>	Norte Americana, placa Norte Americana
<b>NAVSTAR</b>	Navigation System with Time and Ranging
<b>NE</b>	Nordeste
<b>Nu</b>	Núbia, placa Núbia
<b>NW</b>	Noroeste
<b>NWM</b>	<i>Numerical Weather Models</i>

**O**

<b>OAL</b>	Observatório Astronómico de Lisboa
------------	------------------------------------

**P**

<b>P</b>	<i>Precision</i> ou <i>Protected</i>
<b>PA</b>	Plataforma dos Açores
<b>PRN</b>	<i>Pseudo-Random Noise</i> , Ruído Pseudo-Aleatório
<b>PPS</b>	<i>Precise Positioning Service</i>

**Q**

<b>QIF</b>	<i>Quasi-ionosphere-free</i>
------------	------------------------------

**R**

<b>RETINA</b>	<i>Realistic Evaluation of Temporal Interaction of Natural Hazards</i>
<b>RINEX</b>	Receiver INdependent EXchange
<b>RT</b>	Rifte da Terceira

**S**

<b>S</b>	Sul
<b>SE</b>	Sudeste
<b>SHA-AZORES</b>	Avaliação do risco sísmico nos açores através de estudos de neotectónica e paleossismologia
<b>SLR</b>	<i>Satellite Laser Ranging</i>
<b>SRPCBA</b>	Serviço Regional de Protecção Civil e Bombeiros dos Açores

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODÉSIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS SISTEMAS VULCANO-TECTÓNICOS E HIDROTÉRMICOS DO SEGMENTO DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA

**STAMINA** *Study of the Tectonic and Magmatic Interplay in the Azores*

**SOGEO** Sociedade Geotérmica dos Açores

**SP3** *Standard Product #3*

**SPS** *Standard Positioning Service*

**SW** Sudoeste

### T

**TANGO** *TransAtlantic Network for Geodynamics and Oceanography*

**TEC** Conteúdo Electrónico Total

### U

**UNAVCO** *university NAVSTAR Consortium*

**USNO** *United States Naval Observatory*

**UTC** Tempo Universal Coordenado

**UA** Universidade dos Açores

### V

**VLBI** Interferometria de Bases Muito Longas, *Very Long Baseline Interferometry*

### W

**W** Oeste

**WGS-84** *World Geodetic System 84*

### Z

**ZFC** Zona do Fogo/Congro

**ZFNA** Zona de Fractura Norte dos Açores

**ZFEA** Zona de Fractura Este dos Açores

**ZFEP** Zona de Fractura Faial-Pico

## AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos a distribuir aquando da concretização de um trabalho desta índole são inúmeros. Ao longo deste percurso muitas foram as pessoas que, pelas suas palavras, actos e ensinamentos, me influenciaram, contribuindo, de forma directa ou indirecta, para que este trabalho tenha evoluído e chegado a bom porto. Assim, quero aqui expressar o meu reconhecimento a todos aqueles que acreditaram, confiaram e me aconselharam. De um modo muito especial agradeço:

- À directora do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, a Professora Doutora Maria Gabriela Queiroz, pelo total apoio, por acreditar em mim e fornecer as condições necessárias à concretização deste trabalho, e principalmente pela amizade demonstrada ao longo destes anos;

- À orientadora científica deste trabalho, Professora Doutora Teresa Ferreira, que esteve sempre presente em cada fase deste trabalho e, cujas palavras de incentivo asseguraram a minha motivação durante todo o processo. Obrigada pela sua disponibilidade na revisão de textos científicos, na apreciação crítica, nos comentários, nas sugestões e no esclarecimento de dúvidas. Agradeço-lhe acima de tudo a amizade e a confiança que depositou em mim, não deixando nunca que eu desistisse mesmo nos momentos de maior fraqueza;

- Ao co-orientador científica deste trabalho, Prof. Doutor Freysteinn Sigmundsson, pela sua permanente disponibilidade, pelos seus ensinamentos e pela orientação científica e sugestões.

- Ao amigo Professor Doutor José Virgílio Cruz o meu muito obrigado pelo carinho com que sempre me acolheu, por poder sempre contar com o seu entusiasmo contagiante, com a sua alegria e com as suas palavras amigas quando mais precisei. A força, o sorriso e a disponibilidade manifestada e a confiança depositada contribuíram decisivamente para que este trabalho tenha chegado ao fim.

## AGRADECIMENTOS

---

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODESIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS SISTEMAS VULCANO-TECTÓNICOS E HIDROTÉRMICOS DO SEGMENTO DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA

- Ao Professor Doutor Virgílio Mendes, um agradecimento muito especial pela amizade, pelo apoio, pelos valiosos ensinamentos transmitidos e discussões científicas, pela disponibilidade na revisão de textos, pela permanente disponibilidade e pelas palavras amigas, quando necessárias;
- De uma forma muito especial, quero agradecer à amiga Ana Rita Hipólito, pela lealdade, confiança e amizade demonstradas; por não me ter deixado cair nas etapas mais complicadas ao longo da realização deste trabalho; pelo incentivo e por me ter suportado durante estes anos com desabafos dos sucessos e insucessos; pelas discussões científicas; pela disponibilidade na revisão de textos, na apreciação crítica, nos comentários, nas sugestões, pela mão amiga que fez este trabalho ter um fim;
- Ao Professor Doutor João Luís Gaspar, pela forma ímpar de transmissão de conhecimentos e despertar do espírito científico. Por ter acreditado em mim, possibilitando a realização do tema de tese aqui apresentado;
- Ao Professor Doutor Rui Coutinho, pela amizade, apoio e incentivo sempre manifestado nos períodos de maiores dificuldades;
- Ao amigo Carlos Primo pela amizade e disponibilidade nos períodos de maior dificuldade na instalação de *softwares* e problemas na parte informática;
- Aos técnicos Ernesto Sousa, Victor Sousa e Rui Mestre do Departamento de Geociências e do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores, pela forma carinhosa com que sempre me acolheram e ajudaram na instalação dos equipamentos no campo e na execução das tarefas necessárias;
- Ao amigo e grande companheiro das campanhas de campo, Eng.º Pedro Torres, pela ajuda nos trabalhos de campo, na instalação de equipamento na organização das campanhas, disponibilidade e, principalmente, pela amizade e companheirismos nas horas de solidão dos trabalhos de campo;
- Quero ainda agradecer às amigas Ana Gomes, Catarina Silva, Catarina Vieira, Ana Barbosa, Manuela Martins, Sandra Mendes e a Margarida Gonçalves pela amizade, pelo incentivo e por me terem

suportado durante estes anos com desabafos dos sucessos e insucessos atingidos, e acima de tudo, pedir-lhes desculpa pela falta de humor que se foi acentuando com o evoluir do trabalho;

- Às colegas e amigas Patrícia Raposo e Crisálida Rego pela ajuda na organização da parte logística das campanhas de campo, por ouvirem os desabafos, pelos momentos de descontração;

- Aos colegas Eng.º António Trota e Paulo Amaral, que comigo trabalharam directamente nas várias vertentes do projecto, tornando possível a sua realização;

- À Dr.ª Maria Beatriz Rego, pela amizade e o estímulo que me ofereceu nos períodos de maior dificuldade e pela sua constante disponibilidade para resolver problemas do domínio jurídico;

- A todas as pessoas que, directa ou indirectamente, estiveram envolvidas nas campanhas de aquisição de dados GPS, nas ilhas Graciosa, Terceira e S. Jorge;

- A todos os funcionários e investigadores do Centro de Vulcanologia e de Avaliação de Riscos Geológicos com quem tive oportunidade de conviver ao longo de vários anos;

- A todos os funcionários dos Serviços Municipalizados, pelo profissionalismo e principalmente pelo carinho com que me acolheram, um bem-haja a todos; com especial amizade ao Eng.º Jorge Nemésio, Eng.º João Garcia, D.ª Lídia, Eng.ª Selma Cordeiro, Filipe Lima e ao Luís Barbosa pela paciência, pelos bons momentos de convívio, de partilha de conhecimentos e de apoio;

- Com grande carinho, quero agradecer de uma forma muito especial, aos meus pais, José Manuel e Marília, por acreditarem em mim, pela paciência, confiança e amizade demonstradas; por saberem ouvir e retribuir com palavras de apreço; pela partilha dos momentos de rebeldia e frustração. Obrigada por ajudarem a transformar os meus sonhos em realidade, sem questionar;

- Aos meus irmãos e melhores amigos, José Manuel, João Luís, Pedro, Ana Luísa e Inês dedico com carinho esta conquista, por serem uma referência na minha vida, pelo apoio e compreensão inestimáveis. Companheiros de tantas aventuras e lutas, estando sempre tão longe e, ao mesmo

tempo, tão perto. Obrigada por estarem presentes nos momentos mais difíceis da minha vida e pelas palavras de encorajamento quando mais precisei;

- Às minhas cunhadas e cunhado, Valéria, Marta, Luís, Margarida e Francisco pela força e amizade sempre demonstrada e disponibilidade para tratar qualquer assunto e amizade de uma vida;

- Aos meus sobrinhos, Hugo, Catarina Rodrigues, Luís Gonçalves, Catarina Gonçalves, Tomé, Rita, Rute, Maria, Carolina, Simão, Sofia de quem sinto muito a falta e os quais me proporcionam muitas alegrias enquanto tia;

- Aos meus sogros, Augusto e Lorena Mestre por acompanharem este trabalho de perto ajudando sempre que possível com a Joana, transmitindo sempre alegria e uma grande amizade, acolhimento e apoio manifestados não só nas minhas deslocações e estadias para as ilhas, mas ao longo dos anos;

- À minha princesa Joana Mestre dedico este trabalho. Pela compreensão e ternura sempre manifestadas apesar da falta de atenção e ausências. Espero que o entusiasmo, seriedade e empenho que dedico ao trabalho lhe possa servir de estímulo para fazer sempre “mais e melhor”;

- Ao Rui Mestre, ouvinte atento de algumas dúvidas, inquietações, desânimos e sucessos, pelo apoio, pela confiança e pela valorização sempre tão entusiasta do meu trabalho. Pela compreensão da minha quase total ausência ao longo de todo este processo, sem nunca deixar de me incentivar a continuar. O meu porto seguro em todas as minhas aventuras.

A todos, reitero o meu apreço e a minha eterna gratidão.

Para a realização da presente dissertação beneficiou-se da bolsa de investigação referente à medida M3.1.2/FRCT – Bolsas individuais de investigação científica e tecnológica, do Plano Integrado para a Ciência e Tecnologia (PICT), aprovado pelo Conselho de Governo em 03 de Junho de 2005, financiado pelo Fundo Regional da Ciência e Tecnologia (FRCT) do Governo Regional dos Açores.

## RESUMO

O enquadramento geodinâmico do arquipélago dos Açores, aliado às suas características geológicas, geoquímicas, geofísicas e as frequentes manifestações das actividades sísmica e vulcânica, têm motivado o avanço de estudos multidisciplinares, em particular, aplicados a sistemas vulcânicos e tectónicos como complemento à mitigação de riscos geológicos. Neste contexto, desde 1999 que o Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos (CVARG) da Universidade dos Açores (UAç) tem vindo a desenvolver estudos no domínio da deformação crustal de forma a contribuir para o enriquecimento do conhecimento científico sobre a evolução do estado da deformação dos sistemas vulcano-tectónico activos da região dos Açores. Consequentemente, o presente trabalho tem como objectivo a compreensão dos processos de deformação crustal dos sistemas vulcano-tectónicos das ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa, tendo-se para o efeito procedido à implementação de um sistema de processamento / tratamento automático de dados GPS.

Numa fase preliminar foi efectuada uma reavaliação das redes geodésicas (GPS) já existentes nas ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa no sentido de definir as geometrias mais adequadas e verificar a necessidade de densificar as mesmas redes. No âmbito dos trabalhos desenvolvidos em paralelo com o CVARG, em Junho de 2008 e Fevereiro de 2009 foram instaladas novas estações nas ilhas do Faial e Pico, respectivamente. As estações da ilha do Faial funcionaram de modo permanente durante cerca de 6 meses. As estações instaladas na ilha do Pico permanecem a operar de modo contínuo. As observações GPS destas estações foram incluídos no tratamento e processamento dos dados provenientes das redes de monitorização regular, complementando os trabalhos desenvolvidos.

Foram realizadas três campanhas de recolha de dados GPS, em 2008, 2009 e 2010, nas ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa, observando-se cerca de 105 marcas geodésicas. Na ilha Terceira recorreu-se igualmente aos dados GPS provenientes das duas estações permanentes existentes. A informação existente de observações GPS das redes das ilhas Graciosa e Terceira, de campanhas realizadas em 2003, 2004, 2006 e 2007, foi igualmente incluída no presente trabalho. Foram ainda incluídos, na fase do processamento, alguns dos dados adquiridos pela rede REPRAA, entre 2008 e

2010, e a informação das estações GPS globais (pertencentes à rede IGS e à rede EUREF) distribuídas pelas placas tectónicas que integram a região dos Açores. Os dados resultantes dos trabalhos de campo foram tratados e processados recorrendo ao *software* Bernese, versão 5.0, visando criar uma metodologia de processamento para a análise das taxas de deformação das ilhas e determinar o respectivo campo das velocidades horizontais para serem comparados com as estimativas previstas pelo modelo cinemático global NUVEL – 1A (DeMets *et al.*, 1994). Os resultados geodésicos (posição e velocidade) obtidos neste trabalho são relativos a um sistema de referência terrestre global, ITRF2005 (Altamimi *et al.*, 2007).

A comparação das velocidades obtidas pelo processamento das observações de GPS com as previstas pelo modelo cinemático global NUVEL-1A, sugere que as ilhas Terceira e Graciosa apresentam um movimento relativo mais próximo da placa Eurasiática (Eu), enquanto que as ilhas do Faial e Pico apresentam características de movimentação muito próximas da placa Núbia (Nu). Os resultados obtidos para a ilha de S. Jorge sugerem um comportamento intermédio entre as placas Nu e Eu. As observações GPS confirmam claramente o comportamento distinto da ilha das Flores (Grupo Ocidental) relativamente às restantes ilhas do arquipélago sitas a leste da CMA, atestando para a sua posição em plena placa NA.

Para a ilha Terceira, a análise dos vectores de velocidade horizontal, tendo como referência a estação SRPC, mostra uma tendência geral compressiva, dirigida para a região central da ilha, na zona Pico Alto - caldeira de Guilherme Moniz. Este padrão de deformação pode ser interpretado como sendo a expressão de deformações locais associados aos sistemas vulcânicos activos ali existentes (Vulcão do Pico Alto e Sistema Fissural Basáltico). De referir que na mesma região se concentram a maioria dos epicentros registados no período de 2003 – 2010, definido uma faixa de direcção NW-SE. Relativamente à componente vertical, tendo ainda como referência a estação SRPC, verificou-se uma subsidência generalizada para toda a ilha, com excepção para a área do *Graben* das Lajes. A zona do bloco NE do *Graben* das Lajes evidencia um comportamento contrário ao verificado para a restante ilha.

Para a ilha Graciosa, verifica-se um padrão de deslocamento horizontal, tendo como referência a estação GPER, de magnitude baixa. No que concerne aos resultados obtidos para a componente

vertical local, identificou-se uma relação entre o comportamento de determinadas estações e algumas das falhas cartografadas (Gaspar 1995, 1996; Hipólito, 2009).

Relativamente aos resultados obtidos para a ilha de S. Jorge, o padrão de deformação horizontal, tendo ainda como referência a estação SJ02, não é claramente interpretável tendo por base o mapa tectónico e conhecendo a distribuição dos sistemas vulcânicos que compõem a ilha. Porém, tendo por base a estrutura tectónica NNW-SSE que separa os complexos vulcânicos mais recentes (Manadas e Rosais) do extinto complexo vulcânico do Topo, pode-se inferir uma dissemelhança no padrão de deformação que caracteriza cada um dos sectores, sendo a parte leste da ilha marcada por um comportamento de deformação mais homogéneo, no que respeita à magnitude dos vectores, atestando para a sua estabilidade. Os resultados obtidos para a componente vertical da deformação local, tendo como referência a estação SJ02, permitem igualmente considerar a existência de dois sectores apresentando comportamentos distintos, o sector W e o sector E, separados pela mesma estrutura NNW-SSE, e que apresentam uma movimentação maioritariamente em subsidência e soerguimento, respectivamente.

No que concerne às taxas de deformação horizontal, para a ilha Terceira, as sub-redes definidas pelas estações que cobrem o Vulcão de Santa Bárbara, Vulcão de Guilherme Moniz e Vulcão dos Cinco Picos mostram uma tendência compressiva segundo uma orientação de N8°E, N21°E e N27°E, respectivamente. Para a sub-rede do Vulcão do Pico Alto, verificou-se uma ligeira compressão segundo N65°E, com uma magnitude de 0,231 ppm/ano. O *Graben* das Lajes, apresenta um regime de cisalhamento, com uma ligeira extensão segundo N4°W e uma magnitude de 0,182 ppm/ano. Para a ilha Graciosa verifica-se que as sub-redes definidas pelas estações que cobrem o Vulcão da Caldeira, a estrutura tectónica do *Graben* Serra das Fontes e a Falha Sul da Serra das Fontes, mostram uma extensão segundo uma direcção N77°E, N18°W e N44°W, respectivamente. As sub-redes definidas pelas estações que cobrem o Maciço da Serra das Fontes, o Maciço Centro-Meridional e Plataforma NW, sugerem um regime de compressão segundo uma direcção N76°W, N4°E e N88°E, respectivamente.

As velocidades estimadas permitiram calcular o campo de velocidades da região em estudo, nas componentes horizontal e vertical, possibilitando um melhor conhecimento e compreensão da

distribuição e comportamento dos sistemas vulcânicos activos das ilhas analisadas e estruturas tectónicas que as afectam, com vista a caracterizar os respectivos estados actuais de deformação e assim possibilitar uma melhor detecção de futuras alterações aos padrões de deformação agora estabelecidos. Esta abordagem permitiu ainda complementar a informação existente sobre a cinemática da região dos Açores e em particular das ilhas em estudo e sua interpretação no contexto do conhecimento actual sobre a geodinâmica da Junção Tripla dos Açores.

**Palavras-chave:** Junção Tripla dos Açores; Deformação crustal; GPS; sistemas vulcano-tectónicos.

## ABSTRACT

The geodynamic setting of the Azores archipelago, allied to the geological, geochemical, geophysical and to the frequent manifestations of seismic and volcanic activities have motivated a number of multidisciplinary studies applied to the volcanic and tectonic systems as a complement for the mitigation of geological risks. In this context, since 1999 the Centre for Volcanology and Geological Risks Assessment (CVARG) of the University of the Azores (UAz) has been developing studies in the field of crustal deformation contributing for the growth of the scientific knowledge regarding the deformation evolution of the active volcano-tectonic from the Azores. Consequently, the present work aims to the understanding of the processes of crustal deformation of the volcano-tectonic systems of Terceira, S. Jorge and Graciosa islands. For this an automatic processing / treatment GPS data system was implemented.

In a preliminary stage the reassessment of existing geodetic networks (GPS) in Terceira, S. Jorge and Graciosa islands was performed, in order to define the most suitable geometries and to verify the need to increase their density. Between June 2008 and February 2009, work was developed in parallel with the CVARG and new GPS permanent stations were installed in Faial and Pico islands, respectively. Stations at Faial island operated during about 6 months. Stations installed at Pico island are still in operation. GPS observations generated by these stations were included in the treatment and processing of data from regular monitoring networks complementing the work developed.

In 2008, 2009 and 2010, three campaigns were conducted in order to collect GPS data in the islands of Terceira, S. Jorge and Graciosa. During these years, approximately 105 geodetic marks were observed. Other GPS data acquired during earlier campaigns (conducted in 2003, 2004, 2006 and 2007) in Graciosa and Terceira islands were also added to the data set. GPS data from the two existing permanent stations in Terceira were also included as well as, data provided by the REPRAA permanent network from 2008 to 2010 and observations from the global GPS stations distributed on the tectonic plates are present at the Azores region (which belong to the IGS network and the EUREF network). Data from regular campaigns were treated and processed using the Bernese 5.0 Software. The aim was

to create a processing methodology for the analysis of deformation rates in the islands and to determine the respective horizontal velocity fields, in order to compare them with the estimates provided by the global kinematic model NUVEL - 1A (DeMets *et al*, 1994). Geodetic results (position and velocity) obtained in this work are relative to a global terrestrial reference system ITRF2005 (Altamimi *et al.*, 2007).

The comparison of velocities obtained by processing of GPS observations with those predicted by the global kinematic model NUVEL-1A suggests that Terceira and Graciosa islands have a relative movement close to the Eurasian plate, whereas the Faial and Pico islands behave similarly with the displacement characteristics of Nubian plate. The results obtained for São Jorge show that this island is moving with an intermediate behavior between Eurasian and Nubian plates. GPS observations clearly confirm the distinct behavior of Flores island (western Group) from the remaining islands of the archipelago east of CMA attesting its full position in the NA plate.

For Terceira island, the analysis of the horizontal deformation vectors, with reference to the SRPC station, show a general compressive pattern trending to the central region of the island, the Pico Alto volcano - caldeira de Guilherme Moniz region. This deformation pattern can be interpreted as the expression of local deformations associated with existing active volcanic systems (Pico Alto volcano and basaltic fissure system). In that same region most epicenters recorded in the period 2003 – 2010 are located, defining, a NW-SE direction. In terms of the vertical component, a widespread subsidence for the entire island was observed, except for the area of Lajes *Graben*. The well-defined uplift behavior of the NE block of Lajes *Graben* contrasts with the general subsidence observed in the remaining island.

For Graciosa island, and using GPER as the reference station, the horizontal deformation displays a low magnitude. Regarding the vertical component the obtained may have some relation with some of the mapped faults from Gaspar (1995, 1996) and Hipólito (2009).

Regarding the results obtained for the island of S. Jorge, the pattern of the local horizontal deformation cannot be clearly related with the tectonic mapping and with the volcanic systems that make up the island. However, the NNW-SSE tectonic structure that separates the younger volcanic systems (Manadas and Rosais) from the extinct Topo volcanic seems to establish a boundary between the

dissimilarity in the pattern of deformation that characterizes each of the sectors. The eastern part of the island is marked by a more uniform deformation behavior in relation to the magnitude of the vectors, attesting its stability. The results for the vertical component of the deformation, also points to the existence of two sectors with different behaviours, the W and the E sectors, separated by the same NNW-SSE structure, with a movement mostly in subsidence and uplift, respectively.

Regarding the main strain rates of Terceira island, the established sub-networks defined by the stations located at Santa Bárbara volcano, Guilherme Moniz volcano and Cinco Picos volcano show a compressive trend according to N8°E, N21°E and N27°E orientation, respectively. For the sub-network of Pico Alto volcano, there is a slight compression trending N65°E, with a magnitude of 0,231 ppm/yr. Lajes *Graben* presents shearing, with a slight extension according to N4°W and a magnitude of 0,182 ppm/yr. For Graciosa, the sub-networks defined for the Caldeira volcano, the tectonic structure of the Serra das Fontes - Serra Branca *Graben* and the Southern Fault of Serra das Fontes, show an extension according to the N77°E, N18°W and N44°W directions, respectively. The sub-networks defined for Serra das Fontes, the Maciço Centro-Meridional and NW Plataforma, suggest a system of compressive system trending to N76°W, N4°E and N88°E, respectively.

The estimated velocities allowed the calculation of the velocity field for the studied region, its horizontal and vertical components, allowing a better knowledge and understanding of the distribution and behavior of the active volcanic systems for the analyzed islands and its tectonic structures. The aim is to make possible a better recognition of future changes in the deformation patterns that were defined. This approach allowed to further complement the existing information on the kinematics of the Azores region, in particular in the domain of the islands under study, and its interpretation in the context of the current knowledge of Azores Triple Junction geodynamics.

**Keywords:** Azores Triple Junction; crustal deformation; GPS; volcano-tectonic systems.

## ABSTRACT

---

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODÉSIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS SISTEMAS VULCANO-TECTÔNICOS E HIDROTERMAIS DO SEGMENTO DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA

## PREÂMBULO

O arquipélago dos Açores situa-se no Oceano Atlântico Norte, na zona de junção tripla determinada pelas placas litosféricas Norte Americana, Eurasiática e Núbia, facto que se reflecte na existência de importantes sistemas de fracturas, nomeadamente a Crista Média-Atlântica, a Zona de Fractura Este dos Açores, o Rifte da Terceira e a Falha Gloria. Caracterizada pela complexidade geológica da fronteira entre as referidas placas, a região é efectada por uma actividade sísmica e vulcânica bastante significativa. Neste contexto, os Açores são, pois, um local de excelência para a aplicação e desenvolvimento das mais diversas técnicas de monitorização vulcânica (geofísicas, geoquímicas e geodésicas), com o intuito de caracterizar cada aparelho vulcânico e áreas circundantes de forma a possibilitar uma correcta mitigação e avaliação de circunstâncias em situações de risco.

Nesta perspectiva, o trabalho que se apresenta pretende ser mais uma contribuição para o enriquecimento do conhecimento científico sobre a evolução do estado da deformação vulcano-tectónica dos sistemas vulcânicos activos da região dos Açores. O seu desenvolvimento vem na continuidade dos trabalhos já desenvolvidos por Rodrigues (2005), Rodrigues *et al.* (2006, 2009a; 2009b; 2010a; 2010b) centrados na compreensão dos processos de deformação crustal dos sistemas vulcano-tectónico das ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa e na implementação de um sistema de processamento / tratamento automático de dados de observação GPS. Neste contexto, os resultados presentemente obtidos foram interpretados com o propósito de melhor compreender a cinemática da região e, em particular, das ilhas em estudo, ao nível das estruturas tectónicas e vulcânicas, com vista a possibilitar uma resposta mais rápida e eficaz às catástrofes naturais.

No primeiro capítulo procede-se à apresentação dos objectivos do trabalho. Elabora-se um breve resumo do contributo para o enriquecimento do conhecimento científico sobre a evolução do estado da deformação vulcano-tectónica dos sistemas vulcânicos activos no arquipélago dos Açores. Adicionalmente faz-se uma breve referência aos trabalhos desenvolvidos no âmbito da deformação crustal local e globais nos Açores, e que precederam ao presente estudo, e cuja leitura se entende como essencial para compreender o estado dos conhecimentos à data da sua planificação e realização.

No segundo capítulo procede-se a descrição das particularidades do ambiente geodinâmico que domina a Plataforma dos Açores. Apresenta-se uma sucinta compilação dos diversos modelos sucessivamente propostos para explicar o comportamento geodinâmico e a distribuição espacial das diferentes estruturas que compõem a região dos Açores. Faz-se de igual modo uma sinopse das principais características da actividade sísmica e vulcânica que marcou a história do arquipélago açoriano.

No seguimento da caracterização do enquadramento dos Açores, no terceiro capítulo é realizada uma concisa compilação das principais características vulcanológicas e estruturas tectónicas das diferentes ilhas abordadas neste trabalho, fazendo-se uma breve referência à actividade vulcânica e sísmica histórica e instrumental de maior relevância.

No quarto capítulo faz-se referência, de uma forma sintética, aos princípios teóricos indispensáveis que fundamentam o desenvolvimento do bom funcionamento da técnica que serviu de base à realização deste projecto – o GPS.

A metodologia de concepção e implementação das redes de marcas geodésicas usadas para a recolha de dados de campo são descritas no quinto capítulo de uma forma detalhada. É igualmente descrita a estratégia adoptada para o tipo de ocupação: campanhas regulares e/ou estações permanentes de aquisição de dados GPS.

No sexto capítulo faz-se uma breve descrição do *software* utilizado durante o processamento dos dados GPS obtidos nas diversas campanhas realizadas em cada ilha. Segue-se a descrição das diferentes etapas e estratégias escolhidas ao longo do processamento das observações GPS (*Bernese GPS Software*, Versão 5.0).

Após o tratamento e processamento dos dados, no sétimo capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os campos de velocidades de deslocamento horizontais e verticais das ilhas em estudo. Seguidamente, faz-se uma análise preliminar dos resultados obtidos comparando com as velocidades estimadas pelo modelo cinemático global NUVEL-1A, descrito em DeMets *et al.* (1994). Os resultados geodésicos (posição e velocidade) obtidos no presente processamento são relativos ao sistema de referência terrestre global, o

*International Terrestrial Reference Frame 2005 (ITRF2005)* (Altamimi *et al.*, 2007). Por fim, procede-se a análise das direcções dos eixos de tensão para as ilhas Terceira, Graciosa e para o triângulo entre Terceira – Graciosa – São Jorge.

No oitavo capítulo é dedicado à interpretação final e discussão dos resultados obtidos no processamento das observações GPS das ilhas. Pretende-se nesta fase identificar a existência de possíveis deformações locais ao nível dos edifícios vulcânicos que constituem cada ilha alvo de estudo e/ou das estruturas tectónicas que as afectam. Para tal, conjugou-se a informação relativa às estruturas tectónicas identificadas nas diferentes ilhas e a sismicidade instrumental registada no período de 2003 a 2010. Para cada ilha é efectuada uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os estudos anteriormente desenvolvidos. Também do ponto de vista análise geodinâmica do sector do arquipélago compreendido pelas ilhas da Terceira, S. Jorge e Graciosa procurar-se tecer algumas considerações relativamente à posição e comportamento cinemático de cada ilha relativamente à zona de fronteira Eu-Nu, ou seja, no segmento do *Rift* da Terceira (*s.l.*) nesta região.

Por fim, no capítulo nono são tecidas as considerações finais do trabalho e apresentam-se algumas linhas orientadoras para trabalhos futuros.

## PREÂMBULO

---

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODÉSIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS SISTEMAS VULCANO-TECTÔNICOS E HIDROTERMAIS DO SEGMENTO DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A presente dissertação destina-se a ser apresentada à Universidade dos Açores para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, especialidade de Geodesia, e descreve a aplicação de técnicas de Geodesia Espacial ao estudo dos sistemas vulcano-tectónicos e hidrotermais das ilhas Terceira, São Jorge e Graciosa, localizadas ao longo do segmento ocidental da zona de fronteira entre as placas litosféricas Eurásia (Eu) e Núbia (Nu).

## 1.1 – MOTIVAÇÃO

Desde os primórdios da sua existência que o Homem tem travado uma luta constante, em prol da sua sobrevivência, contra as forças da natureza tais como os sismos, as erupções vulcânicas, as inundações e os grandes movimentos de vertentes. Ao longo de muitos anos estes fenómenos naturais não tinham explicação, sendo justificados através de crenças e mitos, aceites com um sentimento de impotência e de pavor. A procura de solos férteis, a ligação à terra, as convicções culturais e religiosas e a ignorância pura e simples conduziram, ao longo dos tempos, a uma vivência, paredes-meias, do Homem com os vulcões. Pela perda avultada de vidas e bens materiais, o Homem sente na pele o efeito devastador e incontrolável do poder das catástrofes naturais. São exemplos a erupção do Mont Pelée na ilha Caribenha da Martinica em 1902, onde um fluxo de cinza e gases a alta temperatura atingiu a cidade de St. Pierre, vitimando cerca de 28.000 habitantes. Mais recentemente, um fluxo de lama desencadeado pela erupção de 1985 do vulcão Nevado del Ruiz, na Colômbia, foi responsável pela morte de grande parte de uma população de 25.000 habitantes da cidade de Armero (Sigurdsson, 2000).

Com o surgimento do pensamento científico, passou-se a procurar uma explicação coerente para os fenómenos da natureza. As diferentes explicações deixaram de ser meras conjunturas para se converterem em teorias coerentes e fundamentadas, com registos de informação adequado para cada tipo de fenómeno. Nesta busca constante e quase desesperada do Homem para dar resposta a tudo o quanto provém de fenómenos naturais, muitos foram os cientistas que arriscaram ou mesmo perderam a vida. Entre as erupções mais devastadoras da História da Vulcanologia destacam-se as de Krakatoa, em 1883 (Carey *et al.*, 1996), a do já referido Monte Pelée (*West Indies*), em 1902 (Boudon and Lajoie, 1989) e a do

Novarupta, no Alasca, em 1912 (Houghton *et al.*, 2004). Estas erupções atraíram a atenção dos governos e da população em geral para a importância do estudo dos vulcões, sendo que a Vulcanologia deu então os seus primeiros passos enquanto Ciência.

A monitorização vulcânica envolve a aplicação e a combinação de diferentes técnicas (geofísica, geoquímica e geodesia) para a avaliação do comportamento de um aparelho vulcânico activo e das respectivas áreas circundantes. Neste domínio, a geodesia tem tido um papel crucial na área de investigação para a consolidação do conhecimento em termos de deformação crustal. A evolução constante das técnicas geodésicas verificada nos últimos anos, fruto do desenvolvimento tecnológico, tem contribuído significativamente para o crescente do conhecimento dos processos físicos e dinâmicos da Terra. A aplicação da monitorização geodésica permite avaliar a evolução de possíveis deformações crustais eventualmente relacionadas com movimentações de natureza tectónica (globais e locais), vulcânica, erosiva e alterações da superfície devido à actividade antropogénica. Esta monitorização baseia-se na medição de grandezas geométricas, tais como ângulos, distâncias e desníveis, e inclui técnicas de geodesia clássica e espacial. No que concerne à geodesia clássica, esta tem como objectivo o posicionamento no solo; as medições são obtidas com recurso a instrumentos de que são exemplo os teodolitos, distanciómetros electromagnéticos e níveis ópticos. De entre as técnicas que se baseiam na determinação do posicionamento preciso de pontos à superfície terrestre com base no sistema global de navegação por satélite (GNSS – Global Navigation Satellite Systems), aplicadas à monitorização da deformação crustal, destacam-se (1) o Global Positioning System (GPS); (2) o GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS); (3) o sistema Galileo; e (4) o sistema Compass.

As primeiras aplicações da técnica GPS com o objectivo de detectar tanto as deformações locais da crosta, como o movimento das placas litosféricas, datam da década de 1980, com as redes estabelecidas nos Estados Unidos da América (Califórnia) e no Japão. Desde então, o número de redes contínuas, nacionais, regionais e locais, cresceu substancialmente e os resultados obtidos estão, geralmente, de acordo com os modelos geológicos. Nas últimas décadas, o GPS tem sido utilizado na região dos Açores, para estudar tanto deslocamentos inter-ilhas, relacionados com a geodinâmica da região, (Bastos *et al.*, 1991, 1993, 1998; Fernandes *et al.*, 2003; Mendes *et al.*, 2002; Fernandes, 2004; Fernandes *et al.*, 2006) como a deformação local, intra-ilhas, associada a movimentações magmáticas, (Pagarete *et al.*, 1998; Sigmundsson *et al.*, 1995; Jónsson *et al.*, 1999; Rodrigues, 2005; Trota 2002, 2008; Trota *et al.*, 2009; Catita, 2007; Ferreira, 2006; Mendes *et al.*, 2011, 2013). De facto, em resultado do enquadramento geotectónico do arquipélago dos Açores, esta técnica permite realizar uma monitorização sismovulcânica,

detectando deformações crustais, à escala milimétrica, relacionadas com a actuação de tensões associadas a fenómenos de natureza sísmica, vulcânica ou hidrotermal. Assim, torna-se possível obter mais informação para o aconselhamento científico às autoridades competentes e emitir os avisos e alertas para o desencadear das acções de Protecção Civil necessárias à salvaguarda de pessoas e bens.

Em suma, podemos concluir que a região dos Açores encontra-se numa região geodinamicamente conturbada cujas características geológicas, geoquímicas, geofísicas e as frequentes manifestações de actividade sísmica e vulcânica, lhe atribuem o estatuto de autêntico laboratório natural para o desenvolvimento de diversos estudos na área da vulcanologia e respectivas ciências relacionadas, o que lhe confere um relevante interesse para muitos investigadores. No âmbito da geodesia espacial, a técnica de GPS está particularmente bem adaptada para responder a este tipo análise, permitindo que a evolução temporal e espacial da deformação da crosta terrestre, gerada pelo efeito de forças tectónico-vulcânicas, possa ser acompanhada e medida com precisão milimétrica, qualquer que seja o grau de evolução dessas deformações, constituindo assim uma técnica essencial na compreensão dos processos inerentes a sistemas vulcânicos e/ou de fronteira de placas e em programas de monitorização sismo-vulcânica.

Considerando o permanente desenvolvimento das populações instaladas em regiões próximas de vulcões potencialmente activos, torna-se fulcral pôr em prática programas de monitorização multidisciplinar para, junto das autoridades de protecção civil, procurar minimizar os efeitos de possíveis riscos naturais.

## 1.2 – CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Desde 1999 que o Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos (CVARG) da Universidade dos Açores (UAç) tem vindo a desenvolver, um projecto ambicioso de forma a contribuir para o enriquecimento do conhecimento científico sobre a evolução do estado da deformação vulcano-tectónico dos sistemas vulcânicos mais activos da região dos Açores. Neste contexto insere-se este trabalho que vem na continuidade dos trabalhos já desenvolvidos por Rodrigues (2005) e Rodrigues *et al.* (2006; 2009a; 2009b; 2010a; 2010b) com o intuito de compreender os processos de deformação crustal dos sistemas vulcano-tectónicos das ilhas Terceira, Graciosa e S. Jorge e procede à implementação de um sistema de processamento / tratamento automático de dados GPS em tempo real ou quasi-real. Com este trabalho pretende-se: (1) Discriminar a deformação crustal de dimensão local, associada aos sistemas vulcânicos-tectónicos e da deformação crustal a nível regional resultante dos processos geodinâmicos actuantes nesta região; (2) estabelecer as linhas de base de deformação crustal para efeitos de monitorização

sismo-vulcânica das ilhas alvo de estudo; (3) identificar zonas de concentração de deformação com interesse para a exploração geotérmica utilizando o campo geotérmico do Pico Alto, ilha Terceira, como caso de estudo; e (4) identificar variações de taxas de deformação indicadoras de reactivação de sistemas vulcano-tectónicos e permitir uma melhoria da capacidade de resposta em situações de emergência/catástrofe. Os resultados obtidos foram interpretados com o propósito de melhor compreender a cinemática da região e em particular das ilhas em estudo, ao nível das estruturas tectónicas e vulcânicas, com vista a possibilitar uma resposta mais rápida e eficaz às catástrofes naturais.

Para atingir os objectivos propostos foi necessário fazer uma reavaliação das redes geodésicas já existentes nas ilhas Terceira, Graciosa e S. Jorge, no sentido de definir as geometrias de rede mais adequadas aos objectivos do trabalho que se pretende realizar. Neste trabalho recorreu-se somente à utilização da técnica GPS, sendo que no tratamento dos dados apenas se processou informação proveniente de satélites da constelação GPS. A aquisição de dados GPS numa área vulcânica pode ser feita de forma (1) regular, quando são efectuadas campanhas de recolha de dados em determinadas épocas do ano; e (2) contínua, quando são instalados receptores que registam continuamente ao longo de um período de tempo ou mesmo de modo permanente. Em ambos os casos a finalidade é, numa primeira fase, a determinação de uma época-zero para as coordenadas dos pontos pertencentes à rede geodésica de uma dada região vulcânica em repouso e, em seguida, a detecção de qualquer desvio em relação à época de referência, que indique o início de alteração do comportamento do vulcão em profundidade e a sua relação com uma possível erupção. Com base nesta metodologia, no âmbito deste projecto foram levadas a cabo três campanhas de recolha de dados GPS, em 2008, 2009 e 2010 nas ilhas Terceira, S. Jorge e Graciosa, observando-se cerca de 105 marcas geodésicas. Na ilha Terceira recorreu-se aos dados GPS provenientes das duas estações permanentes existentes. Uma vez que já existia informação de observações GPS das ilhas Graciosa e Terceira, de campanhas realizadas em 2003, 2004, 2006 e 2007, essa informação foi igualmente incluída no presente trabalho. Foi ainda incluída neste trabalho dados provenientes de estações permanentes instaladas nas ilhas do Faial e Pico durante o decorrer deste projecto.

Os dados resultantes dos trabalhos de campo foram tratados e processados recorrendo ao *software* Bernese, versão 5.0 (Dach *et al.*, 2007), visando criar uma metodologia de processamento para a análise das taxas de deformação das ilhas e determinar o respectivo campo das velocidades horizontais para serem comparados com as estimativas previstas pelos modelos cinemáticos globais. As velocidades estimadas permitem calcular o campo de velocidades, nas componentes horizontal e vertical, permitindo

conhecer e compreender melhor a distribuição da deformação e a cinemática da região e, em particular, das ilhas em estudo.

O presente trabalho é parte integrante de um programa de monitorização mais vasto, que tem sido desenvolvido no arquipélago dos Açores e no qual está envolvida uma equipa multidisciplinar constituída por técnicos e investigadores, no âmbito da Geologia, Geofísica e da Geodesia, do CVARG (Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores) e do CIVISA (Centro de Informação e Vigilância Sismo-vulcânica dos Açores).

### 1.3 – ESTUDOS ANTERIORES

O estudo das deformações da crosta tem-se revelado um processo importante na identificação de sinais precursores de erupções e na compreensão dos processos dos vulcões activos. Com efeito, o facto da técnica GPS ser muito precisa no posicionamento tridimensional relativo, possibilita uma avaliação da deformação no espaço e no tempo, para a modelação e interpretação das tensões responsáveis por essa deformação. Alguns casos de estudo ilustram o exposto: Kilauea e Mauna Loa (Hawaii), Long Valley e Yellowstone (Califórnia), Campi Flegrei e Etna (Itália), Rabaul (Papua, Nova Guiné), Sakurajima (Japão) e Krafla (Islândia), entre muitos outros (Carey *et al.*, 1996; Boudon and Lajoie, 1989; Houghton *et al.*, 2004; Janssen, 2003; Müller, 2011).

Pagarete *et al.* (1990; 1998) descreve que as primeiras observações geodésicas realizadas no arquipélago dos Açores datam do fim do século XIX (1890-1898). Desde então realizaram-se várias campanhas de observação geodésica clássica de modo mais regular (1934-1940, 1948, 1951-1957, 1967, 1980 e 1987-1988). Grande parte destas campanhas tiveram como finalidade o estabelecimento da cartografia da região, não tendo havido, portanto, a preocupação de construir referências adequadas aos estudos de geodinâmica face ao conhecimento e objectivos da época, que não estavam direccionados para a realização de estudos dessa natureza. Durante o período da erupção do vulcão dos Capelinhos, na ilha do Faial, decorreram diversos levantamentos topográficos na tentativa de analisar a evolução da superfície topográfica naquela ilha (Machado, 1959).

Na década de 90, com o aparecimento das técnicas geodésicas espaciais, intensificou-se o interesse no domínio da geodinâmica em relação à região dos Açores e surgiram novos trabalhos de análise dos dados geodésicos clássicos (Pagarete *et al.*, 1990; Pagarete *et al.*, 1998). Pagarete *et al.* (1990, 1998)

apresentam os primeiros resultados, com base na recolha de dados no âmbito de trabalhos de cartografia, e que remontam ao período de 1895-1975, incluindo igualmente dados de campanhas GPS efectuadas em 1994/95. Entre as conclusões obtidas para o estudo levado cabo nas ilhas do grupo central, destacam-se as seguintes: (1) os valores das taxas de deformação são mais elevados do que os fornecidos pelo modelo NUVEL-1; (2) para a ilha do Faial, os modelos tectónicos definidos por Madeira e Ribeiro (1990) estão de acordo com as taxas e direcções das deformações obtidas pelos dados da geodesia clássica; (3) observaram-se extensões perpendiculares às falhas com orientação WNW-ESE; e (4) os dados geodésicos para S. Jorge não estão de acordo com o modelo tectónico proposto por Madeira e Ribeiro (1990), o que pode ser atribuído às características da rede geodésica para a ilha em questão.

A investigação mais extensa realizada no arquipélago dos Açores recorrendo ao GPS foi desenvolvida pelo projecto TANGO (*TransAtlantic Network for Geodynamics and Oceanography*) (Bastos *et al.*, 1991; Bastos *et al.*, 1993, Bastos *et al.*, 1998), este já direccionado para o estudo da geodinâmica da região. A rede TANGO foi estabelecida em 1988, sendo inicialmente constituída por 12 estações GPS posicionadas em quatro placas tectónicas: Euroasiática (Eu), Norte Americana (NA), Africana (Núbia –Nu) e placa das Caraíbas. Entre os principais objectivos do projecto contavam-se (1) o estabelecimento de uma rede geodésica de elevada precisão para as ilhas vulcânicas dos Açores para o estudo cinemático da Junção Tripla dos Açores (JTA) e (2) a evolução geodinâmica da fronteira das placas Eu-Nu no segmento Açores-Gibraltar, através do recurso das técnicas geodésicas: GPS, VLBI, LLR e gravimetria. Utilizou-se, para o efeito, o campo de velocidades absolutas resultantes das observações GPS efectuadas em estações regionais distribuídas por todas as ilhas do Arquipélago. A primeira campanha de observação GPS teve lugar em 1988 (Bastos *et al.*, 1991). Posteriormente, realizaram-se outras campanhas de reobservação que decorreram em 1991, 1993, 1994, 1997, 1999, 2000, 2001 e 2003. Os trabalhos de Bastos *et al.* (1991, 1993, 1998) indicam, apesar da fraca precisão das soluções (ao nível centimétrico), alguns resultados importantes ao nível da geodinâmica da região, nomeadamente: (1) a verificação de um encurtamento entre a ilha de S. Miguel e o grupo central e de uma extensão entre as Flores e as restantes ilhas dos grupos central e oriental; (2) a constatação de que os resultados, na sua globalidade, vão ao encontro do modelo tectónico então proposto por Madeira e Ribeiro (1990); e (3) a determinação da velocidade de expansão média da CMA, com uma taxa de cerca de 25 mm/ano, o que está de acordo com o modelo global NUVEL-1 (DeMets *et al.*, 1990).

Entre 1993 e 1997 foi desenvolvido um projecto europeu nos vulcões das Furnas e do Fogo (S. Miguel) (Sigmundsson *et al.*, 1995; Jónsson *et al.*, 1999) que teve como principal objectivo o estudo da

deformação crustal destes edifícios vulcânicos. Foram instaladas marcas geodésicas distribuídas ao longo do vulcão das Furnas e duas marcas no vulcão do Fogo. Realizaram-se campanhas de aquisição de dados GPS em 1993, 1994 e 1997. Aqueles autores concluíram que a deformação local é relativamente baixa. Para uma análise mais precisa dividiram a rede das Furnas em três blocos de comportamento distinto: (1) os blocos mais estáveis, localizados a N e S que apresentam uma taxa de deformação horizontal de  $3 \pm 1$  mm/ano na direcção N78°E. Uma vez que para esta zona os modelos tectónicos globais apresentam taxas de deformação de 4 mm/ano, os autores concluíram que 75% da deformação está concentrada numa faixa de 10-15 km de extensão; e (2) o bloco central, mais estável, que apresenta movimentos para S e SE. Através das observações obtidas pelas duas estações GPS localizadas no vulcão do Fogo, os autores identificaram uma deflacção da ordem dos 4-6 mm/ano.

As consequências do sismo de 1998, ocorrido na ilha do Faial, reavivaram a necessidade de uma monitorização sistemática como meio de prevenção e alerta de fenómenos de natureza vulcânica e/ou sísmica na região dos Açores. Neste sentido, a elaboração de modelos geodinâmicos adequados que permitam prever a evolução do comportamento da crosta terrestre nesta região adquire uma importância considerável. Com base nos resultados dos projectos anteriores, verificou-se que as técnicas de geodesia espacial fornecem um contributo fundamental para o estudo e compreensão das alterações da superfície das ilhas. Neste âmbito surgiu, em 2000, o projecto científico SARAÇORES com o objectivo de determinar as deformações de origem vulcânica e tectónica, bem como as componentes sísmica e assísmica da região Pico-Faial. Para este efeito, recorreu-se à interpretação de imagens SAR, em modo interferométrico, e à integração de medições *in situ* dos deslocamentos deduzidos a partir de observações GPS e de gravimetria absoluta (Catita, 2007). Para a concretização da componente geodésica deste projecto, foi necessário recorrer à rede de marcas de observação GPS já existente nas ilhas Faial e Pico instaladas pelo projecto TANGO. Uma vez que o número de estações mostrou-se insuficiente foi necessário densificar a rede TANGO, procedendo-se à instalação de um conjunto de estações de observação GPS nas ilhas em estudo. Essa rede complementar passou a designar-se de rede SARTANGO. As campanhas de aquisição de dados GPS nas ilhas do Faial e do Pico decorreram em 2001, 2003, 2004 e 2006 (Catita, 2007). Segundo Catita (2007) e Catita *et al.* (2008), com base em dados de GPS (rede SARTANGO e TANGO) e de interferometria radar por satélite e partindo do modelo cinemático global NUVEL-1A (DeMets *et al.*, 1994), os resultados indicam que para a ilha do Pico é evidente um comportamento cinemático mais próximo da placa Nu do que da placa Eu. De acordo com a mesma autora, a ilha do Faial apresenta um comportamento intermédio relativamente às duas placas, situando-se no interior da zona de deformação activa interplacas, com taxas de deformação um pouco

mais significativas do que as verificadas para o Pico.

O projecto COGEAM (Controlo geodinâmico nos arquipélagos dos Açores e Madeira utilizando estações permanentes GPS) teve início em 1998 com o objectivo de instalar estações permanentes de GPS nas ilhas das Flores (aeroporto de Santa Cruz das Flores), Graciosa (Aeródromo de Santa Cruz), Santa Maria (Pico Alto) e Madeira (Instituto Meteorológico do Funchal), sendo esta última estação operada em cooperação com o Observatório Astronómico de Lisboa (OAL). Este projecto pretendeu obter informação contínua de modo a quantificar os deslocamentos entre as três placas da JTA (Eu, Nu e NA) (<http://mat.fc.ul.pt/eg/eg/cogeam.html>).

Em 2001, teve início o projecto DISPLAZOR (Controlo de deslocamentos tectónicos, vulcânicos e escorregamentos no Faial, Pico e São Jorge (Açores) utilizando a técnica GPS), tendo sido concebido para o estudo e a quantificação das deformações vulcanotectónicas nas ilhas do Faial, Pico e São Jorge, através da interligação entre estudos sísmicos, geológicos e geodésicos. Para atingir os objectivos pretendidos foi concebida e implantada nas ilhas em estudo redes de observação constituída por 60 estações GPS, pela primeira vez observada em 2001 e posteriormente reobservada em 2004. De forma a dar continuidade ao projecto DISPLAZOR, em 2008 é proposto o projecto SHA-AZORES (Avaliação do risco sísmico nos açores através de estudos de neotectónica e paleossismologia) ao abrigo deste projecto, em 2011 é realizada mais uma campanha de observação GPS da rede do DISPLAZOR. As observações GPS foram tratadas e analisadas com base em modelos geofísicos e geodésicos com o objectivo de definir um campo de velocidades para as ilhas do Faial, Pico e São Jorge. De acordo com Mendes *et al.* (2011, 2013) dados preliminares deste estudo indicam, relativamente ao campo de velocidade do deslocamento horizontal, conclui-se que parte da região oriental de S. Jorge apresenta-se, aparentemente, estável enquanto que na região oeste-central da ilha observa-se uma deformação de ~2mm/ano no sentido NE, incompatível com os dados estruturais de neotectónica (*e.g.* Madeira e Brum da Silveira, 2003) e com a informação cinemática conhecida para esta região (DeMets *et al.*, 1994, Bastos *et al.*, 1998, Fernandes, 2004). Os mesmos autores sugerem que tal padrão de deformação poderá estar relacionado com algum processo vulcânico em desenvolvimento neste sector particular da ilha, o que é coincidente com a localização de algumas estruturas vulcânicas.

Mais recentemente Mendes *et al.* (2013), tendo por base as mesmas 15 estações GPS utilizadas neste trabalho, mas focando-se no intervalo de observação de 2001 a 2011, revela a existência de dois regimes distintos para o campo de velocidades horizontal na ilha de S. Jorge: (1) um regime que caracteriza o

sector NW da ilha e (2) um segundo regime limitado à parte SE da ilha. O sector NW apresenta um movimento intermédio entre os definidos para as placas Eu e Nu (de acordo com os modelos NUVEL-1A (DeMets *et al.*, 1994); Revel (Sella *et al.*, 2002); ITRF2005-PMM (Altamimi *et al.*, 2007); ITRFVEL-M (Argus *comunic. pess.*, 2012 in Mendes *et al.*, 2013) e ITRF2008-PMM (Altamimi *et al.*, 2012)), com uma taxa de expansão de  $2,2 \pm 0,3$  mm/ano segundo  $N82^\circ \pm 6^\circ$ , enquanto que o sector SE apresenta um comportamento de movimentação mais próximo da placa Eu apresentando uma taxa de deslocamento de  $1,4 \pm 0,3$  mm/ano com uma direcção de  $N109^\circ \pm 11^\circ$ . O padrão de deformação obtido por aqueles autores para estes dois sectores não é aparentemente compatível com a cinemática das falhas activas conhecidas para a ilha de S. Jorge (Madeira, 1998; Madeira e Brum da Silveira, 2003).

Outro projecto desenvolvido no arquipélago no campo da geodesia é o denominado por STAMINA – *Study of the Tectonic And Magmatic Interplay in the Azores*, com início em 2001. Este trabalho consistiu na caracterização do comportamento geodinâmico e da geometria das placas tectónicas existentes nesta região, tendo como finalidade contribuir para o conhecimento do padrão de deformação do segmento oeste da zona de fronteira entre as placas Eu e Nu (região dos Açores). Uma vez mais, de forma a atingir os objectivos propostos, foi necessário conceber e implantar uma rede de observação na ilha Terceira, tendo sido observada entre Outubro de 1999 e Julho de 2003 (Navarro *et al.*, 2007). Navarro *et al.* (2003, 2008, 2009) e Ferreira (2006) conclui que a ilha Terceira apresenta um comportamento cinemático díspar do proposto pelos modelos cinemáticos que sugere um comportamento para o segmento W da fronteira de placas Eu-Nu, embora os autores mencionem a existência de indícios de que a localização dos centros eruptivos seja maioritariamente controlada pela extensão regional proposto pelo modelo global de deslocamento de placas NUVEL-1A (DeMets *et al.*, 1994).

O projecto RETINA (*Realistic Evaluation of Temporal Interaction of Natural Hazards*), teve início em 2002 e tinha uma duração prevista de quatro anos. Este projecto foi concebido para três áreas geográficas distintas, os Açores, a França e a Islândia, e teve como finalidade avaliar as relações entre a actividade sísmo-vulcânica e os movimentos de vertente. No âmbito deste projecto foi instalada no Nordeste (ilha de S. Miguel) uma estação permanente GPS (RETINA, 2003).

Fernandes *et al.* (2004, 2006), com base em dados GPS obtidos no período de 1993 a 2002 nas várias estações distribuídas pelas nove ilhas do arquipélago, instaladas no âmbito do projecto TANGO confirma que a deformação imposta pelo movimento relativo entre as placas Eu e Nu concentra-se essencialmente ao longo de uma faixa litosférica relativamente pequena com orientação WNW-ESE, coincidente com o

alinhamento das ilhas, e geograficamente localizada entre as ilhas de Santa Maria e Graciosa. De acordo com o mesmo autor, o reprocessamento dos dados para o período de 1993-2002, mostra que a estação GPS localizada na ilha Graciosa, apresenta um comportamento solidário com o demonstrado pela placa Eu, enquanto que a informação proveniente da estação GPS localizada na ilha de Santa Maria sugere um movimento, em magnitude e direcção, próximo do definido para a placa da Nu de acordo com o definido pelos modelos de cinemática global (DEOS2K, Fernandes *et al.*, 2003; Nuvel-1A, DeMets *et al.*, 1994; e REVEL, Sella *et al.*, 2002). Todas as outras estações de observação GPS, localizadas nos grupos Central e Oriental do arquipélago, mostram um comportamento intermédio, sendo por isso consideradas como estando localizadas na zona de deformação activa interplacas. A estação da ilha do Corvo mostra um deslocamento consistente com as estimativas previstas pelos modelos tectónicos globais para a placa NA.

Em 1999 o Grupo de Monitorização Geodésica (GMG) do CVARG pôs em marcha um projecto de grande envergadura na ilha de S. Miguel, consistindo na implementação de uma rede geodésica para a aplicação da técnica GPS, designada por rede SMIG. Este teve como principal objectivo a caracterização e compreensão da cinemática das principais estruturas vulcano-tectónicas activas que afectam a ilha. Para o efeito, foram definidos dois tipos de redes, tendo em atenção o quadro vulcano-tectónico específico de cada sistema vulcânico existente na ilha: (1) uma rede do tipo I, para a dimensão da ilha; e (2) uma rede do tipo V para cada um dos sistemas vulcânicos activos (Trota, 2002). Foram levadas à cabo duas campanhas de aquisição de dados, denominadas por SMIG2000 e SMIG2002. O conjunto de coordenadas obtido contribuiu para traçar uma fiável época-zero de referência para futuros trabalhos (Trota, 2002).

No âmbito de um programa global de monitorização das áreas geotérmicas da Ribeira Grande (ilha de S. Miguel) e do Pico Alto (ilha Terceira), o CVARG estabeleceu em 2002 contractos, entre a Sociedade Geotérmica dos Açores (SOGEO) e a GEOTERCEIRA, respectivamente. De entre as actividades deste projecto incluiu-se a monitorização geodésica dos sistemas geotérmicos com recurso à técnica GPS. Em 2002, o GMG estabeleceu uma rede de monitorização geodésica para a ilha Terceira (rede TERA). Esta rede cobriu toda a superfície da ilha, sendo inicialmente constituída por 40 estações de observação GPS. No âmbito deste trabalho foram ainda instaladas estações de registo permanente na zona da Ribeirinha (S. Miguel) e uma outra em Vila Nova (Terceira), tendo-se efectuado campanhas periódicas de aquisição de dados, tanto na ilha de São Miguel como na ilha Terceira (Trota, 2008; Rodrigues, *et al.*, 2010a).

Em 2002, o GMG estabeleceu uma rede de controlo GPS na Graciosa (rede GRAC) que teve por base a materialização de marcas de apoio no solo, de forma a cobrir a totalidade da ilha, com o objectivo, numa primeira fase, de cálculo das coordenadas dos diversos pontos da rede (Rodrigues, 2005). Desta forma, pretendeu-se traçar uma fiável época-zero de referência para que, entre duas ou mais épocas distintas, se possa avaliar a magnitude, a orientação e a taxa de deformação dos sistemas vulcânicos existentes na ilha. Entre 2003 e 2005 foram realizadas duas campanhas de aquisição de dados GPS. Os dados adquiridos foram processados com *software Bernese 4.2* e estabeleceu-se uma metodologia de processamento adequada às características da rede em análise. Como resultado, Rodrigues (2005) considera este trabalho um ponto de partida para o estudo da deformação crustal na ilha Graciosa. Estabeleceu-se assim uma metodologia de processamento que vai ao encontro das características da rede em análise, definindo-se uma boa e fiável época-zero de referência para o estudo do sistema vulcano-tectónico da ilha Graciosa e permitindo uma avaliação preliminar do campo de velocidades para a ilha Graciosa.

Na continuidade dos trabalhos realizados pelo CVARG, Trota (2008), apresenta um padrão de deformação crustal para as ilhas de S. Miguel e Terceira. O trabalho do autor tem por base o processamento das observações GPS obtidas nas campanhas que decorreram em 2003, 2004, 2006 e 2007 naquelas ilhas. Da análise da informação adquirida o autor conclui que: (1) relativamente à componente vertical da deformação, ambas as ilhas mostram uma subsidência globalmente significativa, com um valor próximo de 1 cm/ano, com excepção para o fenómeno de inflacção observado na zona central da ilha de S. Miguel, na Zona do Fogo/Congro, designada por ZFC; (2) a análise da componente horizontal da deformação observada na ilha Terceira, embora de pequena magnitude, evidencia um regime actual de compressão. Na ilha de S. Miguel observa-se uma elevada deformação ocorrida na ZFC, a análise dos deslocamentos para os sectores W e NE da ilha de S. Miguel permitiu, para o período em análise, identificar um regime extensivo; (3) a informação geodésica obtida, assente num conjunto de dados GPS e de estação total, conjugada com dados de gravimetria, dados geoquímicos publicados e, principalmente, os dados de sismicidade, para o período compreendido entre Dezembro de 1999 e Setembro de 2007, para a região Fogo/Congro, sugere a ocorrência de uma provável intrusão magmática de natureza siliciosa; (4) a análise da implantação do corpo magmático quente, em conjunto com outros dados publicados, contribuiu ainda para atualização do Modelo Conceptual do Sistema Hidrotermal do Fogo; e (5) ainda tendo por base a análise dos dados de GPS, e considerando a geodinâmica da região, Trota (2008) sugere, para a ilha Terceira, um comportamento cinemático mais próximo do verificado para a placa Eu. No mesmo trabalho, o autor afirma a existência de um desfasamento entre as características de movimentação entre os dois

extremos da ilha de S. Miguel. Neste contexto, para a região W daquela ilha verifica-se a ocorrência de uma movimentação horizontal de características intermédias entre a placa Eu e Nu, a contrastar com o extremo E da ilha caracterizado por um comportamento cinemático análogo ao da placa Eu (Trota, 2008).

Em 2004 surge o projecto denominado por KARMA (Modelação cinemática e reológica da fronteira de placas Eu / Nu), este estudo pretendeu realizar observações geodésicas e geofísicas com a finalidade de determinar um modelo cinemático da fronteira de placas dos Açores e criar um modelo reológico da fronteira de placas Eu / Nu válido à escala do segmento. Neste projecto pretende-se utilizar os dados de estações permanentes de GPS, de InSAR e de gravimetria absoluta. As observações obtidas pelas técnicas referidas anteriormente, serão utilizadas no estudo da relação entre a escala regional dominada pela tectónica de placas, e a escala local dominada por processos tectónicos e magmáticos que originaram as ilhas. Este projecto aborda essencialmente a região mais activa em relação à tectónica de placas, ou seja, o grupo central (Terceira, Graciosa, S. Jorge, Pico e Faial). Em cada uma destas ilhas existe uma rede GPS densa, previamente instalada com fundos de outros projectos. Neste estudo está previsto a instalação de reflectores permanentes na ilha do Faial, que irão servir para o processamento interferométrico de imagens SAR, esses reflectores permitem a correlação entre dados GPS e os mapas de deformação InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar).

Ainda no âmbito da geodesia e trabalho desenvolvido pelo CVARG, Amaral (2005; 2010) desenvolveu um trabalho de modelação da estabilidade de taludes no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel). O objectivo passou, fundamentalmente, pela detecção e compreensão de pequenas movimentações do solo que indicassem instabilidade em áreas propícias para a ocorrência de movimentos de vertente. Neste sentido, foi estabelecido um programa de monitorização geodésica, com o recurso a uma Estação Total automática em duas zonas diferenciadas do concelho da Povoação (S. Miguel). Para a realização deste programa, foram implementadas duas redes geodésicas em dois locais com mecanismos de ruptura distintos. A rede instalada é constituída por 18 marcas para a medição com o recurso a uma Estação Total e/ou GPS. Os resultados obtidos neste trabalho através da utilização de modelos de base física permitiram: (1) deduzir uma explicação física para os processos de instabilidade, relacionada com a precipitação na área de estudo; (2) reconstituir os mecanismos condicionantes e desencadeantes do processo de instabilidade; e (3) “predizer” temporalmente e espacialmente a ocorrência de movimentos de vertente. Estes modelos 1D, pelo seu dinamismo e exactidão, mostram vantagens na sua aplicação revelando-se ser uma excelente ferramenta para a “previsão” de movimentos de vertente desencadeados pela precipitação, quer através da determinação analítica da resposta da carga hidráulica, quer através da

utilização de equipamentos de monitorização específicos (tensiómetros), podendo ser utilizados como base para a implementação de sistemas de alerta e alarme (Amaral, 2010).

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEODÉSIA ESPACIAL AO ESTUDO DOS SISTEMAS VULCANO-TECTÓNICOS E HIDROTERMAIS DO SEGMENTO DEFINIDO PELAS ILHAS TERCEIRA, SÃO JORGE E GRACIOSA