

JOANA PACHECO ELEUTÉRIO

**AVALIAÇÃO DE VARIAÇÕES SAZONAIS EM ZONAS DE
DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA NO VULCÃO DAS FURNAS:
IMPLICAÇÕES EM TERMOS DE MONITORIZAÇÃO
SISMOVULCÂNICA**



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES
2013

JOANA PACHECO ELEUTÉRIO

**AVALIAÇÃO DE VARIAÇÕES SAZONAIS EM ZONAS DE
DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA NO VULCÃO DAS FURNAS:
IMPLICAÇÕES EM TERMOS DE MONITORIZAÇÃO
SISMOVULCÂNICA**

TESE REALIZADA NO ÂMBITO DO MESTRADO EM VULCANOLOGIA E
RISCOS GEOLÓGICOS, DE ACORDO COM O DISPOSTO NO ARTº 15 DO
REGULAMENTO DA UNIVERSIDADE DOS AÇORES, PUBLICADO EM
DIÁRIO DA REPÚBLICA, II SÉRIE, Nº113, DE 13 DE JUNHO DE 2008.

ORIENTADORES:
PROFESSORA DOUTORA TERESA DE JESUS LOPES FERREIRA
DOUTORA MARIA DE FÁTIMA BATISTA VIVEIROS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES
2013

À minha família

ÍNDICE:

Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas	VII
Agradecimentos.....	IX
Resumo	XI
Abstract	XIV
 1. Introdução.....	 1
1.1. Gases vulcânicos	1
1.1.1. Riscos associados à libertação de CO ₂ em áreas vulcânicas	2
1.2. Tipos de desgaseificação.....	4
1.2.1. Desgaseificação focalizada	4
1.2.2. Desgaseificação difusa.....	5
1.3. Tipos de medição de CO ₂	5
1.3.1. Concentração de CO ₂	5
1.3.2. Fluxo de CO ₂	6
1.4. Influências metodológicas nos gases vulcânicos	10
 2. Caracterização da área de estudo	 17
2.1. Localização geográfica	17
2.2. Caracterização meteorológica	19
2.3. Enquadramento geológico	20
2.3.1. Geomorfologia	20
2.3.2. Tectónica	21
2.3.3. Vulcanoestratigrafia.....	22
2.3.3.1. Erupções vulcânicas históricas	22
2.4. Sismicidade	24
2.5. Zonas de desgaseificação	26
2.5.1. Desgaseificação focalizada.....	26
2.5.2. Desgaseificação difusa.....	28
2.6. Programa de monitorização sismovulcânica no Vulcão das Furnas	32
2.6.1. Monitorização geoquímica.....	32
2.6.2. Monitorização geofísica.....	34
2.6.3. Monitorização geodésica.....	34
 3. Metodologia e características do equipamento utilizado	 35
3.1. Amostragens regulares	35
3.1.1. Seleção e georreferenciação dos pontos de amostragem.....	35
3.1.2. Medição da temperatura do solo	36
3.1.3. Medição do fluxo de CO ₂	37

3.2. Amostragem contínua de fluxo de CO ₂	39
3.3. Problemas técnicos observados	41
4. Variações temporais de fluxo de CO ₂	42
4.1. Problemas técnicos observados	42
4.2. Resultados	44
4.2.1. Variações Mensais no Fluxo de CO ₂	44
4.2.2. Estatística descritiva estação permanente GFUR2	45
4.2.3. Estatística descritiva estação permanente GFUR3	47
4.2.4. Correlação entre as variações sazonais e o fluxo de CO ₂	49
4.2.4.1. Relação das variáveis meteorológicas com o fluxo de CO ₂ na estação permanente GFUR2	49
4.2.4.2. Relação das variáveis meteorológicas com o fluxo de CO ₂ na estação permanente GFUR3	51
4.3. Discussão	53
5. Variações espaciais de fluxo de CO ₂	59
5.1. Metodologia.....	59
5.1.1. Metodologia de campo	59
5.1.2. Tratamento de dados	62
5.2. Resultados	63
5.2.1. Estatística descritiva.....	63
5.2.2. Mapas de distribuição e variação do fluxo de CO ₂	66
5.2.3. Comparação com trabalhos anteriores	68
5.2.4. Mapas de distribuição e variação das temperaturas do solo	69
5.3. Discussão.....	73
6. Perfis regulares de monitorização de fluxo de CO ₂	76
6.1. Metodologia.....	76
6.1.1. Metodologia de campo	76
6.1.2 Tratamento dos dados.....	78
6.2. Resultados	79
6.2.1. Representação cartográfica do fluxo de CO ₂ dos pontos de amostragem....	79
6.2.2. Representação cartográfica da temperatura do solo dos pontos de amostragem.....	83
6.2.3. Análise dos dados	88
6.3. Discussão	98
Considerações Finais.....	101
Bibliografia.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1.1 – Diferentes tipos de desgaseificação (adaptado de Allard, 1996 <i>in</i> Marcos, 2006).	4
Figura 1.2 – Esquema da medição da concentração de CO ₂	6
Figura 1.3 – Esquema da medição do fluxo de CO ₂ pelo método dinâmico (adaptado de Carapezza e Granieri, 2004).	7
Figura 1.4 – Esquema da medição de fluxo de CO ₂ pelo método da câmara de acumulação (adaptado de Chiodini <i>et al.</i> , 1998).....	8
Figura 1.5 – Esquema da medição do fluxo de gás pela técnica da covariância de Eddy (adaptado de Burba e Anderson, 2010).	9
Figura 2.1 – Localização geográfica do arquipélago dos Açores.	17
Figura 2.2 – Localização dos principais sistemas vulcânicos activos da ilha de São Miguel: 1- Vulcão das Sete Cidades; 2 – Sistema Vulcânico Fissural dos Picos; 3 – Vulcão do Fogo; 4 – Planalto da Achada das Furnas e 5 – Vulcão das Furnas. (<i>In</i> Viveiros, 2010).....	18
Figura 2.3 – Esquema representativo da geomorfologia e tectónica do Vulcão das Furnas (adaptado de Gaspar <i>et al.</i> , 1995 <i>in</i> Sousa, 2003).	21
Figura 2.4 – Localização dos epicentros dos sismos históricos que afectaram o Vulcão das Furnas (CIVISA, 2009 <i>in</i> Medeiros, 2009).	24
Figura 2.5 – Localização epicentral dos sismos ocorridos entre 2002 e 2009 no Vulcão das Furnas e no Planalto da Achada das Furnas, segundo a base de dados do CVARG/CIVISA (<i>In</i> Viveiros, 2010).....	25
Figura 2.6 – Localização das nascentes, segundo Costa, 2006 e das emissões de vapor, segundo Viveiros, 2010, no Vulcão das Furnas.....	26
Figura 2.7 – Comparação da distribuição de CO ₂ no solo de Sousa (2003) e de Baubron <i>et al.</i> , (1994) (<i>In</i> Sousa, 2003).....	28
Figura 2.8 – Distribuição espacial de fluxo de CO ₂ no Vulcão das Furnas (<i>In</i> Viveiros <i>et al.</i> , 2012).....	29
Figura 2.9 – Distribuição espacial da concentração de ²²² Rn no solo (Silva, 2006).....	31
Figura 2.10 – Localização das estações de monitorização contínua de fluxo de CO ₂ no Vulcão das Furnas (<i>In</i> Viveiros, 2010).	33
Figura 3.1 – Material utilizado para georreferenciação dos pontos de amostragem.	36
Figura 3.2 – Material utilizado para medição da temperatura do solo.	36
Figura 3.3 – Estação portátil de medição de fluxo de CO ₂	37
Figura 3.4 – Estação permanente de fluxo de CO ₂ (Viveiros, 2003)	39

Figura 3.5 – Abrigo da estação de fluxo permanente GFUR2 com os sensores meteorológicos associados.	40
Figura 4.1 – Médias mensais dos valores de fluxo de CO ₂ registados nas estações permanentes GFUR2 e GFUR3 de Outubro de 2011 a Outubro de 2012. As linhas azul e vermelha correspondem às linhas de tendência das estações permanentes GFUR2 e GFUR3, respectivamente, obtida através do smooth dos dados, baseado no smoother de dados definido por Velleman (1980)	44
Figura 4.2 – Variação do fluxo de CO ₂ durante o período de estudo na estação permanente GFUR2. Na imagem estão identificados os períodos correspondentes à estação chuvosa (designados de Inverno) e à estação seca (Verão), de acordo com a divisão feita por Viveiros (2010).	45
Figura 4.3 – Variação do fluxo de CO ₂ durante o período de estudo na estação permanente GFUR2. Na imagem estão identificados os períodos correspondentes à estação chuvosa (designados de Inverno) e à estação seca (Verão), de acordo com a divisão feita por Viveiros (2010).	48
Figura 4.4 – Médias mensais dos valores de CO ₂ registados na estação GFUR2 de Janeiro de 2005 a Julho de 2012. A sombreado destacam-se os dados obtidos durante este trabalho. Os dados referentes ao período entre Janeiro de 2005 e Setembro de 2011 correspondem aos existentes no trabalho de Viveiros et al. (2012). A linha cinzenta corresponde à linha de tendência obtida através do smooth dos dados, baseado no smoother de dados definido por Velleman (1980).	53
Figura 4.5 – Médias mensais dos valores de CO ₂ registados na estação GFUR3 de Março de 2008 a Outubro de 2012. A sombreado destacam-se os dados obtidos durante este trabalho. Os dados referentes ao período entre Março de 2008 e Setembro de 2011 correspondem aos existentes no trabalho de Viveiros et al. (2012). A linha cinzenta corresponde à linha de tendência obtida através do smooth dos dados, baseado no smoother de dados definido por Velleman (1980).	54
Figura 4.6 – Precipitação acumulada mensalmente na estação permanente GFUR2. Devido à inexistência de dados na estação GFUR2 nos meses de Fevereiro de 2009 e de Agosto de 2012, os dados de precipitação para estes meses foram registados na estação de fluxo GFOG3, situada no Vulcão do Fogo, e comparado com os meses de Fevereiro de 2012 e de Agosto de 2009 na mesma estação.	55
Figura 4.7 – Valores de fluxo de CO ₂ observados, previstos e residuais na estação permanente GFUR2, após aplicação dos MRA de Viveiros (2010). A partir de Junho foram excluídos os valores de fluxo de CO ₂ previstos e residuais, devido a problemas técnicos em dois ou mais sensores simultaneamente.	58
Figura 4.8 – Valores de fluxo de CO ₂ observados, previstos e residuais na estação permanente GFUR3, após aplicação dos MRA de Viveiros (2010). Entre Junho e Julho foram excluídos os valores de fluxo de CO ₂ previstos e residuais, devido a problemas técnicos em dois ou mais sensores simultaneamente.	58
Figura 5.1 – Localização dos pontos amostrados.	60
Figura 5.2 – Variabilidade a) da humidade e da temperatura do solo; b) do fluxo de CO ₂ , da pressão barométrica, durante as diferentes campanhas realizadas no campo fumarólico da freguesia das Furnas.	61

Figura 5.3 – Média do fluxo de CO ₂ nas diferentes campanhas.....	63
Figura 5.4 – Média das temperaturas do solo nas diferentes campanhas.	64
Figura 5.5 - Correlação entre o fluxo de CO ₂ e a temperatura do solo a uma profundidade de 10 cm nos pontos amostrados.....	65
Figura 5.6 - Correlação entre o fluxo de CO ₂ e a temperatura da superfície do solo nos pontos amostrados.....	66
Figura 5.7 – Mapas de distribuição do fluxo de CO ₂ na área de estudo nas diferentes campanhas.	67
Figura 5.8 – Mapas de distribuição do fluxo de CO ₂ no Verão de 2008 e na Primavera de 2009 (dados provenientes de Viveiros, 2010).....	68
Figura 5.9 – Mapas de distribuição da temperatura do solo a 10 cm de profundidade na área de estudo nas diferentes campanhas.	71
Figura 5.10 – Mapas de distribuição da temperatura da superfície do solo na área de estudo nas diferentes campanhas.	72
Figura 6.1 – Localização dos pontos do perfil (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	77
Figura 6.2 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Fevereiro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m). ...	79
Figura 6.3 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Março de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	80
Figura 6.4 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Maio de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	80
Figura 6.5 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Junho de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	81
Figura 6.6 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Agosto de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).	81
Figura 6.7 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Setembro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m)... ..	82
Figura 6.8 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Novembro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m)... ..	82
Figura 6.9 – Representação cartográfica dos valores de fluxo de CO ₂ amostrados no mês de Dezembro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m)... ..	83
Figura 6.10 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Fevereiro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	84
Figura 6.11 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Março de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	84

Figura 6.12 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Maio de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	85
Figura 6.13 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Junho de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	85
Figura 6.14 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Agosto de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	86
Figura 6.15 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Setembro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	86
Figura 6.16 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Novembro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	87
Figura 6.17 – Representação cartográfica dos valores de temperatura da superfície do solo amostrados no mês de Dezembro de 2012 (As curvas de nível apresentam um espaçamento de 10 m).....	87
Figura 6.18 – Médias mensais do fluxo de CO ₂ nas diferentes campanhas.	88
Figura 6.19 – Variação do fluxo de CO ₂ nas diferentes campanhas. A sombreado, destacam-se os pontos correspondentes às estações permanentes de fluxo de CO ₂	89
Figura 6.20 – Médias mensais da temperatura do solo nas diferentes campanhas.....	90
Figura 6.21 – Variação da temperatura da superfície do solo nas diferentes campanhas. A sombreado destacam-se os pontos correspondentes às estações permanentes de fluxo de CO ₂	91
Figura 6.22 – Médias do fluxo de CO ₂ e da temperatura da superfície do solo de cada ponto amostrado. A sombreado destacam-se os pontos correspondentes às estações permanentes de fluxo de CO ₂	92
Figura 6.23 - Correlação entre o fluxo de CO ₂ e a temperatura da superfície do solo nos pontos amostrados, excepto os pontos correspondentes às estações permanentes, durante o período de estudo.	96
Figura 6.24 - Correlação entre o fluxo de CO ₂ e a temperatura da superfície do solo nos pontos amostrados, excepto o ponto P12 e os pontos correspondentes às estações permanentes, durante o período de estudo.	97
Figura 7.1 – Variações no fluxo de CO ₂ ao longo de todo o período de estudo nas diversas fases de trabalho. As linhas azul, vermelha e verde correspondem às linhas de tendência das estações permanentes GFUR2, GFUR3 e dos perfis, respectivamente, obtida através do smooth dos dados, baseado no smoother de dados definido por Velleman (1980).	106

ÍNDICE DE TABELAS:

Tabela 1.1 – Efeitos e limites de exposição médios para o CO ₂ considerando indivíduos adultos saudáveis (Modificada de Viveiros, 2003. Informação compilada com base em Le Guern <i>et al.</i> , 1982 <i>in</i> Ferreira, 2000; Wong, 1996; Gaspar <i>et al.</i> , 2000; Williams-Jones e Rymer, 2000; Beaubien <i>et al.</i> , 2003 <i>in</i> Viveiros, 2003).....	3
Tabela 1.2 – Relações entre os diferentes gases libertados pelo solo e parâmetros ambientais	11
Tabela 1.3 – Tipos de variações cíclicas observadas em gases libertados pelo solo.	15
Tabela 3.1 – Características dos sensores das estações permanentes de fluxo de CO ₂ GFUR2 e GFUR3. O sensor assinalado com (*) encontra-se na estação GFUR2 (<i>In</i> Viveiros, (2010)).	40
Tabela 4.1 – Períodos de tempo em que se verificaram problemas técnicos nas estações permanentes GFUR2 e GFUR3.	43
Tabela 4.2 – Estatística descritiva dos dados registados na estação GFUR2 durante o período compreendido entre 01-10-2011 e 22-07-2012. Legenda: D.P. – Desvio Padrão; C.V. – Coeficiente de Variação.	45
Tabela 4.3 – Estatística descritiva dos dados registados na estação GFUR2 durante o Inverno. Legenda: D.P. – Desvio Padrão; C.V. – Coeficiente de Variação.	46
Tabela 4.4 – Estatística descritiva dos dados da estação GFUR2 durante o Verão. Legenda: D.P. – Desvio Padrão; C.V. – Coeficiente de Variação.	46
Tabela 4.5 – Estatística descritiva dos dados registados na estação GFUR3 durante o período compreendido entre 01-10-2011 e 21-10-2012. Legenda: D.P. – Desvio Padrão; C.V. – Coeficiente de Variação.	47
Tabela 4.6 – Estatística descritiva dos dados da estação GFUR3 durante o Inverno. Legenda: D.P. – Desvio Padrão; C.V. – Coeficiente de Variação.	48
Tabela 4.7 – Estatística descritiva dos dados da estação GFUR3 durante o Verão. Legenda: D.P. – Desvio Padrão; C.V. – Coeficiente de Variação.	49
Tabela 4.8 – Correlação das variáveis meteorológicas monitorizadas com o fluxo de CO ₂ na estação permanente GFUR2.	51
Tabela 4.9 – Correlação de algumas variáveis meteorológicas com o fluxo de CO ₂ na estação permanente GFUR3. Legenda: N.D. – Não detectado, devido à existência de problemas técnicos.	52
Tabela 4.10 - Correlação entre o fluxo de CO ₂ registado nas estações permanentes GFUR2 e GFUR3 e as variáveis meteorológicas de acordo com Viveiros (2010).	57
Tabela 5.1 – Estatística descritiva das variáveis amostradas durante o período das campanhas.	62
Tabela 5.2 – Estatística descritiva dos dados de fluxo de CO ₂ das campanhas realizadas.	63

Tabela 5.3 – Estatística descritiva dos dados da temperatura do solo das campanhas realizadas.	64
Tabela 5.4 – Volume estimado de CO ₂ libertado durante as diferentes campanhas.....	69
Tabela 6.1 – Caracterização meteorológica dos dias de amostragem.	77
Tabela 6.2 – Estatística descritiva do fluxo de CO ₂ nos pontos amostrados. A sombreado realçam-se os valores superiores a 0,5.	93
Tabela 6.3 – Estatística descritiva da temperatura da superfície do solo nos pontos amostrados.....	94

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e ao contributo de várias pessoas e entidades, que directa ou indirectamente ajudaram na execução da dissertação. De uma forma muito especial gostaria de agradecer:

Ao Magnífico Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor Jorge Medeiros, pela autorização da realização do mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos;

À directora do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Professora Doutora Gabriela Queiroz, pelo total apoio e pela criação das condições necessárias à concretização do trabalho realizado;

À presidente da direcção do Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores, Professora Doutora Teresa Ferreira, igualmente pelo apoio e pelas condições necessárias para a realização deste do trabalho;

À minha orientadora, Professora Doutora Teresa Ferreira, pela disponibilidade, discussão, sugestões e partilha de conhecimentos que permitiram o enriquecimento deste trabalho;

À minha orientadora, Doutora Fátima Viveiros pela amizade, paciência, sugestões e partilha de conhecimentos ao longo de todo o trabalho;

À Catarina Silva, pela leitura de textos, sugestões e partilha de conhecimentos e pela sua amizade;

À Alessia Lisetti, ao Adelino Teixeira e ao Bruno Medeiros, pela colaboração na realização do trabalho de campo;

À Lucía Rodriguez, pelo seu incentivo na parte final da tese, leitura de textos, pela ajuda na formatação dos textos e principalmente pela sua amizade;

Ao Miguel Barreto e ao Andrea Capocci, pela leitura dos textos em inglês e pela amizade que demonstraram;

Aos colegas e amigos de mestrado, principalmente ao António Melo e à Irina Araújo, que acompanharam a realização desta tese, e também ao Carlos Primo, que muitas vezes me ajudou nas questões informáticas;

À Maria João Poim, pela sua amizade e pelo fornecimento de bibliografia para a realização do trabalho;

Ao grupo de SIG, Catarina Goulart e José Medeiros, pela disponibilidade na resolução de problemas e esclarecimento de dúvidas relacionados com programa Arcgis;

Ao Jun Okada e ao João Araújo, pela sua disponibilidade e ajuda nas questões relacionadas com a monitorização geodésica;

Aos professores do mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, pelos conhecimentos transmitidos;

Aos funcionários, colegas e amigos do CVARG/CIVISA, que sempre me incentivaram e ajudaram na realização da tese;

A todos os meus amigos, fora do CVARG/CIVISA, pela sua amizade e pelo seu constante incentivo;

À minha avó Eduarda, pelo seu apoio incondicional nos bons e mau momentos, pela paciência que teve comigo e pela coragem que deu nas alturas de desânimo;

À minha mãe Clotilde, que proporcionou os meus estudos para que eu conseguisse a minha formação académica e pelo seu apoio constante;

À minha madrinha Fátima, ao meu tio José, ao meu tio Manuel e à minha tia Maria dos Anjos (apesar dela já não se encontrar entre nós), que manifestaram interesse e sempre me apoiaram e incentivaram na realização deste trabalho;

À minha prima Carolina, que também me ajudou na parte da formatação da tese e pela sua compreensão nos momentos em que não a pude ajudar e acompanhar nos seus deveres escolares;

Ao Serviço Regional de Protecção Civil e Bombeiros dos Açores, que financiou este trabalho.

RESUMO

O Vulcão das Furnas é um dos três vulcões centrais activos da ilha de São Miguel e apresenta várias manifestações de vulcanismo secundário, nomeadamente campos fumarólicos, nascentes de águas termais e gasocarbónicas e ainda zonas de desgaseificação difusa através dos solos. Os principais gases libertados nas áreas de desgaseificação difusa são o CO_2 e o ^{222}Rn .

Vários estudos realizados em diversas áreas de desgaseificação têm demonstrado que, para além das propriedades físicas do solo, também as variáveis meteorológicas podem influenciar a emissão dos gases a partir dos solos, favorecendo ou inibindo a sua libertação. Alguns desses estudos identificaram variações sazonais e/ou diárias na emissão de CO_2 .

O presente trabalho pretende complementar os trabalhos realizados anteriormente no Vulcão das Furnas relacionados com a desgaseificação difusa de CO_2 , tendo como principal objectivo confirmar a existência de variações sazonais no fluxo de CO_2 . Deste modo, foram (1) analisados os dados temporais das duas estações permanentes de fluxo de CO_2 instaladas no Vulcão das Furnas, (2) realizadas quatro campanhas de detalhe no campo fumarólico da freguesia das Furnas e (3) efectuadas oito campanhas ao longo de um perfil definido entre a Lagoa das Furnas e a Ribeira dos Tambores.

Relativamente aos dados obtidos nas estações permanentes de fluxo de CO_2 no solo, os valores de fluxo de CO_2 na estação GFUR2 (localizada junto à lagoa das Furnas) variaram entre 39,4 e 511,0 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para o período entre Outubro de 2011 e Julho de 2012, e entre 46,9 e 783,9 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ na estação GFUR3 (posicionada no campo fumarólico da freguesia das Furnas) para o período entre Outubro de 2011 e Outubro de 2012. Observou-se que os valores médios de fluxo de CO_2 na estação GFUR2 são ligeiramente superiores durante os meses de Inverno (334 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) em comparação com os meses de Verão (321 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), enquanto que na estação GFUR3, apesar das variações mensais observadas no fluxo de CO_2 , não existem grandes variações quando se consideram as estações Inverno/Verão, apresentando valores médios semelhantes (aproximadamente 329 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para o Inverno e 330 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para o Verão). Foi também calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre o fluxo de CO_2 e as variáveis meteorológicas monitorizadas e verificou-se que não apresentam a mesma correlação ao longo dos vários meses e das estações do ano consideradas. Quando considerado o período inteiro de estudo, a velocidade do

vento é a variável que apresenta melhor correlação com o fluxo de CO₂ nas duas estações permanentes.

Nas campanhas de detalhe, realizadas em Janeiro, Maio, Agosto e Novembro de 2012 no campo fumarólico da freguesia das Furnas, foram amostrados 255 pontos por campanha, tendo-se medido os valores de fluxo de CO₂ e da temperatura do solo à superfície e a 10 cm de profundidade. Os valores de fluxo de CO₂ obtidos variaram desde valores nulos até 16 873,6 g m⁻² d⁻¹. Verificou-se que, de um modo geral, as campanhas realizadas nos meses de Inverno apresentaram valores médios relativamente mais elevados em comparação com os meses de Verão (472,9 e 519,9 g m⁻² d⁻¹ para os meses de Janeiro e de Novembro, respectivamente, e 405,3 e 430,1 g m⁻² d⁻¹ para os meses de Maio e de Agosto, respectivamente). A cartografia do fluxo de CO₂ permitiu identificar claramente uma zona de anomalia na área central de estudo que se mantém ao longo das várias campanhas, segundo uma orientação geral NW – SE e a NE, tal como observado em trabalhos anteriores. Constatou-se também que, de um modo geral, as zonas onde os valores de fluxo de CO₂ se encontravam dentro do limite de origem biogénica (> 25 g m⁻² d⁻¹, jardim/pastos) apresentavam um aumento no fluxo de CO₂ durante os meses de Verão e uma diminuição durante o Inverno, enquanto que as zonas onde o fluxo de CO₂ evidenciava uma origem hidrotermal (zona onde se localizam as fumarolas) apresentavam uma diminuição nos valores de fluxo de CO₂ durante o Verão e um aumento durante o Inverno. Todavia, a extensão das zonas anómalas é relativamente superior nos meses de Verão. Verificou-se que o fluxo de CO₂ apresenta uma correlação positiva quer com a temperatura do solo à superfície, quer em profundidade. Contudo, nota-se que a correlação do fluxo de CO₂ com a temperatura do solo à superfície é ligeiramente superior à correlação entre o fluxo de CO₂ e a temperatura do solo em profundidade. Em ambos os casos, o mês de Agosto apresenta a correlação entre as temperaturas do solo e o fluxo de CO₂ mais elevada e no mês de Maio a correlação menor.

Relativamente aos perfis de monitorização realizados entre Fevereiro e Dezembro de 2012, foram monitorizados 20 pontos ao longo de uma faixa localizada entre a Lagoa das Furnas e a Ribeira dos Tambores, estando também incluídos os pontos correspondentes às duas estações permanentes de fluxo de CO₂. Estes pontos abrangem áreas com e sem anomalias de fluxo de CO₂, anteriormente estudada por Viveiros (2010). Os valores de fluxo de CO₂ observados nos diversos pontos variaram entre 2,0 g m⁻² d⁻¹ e 1947,2 g m⁻² d⁻¹ ao longo das várias campanhas. Verificou-se que os valores médios das várias campanhas mostraram, de um modo geral, um aumento ao longo do período de estudo, apresentando no mês de Março a média de fluxo de

CO₂ mais baixa e no mês de Setembro a média mais elevada. Notou-se, também, que os pontos não se comportam todos de igual forma, sendo que uns tenderam a evidenciar aumento do fluxo de CO₂ nos meses de Verão, diminuindo nos meses de Inverno, outros permaneceram relativamente estáveis e outros ainda tenderam a aumentar ao longo das várias campanhas. Calculou-se igualmente o coeficiente de correlação entre o fluxo de CO₂ e a temperatura da superfície do solo e verificou-se que a correlação é sempre positiva, variando entre 23% e 97%, correspondendo ao mês de Março a correlação mais baixa e ao mês de Agosto a mais elevada.

De um modo geral, os dados registados na estação GFUR2 e os dados da cartografia das campanhas de detalhe indicam a possível existência de variações sazonais, registando-se valores relativamente mais elevados de fluxo de CO₂ durante os meses de Inverno em relação aos meses de Verão, à semelhança do que já foi observado em trabalhos anteriores. Em relação aos dados da estação GFUR3 e dos perfis de monitorização não se verificaram variações significativas entre os meses de Verão e os meses de Inverno.

ABSTRACT

Furnas Volcano is one of the three active central volcanoes of São Miguel Island and it shows various manifestations of secondary volcanism as fumarolic fields, thermal and cold CO₂-rich springs as well as soil diffuse degassing areas. CO₂ and ²²²Rn are the main gases released in the soil diffuse degassing zones.

Several studies in various degassing areas have shown that, in addition to the physical properties of soil, meteorological variables can also affect the emission of gases through the soils, favoring or inhibiting its release. Some of these studies have identified seasonal and/or diurnal variations in CO₂ emissions.

The present work pretends to complement soil CO₂ diffuse degassing works previously developed in Furnas Volcano and intends to confirm the existence of seasonal variations in the soil CO₂ fluxes. In order to reach this goal, (1) the temporal data of the two permanent CO₂ flux stations installed in Furnas Volcano were examined, (2) four detail campaigns in Furnas village fumarolic field were performed and (3) eight surveys of a defined profile between Furnas Lake and Ribeira dos Tambores were monitored.

Regarding the data obtained in the permanent soil CO₂ flux stations, the values of CO₂ flux in GFUR2 station (located close to Furnas Lake) varied between 39,4 and 511,0 g m⁻² d⁻¹ for the period between October 2011 and July 2012, and between 46,9 and 783,9 g m⁻² d⁻¹ in GFUR3 station (located in Furnas Village fumarolic ground) for the period between October 2011 and October 2012. It was observed that the average values of the CO₂ flux in GFUR2 station are slightly higher during the winter months (334 g m⁻² d⁻¹) compared to the summer period (321 g m⁻² d⁻¹), while in GFUR3 station, despite the monthly variations observed in the CO₂ flux, there are no major changes when considering the winter/summer seasons, displaying similar average values (approximately 329 g m⁻² d⁻¹ for winter and 330 g m⁻² d⁻¹ for summer). It was also calculated the Pearson correlation coefficient between the CO₂ flux and the meteorological variables monitored and it was verified that they do not have the same correlation over the months and seasons considered. When the entire study period is considered, the wind speed is the variable that shows the best correlation with the CO₂ flux in the two permanent stations.

In the detail campaigns, performed in January, May, August and November 2012 in Furnas village fumarolic field, 255 points were sampled per campaign, and in addition to soil CO₂ fluxes, soil temperatures at the surface and at 10 cm depth were also measured. The CO₂ flux values varied from null values to 16 873,6 g m⁻² d⁻¹. In

general, the campaigns performed during the winter months showed relatively higher values compared to the summer months (472,9 and 519,9 g m⁻² d⁻¹ for January and November, respectively, and 405,3 and 430,1 g m⁻² d⁻¹ for May and August, respectively). The mapping of the CO₂ flux allowed to clearly identify an anomalous zone in the central surveyed area that remains throughout the various campaigns, according to a general direction NW - SE and in the sector NE, similarly to the observed in previous studies. It was also observed that, in general, the areas where the values of CO₂ flux were within the limits of biogenic origin (> 25 g m⁻² d⁻¹, garden/pasture) showed an increase in the CO₂ flux during the summer months and a decrease during winter, while areas where the CO₂ flux revealed a hydrothermal origin (area where fumaroles are located) showed lower soil CO₂ flux values during summer and higher during the winter period. Even though these observations, the extent of spatial anomalous areas is relatively higher in the summer months. A positive correlation between soil CO₂ flux and soil temperature at the surface and at 10 cm depth is also observed, being the correlation between CO₂ flux and soil temperature at the surface slightly higher than the correlation between CO₂ flux and soil temperature at depth. In both cases, the highest correlation between the soil temperatures and the CO₂ flux are registered in August and the lowest correlation in May.

Regarding the monitoring profiles performed between February and December 2012, 20 fixed points along a track located between Furnas Lake and Ribeira dos Tambores were monitored, including also the points that correspond to the two permanent CO₂ flux stations. These points cover areas with and without CO₂ flux anomalies, previously studied by Viveiros (2010). The values of CO₂ flux observed at various points oscillated from 2,0 g m⁻² d⁻¹ to 1947,2 g m⁻² d⁻¹ during the various campaigns. The average values of several campaigns showed a general increase during the time period, with the lowest CO₂ flux averages being registered in March and the highest averages in September. The points do not behave in the same way in all the monitoring sites, since some of them tend to show an increase of CO₂ flux in the summer months, decreasing during the winter months, others remained relatively stable and others tended to increase during the various campaigns. The correlation coefficient between the CO₂ flux and the soil temperature at the surface was also calculated and it was observed that the correlation is always positive, varying between 23% and 97%, corresponding to March the lowest correlation and to August the highest correlation.

In general, the data acquired in GFUR2 station and the data of the detailed spatial surveys indicate the possible existence of seasonal variations, registering

relatively higher values of CO₂ flux during the winter months compared to the summer months, as observed in previous works. Regarding the data of GFUR3 station and the monitoring profiles, no significant variations were verified between the summer months and the winter months.

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve explicação sobre os gases vulcânicos, bem como caracterizar os diferentes tipos de desgaseificação, em particular a desgaseificação difusa e os métodos de medição de CO₂. Para além disso, discriminam-se igualmente os parâmetros meteorológicos que, de alguma forma, podem influenciar os processos de desgaseificação, assim como a forma que essa influência é exercida.

1.1. GASES VULCÂNICOS

Nas últimas décadas, o estudo dos gases vulcânicos tem sido considerado um instrumento cada vez mais importante e necessário na monitorização de vulcões. De facto, durante a subida do magma até à superfície, o processo de exsolução dos componentes mais voláteis constituem a força motriz das erupções vulcânicas (Allard, 1996). Um programa de monitorização contínua da composição dos gases emitidos num determinado sistema vulcânico permite definir uma linha de base e, esta informação integrada com outros tipos de monitorização (geofísica, geodesia), poderá dar indicações sobre eventuais alterações que se verifiquem em profundidade (Bruno *et al.*, 2001; Delmelle e Stix, 2000; Stix e Gaonac'h, 2000).

Relativamente à composição química, os gases vulcânicos contêm um número restrito de elementos químicos que formam vários compostos moleculares. Os elementos maiores são essencialmente o hidrogénio (H), o carbono (C), o oxigénio (O), o enxofre (S), o azoto (N), e alguns halogéneos como o cloro (Cl), o flúor (F) e o bromo (Br). Os gases raros como o hélio (He), o néon (Ne), o argón (Ar), o cripton (Kr) e o xénon (Xe) constituem os elementos menores. Vestígios de metais, tais como o sódio (Na), o vanádio (V), o crómio (Cr), o bismuto (Bi), o cobre (Cu), o zinco (Zn) e o ouro (Au), ocorrem geralmente associados a fumarolas de elevada temperatura. No que se refere aos compostos originados por estes elementos, os mais predominantes são a água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o sulfureto de hidrogénio (H₂S), o hidrogénio molecular (H₂), o azoto molecular (N₂), o metano (CH₄), o oxigénio (O₂), o dióxido de enxofre (SO₂), o ácido fluorídrico (HF), o ácido clorídrico (HCl), o ião sulfato (SO₄²⁻), e a amónia (NH₃) (Allard, 1996; Delmelle e Stix, 2000; Stix e Gaonac'h, 2000).

A composição dos gases vulcânicos é controlada pelas diferenças de solubilidade destes componentes no magma e pelas condições de pressão e temperatura. Assim, por ordem ascendente de solubilidade e de acordo com estas condições, os primeiros componentes a serem libertados são o CO₂, o Ar e o He,

seguindo-se o H₂, o SO₂, a H₂O e por fim o HCl e o HF (Allard, 1996; Delmelle e Stix, 2000).

Por outro lado, durante a ascensão do magma, a fase gasosa pode ser enriquecida pela adição de outros tipos e quantidades de gases em resposta aos reequilíbrios que os componentes vão sofrendo, resultante da interacção com os sistemas circundantes como as rochas encaixantes, a água meteórica ou os sistemas hidrotermais, ou ainda interacções entre a biosfera/atmosfera (Allard, 1996; Ferreira, 1994; Stix e Gaonac'h, 2000).

1.1.1. Riscos Associados à Libertação de CO₂ em Áreas Vulcânicas

O CO₂ é um dos componentes mais abundantes dissolvidos no magma e devido à sua baixa solubilidade é um dos primeiros gases a ser exsolvido e libertado durante a ascensão do magma (Allard, 1996). Mesmo em períodos de repouso de actividade vulcânica, a libertação de CO₂ pode constituir uma ameaça para a saúde pública e para o meio ambiente local (Baubron *et al.*, 1994; Baxter *et al.*, 1999; Beaubien *et al.*, 2003; Carapezza *et al.*, 2003; 2011; Williams – Jones e Rymer, 2000).

Este gás é incolor e inodoro e como é mais denso do que o ar (a temperatura e pressão ambiente) tende a acumular-se em depressões e zonas pouco ventiladas podendo provocar sintomas como vómitos, tonturas, visão turva quando atinge concentrações elevadas (Weinstein e Cook, 2005; Williams-Jones e Rymer, 2000). Por ser um gás asfixiante, o CO₂ pode ocupar facilmente a posição do oxigénio nas trocas gasosas a nível pulmonar, podendo tornar-se extremamente perigoso, conduzindo rapidamente quer à inconsciência quer à morte por asfixia em concentrações superiores a 12%vol. (Baubron *et al.*, 1994; Beaubien *et al.*, 2003; Weinstein e Cook, 2005; Williams – Jones e Rymer, 2000). Na tabela 1.1 estão indicados os limites de exposição ao CO₂ e os sintomas que se podem sentir quando os indivíduos se encontram expostos a diferentes níveis de concentração de CO₂ no ar.

Tabela 1.1 – Efeitos e limites de exposição médios para o CO₂ considerando indivíduos adultos saudáveis (Modificada de Viveiros, 2003. Informação compilada com base em Le Guern *et al.*, 1982 in Ferreira, 2000; Wong, 1996; Gaspar *et al.*, 2000; Williams-Jones e Rymer, 2000; Beaubien *et al.*, 2003 in Viveiros, 2003).

Concentração (%)	Tempo de Exposição	Efeitos	Observações
0,038			Ar Atmosférico
0,5	8h diárias em ambiente de trabalho		Limite de exposição admissível (PEL-Permissible Exposure Limit)
0,5 - 3,0	Algumas horas	Dificuldade em respirar	
		Aumento do ritmo cardíaco	
		Dores de cabeça	
3,0	Até 15 minutos		Limite de exposição para um curto período (STEL-Short-Term Exposure Limits)
	Mais do que 15 minutos	100% Aceleração da respiração	
		Dores de cabeça	
5,0		Fraqueza muscular	
		300% Aceleração da respiração	
		Dores de cabeça	
		Fraqueza muscular	
		Depressão nervosa	
		Vômitos	
		Tonturas	
		Ruídos nos ouvidos	
10,0	Alguns minutos	Sonolência	
		Inconsciência (recuperação rápida dos indivíduos quando colocados em ambiente ventilado)	
Mais do que 12,0		Rápida inconsciência	
		Morte	

Para além do impacto que o CO₂ pode ter em seres vivos, é também um dos gases mais importantes e responsável pelo fenómeno do efeito de estufa e, consequentemente, pelo aquecimento global (Florides e Christodoulides, 2009; Williams – Jones e Rymer, 2000). Embora se verifique uma grande emissão de CO₂ para a atmosfera em áreas vulcânicas activas, a principal emissão de CO₂ para a atmosfera é de origem antropogénica (Friedlingstein *et al.*, 2010; Granados *et al.*, 2012).

Contudo, continuam a existir inúmeras áreas vulcânicas onde a emissão de CO₂ para a atmosfera não tem sido contabilizada (Burton *et al.*, 2013).

1.2. TIPOS DE DESGASEIFICAÇÃO

As espécies gasosas que se encontram no magma são libertadas para a atmosfera não só nos períodos de actividade vulcânica, mas também nos períodos de repouso (Chiodini *et al.*, 1998; Delmelle e Stix, 2000). Os gases vulcânicos podem ocorrer à superfície de forma focalizada e visível, como é o caso das plumas eruptivas, das fumarolas e das bolhas em lagos de lava, ou de forma difusa e imperceptível, como a difusão através dos solos (Stix e Gaonac'h, 2000).

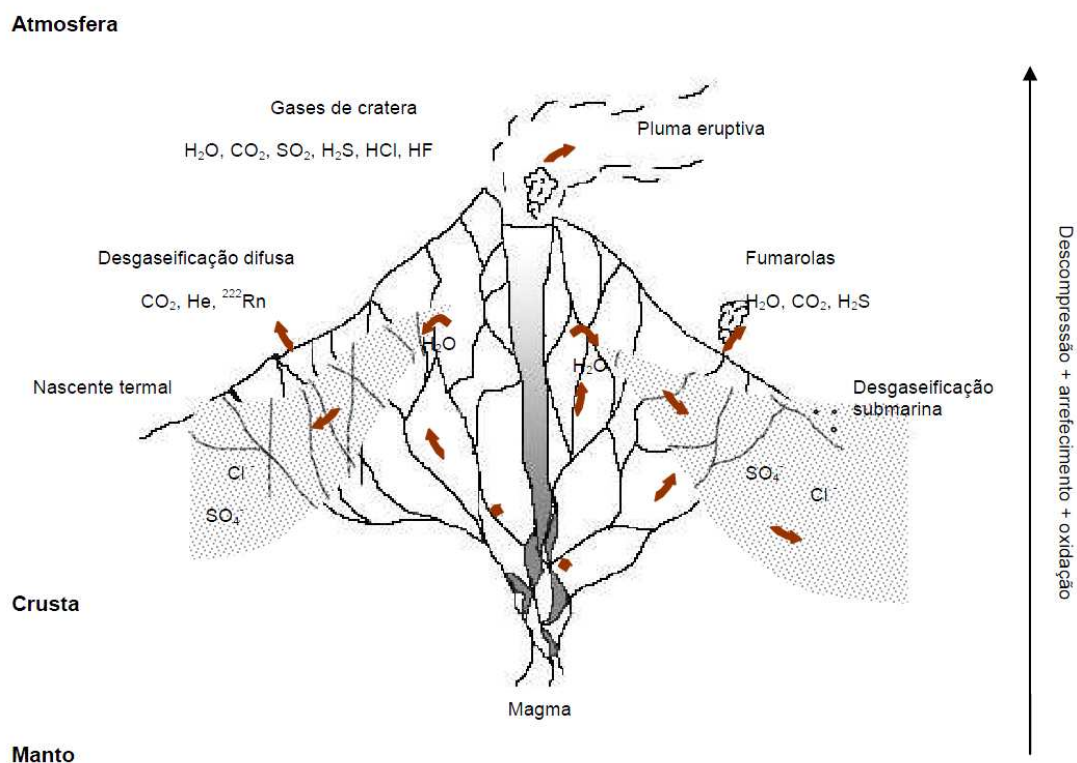


Figura 1.1 – Diferentes tipos de desgaseificação (adaptado de Allard, 1996 *in* Marcos, 2006).

1.2.1. Desgaseificação Focalizada

Quando a emissão de gás ocorre numa área bem definida é designada desgaseificação focalizada. Este tipo de emanações é geralmente observado em crateras de vulcões activos (plumas eruptivas) e estão-lhe normalmente associados gases de natureza ácida como o SO_2 , o HCl e o HF (Allard, 1996; Stix e Gaonac'h, 2000).

As fumarolas são, igualmente, outro exemplo de desgaseificação focalizada e podem ser classificadas como fumarolas de elevada ou de baixa temperatura. A composição química destes dois tipos de fumarolas é significativamente diferente. As fumarolas de baixa temperatura estão associadas à presença de sistemas

hidrotermais e são caracterizadas por serem ricas em CO_2 , pobres em HCl e apresentarem uma baixa razão $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$. Nestas emissões de baixa temperatura também surge frequentemente o metano (CH_4), sendo-lhe atribuída uma origem hidrotermal (Delmelle e Stix, 2000).

1.2.2. Desgaseificação Difusa

Quando a desgaseificação não é observada directamente e ocorrem de forma contínua através da superfície dos vulcões, dá-se o nome de desgaseificação difusa. Este tipo de emanção ocorre principalmente em zonas de falhas ou fracturas, uma vez que os gases conseguem percolar pelos poros existentes no edifício vulcânico e assim atingir mais facilmente a superfície. Estes gases podem também encontrar-se dissolvidos em águas de nascentes termais e em águas gasocarbónicas (Allard, 1996; Bruno *et al.*, 2001; Delmelle e Stix, 2000). Este tipo de emissão é geralmente de baixas temperaturas e está associado a elementos não reactivos como o CO_2 , o He e o Rn (Delmelle e Stix, 2000). Contudo, a libertação destes gases através dos solos pode, por vezes, ser acompanhada de anomalias térmicas que se desenvolvem como resposta à circulação de gases magmáticos, calor e água (*e.g.* Finizola *et al.*, 2003; Marcos, 2006).

1.3. TIPOS DE MEDIÇÃO DE CO_2

As emanções de CO_2 no solo podem ser medidas através de dois métodos: a medição da concentração e a determinação do fluxo, também designado por efluxo. No que se refere à determinação do fluxo de CO_2 , têm-se desenvolvido e aperfeiçoado diversas metodologias ao longo dos tempos.

1.3.1. Concentração de CO_2

A medição da concentração de CO_2 consiste na recolha de amostras de gás existente no solo, com o auxílio de uma sonda que é introduzida a uma determinada profundidade no solo e analisados por cromatografia (*e.g.* Allard *et al.*, 1991; Hinkle, 1990; Hinkle e Harms, 1992; Hernández *et al.*, 2000). No caso dos Açores, o gás é medido através de um analisador com detector de infravermelhos (*e.g.* Baubron *et al.*, 1994; Ferreira e Gaspar, 1997; Sousa, 2003; Marcos, 2006).

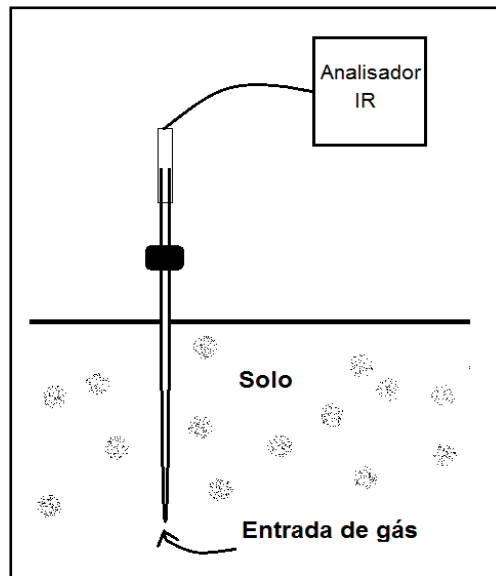


Figura 1.2 – Esquema da medição da concentração de CO₂.

1.3.2. Fluxo de CO₂

Relativamente à determinação do fluxo de CO₂, conhecem-se diversas metodologias, que se subdividem em métodos directos e indirectos (Chiodini *et al.*, 1998).

A medição do fluxo de CO₂ através do método indirecto baseia-se na medição da concentração de CO₂ a diferentes profundidades. Neste caso, os valores de fluxo são calculados de acordo com um modelo unidimensional de transporte de gás num meio poroso homogéneo (Lei de Fick). Contudo, a utilização deste método é muito limitada, uma vez que para se calcular a concentração de CO₂ é necessário ter em conta as propriedades do solo e o coeficiente de difusão do gás (Camarda *et al.*, 2006; Chiodini, *et al.*, 1998; Baubron *et al.*, 1990 *in* Camarda, 2004).

A determinação do fluxo de gás a partir do método directo pode ser ainda efectuada através de procedimentos dinâmicos ou estáticos. Relativamente aos procedimentos dinâmicos, estes consistem na medição da concentração de CO₂ no solo e no ar atmosférico recorrendo-se para isso, a uma sonda, à qual está associada uma bomba de aspiração, e que é colocada no solo a uma determinada profundidade (Fig. 1.3).

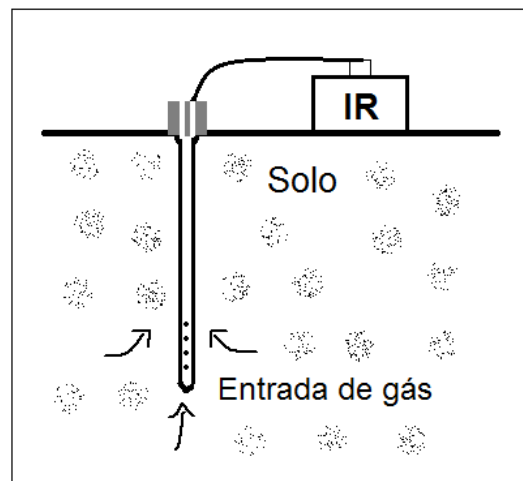


Figura 1.3 – Esquema da medição do fluxo de CO_2 pelo método dinâmico (adaptado de Carapezza e Granieri, 2004).

Após um determinado tempo, a concentração de CO_2 da amostra atinge um valor constante, denominado “concentração dinâmica”, e que é proporcional à concentração de CO_2 no solo (Gurrieri e Valenza, 1988 *in* Camarda *et al.*, 2006). O fluxo através do solo, designado como fluxo dinâmico, é calculado com recurso a uma função que envolve a concentração medida, a taxa de aspiração, uma constante empírica dependente das características do aparelho, a permeabilidade do solo e o próprio fluxo imposto (Gurrieri e Valenza, 1988 *in* Giammanco *et al.*, 1998).

No que diz respeito aos procedimentos estáticos existem diversas técnicas. Uma das técnicas é a medição do fluxo de CO_2 utilizando soluções alcalinas para absorver o CO_2 que é libertado pelo solo para um recipiente fechado (Chiodini *et al.*, 1998). Porém, a técnica mais utilizada é o método da câmara de acumulação ou câmara fechada e consiste na determinação da taxa de aumento da concentração de CO_2 dentro de uma câmara invertida colocada na superfície do solo (Chiodini *et al.*, 1998). O gás existente na câmara de acumulação é continuamente aspirado por uma bomba e enviado para um detector de infravermelhos (IR) sendo depois novamente injectado na câmara (Fig. 1.4). Os valores da concentração de CO_2 são adquiridos por um conversor analógico-digital e determinados os valores de fluxo a partir do declive da recta de incremento da concentração de CO_2 (Chiodini *et al.*, 1998; Carapezza e Granieri, 2004).

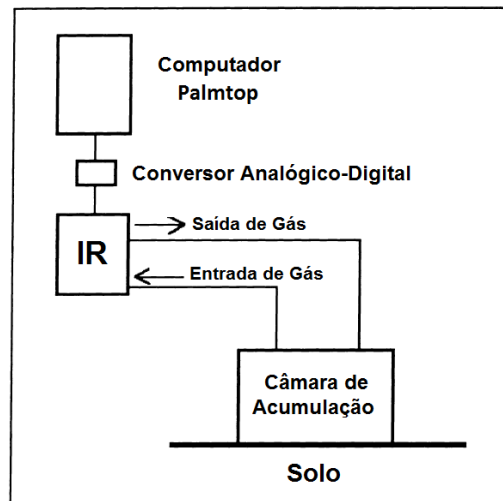


Figura 1.4 – Esquema da medição de fluxo de CO₂ pelo método da câmara de acumulação (adaptado de Chiodini *et al.*, 1998).

Tonani e Miele (1991 *in* Chiodini *et al.*, 1998) observaram que o método da câmara de acumulação ou “profundidade zero no tempo zero” é a melhor forma de medir o fluxo de CO₂ em regiões vulcânicas e geotérmicas, por ser um método absoluto que não requer nem suposições, nem correlações que dependam das características do solo. Este método é simples e rápido, porém, é necessário ter certos cuidados, uma vez que o posicionamento da câmara no solo pode perturbar o fluxo afetando a pressão do ar ou a velocidade do vento dentro da câmara e causando uma acumulação de vapor de água na câmara de acumulação (Welles *et al.*, 2001).

Recentemente, a técnica micrometeorológica, conhecida por covariância de Eddy, tem também sido nas medições de fluxo de CO₂ em ambientes vulcânicos (Lewicki *et al.*, 2008, 2009, 2012a, 2012b; Lewicki e Hilley, 2009, 2012). Este método tem a vantagem de realizar medições sem provocar alterações nas emissões do sistema e consegue abranger uma área mais alargada (Fig. 1.5) (Welles *et al.*, 2001; Werner *et al.*, 2000, 2003, 2006).

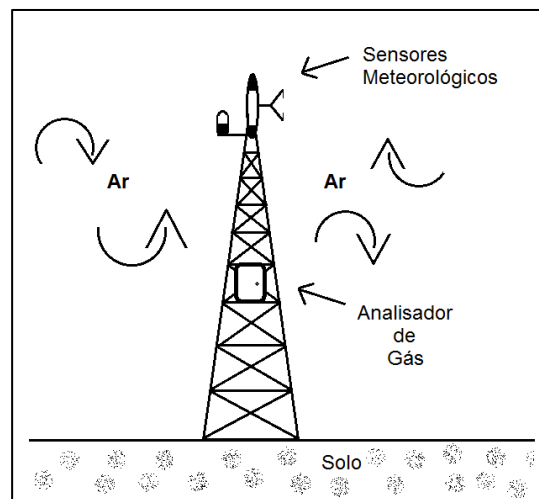


Figura 1.5 – Esquema da medição do fluxo de gás pela técnica da covariância de Eddy (adaptado de Burba e Anderson, 2010).

A utilização desta técnica permite obter informação sobre o fluxo proveniente de fumarolas e possibilitar a detecção de variações a grande escala nos sistemas vulcânicos. Contudo, também existem limitações à utilização desta técnica, pois, por exemplo, a área de estudo deve ter um declive inferior a 15%; a direcção do vento ser constante e a torre de medição estar situada a aproximadamente 150 – 200 metros da área de desgaseificação. Adicionalmente, outra limitação a esta técnica é a ausência de dados em períodos de baixa turbulência (Werner *et al.*, 2003).

1.4. INFLUÊNCIAS METEOROLÓGICAS NOS GASES VULCÂNICOS

Estudos realizados em diferentes áreas de desgaseificação mostraram que, para além das propriedades físicas do solo (e.g. porosidade, permeabilidade), as variáveis meteorológicas, como a precipitação, a temperatura do solo e do ar, a pressão barométrica, a velocidade e a direcção do vento, a neve e a humidade do solo podem também influenciar fortemente a emissão dos gases vulcânicos a partir dos solos, favorecendo ou inibindo a sua libertação (e.g. Chiodini *et al.*, 1998; Climent *et al.*, 1999; Granieri *et al.*, 2003; Hinkle, 1994; Toutain *et al.*, 1992; Winkler *et al.*, 2001).

Estas variáveis meteorológicas são responsáveis por grande parte da variabilidade do fluxo de gases (e.g. Lewicki *et al.*, 2007; Rogie *et al.*, 2001; Viveiros *et al.*, 2008). De facto, alguns estudos verificaram através de métodos estatísticos que as variáveis meteorológicas podem explicar até cerca de 50% das oscilações no fluxo de CO₂ verificadas em pontos permanentes (e.g. Granieri *et al.*, 2010; Viveiros *et al.*, 2008). Alguns autores (Giammanco *et al.*, 1995; Granieri *et al.*, 2003, 2010; Viveiros *et al.*, 2008; Viveiros, 2010) observaram ainda, que as mesmas variáveis meteorológicas podem influenciar de modo diferente a libertação dos gases, nomeadamente o CO₂, consoante o local onde é realizada a monitorização.

Por outro lado, alguns estudos desenvolvidos nesta temática também observaram que uma variável por si só pode influenciar pouco o fluxo de CO₂, mas que quando combinada com outra ou outras variáveis, essa influência pode ser muito maior (e.g. Granieri *et al.*, 2003, 2010). Por exemplo, Granieri *et al.* (2010) verificou que a humidade do solo influenciava cerca de 19% as variações de fluxo de CO₂ na estação FLXOV1 em La Solfatara, mas que quando combinada com a velocidade do vento essa influência passava para aproximadamente 37%.

Considerando a importância de compreender o tipo de influência que as variáveis ambientais podem ter nas variações de gases vulcânicos e numa tentativa de sistematizar os resultados obtidos por diversos autores, na tabela 1.2 estão descritas as correlações observadas entre diferentes gases estudados e as variáveis meteorológicas que influenciam a sua libertação.

Tabela 1.2 – Relações entre os diferentes gases libertados pelo solo e parâmetros ambientais.

Autores	Gases	Tipo de Medição	Parâmetro	Relação	Local
Toutain <i>et al.</i> , 1992	CO ₂ ; He; Rn	Concentração	Marés	Positiva	Vulcão Vulcano (Itália)
			Pressão barométrica	Negativa	
Hinkle, 1994	He; CO ₂ ; O ₂ ; N ₂	Concentração	Pressão barométrica	Negativa	Local semi-árido não mineralizado, Arvada, Colorado (EUA)
			Temperatura do ar	Positiva	
			Temperatura do solo	Positiva	
			Precipitação ou neve	Negativa	Vulcão Kilauea, Hawai (EUA)
Giammanco <i>et al.</i> , 1995	CO ₂	Fluxo	Temperatura do ar	Positiva	Zafferana Etnea-Santa Venerina, Vulcão Etna (Itália)
			Pressão barométrica	Negativa	Paternò, Vulcão Etna (Itália)
			Temperatura do ar	Positiva	
Chiodini <i>et al.</i> , 1998	CO ₂	Fluxo	Pressão barométrica	Negativa	Grotta dei Palizzi, Vulcão Vulcano (Itália)
McGee e Gerlach, 1998	CO ₂	Concentração	Neve	Positiva	Horseshoe Lake, Mammoth Mountain, Califórnia (EUA)
Climent <i>et al.</i> , 1999	Rn	Concentração	Temperatura do solo	Negativa	Região de Kanto (Japão)
			Temperatura do ar	Negativa	
			Pressão barométrica	Negativa	
			Precipitação	Positiva	
			Humidade do solo	Positiva	
Rogie <i>et al.</i> , 2001	CO ₂	Fluxo	Pressão barométrica	Negativa	Mammoth Mountain, Califórnia (EUA)
			Velocidade do vento	Positiva	

Tabela 1.2 – Relações entre os diferentes gases libertados pelo solo e parâmetros ambientais
(Continuação).

Autores	Gases	Tipo de Medição	Parâmetro	Relação	Local
Winkler <i>et al.</i> , 2001	Rn	Concentração	Direcção do vento	Maior concentração a N e a S	GSF National Research Center for Environment and Health, Munique-Neuherberg (Alemanha)
			Velocidade do vento	Negativa	
			Precipitação	Negativa	
Granieri <i>et al.</i> , 2003	CO ₂	Fluxo	Pressão barométrica	Negativa	Vulcão La Solfatara (Itália)
			Precipitação	Negativa	Vulcão Vesuvio (Itália)
			Pressão barométrica	Negativa	
Lewicki <i>et al.</i> , 2007	CO ₂	Fluxo	Pressão barométrica	Positiva	Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, Califórnia (EUA)
			Velocidade do vento	Negativa	
Viveiros <i>et al.</i> , 2008	CO ₂	Fluxo	Temperatura do solo	Negativa	Vulcão do Fogo, São Miguel (Portugal)
			Humidade do solo	Positiva	
			Precipitação	Positiva até 13 mm/h	
				Negativa se superior a 13 mm/h	
			Temperatura do ar	Negativa	
			Velocidade do vento	Negativa	
Granieri <i>et al.</i> , 2010	CO ₂	Fluxo	Humidade do solo	Positiva	Vulcão La Solfatara (Itália)
			Temperatura do ar	Positiva	
			Precipitação	Positiva	

Tabela 1.2 – Relações entre os diferentes gases libertados pelo solo e parâmetros ambientais
(Continuação).

Autores	Gases	Tipo de Medição	Parâmetro	Relação	Local
Viveiros, 2010	CO ₂	Fluxo	Humidade do solo	Positiva	Junto ao campo fumarólico da freguesia das Furnas, São Miguel (Portugal)
			Temperatura do solo	Negativa	
			Pressão barométrica	Negativa	
			Precipitação	Positiva até 23 mm/h	
				Negativa se superior a 23 mm/h	
			Humidade do solo	Positiva até 21%	Junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas, São Miguel (Portugal)
				Negativa se superior a 21%	
			Temperatura do solo	Positiva	
			Pressão barométrica	Positiva	
			Temperatura do ar	Negativa	
			Velocidade do vento	Negativa	
			Precipitação	Negativa	
			Temperatura do solo	Positiva	Campo fumarólico da freguesia das Furnas, São Miguel (Portugal)
			Pressão barométrica	Negativa	
			Temperatura do ar	Negativa	
			Velocidade do vento	Negativa	
			Humidade do solo	Positiva	
Hernández <i>et al.</i> , 2012	CO ₂	Fluxo	Pressão barométrica	Negativa	Vulcão Timanfaya, Lanzarote (Espanha)
			Precipitação	Positiva	

As variáveis meteorológicas podem, igualmente, influenciar a concentração e o fluxo dos gases quer sazonalmente (*e.g.* Giammanco *et al.*, 1995; Granieri *et al.*, 2003; 2010; Hernández *et al.*, 2012; McGee e Gerlach, 1998; Viveiros *et al.*, 2008), quer diariamente (*e.g.* Hinkle, 1994; McGee *et al.*, 2000; Rogie *et al.*, 2001; Toutain *et al.*,

1992; Viveiros, 2010), embora as variações cíclicas diárias sejam menores que as variações sazonais (Hinkle, 1994).

As variações diárias que se verificam na concentração e no fluxo de CO₂ são controladas essencialmente pelas oscilações da pressão barométrica e da temperatura do ar que ocorrem durante o dia (e.g. Granieri *et al.*, 2003; Hernández *et al.*, 2012; McGee *et al.*, 2000; Rinaldi *et al.*, 2012; Rogie *et al.*, 2001; Viveiros, 2010), enquanto que as variações sazonais que se verificam estão relacionadas não só com a estabilidade das condições meteorológicas, mas também com a precipitação e a pressão barométrica, que são variáveis meteorológicas indicativas das variações sazonais.

Na tabela 1.3 estão sintetizadas o tipo de variações observadas por alguns autores e o modo como essas variações ocorrem ao longo do tempo.

Tabela 1.3 – Tipos de variações cíclicas observadas em gases libertados pelo solo.

Autores	Tipo de Variação	Descrição da Variação	Local
Hinkle, 1994	Sazonal	Maior concentração de CO₂ no Verão Menor concentração de CO₂ no Inverno	Local semi-árido não mineralizado, Arvada, Colorado (EUA)
Winkler <i>et al.</i> , 2001	Diária	Maior concentração de ²²²Rn durante a noite/madrugada Menor concentração de ²²²Rn durante a tarde	GSF National Research Center for Environment and Health, Munique-Neuherberg (Alemanha)
	Sazonal	Maior concentração de ²²²Rn no Outono Menor concentração de ²²²Rn na Primavera	
Viveiros <i>et al.</i> , 2008	Sazonal	Maior fluxo de CO₂ no Inverno Menor fluxo de CO₂ no Verão	Vulcão do Fogo, São Miguel (Portugal)
Granieri <i>et al.</i> , 2010	Sazonal	Maior fluxo de CO₂ no Inverno Menor fluxo de CO₂ no Verão	Vulcão La Solfatara (Itália)
Viveiros, 2010	Sazonal	Maior fluxo de CO₂ no Inverno Menor fluxo de CO₂ no Verão	Vulcão das Furnas, São Miguel (Portugal)
	Diária	Fluxo mais elevado durante a manhã Valores menores de fluxo durante a tarde	
Hernández <i>et al.</i> , 2012	Sazonal	Maior fluxo de CO₂ no Inverno Menor fluxo de CO₂ no Verão	Vulcão Timanfaya, Lanzarote (Espanha)

Recentemente, estudos realizados mostraram que os parâmetros meteorológicos controlam não só processos superficiais, como a emissão de gases vulcânicos, mas também fenómenos profundos, mesmo que ainda persistam algumas dúvidas sobre estes mesmos processos. Durante a erupção do vulcão Stromboli (Itália) em 2007, Patanè *et al.* (2007) observaram que alguns parâmetros meteorológicos, como a baixa pressão barométrica e a elevada velocidade do vento coincidiam com o aumento do tremor vulcânico. Nos últimos anos foram detectados no Vulcão do Fogo (Açores), alguns efeitos sazonais no padrão de velocidade das ondas sísmicas. Verificou-se que durante os meses de Inverno a velocidade das ondas sísmicas é mais baixa do que nos meses de Verão, mostrando uma boa correlação com a precipitação (Martini *et al.*, 2009).

Deste modo, salienta-se a importância de se considerar as condições meteorológicas em qualquer programa de monitorização sismovulcânica, para melhor compreender as relações entre os fenómenos vulcânicos e as variáveis externas.