

CATARINA PAULA PACHECO DA SILVA

**ESTUDO DA DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA DE ^{222}Rn : IMPLICAÇÕES
EM TERMOS DE MONITORIZAÇÃO SISMOVULCÂNICA, RECURSOS
GEOTÉRMICOS E SAÚDE PÚBLICA**



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2013

CATARINA PAULA PACHECO DA SILVA

**ESTUDO DA DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA DE ^{222}Rn : IMPLICAÇÕES
EM TERMOS DE MONITORIZAÇÃO SISMOVULCÂNICA, RECURSOS
GEOTÉRMICOS E SAÚDE PÚBLICA**

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

ORIENTADORA:

PROFESSORA DOUTORA TERESA DE JESUS LOPES FERREIRA
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

CO-ORIENTADOR:

PROFESSOR DOUTOR PATRICK ALLARD
INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS (IPGP)



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2013

À minha família

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS	XXI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XXIII
AGRADECIMENTOS	XXV
RESUMO	XXIX
ABSTRACT	XXXV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Nota Prévia	1
1.2. Gases Vulcânicos	3
1.3. Desgaseificação Difusa.....	5
1.3.1. Dióxido de Carbono (CO ₂)	6
1.3.2. Radão (²²² Rn)	9
1.4. Aplicações do Estudo de Desgaseificação Difusa do ²²² Rn	12
1.4.1. Presença de Falhas Activas	12
1.4.2. Actividade Sísmica.....	13
1.4.3. Actividade Vulcânica.....	16
1.4.4. Reservatórios Geotérmicos	19
1.5. ²²² Rn e Saúde Pública	21
2. VULCÃO DAS FURNAS	25
2.1. Nota Prévia	25
2.2. Enquadramento Geotectónico	26
2.3. Enquadramento Geológico	29
2.3.1. Geomorfologia	29
2.3.2. Tectónica	31
2.3.3. Vulcanoestratigrafia	32
2.4. Erupções Vulcânicas e Sismicidade	35
2.4.1. Erupções Históricas e Sismicidade Associada.....	35
2.4.2. Sismicidade Histórica de Natureza Tectónica	39

2.4.3. Sismicidade Local no Período em Estudo	43
2.5. Zonas de Desgaseificação	45
3. CARTOGRAFIA DA EMISSÃO DE ^{222}Rn NO SOLO	49
3.1. Nota Prévia	49
3.2. Radão no Solo	50
3.3. Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos dados	57
3.3.1. Equipamento	57
3.3.1.1. Detetor de ^{222}Rn	57
3.3.1.2. Detetor de CO_2	59
3.3.2. Amostragem	60
3.3.3. Recolha e Análise Estatística dos Dados	63
3.4. Apresentação dos Resultados	68
3.4.1. Cartografia da Concentração de ^{222}Rn no Solo	68
3.4.2. Cartografia da Concentração de CO_2 no Solo	71
3.4.3. Cartografia de Anomalias Térmicas	74
3.5. Discussão	77
3.5.1. Zonas Anómalas Principais	77
3.5.2. Zonas de Desgaseificação Anómala e Estruturas Vulcano-tectónicas	90
3.5.3. Alinhamentos de Desgaseificação Difusa	93
3.5.4. Zonas de Interesse para Exploração Geotérmica	99
3.5.5. Considerações Gerais	101
4. MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO SOLO	105
4.1. Nota Prévia	105
4.2. Factores Externos que Influenciam a Concentração de ^{222}Rn no Solo	107
4.3. Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados	109
4.3.1. Configuração de Amostragem do Equipamento e Armazenamento de Dados	109
4.3.2. Fases de Amostragem	109
4.3.3. Análise Estatística dos Dados	112
4.4. Apresentação dos Resultados	117
4.4.1. Local 1 - Jardim do Centro Termal das Furnas	117
4.4.2. Local 2 – Campo Fumarólico da Freguesia das Furnas	125
4.4.3. Local 3 – Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas	130
4.5. Discussão	143
4.5.1. Análise de Regressão Múltipla	143

4.5.1.1. Modelos, Dados Previstos e Resíduos	143
4.5.1.2. Grupos A – Valores Baixos de Concentração de ^{222}Rn	147
4.5.1.3. Grupos B – Valores Intermédios de Concentração de ^{222}Rn	152
4.5.1.4. Grupos C – Valores Elevados de Concentração de ^{222}Rn	153
4.5.1.5. Local 1 – Jardim do Centro Termal das Furnas.....	155
4.5.1.6. Local 2 – Campo Fumarólico da Freguesia das Furnas	157
4.5.1.7. Local 3 – Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas	159
4.5.2. Análise Espectral	162
4.5.3. Dados Filtrados e Actividade Sísmica	167
4.5.4. Considerações Gerais	172
5. MONITORIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn EM NASCENTES.....	179
5.1. Nota Prévia	179
5.2. Radão na Água	180
5.3. Metodologia de Amostragem e Tratamento dos Dados	183
5.3.1. Equipamento.....	183
5.3.2. Amostragem.....	184
5.3.2.1. Campo	184
5.3.2.2. Laboratório	186
5.3.3. Recolha e Tratamento de Dados.....	187
5.4. Apresentação dos Resultados	189
5.5. Discussão.....	207
5.5.1. Caracterização das Nascentes Amostradas em Termos de Radão e Temperatura.....	207
5.5.2. Variações Temporais de Radão e de Temperatura nas Nascentes Amostradas	211
5.5.3. Dados Obtidos e Actividade Sísmica.....	220
5.5.4. Saúde Pública.....	228
5.5.5. Considerações Gerais	230
6. CARTOGRAFIA DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E RISCO PARA A SAÚDE PÚBLICA.....	233
6.1. Nota Prévia	233
6.2. Fontes de Radão nos Edifícios e Medidas de Mitigação.....	234
6.3. Metodologia de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados	240
6.3.1. Equipamento.....	240

6.3.2. Amostragem.....	241
6.3.3. Recolha e Análise Estatística dos Dados.....	241
6.4. Apresentação dos Resultados	243
6.4.1. Freguesia das Furnas.....	243
6.4.2. Freguesia da Ribeira Quente.....	246
6.5. Discussão.....	249
6.5.1. Freguesia das Furnas.....	249
6.5.2. Freguesia da Ribeira Quente.....	255
6.5.3. Risco para a Saúde Pública	260
6.5.4. Considerações Gerais	268
7.MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS.....	271
7.1. Nota Prévia	271
7.2. Factores Externos que Influenciam a Concentração de ^{222}Rn no Ar Interior	272
7.3. Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados.....	275
7.3.1. Configuração de Amostragem	275
7.3.2. Locais de Amostragem	276
7.3.3. Recolha e Análise Estatística dos Dados.....	280
7.4. Apresentação dos Resultados	284
7.4.1. Local 1 - Habitação	284
7.4.2. Local 2 – Edifício Comercial	291
7.4.3. Local 3 – Edifício Propriedade da Universidade dos Açores	296
7.5. Discussão.....	307
7.5.1. Análise de Regressão Múltipla	307
7.5.1.1. Modelos, Dados Previstos e Resíduos	307
7.5.1.2. Local 1 - Habitação	310
7.5.1.3. Local 2 - Edifício Comercial.....	311
7.5.1.4. Local 3 - Edifício Propriedade da Universidade dos Açores.....	313
7.5.2. Análise Espectral	314
7.5.3. Dados Filtrados e Actividade Sísmica	317
7.5.4. Saúde Pública.....	321
7.5.5. Considerações Gerais	326
CONSIDERAÇÕES FINAIS	331
BIBLIOGRAFIA.....	347

ANEXOS

ANEXO I	A-1
ANEXO II	A-7
ANEXO III	A-13
ANEXO IV	A-29
ANEXO V	A-35
ANEXO VI	A-39
ANEXO VII	A-43
ANEXO VIII	A-81
ANEXO IX	A-87
ANEXO X	A-101
ANEXO XI	A-107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Série de decaimento do ^{238}U (modificado de Hasbrouck, 1983 e de Spencer, 1992).	10
Figura 2.1 – Principais elementos morfotectónicos da região dos Açores. As linhas definem, aproximadamente, a expressão morfológica de cada estrutura; a área a sombreado abrange, aproximadamente, os diferentes segmentos que compõem o RT. CMA – Crista Média Atlântica; ZFLA – Zona de Fractura Leste dos Açores; ZFNA – Zona de Fractura Norte dos Açores; RT – Rift da Terceira; FG – Falha da 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; ST – Santa Maria; Fo – Ilhéus das Formigas; SM – S. Miguel; T – Terceira; G – Graciosa; SJ – São Jorge; P – Pico; F – Faial; FL – Flores; C – Corvo (Hipólito, 2009 e referências nele citadas).	26
Figura 2.2 – Modelo digital de terreno da ilha de S. Miguel. Sistema de referência UTM WGS84; Zona 26S. Legenda: A - Vulcão das Sete Cidades; B - Vulcão do Fogo e C - Vulcão das Furnas.	27
Figura 2.3 – Mapa morfoestrutural do maciço das Furnas (modificado de Gaspar <i>et al.</i> , 1995).	31
Figura 2.4 – Estratigrafia do Vulcão das Furnas (modificado de Guest <i>et al.</i> , 1999).	33
Figura 2.5 – Ortofotomapa com a localização dos centros eruptivos do vulcanismo histórico do Vulcão das Furnas.	35
Figura 2.6 – Carta de intensidades locais relativas aos efeitos cumulativos da actividade sísmica ocorrida entre 2 e 8 de Setembro de 1630. O triângulo a verde representa a localização aproximada do foco eruptivo (in Silveira, 2002).	39
Figura 2.7 – Carta de sismicidade dos Açores. Eventos registados entre 1997 e 2011 (CIVISA, 2012).	40
Figura 2.8 – Cartas de isossistas, intensidades EMS-98, dos sismos de: a) 22 de Outubro de 1522, b) 26 de Julho de 1591, c) 16 de Abril de 1852, d) 5 de Agosto de 1932, e) 27 de Abril de 1935 e f) 26 de Junho de 1952. Os pontos a verde representam a localização aproximada dos epicentros (modificado de Silveira, 2002).	42
Figura 2.9 – Sismicidade na área envolvente ao Vulcão das Furnas para o período compreendido entre Julho de 2005 e Dezembro de 2011 (CVARG/CIVISA, dados não publicados).	43
Figura 2.10 – Ortofotomapa com a localização das manifestações hidrotermais no Vulcão das Furnas (modificado de Costa, 2006; Viveiros, 2010). Localização dos campos fumarólicos: A- Lagoa das Furnas; B- Freguesia das Furnas; C- Ribeira dos Tambores e D- Ribeira Quente.	45
Figura 3.1 – Representação esquemática do processo de emissão do radão. Emissão dos átomos de radão representados pelas letras B, D, E e F. Os átomos de radão que não se conseguiram libertar estão representados pelas letras A, C e G. Nota: no caso do átomo D apenas se considera que ele emanou se conseguir chegar ao poro exterior. As setas a preto representam a distância percorrida pelos átomos de radão por recuo e as setas a vermelho a distância percorrida por difusão (modificado de Sakoda <i>et al.</i> , 2011).	51
Figura 3.2 – Representação esquemática do transporte de radão ao longo de falhas tendo como gás de arraste o CO_2 (modificado de Etiope e Lombardi, 1995).	56
Figura 3.3 – Representação esquemática da migração, por advecção, do geogás em fracturas sem água e preenchidas por água (modificado de Etiope e Martinelli, 2002).	56
Figura 3.4 – Equipamento RAD7 utilizado na medição da concentração de ^{222}Rn (Durrige Company, 2011a).	57
Figura 3.5 – Espectro de energias alfa (modificado de Durrige Company, 2011a).	58
Figura 3.6 – Equipamento GA2000 utilizado na medição da concentração de CO_2 (Geotechnical Instruments, 2009).	59
Figura 3.7 – Localização dos pontos de amostragem da concentração de ^{222}Rn e da temperatura do solo (UTM-WGS84, zona 26S).	60
Figura 3.8 – Localização dos pontos de amostragem da concentração de CO_2 no solo (UTM-WGS84, zona 26S).	61
Figura 3.9 – Histogramas dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn e de CO_2 e de temperatura do solo.	64

Figura 3.10 – Esquema dos procedimentos a seguir na aplicação da simulação sequencial Gaussiana (modificado de Viveiros 2010 e referências nele citadas).....	65
Figura 3.11 – Gráficos da dispersão da média dos dados desagrupados <i>versus</i> o tamanho das células: a) dados da concentração de ^{222}Rn no solo; b) dados da concentração de CO_2 no solo e c) dados da temperatura do solo.....	66
Figura 3.12 – Gráfico de probabilidade acumulada da concentração de ^{222}Rn no solo.	68
Figura 3.13 – Variograma obtido e modelado da concentração de ^{222}Rn no solo (normal score): Cc – silo ou patamar e a – amplitude (m).	69
Figura 3.14 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no solo (cartografia do tipo-E).	70
Figura 3.15 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no solo: a) cartografia realizada com base no total das 100 realizações efectuadas (cartografia do tipo-E); b) cartografia referente à realização mínima estimada e c) cartografia referente à realização máxima estimada.	70
Figura 3.16 – Gráfico de probabilidade acumulada da concentração de CO_2 no solo.....	71
Figura 3.17 – Variograma obtido e modelado da concentração de CO_2 no solo (normal score): Cc – silo ou patamar e a – amplitude (m).	72
Figura 3.18 – Distribuição espacial da concentração de CO_2 no solo (cartografia do tipo-E).	73
Figura 3.19 – Distribuição espacial da concentração de CO_2 no solo: a) cartografia realizada com base no total das 100 realizações efectuadas (cartografia do tipo-E); b) cartografia referente à realização mínima estimada e c) cartografia referente à realização máxima estimada.	73
Figura 3.20 – Gráfico de probabilidade acumulada da temperatura do solo.	74
Figura 3.21 – Variograma obtido e modelado da temperatura do solo (normal score): Cc – silo ou patamar e a – amplitude (m).	75
Figura 3.22 – Distribuição espacial da temperatura do solo (cartografia do tipo-E).....	76
Figura 3.23 – Distribuição espacial da temperatura do solo: a) cartografia realizada com base no total das 100 realizações efectuadas (cartografia do tipo-E); b) cartografia referente à realização mínima estimada e c) cartografia referente à realização máxima estimada.	76
Figura 3.24 – Localização dos pontos de recolha de amostras para o cálculo da taxa de exalação de radão.	78
Figura 3.25 – Localização dos pontos de amostragem e valores de concentração de ^{222}Rn no solo medidos no Vulcão das Sete Cidades.....	81
Figura 3.26 – Localização das principais zonas anómalas de concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R10) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.	82
Figura 3.27 – Cartografia da concentração de CO_2 no solo para a área da freguesia das Furnas de acordo com: a) Baubron <i>et al.</i> (1994a) e b) Sousa (2003) (modificado de Viveiros <i>et al.</i> , 2010).	83
Figura 3.28 – Cartografia do tipo-E para o fluxo de CO_2 no solo para a caldeira do Vulcão das Furnas e freguesia da Ribeira Quente. Os perfis realizados não permitiram a realização de interpolação e os pontos estão representados por uma escala de cores. A, B, C e D representam as principais estruturas de desgaseificação difusa (DDS) identificadas na caldeira do Vulcão das Furnas (modificado de Viveiros <i>et al.</i> , 2010).....	83
Figura 3.29 – Localização das principais zonas anómalas de concentração de CO_2 no solo (C1 a C14) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.	85
Figura 3.30 – Localização das principais zonas de anomalia térmica (T1 a T9) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.....	86
Figura 3.31 – Distribuição da anomalia térmica na área da freguesia das Furnas (modificado de Sousa, 2003).	87
Figura 3.32 – Concentração de ^{222}Rn <i>versus</i> concentração de CO_2 . Medições de ^{222}Rn e CO_2 efectuadas no mesmo ponto de amostragem. O sombreado a cinza representa os valores de ruído de fundo e as linhas vermelhas o decaimento radioactivo teórico do radão.	88

Figura 3.33 – Localização das principais zonas anómalas da concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R10), das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar <i>et al.</i> , 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.....	91
Figura 3.34 – Localização das principais zonas anómalas da concentração de CO_2 no solo (C1 a C14), das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar <i>et al.</i> , 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.....	93
Figura 3.35 – Cartografia da probabilidade da concentração de ^{222}Rn no solo ser superior a 8000 Bq/m^3	94
Figura 3.36 – Cartografia da probabilidade da concentração de CO_2 no solo ser superior a 6 %vol.	94
Figura 3.37 – Cartografia da probabilidade da concentração de ^{222}Rn no solo ser superior a 8000 Bq/m^3 e localização: 1- das principais zonas anómalas da concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R11), 2- das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar <i>et al.</i> , 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas), 3- dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente e 4- dos alinhamentos de desgaseificação identificados (A1 a A5).	95
Figura 3.38 – Cartografia da probabilidade da concentração de CO_2 no solo ser superior a 6 %vol. e localização: 1- das principais zonas anómalas da concentração de CO_2 no solo (C1 a C14), 2- das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar <i>et al.</i> , 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas), 3- dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente e 4- dos alinhamentos de desgaseificação identificados (A4 a A8).	96
Figura 3.39 – Cartografia da probabilidade da concentração de CO_2 no solo ser superior a 6 %vol. e localização: 1- das principais zonas anómalas da concentração de CO_2 no solo (C1 a C14), 2- das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar <i>et al.</i> , 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas), 3- dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente e 4- do alinhamento de desgaseificação circular identificado (A9).....	97
Figura 3.40 – Alinhamentos definidos pelas anomalias de CO_2 (modificado de Sousa, 2003).	98
Figura 3.41 – Cartografia de probabilidade do fluxo de CO_2 no solo na caldeira do Vulcão das Furnas. A escala mostra a probabilidade do fluxo de CO_2 no solo exceder $50 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. As letras “A” a “E” assinalam zonas de desgaseificação específicas e as linhas 1’ a 3’ representam alinhamentos de desgaseificação (modificado de Viveiros, 2010).....	98
Figura 3.42 – Localização das principais zonas com eventual interesse para exploração geotérmica (zona 1, 2 e 3), das anomalias da concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R10), das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar <i>et al.</i> , 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.	100
Figura 4.1 – Monitorização contínua de ^{222}Rn no solo: a) Localização dos pontos de amostragem: Local 1- Jardim do Centro Termal e Local 2- Campo fumarólico da Freguesia das Furnas; b) Estação de ^{222}Rn instalada no interior do abrigo da estação de fluxo de CO_2 GFUR1 e c) Abrigo da estação de fluxo de CO_2 GFUR3, à esquerda, e abrigo da estação de ^{222}Rn à direita.	110
Figura 4.2 – Monitorização contínua de ^{222}Rn no solo junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas: a) Localização do ponto de amostragem 3 e b) Abrigo da estação de ^{222}Rn à esquerda e abrigo da estação de fluxo de CO_2 GFUR2 à direita.....	112
Figura 4.3 – Histogramas dos dados log-transformados da concentração de radão no solo: a) no local 1 - jardim do Centro Termal das Furnas, b) no local 2 – junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas e c) no local 3 – junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas.	114
Figura 4.4 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas.	117
Figura 4.5 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pressão barométrica no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas para o período compreendido entre 6 de Novembro e 3 de Dezembro de 2005.	119
Figura 4.6 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo, da pluviosidade e da humidade do solo no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas para o período compreendido entre 28 de Agosto e 19 de Outubro de 2005.	119
Figura 4.7 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas para o período compreendido entre 9 de Novembro de 2005 e 16 de Janeiro de 2006.	120

Figura 4.8 – Histogramas dos dados da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 1: Grupo A1 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (dados log-transformados), Grupo B1 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo compreendidos entre 8000 Bq/m^3 e $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e Grupo C1 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo superiores a $16\,000 \text{ Bq/m}^3$	121
Figura 4.9 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 1, para o período compreendido entre 3 de Outubro de 2005 e 16 de Janeiro de 2006.	125
Figura 4.10 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 2 localizado junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas.....	126
Figura 4.11 – Histogramas dos dados da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 2: Grupo A2 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (dados log-transformados), Grupo B2 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo compreendidos entre 8000 Bq/m^3 e $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e Grupo C2 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo superiores a $16\,000 \text{ Bq/m}^3$	128
Figura 4.12 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas.	131
Figura 4.13 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas, com ampliação da escala.	131
Figura 4.14 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas para o período compreendido entre 22 de Outubro e 1 de Novembro de 2009.	133
Figura 4.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da velocidade do vento no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas para o período compreendido entre 24 de Setembro e 3 de Novembro de 2009.....	133
Figura 4.16 – Histogramas dos dados da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3: Grupo A3 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (dados log-transformados), Grupo B3 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo compreendidos entre 8000 Bq/m^3 e $50\,000 \text{ Bq/m}^3$ e Grupo C3 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo superiores a $50\,000 \text{ Bq/m}^3$	134
Figura 4.17 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 13 de Maio de 2009 e 20 de Novembro de 2010.....	139
Figura 4.18 – Espectrograma da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 13 de Maio de 2009 e 20 de Novembro de 2010: a) Verão e b) Inverno.	139
Figura 4.19 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 13 de Maio e 31 de Outubro de 2009 (Verão).	140
Figura 4.20 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 1 de Novembro de 2009 e 25 de Abril de 2010 (Inverno).	140
Figura 4.21 – Espectro de amplitudes de baixas frequências da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3. A sombreado cinza estão assinalados os incrementos associados a 340, 48, 25 e 15 dias.....	142
Figura 4.22 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo log-transformados observados no grupo A1, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.1 e dos resíduos calculados.....	144
Figura 4.23 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo observados no grupo B1 e C1, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.2 para valores de concentração de ^{222}Rn compreendidos entre 8000 e $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e da equação 4.3 para valores de concentração de ^{222}Rn superiores a $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e dos respectivos resíduos calculados.	145
Figura 4.24 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo log-transformados observados no grupo A3, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.4 e dos resíduos calculados.....	146
Figura 4.25 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo observados no grupo C3, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.5 e dos respectivos resíduos calculados.	147
Figura 4.26 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura do solo no ponto de amostragem 3: a) dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn do grupo A3 e b) dados totais da concentração de ^{222}Rn no ponto de amostragem 3.	150
Figura 4.27 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da humidade do solo no ponto de amostragem 3: a) dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn do grupo A3 e b) dados totais da concentração de ^{222}Rn no ponto de amostragem 3.	151

Figura 4.28 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura do ar, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 23 de Março e 7 de Abril de 2010.	164
Figura 4.29 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da humidade relativa do ar, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 23 de Março e 7 de Abril de 2010.	165
Figura 4.30 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para o grupo A1 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	168
Figura 4.31 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para os grupos B1 e C1 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	169
Figura 4.32 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no local de amostragem 2 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	170
Figura 4.33 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para o grupo A3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	171
Figura 4.34 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para o grupo C3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	171
Figura 5.1 – Equipamento RAD7 e acessórios utilizados na medição da concentração de ^{222}Rn na água (DurrIDGE Company, 2011b).	183
Figura 5.2 – Localização dos pontos de amostragem e tipos de nascentes monitorizadas.	184
Figura 5.3 – Nascente Água Azeda: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	189
Figura 5.4 – Nascente Água Azeda do Rebentão: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	190
Figura 5.5 – Nascente Dr. Dinis: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	190
Figura 5.6 – Nascente do Caldeirão: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	190
Figura 5.7 – Nascente Água da Prata: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	191
Figura 5.8 – Nascente Dr. Miguel Henrique: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	191
Figura 5.9 – Nascente Quenturas I: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	191
Figura 5.10 – Nascente Quenturas II: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita. A ausência de dados corresponde a um período em que esta nascente esteve sem caudal.	192
Figura 5.11 – Nascente Quenturas III: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	192
Figura 5.12 – Nascente Grutinha I: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	192
Figura 5.13 – Nascente Grutinha II: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	193
Figura 5.14 – Nascente do Torno: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.	193
Figura 5.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	195
Figura 5.16 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda do Rebentão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	196

Figura 5.17 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Dinis, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	196
Figura 5.18 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Caldeirão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	197
Figura 5.19 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água da Prata, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	197
Figura 5.20 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Miguel Henrique, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	198
Figura 5.21 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas III, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	198
Figura 5.22 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha II, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	199
Figura 5.23 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Torno, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	199
Figura 5.24 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	200
Figura 5.25 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	200
Figura 5.26 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	201
Figura 5.27 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda do Rebentão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	202
Figura 5.28 – Variação temporal da temperatura na nascente Dr. Dinis, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	202
Figura 5.29 – Variação temporal da temperatura na nascente Dr. Miguel Henrique, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	203
Figura 5.30 – Variação temporal da temperatura na nascente do Caldeirão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	203
Figura 5.31 – Variação temporal da temperatura na nascente Água da Prata, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	204
Figura 5.32 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	204
Figura 5.33 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha II, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	205
Figura 5.34 – Variação temporal da temperatura na nascente Quenturas I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	205
Figura 5.35 – Variação temporal da temperatura na nascente Quenturas III, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	206
Figura 5.36 – Variação temporal da temperatura na nascente do Torno, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	206
Figura 5.37 – Valores médios da temperatura e da concentração de ^{222}Rn nas nascentes em análise.	210
Figura 5.38 – Valores médios da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 livre nas nascentes em análise. Não existem dados relativamente ao CO_2 livre para a nascente Quenturas II (Costa, 2006; Freire, 2006; Cruz <i>et al.</i> , 2010).	210
Figura 5.39 – Variação temporal da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.	212
Figura 5.40 – Variação temporal da temperatura na nascente do Caldeirão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores máximos de temperatura medidos no solo e na água.	213
Figura 5.41 – Variação temporal da temperatura e do caudal da nascente do Caldeirão. Os dados referentes ao caudal desta nascente são de Freire <i>et al.</i> (2013 <i>in press</i>).	214

Figura 5.42 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores de temperatura medidos no solo e na água.	215
Figura 5.43 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores máximos de temperatura medidos no solo e na água.	218
Figura 5.44 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha II, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores de temperatura medidos no solo e na água.	219
Figura 5.45 – Variação temporal da temperatura na nascente do Torno, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores de temperatura medidos no solo e na água.	219
Figura 5.46 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	221
Figura 5.47 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda do Rebentão e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	222
Figura 5.48 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Dinis e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	222
Figura 5.49 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Caldeirão e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	223
Figura 5.50 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água da Prata e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	223
Figura 5.51 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Miguel Henrique e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	224
Figura 5.52 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas I e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	224
Figura 5.53 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas II e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. As zonas a sombreado cinza representam os intervalos da $\mu \pm 2\sigma$ para os dados antes e após a ausência de caudal desta nascente.	225
Figura 5.54 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas III e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	225
Figura 5.55 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha I e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	226
Figura 5.56 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha II e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	226
Figura 5.57 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Torno e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$	227
Figura 5.58 – Valores acumulados da energia dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas no período de amostragem e valores acumulados da concentração de ^{222}Rn nas nascentes: a) Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis e Dr. Miguel Henrique e b) na nascente Dr. Dinis, com ampliação da escala.	227
Figura 5.59 – Valores acumulados da energia dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas no período de amostragem e valores acumulados da concentração de ^{222}Rn nas nascentes do Caldeirão, Água da Prata, Quenturas I, Quenturas II, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno.	228
Figura 6.1 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas.	245

Figura 6.2 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas, com ampliação da escala.....	245
Figura 6.3 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente.....	248
Figura 6.4 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas, nas campanhas de Verão (à esquerda) e Inverno (à direita).....	250
Figura 6.5 – Média anual da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas.....	251
Figura 6.6 – Dose efectiva anual calculada com base na média anual da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas.....	253
Figura 6.7 – Distribuição espacial da concentração média anual de ^{222}Rn no ar interior de edifícios e no solo na freguesia das Furnas.....	253
Figura 6.8 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Verão, e no solo na freguesia das Furnas.....	254
Figura 6.9 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Inverno, e no solo na freguesia das Furnas.....	255
Figura 6.10 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente, nas campanhas de Verão (à esquerda) e Inverno (à direita).....	256
Figura 6.11 – Média anual da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente.....	257
Figura 6.12 – Distribuição espacial da concentração média anual de ^{222}Rn no ar interior de edifícios e no solo na freguesia da Ribeira Quente.....	258
Figura 6.13 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Verão, e no solo na freguesia da Ribeira Quente.....	259
Figura 6.14 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Inverno, e no solo na freguesia da Ribeira Quente.....	260
Figura 6.15 – Cartografia da susceptibilidade de ^{222}Rn no solo para a freguesia das Furnas.....	262
Figura 6.16 – Cartografia da susceptibilidade de ^{222}Rn no solo para a freguesia da Ribeira Quente.....	262
Figura 6.17 – Cartografia da vulnerabilidade no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia das Furnas (modificado de Viveiros, 2010).....	264
Figura 6.18 – Cartografia da vulnerabilidade no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia da Ribeira Quente (modificado de Viveiros, 2010).....	264
Figura 6.19 – Cartografia do risco no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia das Furnas.....	266
Figura 6.20 – Cartografia do risco no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia da Ribeira Quente.....	267
Figura 7.1 – Histogramas dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios: a) no local 1 - habitação, b) no local 2 – edifício comercial e c) no local 3 – edifício pertencente à Universidade dos Açores para o período de 11 de Agosto de 2010 a 31 de Março de 2011.....	281
Figura 7.2 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior da habitação. A zona a sombreado cinza corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.....	284
Figura 7.3 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior da habitação, com ampliação da escala. A zona a sombreado cinza corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.....	285
Figura 7.4 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação e da velocidade do vento na estação GFUR1 para o período compreendido entre 14 de Novembro e 4 de Dezembro de 2005.....	287
Figura 7.5 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e os períodos em que a ventilação deste espaço foi reduzida ou nula, representados pelo sombreado cinza.....	287
Figura 7.6 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e do diferencial de pressão entre o interior e o exterior deste edifício, para o período compreendido entre 15 de Novembro e 15 de Dezembro de 2005.....	288
Figura 7.7 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no ponto de amostragem 1, para o período compreendido entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005.....	291

Figura 7.8 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior do edifício comercial.	292
Figura 7.9 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e os períodos em que a ventilação deste espaço foi reduzida devido ao seu encerramento, representados pelo sombreado cinza.	293
Figura 7.10 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da pressão barométrica no interior do edifício e em GFUR3.	294
Figura 7.11 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da velocidade do vento.	294
Figura 7.12 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores.	297
Figura 7.13 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores para o período compreendido entre 6 de Fevereiro e 17 de Abril de 2009.	298
Figura 7.14 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores, da pluviosidade e da humidade do solo na estação GFUR3 para o período compreendido entre 10 de Agosto e 24 de Outubro de 2010.	299
Figura 7.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da pressão barométrica na estação GFUR3 para o período compreendido entre 1 e 31 de Agosto de 2008.	299
Figura 7.16 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 30 de Novembro de 2011.	302
Figura 7.17 – Espectrograma da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 30 de Novembro de 2011.	302
Figura 7.18 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 16 de Abril de 2008 e 12 de Fevereiro de 2009.	303
Figura 7.19 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 7 de Agosto de 2009 e 15 de Março de 2010.	304
Figura 7.20 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.	304
Figura 7.21 – Espectrogramas da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para os períodos compreendidos entre: a) 16 de Abril de 2008 e 12 de Fevereiro de 2009; b) 7 de Agosto de 2009 e 15 de Março de 2010 e c) 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.	305
Figura 7.22 – Espectro de amplitudes de baixas frequências da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no ponto de amostragem 3. A sombreado cinza estão assinalados os incrementos associados a 682, 341 e 62 dias.	306
Figura 7.23 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior observados no local de amostragem 1, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 6.1 e dos respectivos resíduos calculados.	308
Figura 7.24 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior observados no local de amostragem 2, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 6.2 e dos respectivos resíduos calculados.	309
Figura 7.25 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior observados no local de amostragem 3, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 6.3 e dos respectivos resíduos calculados para o período de amostragem compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 31 de Março de 2011.	309
Figura 7.26 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, nível de referência recomendado na legislação regional, velocidade do vento e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.	311
Figura 7.27 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial, velocidade do vento e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.	312
Figura 7.28 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício da Universidade dos Açores, dos dados previstos no modelo proposto e dos resíduos calculados para o período de determinação do modelo, representado pelo sombreado cinza, e para o restante período de amostragem.	314
Figura 7.29 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da pressão barométrica, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 30 de Janeiro e 3 de Fevereiro de 2011.	316

Figura 7.30 – Variação temporal dos resíduos dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 1 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.	318
Figura 7.31 – Variação temporal dos resíduos dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 2 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.	319
Figura 7.32 – Variação temporal dos resíduos dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.	320
Figura 7.33 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.	320
Figura 7.34 – Variação temporal da concentração de CO_2 no ar interior da habitação e nível de referência recomendado por diversas entidades internacionais (NIOSH/OSHA) (NIOSH, 2007).	322
Figura 7.35 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e nível de referência recomendado na legislação regional.	322
Figura 7.36 – Variação temporal da concentração de CO_2 no ar interior do edifício comercial, nível de referência recomendado por diversas entidades internacionais (NIOSH/OSHA) (NIOSH, 2007) e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.	323
Figura 7.37 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial, nível de referência recomendado na legislação regional e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.	324
Figura 7.38 – Variação temporal da concentração de CO_2 no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e nível de referência recomendado por diversas entidades internacionais (NIOSH/OSHA) (NIOSH, 2007).	325
Figura 7.39 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e limite de referência recomendado na legislação regional.	325
Figura 7.40 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala e pressão barométrica no interior e exterior da habitação (modificado de Silva, 2006).	328

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Composição química dos gases vulcânicos emitidos em diferentes vulcões (modificado de Delmelle e Stix, 2000 e referências nele citadas).	4
Tabela 1.2 – Efeitos e limites de exposição médios para o CO ₂ considerando adultos saudáveis (modificado de Viveiros, 2010 e referências nele citadas).	8
Tabela 1.3 – Tempo de semi-vida do primeiro elemento das séries radioactivas, do potássio (⁴⁰ K) e dos isótopos de radão (modificado de Garzón e Garzón, 2001 e referências nele citadas).	9
Tabela 1.4 – Risco de contrair cancro do pulmão devido a exposição ao radão em fumadores e em não fumadores (modificado de US EPA, 2009a; 2009b).	23
Tabela 2.1 – Estatística descritiva anual da sismicidade local no período em estudo.	44
Tabela 3.1 – Concentração de ²³⁸ U em rochas magmáticas (modificado de Wiegand, 2001 e referências nele citadas).	50
Tabela 3.2 – Estatística das populações identificadas nos dados de concentração de ²²² Rn no solo e o intervalo de confiança de 90 % da média.	69
Tabela 3.3 – Estatística das populações identificadas nos dados de concentração de CO ₂ no solo e o intervalo de confiança de 90 % da média.	72
Tabela 3.4 – Estatística das populações identificadas nos dados de temperatura do solo e o intervalo de confiança de 90 % da média.	75
Tabela 3.5 – Valores máximos e mínimos de concentração de ²²² Rn no solo obtidos em diversas regiões vulcânicas.	77
Tabela 3.6 – Taxa de exalação calculada para as amostras analisadas e informação utilizada no seu cálculo.	80
Tabela 4.1 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ²²² Rn obtidos no ponto de amostragem 1, do fluxo de CO ₂ e dos parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR1.	118
Tabela 4.2 – Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> das variáveis analisadas durante o período em estudo.	121
Tabela 4.3 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ²²² Rn log-transformados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m ³ (Grupo A1).	122
Tabela 4.4 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ²²² Rn compreendidos entre 8000 e 16 000 Bq/m ³ (Grupo B1).	123
Tabela 4.5 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ²²² Rn superiores a 16 000 Bq/m ³ (Grupo C1).	124
Tabela 4.6 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ²²² Rn obtidos no ponto de amostragem 2, do fluxo de CO ₂ e dos parâmetros meteorológicos registados pela estação GFUR3.	127
Tabela 4.7 – Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> das variáveis analisadas durante o período em estudo.	128
Tabela 4.8 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ²²² Rn log-transformados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m ³ (Grupo A2).	129
Tabela 4.9 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ²²² Rn superiores a 16 000 Bq/m ³ (Grupo C2).	130
Tabela 4.10 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ²²² Rn obtidos no ponto de amostragem 3, do fluxo de CO ₂ e dos parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR2.	132
Tabela 4.11 – Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> das variáveis analisadas durante o período em estudo.	135

Tabela 4.12 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn log-transformados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (Grupo A3).	136
Tabela 4.13 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn compreendidos entre 8000 e $50\,000 \text{ Bq/m}^3$ (Grupo B3).	137
Tabela 4.14 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn superiores a $50\,000 \text{ Bq/m}^3$ (Grupo C3).	138
Tabela 4.15 – Correlação e atraso entre a concentração de ^{222}Rn no solo e os parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR2, para o período de amostragem compreendido entre 1 de Novembro de 2009 e 25 de Abril de 2010 (Inverno).	141
Tabela 4.16 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados dos grupos A.	148
Tabela 4.17 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados dos grupos B.	152
Tabela 4.18 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados dos grupos C.	154
Tabela 4.19 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados do ponto de amostragem 1.	155
Tabela 4.20 – Análise de regressão múltipla do modelo aplicado aos dados obtidos pela estação GFUR1 para o período compreendido entre Agosto de 2003 e Agosto de 2004 (modificado de Viveiros <i>et al.</i> , 2008a; Viveiros, 2010).	157
Tabela 4.21 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados do ponto de amostragem 2.	158
Tabela 4.22 – Análise de regressão múltipla do modelo aplicado aos dados obtidos pela estação GFUR3 para o período compreendido entre 20 de Abril de 2008 e 30 de Abril de 2009 (modificado de Viveiros, 2010).	159
Tabela 4.23 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados do ponto de amostragem 3.	160
Tabela 4.24 – Análise de regressão múltipla do modelo aplicado aos dados obtidos pela estação GFUR2 durante o ano de 2006 (modificado de Viveiros, 2010).	161
Tabela 4.25 – Principais frequências identificadas na série temporal da concentração de radão no solo, nos meses de Inverno, no ponto de amostragem 3 e fenómenos com periodicidade semelhante (a) Han e Han, 2002 e referências nele citadas b) Groves-Kirkby <i>et al.</i> , 2006; c) Schureman, 1976).	163
Tabela 5.1 – Concentração de radão máxima permitida em águas de abastecimento público (US EPA, 1999 ¹ ; Horváth <i>et al.</i> , 2000 ² ; Voronov, 2004 ³).	182
Tabela 5.2 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn e de temperatura obtidos nas nascentes em análise.	194
Tabela 5.3 – Elementos maiores presentes nas nascentes em estudo (Cruz <i>et al.</i> , 1999; Freire, 2006; Costa, 2006; Cruz <i>et al.</i> , 2010).	208
Tabela 5.4 – Elementos menores e traço presentes nas nascentes em estudo (Cruz <i>et al.</i> , 1999; Freire, 2006; Costa, 2006; Cruz <i>et al.</i> , 2010), n.d. – não determinado.	208
Tabela 5.5 – Dose efectiva anual de radão nas nascentes em análise.	230
Tabela 6.1 – Limites recomendados para a concentração de ^{222}Rn no interior de edifícios (Bq/m^3).	237
Tabela 6.2 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas nas duas campanhas realizadas.	246
Tabela 6.3 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente nas duas campanhas realizadas.	248
Tabela 6.4 – Classes de risco à exposição de radão definidas pela integração dos valores de susceptibilidade e vulnerabilidade.	265
Tabela 7.1 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior e da pressão barométrica no interior do edifício obtidos no ponto de amostragem 1 e dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR1.	286

Tabela 7.2 – Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> das variáveis analisadas durante o período em estudo.....	289
Tabela 7.3 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem 1 – Habitação.	290
Tabela 7.4 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior e da pressão barométrica obtidos no ponto de amostragem 2, dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR3 e da pluviosidade obtida pela estação GFUR2.	293
Tabela 7.5 – Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> das variáveis analisadas durante o período em estudo.....	295
Tabela 7.6 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem 2 – Edifício comercial.	296
Tabela 7.7 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no ponto de amostragem 3, da pressão barométrica e da concentração de CO_2 no ar interior obtidos pela estação protótipo e dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR3.	298
Tabela 7.8 – Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> das variáveis analisadas durante o período em estudo (11 de Agosto de 2010 a 31 de Março de 2011).	300
Tabela 7.9 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem 3 – Edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 31 de Março de 2011.....	301
Tabela 7.10 – Correlação e atraso entre a concentração de ^{222}Rn no ar interior e os parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR3, para o período de amostragem compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.....	306
Tabela 7.11 – Principais frequências identificadas na série temporal da concentração de radão no ar interior, no ponto de amostragem 3, e fenómenos com periodicidade semelhante: (a) Han e Han, 2002 e referências neles citadas b) Groves-Kirkby <i>et al.</i> , 2006; c) Schureman, 1976.	315

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 2.1 – Pico do Gaspar, domo traquítico resultante da erupção de 1439-43.	36
Fotografia 2.2 – Domo resultante da erupção de 1630.	37
Fotografia 2.3 – Campo fumarólico da Freguesia das Furnas.	46
Fotografia 3.1 – Medição da concentração de ^{222}Rn no solo. Legenda: A - detector de ^{222}Rn ; B - sonda de ferro; C - detector de CO_2 ; D - termómetro e E - GPS.	62
Fotografia 3.2 – Medição da concentração de ^{222}Rn em produtos vulcânicos do Vulcão das Furnas.	79
Fotografia 5.1 – Recolha de água para posterior medição da concentração de ^{222}Rn	185
Fotografia 5.2 – Análise da concentração de radão na água: a) Equipamento montado em circuito fechado; b) processo de arejamento da amostra e c) medição da concentração de ^{222}Rn dissolvido na água.	187
Fotografia 6.1 – Detector de ^{222}Rn utilizado na monitorização da qualidade do ar interior de edifícios.	240
Fotografia 7.1 – Instalação dos detectores de ^{222}Rn e de CO_2 no ponto de amostragem 1.	276
Fotografia 7.2 – Instalação dos detectores de ^{222}Rn e de CO_2 no ponto de amostragem 2.	277
Fotografia 7.3 – Ponto de amostragem 3: a) aspecto exterior do edifício, b) equipamento utilizado para a medição de ^{222}Rn e c) poço onde foi efectuada a amostragem.	279

LISTA DE ACRÓNIMOS

CEC – Commission of the European Communities.

CIVISA – Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores.

CVARG – Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos.

ECA – European Collaborative Action.

IARC – International Agency for Research on Cancer.

ICRP – International Commission on Radiological Protection.

NIOSH – National Institute for Occupational Safety and Health (United States of America).

OSHA – Occupational Safety and Health Administration (United States of America).

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

US EPA – United States Environmental Protection Agency.

WHO – World Health Organisation.

AGRADECIMENTOS

A realização do presente trabalho só foi possível graças ao contributo de diversas personalidades e entidades, pelo que, gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a sua execução, nomeadamente:

- ao anterior Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor Avelino Meneses e ao actual Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor Jorge Medeiros, pela autorização da realização do doutoramento em Vulcanologia;
- ao Fundo Regional da Ciência e Tecnologia a atribuição da bolsa de doutoramento a este projecto (M3.1.2/F/021/2008);
- aos anteriores Directores de Departamento, Professor Doutor José Pacheco e Professor Doutor Nicolau Wallenstein, e ao actual Director, Professor Doutor José Virgílio Cruz, pelas facilidades concedidas na realização deste trabalho;
- à Directora do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Professora Doutora Gabriela Queiroz, pelo apoio concedido que facilitou a realização deste trabalho;
- aos meus orientadores, Professora Doutora Teresa Ferreira e Professor Doutor Patrick Allard, pela disponibilidade, discussão, sugestões e partilha de conhecimentos que permitiram o enriquecimento deste trabalho;
- a todos os docentes pertencentes ao Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos pela partilha de conhecimentos, incentivo e amizade demonstrada;

- ao Professor Doutor João Luís Gaspar pela partilha de conhecimentos e de documentação;
- ao Professor Doutor José Virgílio Cruz pela partilha de conhecimentos e de documentação e pela discussão e esclarecimento de dúvidas;
- ao Professor Doutor José Cabral Vieira pela discussão e esclarecimento de dúvidas no que concerne a aplicação da análise de regressão múltipla;
- à minha colega e amiga, Fátima Viveiros pela sua sempre pronta disponibilidade na discussão de ideias, as sugestões apresentadas e a partilha de conhecimentos e de documentação. Agradeço sobretudo a sua amizade e o encorajamento constante;
- às colegas e amigas Ana Rita Hipólito, Vera Pereira e Joana Pacheco pela sua sempre pronta disponibilidade para colaborar na execução do trabalho de campo;
- à Andrea Costa pela disponibilidade e sugestões apresentadas;
- à Rita Mestre pela disponibilidade e colaboração na resolução de problemas de software;
- aos colegas e amigos Ana Gomes e Pedro Freire pela sempre pronta partilha de documentação;
- ao colega e amigo Vittorio Zanon pela disponibilidade e colaboração na recolha de amostras de escoadas lávicas;
- a todos os colegas do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos que colaboraram na realização deste trabalho e em especial à Catarina Goulart pelo apoio com o SIG e à Rita Carmo e Rita Marques pelo apoio ao tratamento dos dados da sísmica.

- a todos os funcionários do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho e em especial à Patrícia Raposo e à Crisálida Rego pelo auxílio na execução dos aspectos burocráticos, ao Rui Mestre e Bruno Medeiros pela sua colaboração na realização do trabalho de campo e ao José Medeiros pela apoio com o SIG;
- a toda a população das freguesias das Furnas e da Ribeira Quente, pela sua sempre pronta colaboração;
- a todos os meus amigos pelo incentivo e amizade e em especial à Maria Luísa Pimentel e à Lília Oliveira.
- a toda a minha família e, muito em especial, aos meus pais e às minhas irmãs por todo o amor, carinho e incentivo não só na realização deste trabalho, mas ao longo de toda a minha vida.

RESUMO

O radão (^{222}Rn) é um gás nobre, radioactivo, incolor e inodoro resultante da série de decaimento do urânio (^{238}U). Este gás está presente em todo o tipo de materiais geológicos como rochas e solos e pode ser libertado destes para o ar atmosférico ou para a água, onde se dissolve. O radão pode ser um importante indicador de fenómenos que ocorrem em profundidade pelo que o seu estudo tem diversas aplicações, nomeadamente: (a) na identificação de falhas activas; (b) na monitorização sismovulcânica e (c) na prospecção geotérmica. Sendo o radão um gás radioactivo pode representar perigo em termos de saúde pública quando inalado/ingerido em concentrações elevadas, por períodos de tempo prolongados. Em espaços exteriores, este gás normalmente não representa perigo dada a sua dispersão no ar atmosférico, no entanto, quando se acumula em espaços interiores, como em edifícios, pode representar uma séria ameaça.

O Vulcão das Furnas, área de estudo do presente trabalho, corresponde a um centro traquítico poligenético. Este vulcão é encimado por uma depressão, resultante de duas fases distintas de formação de caldeira, no interior da qual ocorreram pelo menos 10 erupções vulcânicas nos últimos 5000 anos. Actualmente o Vulcão das Furnas apresenta diversas manifestações secundárias de vulcanismo, nomeadamente a presença de campos fumarólicos, de nascentes de água termal e gasocarbónica e de zonas de desgaseificação difusa através dos solos.

O estudo da desgaseificação difusa do radão centrou-se na análise da sua variação espacial e temporal no solo e em nascentes termais e frias gasocarbónicas. A realização da cartografia de desgaseificação difusa no solo contemplou medições da concentração do radão, de dióxido de carbono (CO_2) e da temperatura. Os valores de concentração de radão oscilaram entre 0 e 387 527 Bq/m^3 , os valores da concentração de CO_2 entre 0 e 100 %vol. e os valores de temperatura entre 16,5 e 100 °C. A análise estatística dos dados através da representação gráfica (GSA)

permitiu identificar a presença de diferentes populações. A simulação sequencial Gaussiana (SGs) serviu de base à elaboração de cartografia do tipo E, de cartas de probabilidade e do cálculo da incerteza associada às realizações efectuadas. As principais zonas de desgaseificação anómala identificadas encontram-se associadas à presença de estruturas vulcano-tectónicas, surgindo em zonas de falhas, em zonas associadas ao bordo da caldeira e em crateras, e à presença de campos fumarólicos. A distribuição das zonas anómalas permitiu também inferir alinhamentos com direcções NE-SW, NW-SE e E-W e identificar zonas com potencial interesse em termos de exploração geotérmica. As séries temporais da concentração de radão no solo foram obtidas em três pontos de amostragem distintos. Os valores de concentração deste gás obtidos oscilaram entre 0 e 153 000 Bq/m³. Para analisar e filtrar a influência de factores externos (factores meteorológicos e variações no fluxo de CO₂) na variação da concentração de radão foi aplicada a análise de regressão múltipla e a análise espectral. Nos conjuntos dos modelos de regressão propostos as variáveis que mostraram significância estatística são a pressão barométrica, a humidade do solo, a temperatura do solo, o fluxo de CO₂ no solo, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar e a velocidade do vento explicando entre 15,8 % e 73,6 % do total das variações dos dados ou dos dados log-transformados da concentração de radão no solo. A análise espectral permitiu apenas num dos locais de amostragem verificar a existência de variações sazonais, assim como, variações cíclicas diárias de um ciclo por dia, para os dados dos meses de Inverno. A temperatura do ar, a humidade relativa do ar e a velocidade do vento são as variáveis que apresentam correlação com a concentração de radão no solo associada às variações de um ciclo por dia. A análise das baixas frequências permitiu ainda o reconhecimento de variações periódicas associadas a 340, 48 e 15 dias.

A amostragem regular da concentração de radão e da temperatura foi efectuada no conjunto definido pelas nascentes Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis, Caldeirão, Água da Prata, Dr. Miguel Henrique, Quenturas I, Quenturas II, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno. A selecção destas nascentes foi efectuada de modo a abranger os diferentes tipos presentes neste vulcão, nomeadamente, ortotermiais, ortotermiais gasocarbónicas, termiais e termiais

gasocarbónicas. Os valores médios da concentração de radão variaram entre 1189 Bq/m³ na Água da Prata e 29 765 Bq/m³ na água Dr. Miguel Henrique. Relativamente à temperatura, os valores médios oscilaram entre 16,5 °C na Água Azeda do Rebentão e 76,2 °C na água do Caldeirão. As variações da concentração de radão e da temperatura nas nascentes amostradas parecem estar associadas às variações sazonais da pluviosidade, da humidade do solo e da temperatura do ar, expressa neste estudo pelos dados da temperatura do solo. Os valores de concentração de radão na água, assim como, das doses efectivas anuais calculadas são baixos, não ultrapassando em nenhum caso os limites propostos para as águas de abastecimento público pela Organização Mundial de Saúde.

A avaliação da qualidade do ar interior relativamente à presença de radão foi efectuada através de medições regulares em alguns edifícios seleccionados das freguesias das Furnas e Ribeira Quente e de ensaios de monitorização contínua da concentração deste gás e de CO₂ no ar interior de três edifícios da freguesia das Furnas. A monitorização regular em edifícios das duas freguesias foi efectuada através da realização de duas amostragens, uma durante o Verão e outra no Inverno. Os valores obtidos foram superiores nos meses de Inverno do que nos meses de Verão. A média anual calculada da concentração de radão no ar interior de edifícios destas freguesias oscilou entre 23 e 6403 Bq/m³ e a dose efectiva anual entre 0,4 e 107,6 mSv/ano. Cerca de 33 % dos edifícios amostrados na freguesia das Furnas e 21 % na freguesia da Ribeira Quente apresentam valores médios anuais da concentração deste gás superiores ao limite recomendado na legislação regional (150 Bq/m³) e 6 % na freguesia das Furnas apresentam doses efectivas anuais superiores ao limite recomendado pela Comissão Internacional de Protecção Radiológica e pela Organização Mundial de Saúde (10 mSv/ano).

A avaliação do risco de radão no ar, no que diz respeito à exposição humana, foi efectuada através da integração da cartografia da susceptibilidade de radão no solo e da vulnerabilidade do edificado. A cartografia da susceptibilidade de radão no solo permitiu verificar que nas freguesias das Furnas e Ribeira Quente existe uma importante área com susceptibilidade elevada ou muito elevada. Por outro lado, os

edifícios das freguesias das Furnas e da Ribeira Quente apresentam na sua maioria vulnerabilidade elevada ou muito elevada. Em resultado, na cartografia do risco de radão no ar para estas duas freguesias os edifícios apresentam, maioritariamente, risco elevado ou muito elevado.

Nos ensaios de monitorização contínua realizados foi aplicada a análise de regressão múltipla e a análise espectral às séries temporais de dados obtidas de modo a compreender e filtrar a influência de factores externos (parâmetros meteorológicos, ventilação dos edifícios e pressão barométrica no interior do edifício). Os valores de concentração de radão obtidos oscilaram entre 0 e 16 700 Bq/m³ e os de CO₂ variaram entre 0 e 8,5 %vol.. Nos modelos propostos as variáveis que surgem com significância estatística são a ventilação, o diferencial de pressão entre o interior e o exterior do edifício, a humidade do solo, a velocidade do vento, a concentração de CO₂ no ar interior do edifício, a temperatura do ar e a humidade relativa do ar explicando entre 35,7 e 71 % das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior destes edifícios. A análise espectral permitiu a identificação de variações cíclicas diárias associadas a um e a dois ciclos por dia para um dos locais de amostragem enquanto que o espectrograma apenas revela variações cíclicas diárias associadas a dois ciclos por dia. A pressão barométrica, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar e a velocidade do vento são as variáveis correlacionadas com a concentração de radão no ar interior deste edifício associada às variações de dois ciclos por dia, para os períodos em que foi possível efectuar esta correlação. Na gama de baixas frequências do espectro reconhecem-se variações periódicas associadas a 682, 341 e 62 dias.

A realização deste trabalho permitiu obter a definição de um nível de referência da desgaseificação difusa do radão no solo que pode constituir uma importante ferramenta em termos de estratégias de monitorização sismovulcânica, de definição de zonas com potencial para a exploração geotérmica e de ordenamento de território. Também a identificação dos parâmetros externos que exercem influência nas variações temporais deste gás dá indicações quanto ao modo de resposta do radão em diferentes ambientes de desgaseificação. Tal é particularmente importante quando

se considera a existência de espaços fechados como é o interior de edifícios onde a presença de radão pode atingir concentrações muito superiores às recomendadas pela legislação regional e pela Organização Mundial de Saúde, apenas em resultado de diferentes condições meteorológicas. As metodologias aplicadas podem ser estendidas a outras áreas de modo a caracterizar-se, através de cartografia, a desgaseificação difusa de radão ao nível do arquipélago.

ABSTRACT

Radon (^{222}Rn) is a radioactive, colourless and odourless noble gas that results from the radioactive decay chain of uranium (^{238}U). This gas is present in all kinds of rocks and soils and can be released from it into air or water where it dissolves. Radon can be an important indicator of deep phenomena and its study can be used, mainly, in the: (a) identification of active faults; (b) seismovolcanic monitoring and (c) geothermal prospection. As a radioactive gas, radon can represent a threat to public health when inhaled/ingested in high concentrations for a long period of time. When dispersed in atmospheric air, radon does not seem to represent danger for the health, however, when it accumulates in confined spaces, as in buildings, it can become a serious threat.

The studied area is located in Furnas Volcano, a trachytic polygenetic centre that consists of a steep-sided caldera complex, where in the last 5000 years at least 10 volcanic eruptions occurred. Several secondary manifestations of volcanism can be observed at Furnas Volcano, as recognized by the presence of fumarolic grounds, thermal springs, CO_2 -rich mineral waters and several soil diffuse degassing areas.

The main goal of this study was to characterize radon diffuse emanations at Furnas Volcano, including the spatial and temporal variation of radon concentration in soil and water. The data acquisition to perform radon concentration maps also included the measurement of carbon dioxide (CO_2) concentration and soil temperature. The measured values show a variation for radon concentration between 0 and 387 527 Bq/m^3 , for CO_2 concentration between 0 and 100 vol.%, and for soil temperature from 16.5 to 100 °C. The data were statistically analysed using both the graphical statistical approach (GSA) to identify the presence of different populations and the sequential Gaussian simulation (sGs) to produce E-type and probability maps and to calculate the uncertainty. The main anomalous zones are, in general, related to the presence of fumarolic fields and with highly fractured zones, such as fault zones,

craters and caldera rims. The location of the anomalous zones allowed defining some alignments with direction NE-SW, NW-SE and E-W and to identify areas for future geothermal prospection. In order to understand and filter the statistical influence of external factors (meteorological parameters and soil CO₂ flux variation) on soil radon concentration from the three monitored sites, multivariate regression and spectral analyses were applied to the respective time series. Soil radon concentration varied between 0 and 153 000 Bq/m³. The regression models show that barometric pressure, soil water content, soil temperature, soil CO₂ flux, air temperature, air relative humidity and wind speed are the statistical meaningful variables explaining between 15.8 % and 73.6 % of soil radon concentration or of log-transformed soil radon concentration variation. Only on one of the monitored sites, spectral analysis allowed to identify seasonal variations and daily variations associated with one cycle per day on winter months. This one cycle per day is correlated with air temperature, air relative humidity and wind speed cycles. Low frequency analyses allowed to identify other periodical variations related with 340, 48 and 15 days cycles.

Regular sampling of radon concentration and water temperature were performed at some springs namely Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis, Caldeirão, Água da Prata, Dr. Miguel Henrique, Quenturas I, Quenturas II, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II and Torno. In this selection it was taken into account the different types of springs that are present at this volcano. The average values of water radon concentration ranged between 1149 Bq/m³ at Água da Prata spring and 29 765 Bq/m³ at Dr. Miguel Henrique spring and the temperature average values oscillated between 16.5 °C at Água Azeda do Rebentão spring and 76.2 °C at Caldeirão spring. Water radon concentration and temperature show an inverse correlation. The variations of these parameters seem to be related with seasonal variations of soil temperature, rainfall and soil water content. The water radon concentration values and the estimated values of the annual effective dose are low, and do not reach the limit values suggested by the World Health Organization.

To assess the indoor radon concentration regular measurements were conducted in some selected buildings at Furnas and Ribeira Quente villages. In each

selected building two measurements were performed, to cover summer and winter months. The values obtained are higher in winter months. The calculated annual average of indoor radon concentration range between 23 and 6403 Bq/m³ and the annual effective dose oscillated from 0.4 to 107.6 mSv/ano. At 33 % of the buildings of Furnas village and 21 % of the buildings of Ribeira Quente village the indoor radon concentration annual average is above the recommended limit in the regional legislation (150 Bq/m³). At Furnas village about 6 % of the buildings have an annual effective dose average above the recommended limit by the International Commission on Radiological Protection and the World Health Organization (10 mSv/ano).

The radon risk assessment for human exposure, was assessed by integrating the susceptibility given by soil radon maps with the vulnerability of the buildings. In what concerns the susceptibility of soil radon the assessment done demonstrates that Furnas and Ribeira Quente villages have an important area with high to very high susceptibility. Also the vulnerability assessment shows that the buildings at these two villages have a high to very high vulnerability to radon entry. The resulting radon concentration exposure risk maps reveals that the majority of the buildings show a high to very high risk of exposure to radon.

Complementarily, continuous monitoring tests in three buildings at Furnas village were performed. In order to understand and filter the statistical influence of external factors (meteorological parameters, barometric pressure inside the building, ventilation and indoor CO₂ concentration) on the indoor radon concentration, multivariate regression and spectral analyses were applied to the time series recorded. Indoor radon concentration varied between 0 and 161 700 Bq/m³ and CO₂ values oscillated between 0 and 8.5 vol.%. The resulting regression models identify ventilation, differential indoor and outdoor barometric pressure, soil water content, wind speed, indoor CO₂ concentration, air temperature, and air relative humidity as the statistical meaningful variables explaining between 35.7 % and 71 % of the total log-transformed indoor radon concentration variation. Spectral analysis from one of the monitored buildings displayed daily variations associated with one and two cycles per day, but in the resulting spectrogram just the two cycles per day appear after the first

sampling year. The two cycles per day is correlated with barometric pressure, air temperature, air relative humidity and wind speed cycles, in the sampling periods where this analysis was possible to be applied. Low frequency analyses allowed to identify other periodical variations related with 682, 341 and 62 days cycles.

The present work allowed defining the baseline for soil radon diffuse degassing at Furnas Volcano and can represent an important tool in what concerns seismovolcanic monitoring, geothermal prospection, and land-use planning. Also the recognition of what external parameters have influence in radon temporal variations gives indications about how it responds at different degassing environments. This knowledge is crucial for closed environments, such as inside buildings, where indoor radon can reach concentrations clearly above the recommended threshold values established by regional legislation and by the World Health Organization just due to different meteorological conditions. Future works should be conducted on different areas, regarding radon mapping, to allow characterizing radon soil diffuse degassing at the Azores archipelago.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Nota Prévia

Os vulcões activos, durante períodos de actividade eruptiva ou entre erupções, manifestam diversos sinais que reflectem o seu estado presente de actividade, incluindo fenómenos de desgaseificação e anomalias térmicas. Uma vez que a actividade vulcânica varia no tempo e no espaço, os vulcões devem ser monitorizados regularmente, e sempre que possível através de metodologias que permitam uma monitorização contínua, de modo a que se possa compreender a dinâmica de cada vulcão (Stix e Gaonac'h, 2000).

Os gases vulcânicos correspondem a uma componente muito importante dos sistemas vulcânicos, pelo que o seu estudo permite a compreensão de fenómenos que ocorrem em profundidade. Através da análise dos gases que ascendem à superfície da Terra é possível inferir importantes informações como a localização de corpos magmáticos, o modo como o magma ascende até à superfície, a influência da presença de sistemas hidrotermais e o tipo de erupção que irá ocorrer (Stix e Gaonac'h, 2000).

O presente trabalho tem como objectivo principal o estudo da desgaseificação difusa de radão (^{222}Rn) em sistemas hidrotermais/vulcânicos, utilizando o Vulcão das Furnas como laboratório experimental. Neste capítulo pretende-se salientar a importância dos gases vulcânicos nas diversas fases de actividade de um vulcão, com particular incidência no caso do ^{222}Rn , assim como, o seu papel como precursor de actividade sismovulcânica, indicador da presença de zonas de falha/fracturas e indicador de locais com potencial para a exploração geotérmica. Uma vez que o transporte do ^{222}Rn está fortemente associado à presença de dióxido de carbono (CO_2), este gás será também objecto de atenção neste capítulo. Por fim, como a

presença do ^{222}Rn em espaços confinados (e.g. edifícios) pode ter implicações em termos de saúde pública e no Vulcão das Furnas existem aglomerados populacionais, quer no interior da caldeira, quer no seu flanco S, será ainda descrito o efeito, em termos de saúde pública, da exposição a este gás.

1.2. Gases Vulcânicos

Os gases vulcânicos desempenham um papel crucial no desenvolvimento da actividade vulcânica, podendo ser a força motriz de uma erupção devido à sua rápida exsolução e expansão quando a pressão confinante do magma diminui (Allard, 1983).

Os gases vulcânicos apresentam na sua constituição, como elementos maiores, o hidrogénio (H), o carbono (C), o oxigénio (O), o enxofre (S), o azoto (N) e halogéneos como o cloro (Cl), o flúor (F) e o bromo (Br). Como elementos menores, fazem parte dos gases vulcânicos, os gases raros como o hélio (He), o néon (Ne), o árgon (Ar), o cripton (Kr), o xénon (Xe) e o radão (^{222}Rn). Como elementos traço surgem os metais, como por exemplo o sódio (Na), o vanádio (V), o crómio (Cr), o bismuto (Bi), o cobre (Cu), o zinco (Zn) e o ouro (Au), normalmente associados a fumarolas de alta temperatura (Delmelle e Stix, 2000; Allard, 1983).

A composição química dos gases vulcânicos emitidos por diferentes tipos de vulcões está ilustrada na tabela 1.1. O H surge maioritariamente sob a forma de água (H_2O) e em quantidades menores como molécula de hidrogénio (H_2), metano (CH_4) ou amónia (NH_3). No que se refere ao C, o dióxido de carbono (CO_2) surge como espécie dominante, enquanto o metano (CH_4) e o monóxido de carbono (CO) aparecem em quantidades menores. O S surge principalmente sob a forma de dióxido de enxofre (SO_2) e de sulfureto de hidrogénio (H_2S), podendo surgir também, em menores quantidades, como moléculas de enxofre (S_2) ou como sulfureto de carbonilo (COS). Os halogéneos aparecem sob a forma de ácidos, sendo o gás dominante o cloreto de hidrogénio (HCl), surgindo em menores quantidades o fluoreto de hidrogénio (HF) e o brometo de hidrogénio (HBr). O azoto surge essencialmente como molécula de azoto (N_2) (Delmelle e Stix, 2000).

Tabela 1.1 – Composição química dos gases vulcânicos emitidos em diferentes vulcões (modificado de Delmelle e Stix, 2000 e referências nele citadas).

Vulcão	Kilauea	Kilauea	Ert'a' Ale	Usu	Usu	White Island	White Island	Kudriav	Galeras	Nevado del Ruiz
Localização	Havai	Havai	Etiópia	Japão	Japão	Nova-Zelândia	Nova-Zelândia	Rússia	Colômbia	Colômbia
Enquadramento tectónico	Pluma mantélica	Pluma mantélica	Placa divergente	Placa convergente	Placa convergente	Placa convergente	Placa convergente	Placa convergente	Placa convergente	Placa convergente
Actividade	Lago de lava	Zona de rift	Lago de lava	Domo	Domo	Cratera	Cratera	Cratera	Domo	Cratera
Data	25-03-1918	14-01-1983	23-01-1974	08-09-1954	26-06-1985	07-02-1972	13-06-1973	Ago-1995	06-01-1990	Dez-1986
Temperatura (°C)	1170	1010	1130	800	336	620	135	920	187	85
H ₂ O	370 900	798 000	794 000	980 000	999 000	911 000	983 000	953 000	943 000	644 000
CO ₂	489 000	31 500	104 000	12 000	400	49 480	14 450	16 100	22 230	338 000
SO ₂	118 400	149 000	67 800	430	32	18 180	2008	10 600	-	1100
H ₂ S	400	6220	6200	4	35	7190	183	2100	-	10 400
S _{total} (SO ₂ + H ₂ S)	118 800	155 220	74 000	434	67	23 370	2191	12 700	23 030	11 500
HCl	800	1000	4200	530	170	11 570	131	2000	7180	320
HF	-	1900	-	240	-	410	18	960	-	-
NH ₃	-	-	-	1,7	-	17,9	-	-	-	-
He	-	-	-	-	-	-	-	0,13	0,9	-
Ar	-	-	-	0,25	0,25	-	-	0,5	48	7,1
H ₂	4900	9025	14 900	6300	390	925	48	5760	29	1230
N ₂	-	-	1800	570	14	-	150	220	4218	2100
CH ₄	-	-	-	17	0,44	-	-	0,03	0,46	1680
CO	15 100	592	4600	33	-	-	-	11	<1	<0,4
H ₂ O/CO ₂	0,8	25	8	82	2498	18	68	59	42	1,9
S _{total} /CO ₂	0,24	4,9	0,7	0,04	0,17	0,51	0,15	0,79	1	0,03
S _{total} /HCl	149	155	18	0,8	0,4	2,2	17	6,3	3	36

Os gases emitidos pelos vulcões podem ser libertados em zonas localizadas, como é o caso de crateras activas ou de fumarolas, ou de um modo difuso, por exemplo, através dos solos. Os gases libertados nas colunas eruptivas são importantes indicadores da dinâmica da câmara magmática e da escala temporal dos processos de desgaseificação (Gauthier *et al.*, 2000). Por outro lado, os gases libertados de modo difuso fornecem informações relativamente à permeabilidade dos edifícios vulcânicos, ao seu potencial para a desgaseificação noutras áreas para além da cratera e à sua capacidade para libertarem grandes quantidades de gases sem ser em zonas localizadas (Stix e Gaonac'h, 2000; Delmelle e Stix, 2000).

1.3. Desgaseificação Difusa

A exsolução e escape de espécies voláteis pouco solúveis a partir de corpos magmáticos, localizados em profundidade, pode-se reflectir à superfície através da presença de plumas, fumarolas, nascentes termais e gasocarbónicas e pela desgaseificação difusa através dos solos. A emissão permanente de gases libertados pelo magma em vulcões activos é um processo bastante comum, ocorrendo mesmo em fases de dormência destes vulcões (Williams-Jones e Rymer, 2000).

Durante muitos anos pensou-se que a maior parte dos gases vulcânicos seriam emitidos através das crateras dos vulcões. Só na década de 80 foi reconhecida a importância da desgaseificação difusa como processo de libertação de quantidades consideráveis de gases vulcânicos (e.g. Allard *et al.*, 1991; Baubron *et al.*, 1990; 1991; Allard, 1992). Trabalhos desenvolvidos no Vulcão Etna (Allard *et al.*, 1991) demonstraram que a quantidade de CO₂ libertado de modo difuso através dos flancos (55 Gg CO₂ d⁻¹) pode ser da mesma ordem de grandeza do que a libertada ao nível da cratera (70 Gg CO₂ d⁻¹). Os mesmos autores verificaram que a ocorrência de zonas de concentração de CO₂ anómala no solo surgia associada à presença de outros gases como o He e o ²²²Rn, e que as zonas de escoadas lávicas formadas por erupções recentes não apresentavam desgaseificação difusa anómala, concluindo que a presença deste gás não poderia ser atribuída à desgaseificação residual de produtos anteriormente extruídos, mas que deveria ter origem em profundidade.

Num sistema vulcânico os gases libertados ao nível da cratera correspondem normalmente a H₂O e ao CO₂ associados a gases reactivos como o SO₂ e o HCl (Tabela 1.1). Em contraste, os gases libertados de modo difuso, em locais sem anomalia térmica, são desprovidos de H₂O, SO₂ e HCl sendo essencialmente constituídos por CO₂ e em menores quantidades por H₂ e gases raros (He e ²²²Rn). O estudo da desgaseificação difusa de um vulcão é muito importante, quer para o cálculo

total dos gases emitidos (e.g. Allard *et al.*, 1991), quer para a monitorização sismovulcânica (Baubron *et al.*, 1991; Williams-Jones *et al.*, 2000; Parks *et al.*, 2013).

1.3.1. Dióxido de Carbono (CO₂)

O CO₂ é um gás incolor, inodoro e mais denso (44 g/mol) do que ar (29 g/mol). É, a seguir ao vapor de água, o gás libertado em maiores quantidades pelos vulcões e um dos primeiros gases a ser exsolvido e libertado pelo magma (Holloway e Plank, 1994; William-Jones e Rymer, 2000; Bruno *et al.*, 2001). Deste modo, o aumento da emissão de CO₂ de um vulcão corresponde a um forte indício da ascensão de magma e/ou da ascensão de gases provenientes de magma existente em profundidade e a detecção de emissões anómalas deste gás à superfície permite a identificação de zonas de maior permeabilidade como, por exemplo, zonas de falhas (e.g. Baubron *et al.*, 1990; Chiodini *et al.*, 1998; Allard *et al.*, 1998; Giammanco *et al.*, 1998; Bruno *et al.*, 2001; Aiuppa *et al.*, 2004). Por outro lado, sendo a sua presença tão abundante no geogás, o CO₂ é o constituinte perfeito para o transporte de gases raros até à superfície como, por exemplo, o radão (e.g. Guerra e Lombardi, 2001). O CO₂ pode ter diversas origens, nomeadamente, pode ser proveniente do manto, de rochas carbonatadas existentes na crosta ou ser resultado de actividade biogénica (Toutain *et al.*, 2002). A emissão de CO₂, a uma escala global, associada à actividade vulcânica subaérea e submarina, está estimada actualmente em aproximadamente 0,13 a 0,44 Gt por ano (Gerlach, 2011 e referências nele citadas).

Apesar de ser um gás asfixiante, a libertação de CO₂ de modo difuso através dos solos para a atmosfera normalmente não representa perigo para a saúde, uma vez que este se dispersa rapidamente no ar atmosférico, no entanto, e como se trata de um gás mais denso que o ar pode representar perigo em zonas pouco ventiladas ou deprimidas. São diversos os casos reportados de vítimas mortais associadas a fenómenos de degaseificação difusa no que se refere à presença de elevadas concentrações de CO₂, sendo os mais dramáticos o caso da erupção freática do Dieng

Plateau na Indonésia em Fevereiro de 1979, que teve como consequência a morte de, pelo menos, 142 pessoas (Allard *et al.*, 1989), e o do Lago Nyos (Camarões), onde uma nuvem de CO₂ provocou a morte de pelo menos 1700 pessoas no dia 21 de Agosto de 1986 (Barberi *et al.*, 1989; Tazieff, 1989). Devido a emissões continuadas de CO₂ no Vulcão Alban Hills (Itália) foi reportada, num período de 20 anos, a morte de 10 pessoas (Beaubien *et al.*, 2003). Nos Açores, em 1992 na Furna do Enxofre, na ilha Graciosa, faleceram dois turistas devido à presença de elevadas concentrações deste gás nesta gruta lávica. No dia do incidente os valores de concentração de CO₂ no ar junto ao lago desta gruta rondavam os 15 %vol. (Gaspar *et al.*, 1998). Os sintomas da exposição a diferentes concentrações de CO₂ estão sintetizados na tabela 1.2.

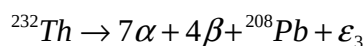
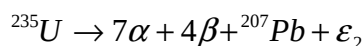
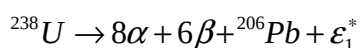
A libertação de CO₂ pode ter ainda consequências na fauna e flora como as reportadas na Caldeira de Long Valley (E.U.A.), na região de Mammoth Mountain onde a libertação de CO₂ afectou uma área superior a 500 000 m² provocando a morte da vegetação, essencialmente árvores (William-Jones e Rymer, 2000). Em 1999, na vila Cava dei Selci (Vulcão Alban Hills, Itália), foi reportada a morte de 30 vacas e algumas ovelhas como consequência da libertação de grande concentração de CO₂ associada a actividade sísmica na zona (Annunziatellis *et al.*, 2003) e, no caso do lago Nyos, a vida animal foi afectada até 14 km de distância do lago (Tazieff, 1989). Em regiões vulcânicas é frequentemente reportada a morte de pequenos animais em zonas deprimidas, este é também o caso do Vulcão das Furnas onde foi relatada a morte de baratas, pássaros, ratos, gatos e galinhas (Sousa, 2003; Viveiros, 2010).

Tabela 1.2 – Efeitos e limites de exposição médios para o CO₂ considerando adultos saudáveis (modificado de Viveiros, 2010 e referências nele citadas).

Concentração (%)	Tempo de exposição	Efeitos	Observações
0,033			Ar atmosférico
0,5	8 h diárias em ambiente de trabalho		Limite de exposição admissível (PEL – Permissible Exposure Limit)
0,5 a 3,0	Algumas horas	Dificuldade em respirar. Aumento do ritmo cardíaco. Dores de cabeça.	
	15 minutos		Limite de exposição para um curto período (STEL – Short-Term Exposure Limits)
3,0	> 15 minutos	100% aceleração da respiração. Dores de cabeça. Fraqueza muscular.	
5,0		300% aceleração da respiração. Dores de cabeça. Fraqueza muscular. Depressão nervosa. Vômitos. Tonturas. Ruído nos ouvidos. Sonolência.	
10,0	Alguns minutos	Inconsciência. Recuperação rápida dos indivíduos quando colocados em ambiente ventilado.	
> 15,0		Rápida inconsciência. Morte.	

1.3.2. Radão (^{222}Rn)

Os materiais geológicos contêm pequenas quantidades de elementos químicos capazes de emitirem radioatividade natural. Esta capacidade radioactiva dos materiais terrestres resulta da presença de elementos radioactivos como o urânio-238 (^{238}U), o urânio-235 (^{235}U), o tório (^{232}Th) e o potássio (^{40}K), provenientes da nébula solar que originou a Terra. Em resultado da diferenciação estes elementos distribuíram-se preferencialmente no manto e crosta terrestre produzindo três séries de decaimento, que se podem representar do seguinte modo (Garzón e Garzón, 2001):



$\varepsilon_i^* (i = 1, 2, 3) \rightarrow \text{energia de reacção}$

A maioria dos elementos ocorre na natureza sob a forma de vários tipos de átomos (isótopos) apresentando uma configuração electrónica semelhante, mas um número de neutrões diferente e consequentemente uma massa também distinta (Allard, 1983). Na natureza existem 32 isótopos do radão (Wiegand, 2001). Os mais importantes são: o actínio (^{219}Rn), o torão (^{220}Rn) e o radão (^{222}Rn) e resultam das três séries de decaimento anteriormente descritas (Tabela 1.3).

Tabela 1.3 – Tempo de semi-vida do primeiro elemento das séries radioactivas, do potássio (^{40}K) e dos isótopos de radão (modificado de Garzón e Garzón, 2001 e referências nele citadas).

Radionuclídeos	Semi-vida (anos)	Isótopos do Rn	Semi-vida
^{238}U	$4,46838 \times 10^9$	^{222}Rn (Radão)	3,82 dias
^{235}U	$0,70385 \times 10^9$	^{219}Rn (Actínio)	3,90 segundos
^{232}Th	$14,0500 \times 10^9$	^{220}Rn (Torão)	59,50 segundos
^{40}K	$1,27778 \times 10^9$	-	-

De entre os vários isótopos do radão o mais relevante, no contexto deste trabalho, é o ^{222}Rn , pelo que, qualquer referência genérica ao elemento radioactivo radão corresponde a este isótopo. O ^{222}Rn é o isótopo seleccionado para estudo uma vez que:

- (a) é um importante indicador de fenómenos que ocorrem em profundidade (Allard, 1983);
- (b) os métodos para a sua detecção são práticos e económicos;
- (c) apresenta um tempo de semi-vida muito superior aos seus isótopos (^{220}Rn e ^{219}Rn), o que facilita a sua detecção (Garzón e Garzón, 2001);
- (d) o ^{238}U é muito mais abundante na natureza relativamente aos seus isótopos (Spencer, 1992).

O radão é um gás radioactivo natural, incolor e inodoro pelo que a sua detecção só é possível através da utilização de equipamento específico (Appleton, 2005). O radão pertence à série de decaimento do urânio (^{238}U) e resulta do decaimento directo do rádio (^{226}Ra) (Figura 1.1) (Hasbrouck, 1983).

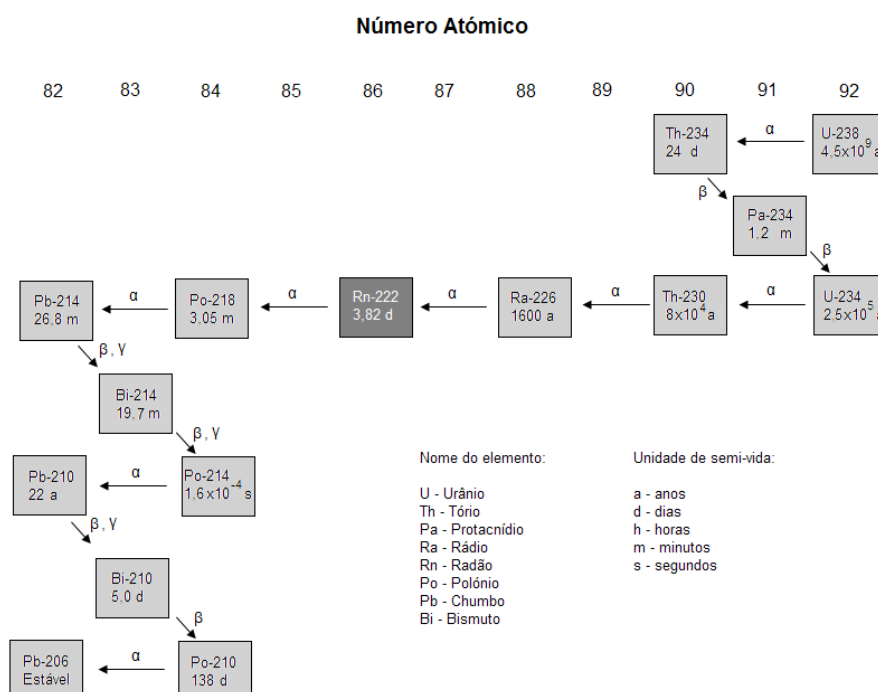


Figura 1.1 – Série de decaimento do ^{238}U (modificado de Hasbrouck, 1983 e de Spencer, 1992).

O ^{226}Ra está presente praticamente em todo o lado, nomeadamente em rochas da crosta e em solos, podendo a sua concentração variar desde quantidades vestigiais até quantidades que permitem a sua exploração (Yu *et al.*, 2006). Esta cadeia radioactiva, que se inicia com o decaimento do ^{238}U , termina com uma forma estável de chumbo (^{206}Pb) (Hasbrouck, 1983).

O radão é um gás quimicamente inerte e pertence, na tabela periódica, ao grupo dos gases nobres. O radão tem um tempo de semi-vida de apenas 3,82 dias e ao decair liberta do núcleo uma partícula α (alfa) transformando-se no elemento seguinte da cadeia, o polónio-218 (^{218}Po) (Figura 1.1).

A partícula α libertada neste processo é constituída por dois neutrões e dois prótons apresentando assim carga +2 (Spencer, 1992). A radioactividade emitida é medida, no Sistema Internacional, em becquerel por metro cúbico (Bq/m^3) em que 1 Bq/m^3 corresponde à desintegração de um átomo de radão por segundo por metro cúbico de ar. Aquando da formação do radão, a partícula α libertada apresenta energia cinética suficiente para provocar o deslocamento, em sentido oposto, do átomo de radão, processo que se designa por recuo ou coice (*α recoil*). O átomo de radão agora formado, dependendo da sua localização no grão mineral, pode ser libertado para os poros existentes no solo ou para as fracturas das rochas como consequência desse movimento de recuo ou pode, de forma mais lenta, migrar na estrutura molecular do mineral e ser libertado por difusão (Spencer, 1992).

Sendo um gás inerte, o radão não estabelece ligações químicas o que lhe permite deslocar-se livremente através dos poros do solo e de material geológico permeável ou ser transportado por água e/ou outros gases presentes em profundidade, podendo ser posteriormente transferido para o ar atmosférico ou para o ar interior de algum edifício (Spencer, 1992; Ciolini e Mazed, 2010).

1.4. Aplicações do Estudo de Desgaseificação Difusa do



1.4.1. Presença de Falhas Activas

Apesar do radão estar presente nos diferentes tipos de materiais geológicos, as concentrações elevadas deste gás na superfície terrestre estão normalmente associadas à presença de rochas enriquecidas em urânio e rádio. No entanto, zonas anómalas de desgaseificação de radão podem também surgir em situações específicas, como sejam, a presença de falhas tectónicas, de rochas carbonatadas carsificadas ou de rochas que apresentem grande fracturação (Swakon *et al.*, 2005 e referências nele citadas).

As anomalias encontradas em zonas de falhas são resultado da migração de radão existente em zonas mais profundas, onde a concentração deste gás é maior (King *et al.*, 1996). Como nas zonas de falha a permeabilidade das rochas é maior, devido à fracturação, o geogás presente em zonas de maior profundidade ascende mais facilmente à superfície através destas descontinuidades, arrastando consigo o radão presente em zonas mais profundas (King *et al.*, 1996; Ciotoli *et al.*, 1999; Baubron *et al.*, 2002; LaBrecque e Cordoves, 2003; Annunziatellis *et al.*, 2003; Burton *et al.*, 2004; Inceoz *et al.*, 2006). Estudos como os realizados por King *et al.* (1996) em falhas activas na Califórnia (EUA), por Al-Tamimi e Abumurad (2001) em falhas no N da Jordânia, por Inceoz *et al.* (2006) nos sistemas de falhas a N e a E da placa da Anatólia (Turquia), por Swakon *et al.* (2005) em falhas da região de Krakow (Polónia) e por Pereira *et al.* (2010) em falhas localizadas em Oliveira do Hospital (Portugal) revelam que, nas proximidades de zonas de falhas, os valores de concentração de radão são extremamente elevados quando comparados com os valores de base, podendo mesmo atingir concentrações cerca de cem vezes superiores aos valores

encontrados no solo nas zonas mais afastadas das mesmas. Por outro lado, a migração do radão pode ser limitada pela presença de níveis impermeáveis, ficando, neste caso, a sua ascensão até à superfície condicionada à presença de falhas (Swakon *et al.* 2005). A emissão de radão ao longo de falhas depende de diversos factores tais como: (a) o grau de fracturação; (b) o tipo de material que preenche a falha e (c) a profundidade do plano de falha (Kresl *et al.*, 1993).

Os estudos da desgaseificação difusa de radão na superfície terrestre, nomeadamente através da identificação de zonas anómalas, podem constituir importantes ferramentas na identificação de falhas activas, na confirmação da presença de falhas ocultas e no mapeamento de falhas (Aubert e Baubron, 1988; King *et al.*, 1996; Ciotoli *et al.*, 1999; Burton *et al.*, 2004; Inceoz *et al.*, 2006; Neri *et al.*, 2011).

1.4.2. Actividade Sísmica

As variações dos campos de tensões associadas a sismos podem ser suficientes para provocar alterações na concentração de radão medida em níveis mais superficiais do solo. Incrementos na concentração deste gás (anomalias positivas) estão associados ao aumento da emissão do radão dos grãos minerais devido a um incremento da temperatura, aumento da área de emissão e à deformação dos cristais (Cox, 1980; Toutain e Baubron, 1999). Estas variações de tensão podem ser suficientes para aumentar a microporosidade na rocha, conduzindo à libertação anómala de radão, mesmo que ainda não tenha ocorrido a ruptura da rocha, isto é, antes da ocorrência do sismo (*e.g.* Nishizawa *et al.*, 1998; Coutinho, 2000). Por outro lado, as alterações observadas podem corresponder a uma diminuição da concentração de radão (anomalias negativas) como resultado do fecho de fissuras e consequentemente da diminuição da área de emissão deste gás ou então do preenchimento das novas fissuras por água com baixa concentração de radão, pelo que o radão que vai sendo libertado das rochas permanece em profundidade

dissolvido na água (Talwani *et al.*, 1980). Em 1973 surgiu o modelo da dilatância que, em conjunto com a difusão da água, explica a ocorrência de alguns percursores de eventos sísmicos. A dilatância resulta da ocorrência e propagação de fracturas nas rochas e tem início quando se atingem tensões tão baixas como metade da tensão de ruptura (Scholz *et al.*, 1973). Tendo em atenção a distribuição dos campos de tensão, as anomalias positivas estão associadas a regiões de forças compressivas e, consequentemente, as anomalias negativas a áreas de forças distensivas (Birchard e Libby, 1980).

As anomalias de radão descritas na literatura associadas a eventos sísmicos, quer no que diz respeito a estudos da concentração e fluxo deste gás no solo, quer da sua concentração na água, reflectem um comportamento complexo e nem sempre uniforme das variações deste gás. Trabalhos realizados no sistema de falhas de Santo André, na zona central da Califórnia (Estados Unidos da América), reportam anomalias positivas de radão no solo que precederam e acompanharam a ocorrência de sismos com magnitudes superiores a 4. Estas anomalias caracterizaram-se por apresentarem valores máximos até duas vezes superiores aos valores médios e mantiveram-se por períodos que variaram entre semanas até 3 meses (King, 1980). Em Taiwan, a monitorização contínua de radão no solo numa zona de falha permitiu detectar incrementos da concentração deste gás que precederam a ocorrência de sismos com magnitudes superiores a 4,5. Estes incrementos normalmente ocorrem 1 a 20 dias antes da ocorrência dos eventos sísmicos (Yang *et al.*, 2005). Numa zona de falhas na região do Vale Kangra (Himalaias), na Índia, foram observadas anomalias de radão no solo, positivas e negativas, associadas a sismos com magnitudes compreendidas entre 2,2 e 5. As anomalias reportadas ocorreram em intervalos desde 13 dias antes e o próprio dia em que decorreu o sismo (Kumar *et al.*, 2009). Também na Índia, estudos da concentração de radão no solo realizados na região de Koyna, permitiram detectar incrementos acentuados da concentração deste gás 20 dias antes da ocorrência de dois sismos com magnitudes de 4,7 e 5,1, respectivamente. No que diz respeito ao sismo de magnitude 4,7, estes incrementos foram 7 vezes superiores aos valores de base enquanto que, no que se refere ao sismo de magnitude 5,1, foram atingidos valores 3000 vezes superiores (Reddy e Nagabhushanam, 2011). O estudo das

variações do fluxo de radão no solo também parece ser um promissor indicador da ocorrência de eventos sísmicos. Em Langadas, na Grécia, foram instaladas três estações para monitorizar em contínuo o fluxo de radão no solo junto a uma zona de falha. Foram identificadas anomalias do fluxo de radão registadas antes ou após a ocorrência de sismos com magnitudes superiores a 4. Estas anomalias correspondem a incrementos no fluxo de radão com duração entre 1 a 3 semanas, podendo os valores de fluxo deste gás ser cerca de 7,5 vezes superior aos valores médios (Papastefanou, 2010).

Estudos da concentração de radão na água realizados em Izu-Oshima-Kinkai, no Japão (Wakita *et al.*, 1980) e na Carolina do Sul, nos Estados Unidos da América (Talwaki *et al.*, 1980) descrevem decréscimos da concentração de radão na água seguidos de incrementos acentuados mantendo-se os valores elevados até à ocorrência de sismos com magnitudes de 7 e 2,3, respectivamente. Por outro lado, diminuições da concentração de radão na água foram observadas em Tangshan, na China (Wakita *et al.*, 1988); em Sucre, na Venezuela (LaBrecque *et al.*, 2001) e em Antung, em Taiwan (sismos em Chengkung, Taitung e Antung) (Kuo *et al.*, 2006; 2009; 2010), antes da ocorrência de sismos com magnitude superior a 4,6. Na China, na rede de monitorização nacional de radão na água com cerca de 151 pontos de amostragem, foram detectadas variações na concentração de radão em cerca de 30 pontos de amostragem. As variações observadas correspondem, quer a incrementos, quer a diminuições bruscas da concentração de radão e ocorreram, em todos os casos, após o evento sísmico de magnitude 8 que ocorreu em Wenchuan (Ren *et al.*, 2012).

Estudos realizados em Northamptonshire, no Reino Unido (Crockett *et al.*, 2006), onde foram efectuadas medições em contínuo no ar interior de edifícios, permitiram identificar anomalias de curto período de radão que precederam um sismo de magnitude 5, com uma antecedência entre 6 e 9 horas.

Dada a complexidade das variações da concentração de radão é extremamente difícil relacionar a ocorrência de anomalias deste gás com uma futura

ocorrência de sismos. Se por um lado diversos estudos parecem indicar que realmente essa relação existe (e.g. King, 1980; Talwani *et al.*, 1980; Kumar *et al.*, 2009), por outro lado, factores não relacionados com eventos sísmicos (e.g. variações de parâmetros meteorológicos) podem, em determinado contexto, provocar alterações na concentração de radão conduzindo à ocorrência de anomalias que não são precursoras de actividade sísmica (e.g. Garavaglia *et al.*, 1998; Chyi *et al.*, 2001). Também se verifica a ocorrência de sismos que não são precedidos por anomalias de radão (e.g. Wakita *et al.*, 1988) ou anomalias de radão que surgem somente após a ocorrência do sismo (e.g. Talwani *et al.*, 1980). Deste modo, quando se pretende identificar anomalias de radão associadas a eventos sísmicos, a monitorização deve ser feita de modo contínuo e as estações de radão devem estar instaladas em locais onde estes eventos são esperados, isto é, nas proximidades de falhas ou de zonas de falhas. Por outro lado, é necessário identificar e eliminar a influência de factores externos que podem contribuir para a variação da concentração de radão nestas zonas, tais como, variações de parâmetros meteorológicos (e.g. pressão barométrica, temperatura do ar e do solo, pluviosidade, humidade do solo e velocidade do vento) (Garavaglia *et al.*, 1998; Chyi *et al.*, 2001; Kumar *et al.*, 2009).

1.4.3. Actividade Vulcânica

Num sistema vulcânico activo as zonas de circulação de gases e fluidos podem mudar ao longo do tempo. Podem surgir novas zonas de fractura como resultado de actividade sísmica ou de erupções facilitando a libertação de gases do magma. Por outro lado, pode ocorrer o fecho de zonas de fractura através da sua colmatação. Essa colmatação pode ser resultante da movimentação de magma ou de fluidos cujo arrefecimento permite a precipitação de elementos dissolvidos (Stix e Gaonac'h, 2000).

Alterações da permeabilidade de edifícios vulcânicos podem provocar alterações na pressão do sistema que, se atingir valores críticos, pode conduzir a um

episódio eruptivo. Um modo de monitorizar as mudanças de permeabilidade e de pressão é através da análise dos gases libertados. Quando um sistema vulcânico é permeável e aberto, o fluxo de gases é elevado e são libertadas concentrações elevadas de gases magmáticos, como o SO_2 e o HCl . Quando o sistema está parcialmente fechado, o fluxo de gases vulcânicos diminui aumentando a libertação de gases hidrotermais como o CO_2 e o vapor de água (Stix e Gaonac'h, 2000).

Devido ao curto período de semi-vida do radão, as medições deste gás efectuadas à superfície de um vulcão são provenientes de níveis superficiais e não de magma ou de falhas profundas, a não ser que o transporte do radão seja efectuado rapidamente até à superfície (Delmelle e Stix, 2000). Assim, o incremento de radão na superfície do solo pode ser resultado: (a) do incremento da actividade sísmica, e consequente aumento da temperatura, da fracturação e da deformação dos cristais; (b) da ascensão de grandes quantidades de gases (gases de arraste) devido ao aumento da temperatura (c) do aumento da temperatura das águas subterrâneas e/ou do sistema hidrotermal ou ainda (d) da libertação de quantidades elevadas de radão associada à movimentação de magma. Este tipo de fenómeno foi observado em vulcões como o Karymsky, o Kilauea e o Cerro Negro (Chirkov, 1975; Cox, 1980; Connor *et al.*, 1996).

A ascensão de magma, que precede a ocorrência de uma erupção vulcânica, provoca incrementos de temperatura que conduzem à libertação de radão. De acordo com Gasparini e Mantovani (1978) essa libertação ocorre do modo que se segue:

- (a) o radão está presente nas rochas, nos minerais, nos fluidos dos poros e na água subterrânea existentes num vulcão;
- (b) a libertação de fluidos do magma e a sua ascensão até à superfície provoca o aquecimento das rochas encaixantes;
- (c) o aumento da temperatura provoca a remoção do radão presente nos fluidos intersticiais e até mesmo na água subterrânea. Por outro lado, em rochas fortemente fracturadas esse incremento de temperatura pode ser suficiente para provocar o escape do radão de rochas e minerais por difusão. A passagem de gases por níveis de água pode provocar um

reequilíbrio entre as fases gasosas e líquidas conduzindo à remoção do radão desta última;

(d) o radão é transportado para a superfície por difusão ou advecção;

(e) o radão concentra-se na água subterrânea pouco profunda ou nos espaços existentes no solo.

Trabalhos realizados em vulcões como, por exemplo, o Karymsky em Kamchatka (Chirkov, 1975), o Kilauea no Hawai (Thomas *et al.*, 1986), o Cerro Negro na Nicarágua (Connor *et al.*, 1996), o Popocatepetl no México (Armienta *et al.*, 2002), o Etna em Itália (Immè *et al.*, 2005, 2006a, 2006b; Neri *et al.*, 2006; La Delfa *et al.*, 2007), o Stromboli em Itália (Cigolini *et al.*, 2005, 2009) e Vulcano em Itália (Baubron *et al.*, 1990) têm evidenciado a importância da identificação de anomalias de radão associadas à ocorrência de erupções vulcânicas, quer através de estudos da desgaseificação difusa do radão no solo (variações temporais e espaciais), quer através da medição deste gás em nascentes. No entanto, é necessário ter em consideração na análise e interpretação das anomalias de radão os factores que podem influenciar a origem e transporte deste gás (Connor *et al.*, 1996). A desgaseificação difusa do radão através dos solos constitui um excelente instrumento de monitorização de sistemas vulcânicos uma vez que, por um lado, possibilita um acompanhamento, em períodos de crise, a uma distância segura da cratera em erupção (Baubron *et al.*, 1991; Connor *et al.*, 1996) e por outro lado, o seu estudo em períodos de repouso, permite a recolha de informações sobre processos que ocorrem em profundidade, pois os gases normalmente atingem as zonas superficiais mais rapidamente do que o magma (Gauthier *et al.*, 2000). Deste modo, as informações recolhidas podem indiciar a ocorrência de intrusões magmáticas, erupções ou alterações na actividade vulcânica, principalmente quando integradas com informações recolhidas por outras técnicas de monitorização, como por exemplo, de geofísica e de geodesia (e.g. Thomas *et al.*, 1986; Heiligmann *et al.*, 1997; Gauthier *et al.*, 2000; Cigolini *et al.*, 2005; Morelli *et al.*, 2006; Laiolo *et al.*, 2012).

1.4.4. Reservatórios Geotérmicos

No interior da Terra está armazenada uma enorme quantidade de energia atingindo temperaturas da ordem dos 4000 °C a 6000 km de profundidade, no núcleo interno. Esta temperatura decresce gradualmente até à superfície terrestre, apresentando a crosta um gradiente geotérmico de 30 °C/km e produzindo um fluxo geotérmico médio de 0,06 W/m² (Balcázar *et al.*, 1990).

No entanto, existem zonas anómalas da crosta terrestre onde o gradiente geotérmico atinge valores superiores. Estas zonas podem resultar, segundo Quintino (1969), de uma distribuição irregular de elementos radioactivos, da dissipação de calor de origem mecânica através de movimentos tectónicos, de reacções químicas que ocorrem no subsolo ou do movimento de fluidos e de magma. De acordo com o gradiente geotérmico as zonas anómalas designam-se de hipertermais ou semitermais. As regiões hipertermais caracterizam-se por apresentarem gradientes geotérmicos superiores a 80 °C/km produzindo fluxos na ordem dos 100 W/m² e estão associadas a limites de placas tectónicas ou a regiões vulcânicas. As regiões semitermais apresentam gradientes geotérmicos entre os 40 °C/km e os 80 °C/km e surgem associadas a anomalias geológicas localizadas em zonas afastadas dos limites de placas tectónicas (Balcázar *et al.*, 1990).

A identificação de zonas de interesse para exploração geotérmica é efectuada através do cruzamento de dados fornecidos pela fotogeologia, hidrogeologia e vulcanologia. Nas zonas identificadas são então aplicadas técnicas geofísicas e geoquímicas de forma a delimitar as zonas cuja exploração possa vir a ser economicamente rentável. No entanto, apenas aquando da execução de furos de prospecção é possível avaliar a rentabilidade da exploração do reservatório. Como a temperatura aumenta com a profundidade e por seu lado a energia aumenta com a temperatura, na maior parte das vezes estes furos têm profundidades superiores a 1 km, pelo que a sua realização encarece muito a prospecção. Assim, torna-se necessário identificar falhas activas, uma vez que estas são bons indicadores da

localização do reservatório geotérmico de modo a reduzir o número de furos a realizar (Balcázar *et al.*, 1990). Como as falhas activas correspondem às trajectórias preferenciais para a ascensão de gases até à superfície, a cartografia de anomalias de radão, pode fornecer boas indicações relativamente à sua localização uma vez que, com o aumento da temperatura aumenta também a quantidade de radão libertado pelos grãos minerais, o transporte de radão por convecção e em alguns casos, aumenta ainda a quantidade de radão que é libertado de águas existentes em níveis mais profundos (Cox, 1980). O radão pode ainda ser utilizado como geomarcador em estudos das variações do fluxo de fluidos em poços geotérmicos (D'Amore *et al.*, 1978/79).

A cartografia da desgaseificação difusa do radão pode ser uma importante ferramenta em termos de prospecção e monitorização de campos geotérmicos uma vez que: (a) anomalias de radão elevadas permitem identificar a presença de falhas activas; (b) os furos geotérmicos mais produtivos estão normalmente associados a áreas de elevada concentração de radão e (c) estudos da variação, a longo prazo, da concentração de radão podem fornecer algumas indicações sobre a termodinâmica envolvida no campo geotérmico em virtude do radão detectado nas zonas de falhas ser transportado para a superfície por processos de desgaseificação (Balcázar *et al.*, 1990).

1.5. ^{222}Rn e Saúde Pública

Sendo o radão o único elemento gasoso da série de decaimento do ^{238}U , é o que apresenta maior mobilidade, podendo portanto ser facilmente introduzido no organismo humano através de dois modos principais: pela sua inalação durante a respiração e pela ingestão de água onde este gás se encontre dissolvido. Cerca de 50 % do total da radiação natural a que os seres vivos estão expostos são resultantes da radiação emitida por este gás (Yu *et al.*, 2006).

Uma vez que o radão é um gás inerte, uma parte substancial do radão que é inalado é expulso do organismo através da sua exalação. No entanto, se este gás decair no interior do organismo, os produtos sólidos resultantes do seu decaimento, que são quimicamente activos, podem aderir às superfícies das vias respiratórias e dos pulmões. As implicações do radão em termos de saúde pública resultam do facto deste gás ser radioactivo e ao decair originar produtos também eles capazes de emitir radiação (Hasbrouck, 1983; Yu *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2008).

Da radiação que é emitida por estes produtos (α , β e γ), as partículas α são as que representam maior perigo, uma vez que são as maiores e as que apresentam maior energia podendo penetrar nos tecidos danificando as células situadas perto das superfícies das vias respiratórias (Hasbrouck, 1983). As partículas α podem penetrar nos tecidos epiteliais do pulmão, provocando danos e mutações nas suas células, através da remoção de electrões das moléculas, nomeadamente de RNA e DNA, afectando consequentemente, quer a informação contida nestas moléculas, quer a divisão celular e podendo ainda causar mutações nos cromossomas (Boice Jr. e Lubin, 1997; Gao *et al.*, 2008). Em casos extremos, estes danos podem ter consequências mais graves conduzindo ao desenvolvimento de cancro no pulmão (Boice Jr. e Lubin, 1997; Gao *et al.*, 2008). Parte do radão e dos produtos resultantes do seu decaimento poderá passar dos pulmões para o sangue, sendo posteriormente distribuídos por todo o corpo podendo afectar outros órgãos. Neste caso, os órgãos

mais afectados serão os que apresentarem maior quantidade de tecido adiposo uma vez que o radão apresenta maior solubilidade neste do que no sangue. No caso particular do polónio (^{210}Po), este pode inclusivamente, ser acumulado nos ossos humanos (Appleton, 2005; Yu *et al.*, 2006).

A evidência clara da relação existente entre a exposição a elevadas concentrações de radão e o cancro de pulmão surge em estudos, como os realizados na Alemanha e em França, efectuados em mineiros que durante muitos anos trabalharam em minas de urânio (Schröder *et al.*, 2002; Laurier *et al.*, 2004). A crescente preocupação com a exposição a este gás e a sua relação com o cancro de pulmão conduziu à realização de diversos estudos com o objectivo de se conhecer a implicação da exposição a este gás no interior de habitações (*e.g.* Planinic *et al.*, 2003; Lubin *et al.*, 2004).

A exposição a concentrações elevadas de radão é considerada a segunda causa de cancro de pulmão a nível mundial, a seguir ao tabaco (WHO, 2009) e a principal responsável por esta doença em não fumadores, estimando-se que a exposição a este gás seja responsável pela morte de 2500 pessoas por ano no Reino Unido (Birchall e Marsh, 2005) e 21 000 pessoas por ano nos Estados Unidos da América (US EPA, 2009a). Em Portugal, estudos desenvolvidos na Região Norte, nos distritos do Porto, Braga, Viana do Castelo, Vila Real e Bragança, estimam que o número de mortes associadas ao cancro do pulmão provocado por exposição ao radão oscilou entre 1565 e 2406 para o período compreendido entre 1995 e 2004, correspondendo a cerca de 18 a 28 % do total de mortes devido a esta doença (Veloso *et al.*, 2012). O risco de se contrair cancro de pulmão é 10 a 20 vezes superior quando se conjugam estes dois factores, isto é, fumadores expostos a elevadas concentrações de radão (Tabela 1.4) (Jones, 1999; Williams-Jones e Reymer, 2000).

Tabela 1.4 – Risco de contrair cancro do pulmão devido a exposição ao radão em fumadores e em não fumadores (modificado de US EPA, 2009a; 2009b).

Concentração de radão (exposição durante toda a vida)	Se 1000 pessoas fumadoras estiverem expostas a esta concentração de radão ...	Se 1000 pessoas não fumadoras estiverem expostas a esta concentração de radão...
740 Bq/m ³	Cerca de 260 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 36 podem desenvolver cancro no pulmão
370 Bq/m ³	Cerca de 150 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 18 podem desenvolver cancro no pulmão
296 Bq/m ³	Cerca de 120 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 15 podem desenvolver cancro no pulmão
148 Bq/m ³	Cerca de 62 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 7 podem desenvolver cancro no pulmão
74 Bq/m ³	Cerca de 32 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 4 podem desenvolver cancro no pulmão
48 Bq/m ³	Cerca de 20 podem desenvolver cancro no pulmão	Cerca de 2 podem desenvolver cancro no pulmão

O efeito resultante da ingestão de água onde o radão está dissolvido é mínimo quando comparado com a inalação deste gás no ar. Se por um lado a quantidade de água que é ingerida é muito inferior à quantidade de ar que é inalado diariamente, por outro lado, e apesar de algumas células da parede do estômago poderem ser afectadas, a maior parte da radiação é absorvida pela presença de alimentos. O maior problema da ingestão de radão dissolvido na água reside na sua transferência, através das paredes do intestino, por difusão (Hasbrouck, 1983). Apesar desta atenuação o radão é também considerado um dos responsáveis pelo cancro do estômago, cólon e de outros órgãos do aparelho digestivo (Voronov, 2004). O radão é ainda suspeito de provocar leucemia (Jones, 1999; Voronov, 2004).

No entanto, alguns autores (Voronov, 2004; Falkenbach *et al.* 2005) reconhecem as águas com elevado teor em radão como as mais eficientes para fins terapêuticos. Este tipo de terapia, aplicado em pacientes com doenças reumáticas conduziu, num espaço de apenas alguns meses (3 a 6), à redução do nível de dor e a melhorias na capacidade locomotora destes doentes (Falkenbach *et al.*, 2005). As

vantagens da utilização destas águas são também reconhecidas, por Voronov (2004), no tratamento de doenças associadas aos sistemas nervoso, cardiovascular e respiratório. No entanto, este autor admite a necessidade de serem efectuados mais estudos, nomeadamente no que se refere às doses necessárias, a influências várias ao nível de saúde, quer sejam provocadas directamente por este gás, quer por outros elementos existentes nestas águas, à preservação da composição química destas águas e à acumulação de níveis elevados de radão no ar.

Apesar de muitas águas com elevadas concentrações de radão serem consideradas medicinais, este efeito terapêutico não é reconhecido por nenhuma das organizações internacionais de saúde, pelo contrário, algumas delas, como por exemplo a Organização Mundial de Saúde (WHO), a Agência Internacional para a Pesquisa do Cancro (IARC) e a Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos da América (US EPA) consideram o radão como um agente cancerígeno (WHO, 2009; Vásquez *et al.*, 2011).

2. VULCÃO DAS FURNAS

2.1. Nota Prévia

O Vulcão das Furnas localiza-se na ilha de S. Miguel e é o mais oriental dos três vulcões centrais activos existentes nesta ilha. Este vulcão corresponde a um centro traquítico poligenético e apresenta uma caldeira central. A sua actividade eruptiva tem apresentado um carácter essencialmente explosivo, emitindo material de natureza traquítica (*s.l.*). Apesar da maioria da sua actividade eruptiva se desenvolver essencialmente no interior da caldeira, onde ocorreram pelo menos 10 erupções vulcânicas nos últimos 5000 anos, e no bordo da caldeira, foram ainda identificados centros eruptivos no seu exterior, resultantes de actividade estromboliana (Booth *et al.*, 1978; Guest *et al.*, 1999).

O Vulcão das Furnas apresenta actualmente diversas manifestações de vulcanismo secundário à superfície, que se traduzem pela presença de campos fumarólicos, de zonas de desgaseificação difusa, de nascentes termais e de nascentes gasocarbónicas. Neste capítulo pretende-se caracterizar geologicamente a área de estudo.

2.2. Enquadramento Geotectónico

O arquipélago dos Açores, formado por nove ilhas vulcânicas, localiza-se no Atlântico Norte, na zona de confluência das placas tectónicas Norte Americana, Euroasiática e Núbica (Figura 2.1).

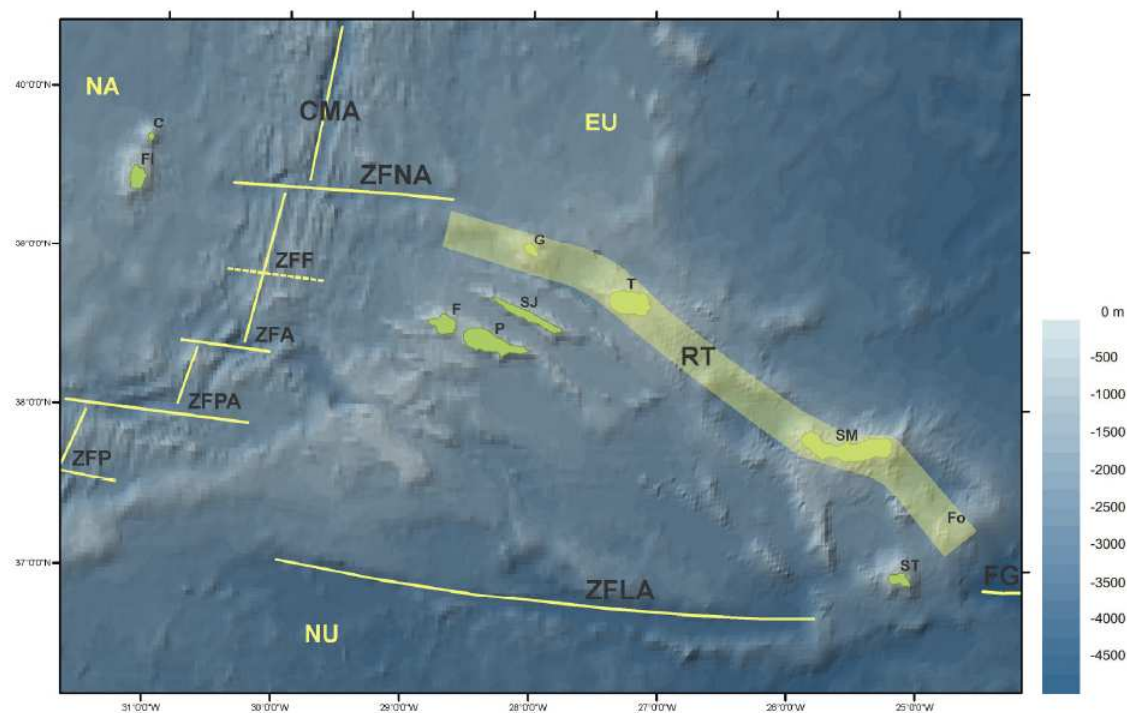


Figura 2.1 – Principais elementos morfo-tectónicos da região dos Açores. As linhas definem, aproximadamente, a expressão morfológica de cada estrutura; a área a sombreado abrange, aproximadamente, os diferentes segmentos que compõem o RT. **CMA** – Crista Média Atlântica; **ZFLA** – Zona de Fractura Leste dos Açores; **ZFNA** – Zona de Fractura Norte dos Açores; **RT** – Rift da Terceira; **FG** – Falha da 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 Euroasiática (Eurásia); **NU** – placa Núbica; **NA** – placa Norte Americana; **ST** – Santa Maria; **Fo** – Ilhéus das Formigas; **SM** – S. Miguel; **T** – Terceira; **G** – Graciosa; **SJ** – São Jorge; **P** – Pico; **F** – Faial; **FL** – Flores; **C** – Corvo (Hipólito, 2009 e referências nele citadas).

As principais estruturas tectónicas que atravessam este arquipélago correspondem: (a) à Crista Média Atlântica (CMA), que separa as ilhas do Corvo e Flores das restantes, (b) à Zona de Fractura Leste dos Açores (ZFLA), que se estende

desde a Crista Média Atlântica até Gibraltar, incluindo a Falha da Glória (FG) e (c) ao Rift da Terceira com direcção NW-SE e que se estende desde a Crista Média Atlântica até à Falha da Glória, passando pelas ilhas Graciosa, Terceira e S. Miguel (Machado, 1959; Searle, 1980; Madeira e Ribeiro, 1990; Vogt e Jung, 2004). Este complexo enquadramento tectónico faz das ilhas açorianas o local propício à ocorrência de erupções vulcânicas e de sismos tectónicos e vulcano-tectónicos.

A ilha de S. Miguel, localizada no grupo Oriental, corresponde à maior ilha do arquipélago e é constituída por três vulcões centrais activos, de composição essencialmente traquítica (Sete Cidades, Fogo e Furnas), ligados entre si por zonas de vulcanismo fissural (Figura 2.2). Os centros traquíticos têm apresentado, ao longo da sua história eruptiva, um vulcanismo essencialmente explosivo, enquanto que as zonas de vulcanismo fissural, apesar de ocasionalmente ocorrerem erupções traquíticas, caracterizam-se essencialmente pela ocorrência de erupções basálticas efusivas dando origem a alinhamentos de cones de escórias (Guest *et al.*, 1999).

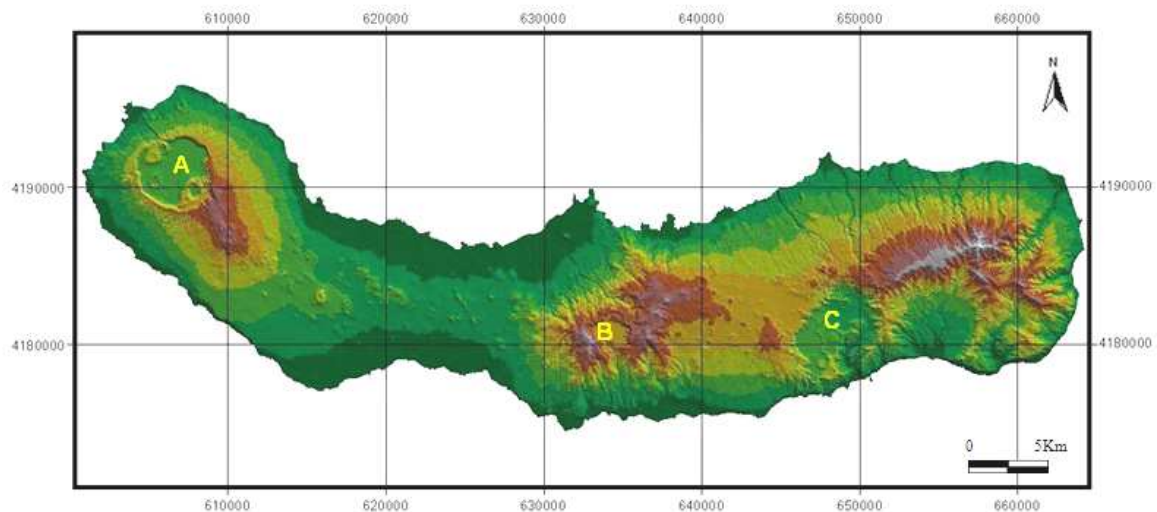


Figura 2.2 – Modelo digital de terreno da ilha de S. Miguel. Sistema de referência UTM WGS84; Zona 26S. Legenda: A - Vulcão das Sete Cidades; B – Vulcão do Fogo e C - Vulcão das Furnas.

O Vulcão das Furnas situa-se aproximadamente entre as coordenadas UTM M 644000 e 652000 e P 4176000 e 4184500, zona 26S. Este vulcão é considerado o vulcão central mais jovem da ilha de S. Miguel, tendo sido, o início da sua actividade

subaérea, datada de há 100 000 anos, enquanto o Vulcão do Fogo e o Vulcão das Sete Cidades apresentam lavas subaéreas datadas de há aproximadamente 200 000 anos (Moore, 1990).

2.3. Enquadramento Geológico

2.3.1. Geomorfologia

O Vulcão das Furnas é delimitado a W pelo planalto da Achada das Furnas, a N pelo planalto litoral do Norte e a E pelo sistema vulcânico da Povoação, não sobressaindo em termos topográficos relativamente a estes (Zbyszewsky *et al.*, 1958). O local de maior altitude situa-se no Salto do Cavalo, com uma cota de 850 m, e apresenta um maior declive no flanco S que se estende até ao mar.

O Vulcão das Furnas apresenta uma importante depressão central, onde é possível identificar, pelo menos, duas caldeiras que reflectem períodos importantes da sua história eruptiva e algumas depressões de dimensões inferiores (Guest *et al.*, 1999).

A caldeira externa corresponde à caldeira mais antiga com cerca de 30 000 anos (Guest *et al.*, 1999). Com um diâmetro de 7 por 5,5 km (Gaspar *et al.*, 1995), apresenta um bordo indistinto a S resultado, quer da proximidade aos centros eruptivos mais recentes e consequentemente da deposição do material resultante das respectivas erupções, quer, provavelmente, da acção tectónica (Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999). A N e a NE o seu bordo é facilmente identificado intersectando uma sequência de lavas pertencentes aos complexos vulcânicos Povoação/Nordeste. Após a formação desta caldeira seguiu-se um período de preenchimento da mesma, através da deposição de material resultante de erupções intra-caldeira mais recentes. Estes depósitos estão preservados na zona N e NW da caldeira onde apresentam uma espessura de aproximadamente 200 m, sendo também observados ao longo do Vale da Ribeira Quente (Guest *et al.*, 1999).

A caldeira interna formou-se há cerca de 12 000–10 000 anos (Guest *et al.*, 1999) e apresenta um diâmetro de 4,5 por 3,5 km (Gaspar *et al.*, 1995). A E intersecta o bordo da caldeira externa expondo lavas do complexo vulcânico do Nordeste e a NW apresenta o bordo bem definido expondo a sequência de depósitos que preencheram a caldeira externa. A S, à semelhança do que sucede com a caldeira externa, o seu bordo é indistinto devido à deposição do material resultante das erupções mais recentes (Guest *et al.*, 1999). Após a formação desta caldeira, seguiu-se um novo período de preenchimento com material resultante das últimas erupções deste vulcão (Guest *et al.*, 1999).

Durante este segundo período de preenchimento da caldeira ocorreram pelo menos duas erupções que originaram depressões. Uma com cerca de 1,5 km de diâmetro corresponde ao local onde actualmente está instalada a Lagoa das Furnas e a outra corresponde à depressão onde foi edificada a freguesia das Furnas. A formação desta última parece estar associada à erupção que originou o depósito Furnas C (Both *et al.*, 1978; Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999), datada de há 1870 ± 120 anos BP (Guest *et al.*, 1999).

A presença de formas vulcânicas como domos, cones de pedra-pomes e anéis pomíticos, no interior da depressão central, evidencia o carácter explosivo das erupções intra-caldeira, enquanto que nos flancos do Vulcão das Furnas observam-se principalmente cones de escórias, resultantes de erupções com características mais efusivas (Figura 2.3). No interior da caldeira interna é possível observar a presença de cinco domos traquíticos. Destes, dois são resultantes das erupções históricas de 1439-43 e 1630 e são circundados por anéis pomíticos, correspondendo os restantes ao Pico das Marconas, ao Pico das Caldeiras e ao Pico dos Bodes (Gaspar *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999). A NE, na zona da Terra da Cafuga, observa-se um alinhamento de domos no interior da caldeira externa. Deste alinhamento faz parte o Pico do Ferro que se encontra cortado pelo bordo da caldeira interna (Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999). É possível observar ainda a E, junto do bordo da caldeira externa, um cone de pedra-pomes designado de Pico do Canário e a N pelo menos 10 cones

de escórias com idades superiores a 5000 anos e com escoadas lávicas associadas (Guest *et al.*, 1999).

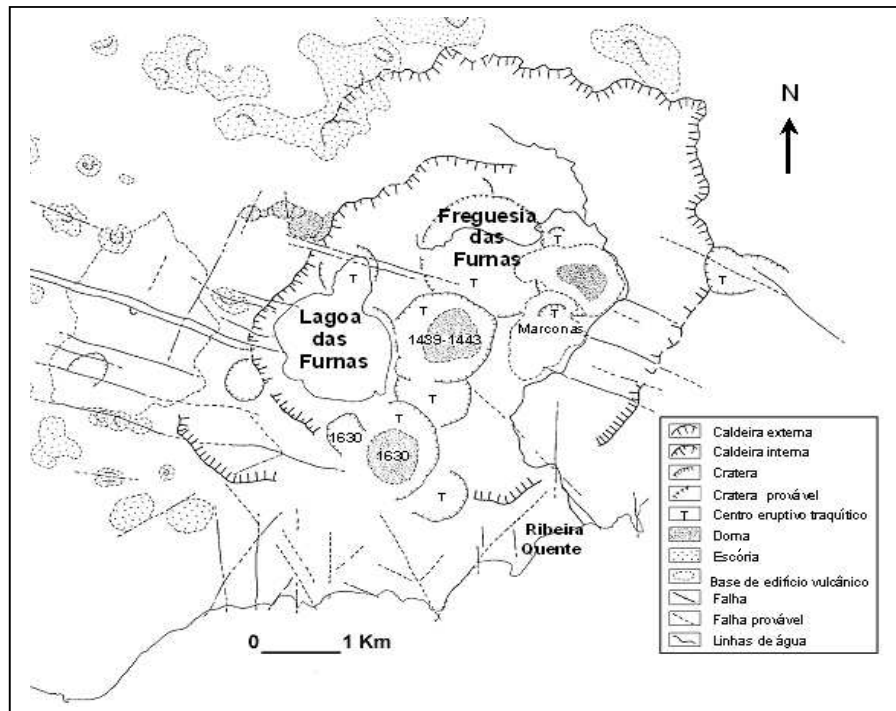


Figura 2.3 – Mapa morfoestrutural do maciço das Furnas (modificado de Gaspar *et al.*, 1995).

2.3.2. Tectónica

A nível de estruturas tectónicas destacam-se dois sistemas de fracturas principais, um de direcção WNW-ESE e outro de direcção variável N-S e (N)NE-(S)SW, ambos potencialmente activos e afectando depósitos vulcânicos com idade inferior a 3000 anos. A morfologia das caldeiras sugere a ocorrência de colapsos controlados por estas direcções estruturais (Gaspar *et al.*, 1995; Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999).

O sistema WNW-ESE atravessa o edifício vulcânico e apresenta uma componente normal associada a uma componente de desligamento direito. No exterior da caldeira, a W, surgem vários alinhamentos de cones de escória orientados segundo esta direcção, principalmente na região dos Cedros (Gaspar *et al.*, 1995; Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999).

O sistema de falhas de direcção N-S e (N)NE-(S)SW está patente a S e a W deste vulcão. Na costa S, desde a Praia das Amoras até à Ribeira Quente, este sistema de falhas está bem expresso, podendo ser observada uma nítida movimentação vertical ultrapassando em alguns casos os 100 m de rejeito (Gaspar *et al.*, 1995; Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999).

Por outro lado, a orientação de alguns vales sugerem a existência de falhas de orientação E-W e na vertente S, surge uma outra estrutura distensiva, com direcção NW-SE, coincidente com a direcção do sistema de fracturas regional do “*Rift* da Terceira” (Gaspar *et al.*, 1995; Pacheco, 1995; Guest *et al.*, 1999).

2.3.3. Vulcanoestratigrafia

O estudo dos produtos vulcânicos expelidos pelo Vulcão das Furnas evidencia que cerca de 90% destes produtos correspondem a depósitos piroclásticos de queda, estando a presença de ignimbritos e *surges* limitada à ocupação de alguns vales (Cole *et al.*, 1999; Guest *et al.* 1999).

Guest *et al.* (1999) dividiu os produtos vulcânicos resultantes das erupções do Vulcão das Furnas em três grupos principais: Grupo Inferior, Grupo Intermédio e Grupo Superior (Figura 2.4).

O Grupo Inferior é constituído essencialmente por *lapilli* pomítico (Cole *et al.*, 1999; Guest *et al.* 1999). É possível observar também depósitos de cinza e de blocos

e cinza e uma escoada lávica traquítica (Garajau). O limite entre o Grupo Inferior e o Intermédio corresponde ao Ignimbrito da Povoação (Guest *et al.*, 1999). Esta formação corresponde a um depósito piroclástico de fluxo bastante distinto e é constituído por depósitos de *lapilli* de queda, *surges*, ignimbritos não consolidados e ignimbritos densos bem consolidados (Duncan *et al.*, 1999). Este depósito, datado de há cerca de 30 000 anos, resulta, provavelmente, da maior erupção deste vulcão, sendo responsável pela formação da caldeira externa (Guest *et al.*, 1999).

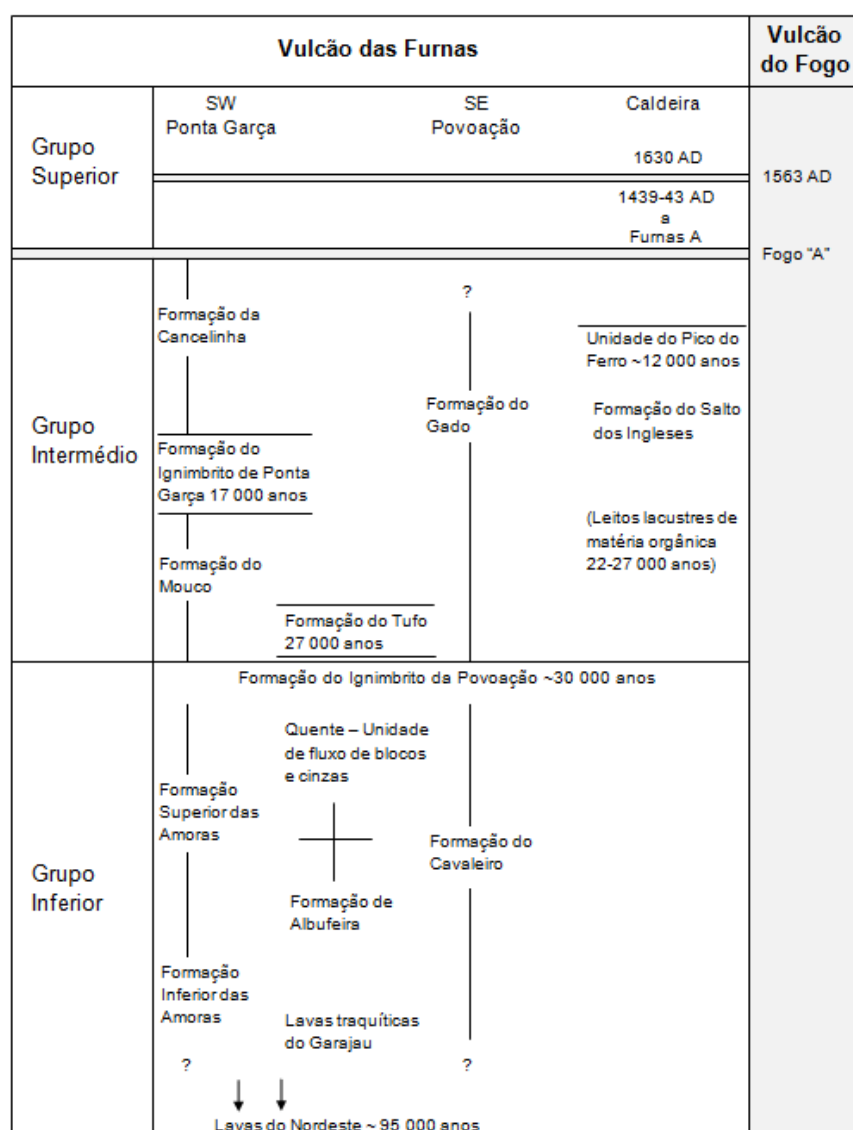


Figura 2.4 – Estratigrafia do Vulcão das Furnas (modificado de Guest *et al.*, 1999).

O Grupo Intermédio apresenta, na sua base, predominantemente depósitos de *lapilli* basálticos a SW e a SE depósitos de *lapilli* pomíticos, e uma escoada basáltica na Formação do Mouco. A estes depósitos sobrepõe-se o Ignimbrito de Ponta Garça, datado de há cerca de 17 000 anos, e na parte superior deste Grupo podem-se observar depósitos alternados de *lapilli* e cinzas pomíticas (Cole *et al.*, 1999; Guest *et al.* 1999). A formação da caldeira interna (12 000 anos) marcou o final deste período de preenchimento da caldeira externa e, de acordo com Guest *et al.* (1999) pode estar associada à formação de um ignimbrito. O Grupo Intermédio e o Grupo Superior são separados pelo depósito do Vulcão do Fogo conhecido por Fogo A, datado de há cerca de 4550 anos (Booth *et al.*, 1978) e 4230 ± 150 e 4520 ± 90 anos BP (Wallenstein, 1999).

O Grupo Superior é formado pelos depósitos das erupções mais recentes deste vulcão e reportam-se à actividade dos últimos 5000 anos. Neste período foi identificada a ocorrência de pelo menos dez erupções no interior da caldeira, tendo três delas ocorrido nos últimos 600 anos (Both *et al.*, 1978; Guest *et al.*, 1999). Os depósitos resultantes destas erupções são bastante uniformes apresentando estratos alternados de *lapilli* e cinzas pomíticos, reflectindo períodos de actividade magmática que alternaram com períodos de actividade hidromagmática. A actividade hidromagmática deverá ser resultado, por um lado, da interacção do magma com o sistema hidrotermal deste vulcão e por outro, da interacção com as lagoas existentes, na época, no interior da caldeira. Estas erupções originaram ainda *surges* e escoadas piroclásticas (Cole *et al.*, 1999).

2.4. Erupções Vulcânicas e Sismicidade

2.4.1. Erupções Históricas e Sismicidade Associada

O Vulcão das Furnas foi palco de duas erupções históricas (Figura 2.5). A primeira ocorreu aquando do povoamento da ilha de S. Miguel, no período entre 1439 e 1443 (Queiroz *et al.*, 1995) e a segunda em 1630.



Figura 2.5 – Ortofotomapa com a localização dos centros eruptivos do vulcanismo histórico do Vulcão das Furnas.

As descrições históricas da chegada e instalação dos primeiros povoadores na ilha de S. Miguel apontam, de acordo com Queiroz *et al.* (1995), para a ocorrência de uma erupção vulcânica na mesma altura. O centro eruptivo associado a essa erupção

foi identificado, por estes autores, como sendo o pico do Gaspar. A fase inicial desta erupção terá apresentado um carácter explosivo, subpliniano, originando um anel de pedra-pomes e a segunda fase, efusiva, conduziu à instalação de um domo traquítico no interior da cratera formada (Fotografia 2.1) (Queiroz *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999). Esta erupção evidenciou períodos de actividade magmática que alternaram com períodos de actividade freatomagmática dando origem a alternância de depósitos de *lapilli* e de depósitos de cinza, respectivamente (Cole *et al.*, 1999). De acordo com as descrições históricas existentes a fase explosiva desta erupção deverá ter precedido a chegada dos primeiros povoadores, tendo estes assistido aos fenómenos associados à instalação do domo (Queiroz *et al.*, 1995).



Fotografia 2.1 – Pico do Gaspar, domo traquítico resultante da erupção de 1439-43.

No que diz respeito à actividade sísmica associada a esta erupção existe pouca informação disponível. A análise de relatos históricos evidencia que os primeiros povoadores terão sentido, por um período de aproximadamente um ano,

uma intensa actividade sísmica e não regressaram ao Reino apenas por falta de transporte (Queiroz *et al.*, 1995).

A erupção de 1630, à semelhança da erupção descrita anteriormente, apresentou uma fase inicial explosiva, subpliniana, sucedida por uma segunda fase de carácter mais efusivo que culminou com a instalação de um domo (Fotografia 2.2) (Guest *et al.*, 1999).



Fotografia 2.2 – Domo resultante da erupção de 1630.

Esta erupção teve início no dia 3 de Setembro e foi precedida, de acordo com relatos históricos, por uma actividade sísmica intensa e quase contínua e por movimentos de massa (Cole *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999). A fase explosiva desta erupção teve a duração de três dias, apresentando períodos de actividade magmática que alternaram com períodos de actividade freatomagmática, pelo que os seus depósitos apresentam estratificação de *lapilli* e cinza pomítica correspondentes à

alternância destes episódios (Cole *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999). A coluna eruptiva terá atingido uma altura de 14 km e os depósitos de queda resultantes cobriram toda a ilha de S. Miguel, atingindo a distância de cerca de 550 km (Corvo) (Cole *et al.*, 1995). Por outro lado, a fase de instalação do domo prolongou-se por um período de aproximadamente dois meses (Cole *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999).

Esta erupção provocou cerca de 195 vítimas, sendo 30 resultado da explosão inicial e entre 80 a 115 resultado de um *surge* que atingiu Ponta Garça e do colapso de habitações. As restantes vítimas resultaram do colapso de habitações noutras localidades. Em resultado dos depósitos de queda e do *surge* a freguesia de Ponta Garça ficou coberta por 6 m de material desta erupção. O colapso de habitações ocorreu, quer devido à actividade sísmica, quer como resultado da deposição de cinzas nos telhados (Cole *et al.*, 1995; Guest *et al.*, 1999; Pomonis *et al.*, 1999).

A actividade sísmica associada à erupção de 1630, descrita como forte ou contínua, começou a ser sentida pela população a partir das 20:00 do dia 2 de Setembro, isto é, apenas algumas horas antes do início da erupção e fez-se sentir a 30 km de distância, em Ponta Delgada. Esta actividade sísmica provocou muitos danos, causando a destruição de quase todos os edifícios num raio de 10 km e provocando a ocorrência de movimentos de massa na costa S da ilha, nomeadamente na Ribeira Quente (Cole *et al.*, 1995). Os eventos de maior intensidade deverão estar associados ao processo de abertura da conduta e à primeira fase da erupção (Cole *et al.*, 1995; Silveira, 2002). Os efeitos desta crise, segundo Silveira (2002), podem ser equiparados a um sismo de intensidade igual ou superior a VIII na escala EMS-98 no Vale das Furnas e em Ponta Garça, Grau VIII em Vila Franca do Campo e Grau VII em Ponta Delgada (Figura 2.6). A zona epicentral deverá ter-se localizado numa zona ampla sob e nas imediações do Vulcão das Furnas.

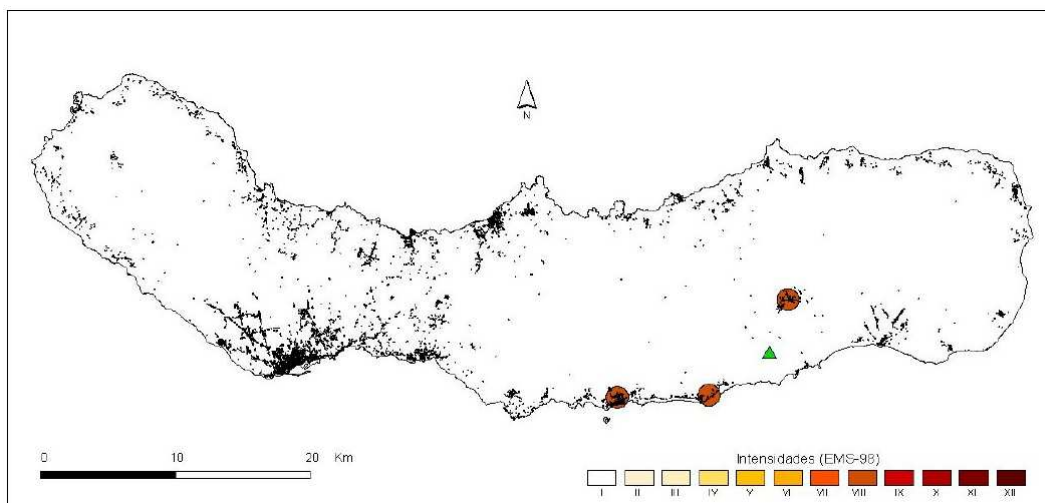


Figura 2.6 – Carta de intensidades locais relativas aos efeitos cumulativos da actividade sísmica ocorrida entre 2 e 8 de Setembro de 1630. O triângulo a verde representa a localização aproximada do foco eruptivo (*in* Silveira, 2002).

2.4.2. Sismicidade Histórica de Natureza Tectónica

A ilha de S. Miguel corresponde a uma zona propícia à ocorrência de sismos tanto associados a actividade vulcânica, como de origem tectónica (Figura 2.7). Também a região das Furnas foi ao longo dos tempos históricos afectada por diversos eventos sísmicos de origem tectónica. Destes eventos destacam-se os de 22 de Outubro de 1522, de 26 de Julho de 1591, de 16 de Abril de 1852, de 5 de Agosto de 1932, de 27 de Abril de 1935 e de 26 de Junho de 1952.

O sismo de 22 de Outubro de 1522 abalou de forma violenta a ilha de S. Miguel, provocando estragos em toda a ilha. Vila Franca do Campo, o principal centro populacional e capital da ilha na época, foi a localidade mais atingida tendo sido em grande parte destruída pelo sismo e pelo movimento de massa por ele desencadeado e que a soterrou quase na totalidade (Marques, 2004). Este sismo foi sucedido por várias réplicas e por inúmeros movimentos de massa que ocorreram um pouco por toda a ilha. Em resultado desta catástrofe terão perecido cerca de 5 mil pessoas (Frutuoso, 1522-1591), sendo este sismo considerado o que provocou mais

mortes no arquipélago. Em 2002, Silveira com base na análise dos relatos históricos existentes sugeriu uma intensidade máxima, para este sismo, de grau X (EMS-98) em Vila Franca do Campo e VIII a IX (EMS-98) nas Furnas (Figura 2.8 a)).

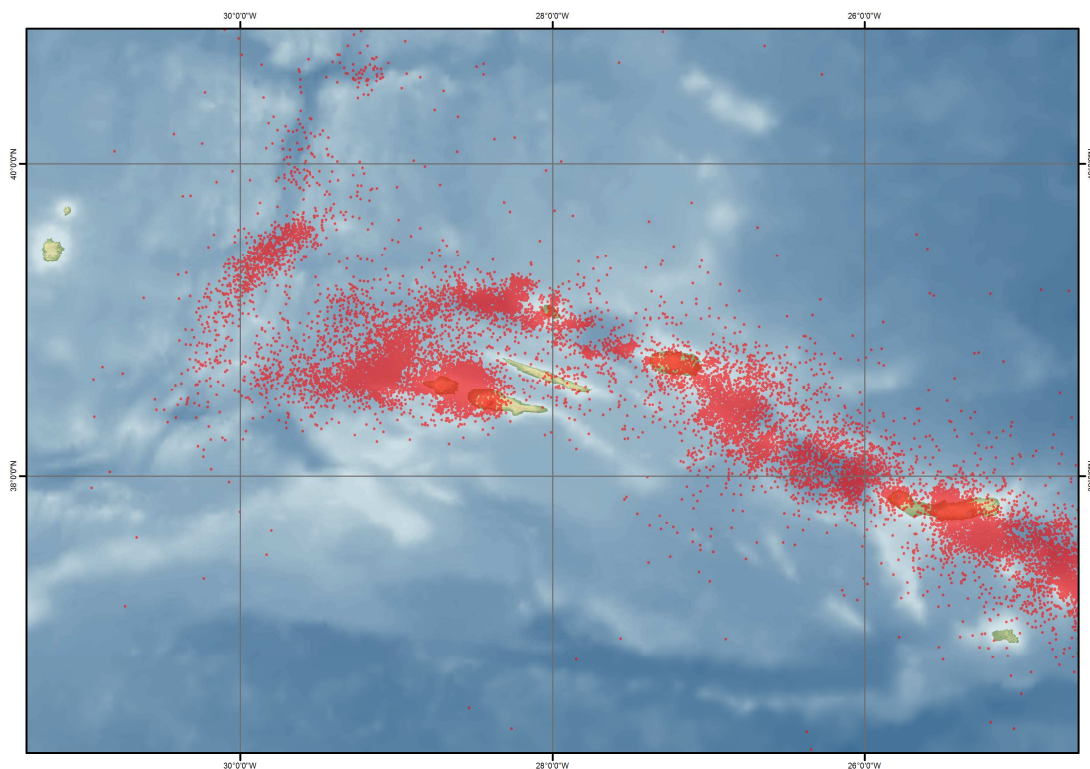


Figura 2.7 – Carta de sismicidade dos Açores. Eventos registados entre 1997 e 2011 (CIVISA, 2012).

Em 1591 a ilha de S. Miguel foi afectada por uma importante crise sísmica que se iniciou com o sismo de 26 de Julho e cujas réplicas se fizeram sentir até ao dia 12 de Agosto do mesmo ano. Vila Franca de Campo foi uma vez mais uma das zonas mais afectadas por este evento juntamente com Água do Pau. Nestas localidades colapsaram várias habitações e foram registadas várias vítimas que ficaram soterradas nos escombros. De acordo com Silveira (2002) a intensidade deste sismo nas zonas mais afectadas terá sido VIII (EMS-98) ou superior (Figura 2.8 b)). Este sismo foi ainda responsável pela ocorrência de movimentos de massa, abertura de fendas no solo e pelo aparecimento de uma nascente temporária que secou 4 dias depois.

O sismo de 16 de Abril de 1852 afectou toda a ilha de S. Miguel e em especial a zona ocidental da ilha, tendo sido o concelho da Ribeira Grande o mais afectado. Silveira (2002) atribuiu uma intensidade máxima a este sismo de VIII (EMS-98) na Ribeira Grande e grau IV a V (EMS-98) nas Furnas (Figura 2.8 c)). Este sismo foi acompanhado por várias réplicas e provocou a morte a nove pessoas, algumas ficaram soterradas nos escombros das suas casas e outras foram atingidas na sequência da queda de pedras ou do colapso de paredes. Este sismo foi ainda sentido em Santa Maria e em todas as ilhas do grupo Central, com excepção da ilha do Pico.

O sismo de 5 de Agosto de 1932 foi um dos mais importantes sismos sentidos na ilha de S. Miguel no século XX, causando vários danos materiais em especial no concelho da Povoação. Neste evento não há registo de vítimas mortais. A intensidade máxima deste sismo terá sido, de acordo com Silveira (2002), grau VIII (EMS-98) em Água Retorta e na Lomba do Cavaleiro e Grau VII a VIII (EMS-98) no Faial da Terra e Lomba do Loução (Figura 2.8 d)). Na freguesia das Furnas apareceram fendas na igreja de Sant`Ana, numa das casas do Estaleiro e no edifício das Termas e caiu uma trave de uma das habitações. A esta localidade Silveira (2002) atribuiu o grau V a VI (EMS-98). Este sismo foi seguido por algumas réplicas e movimentos de massa.

A 27 de Abril de 1935 a ilha de S. Miguel sofreu novo abalo sísmico, tendo-se sentido várias réplicas até à madrugada do dia 11 de Maio. Este sismo foi ainda responsável pela ocorrência de diversos movimentos de massa. Novamente foi o concelho da Povoação o mais afectado registando-se importantes danos materiais, alguns feridos devido à queda de pedras de paredes e de muros e uma vítima mortal. A intensidade máxima atribuída a este sismo por Silveira (2002) é de VIII a IX (EMS-98) na Lomba do Cavaleiro (Figura 2.8 e)). Nas Furnas apenas há registo de fendas em algumas habitações antigas e a queda de alguns muros tendo sido atribuído a esta localidade o grau V (EMS-98) (Silveira, 2002).

Em 1952, a 26 de Junho, foram sentidos quatro sismos na ilha de S. Miguel. Estes sismos afectaram em particular a costa SE da ilha, sendo os concelhos da Povoação e de Vila Franca do Campo os mais afectados, não havendo, no entanto,

vítimas mortais a registar. O evento principal foi precedido por pequenos abalos premonitórios alguns dias antes e foram sentidas réplicas até ao mês de Setembro do mesmo ano. Estes sismos provocaram ainda a ocorrência de alguns movimentos de massa. A intensidade máxima deste sismo atingiu, segundo Silveira (2002), o grau VIII (EMS-98) no lugar do Fogo na Ribeira Quente (Figura 2.8 f)). Nas Furnas foram sentidos cinco sismos não havendo danos graves a reportar, apenas ligeiras fendas em habitações. Nesta localidade os prejuízos correspondem, de acordo com Silveira (2002), ao grau V (EMS-98).

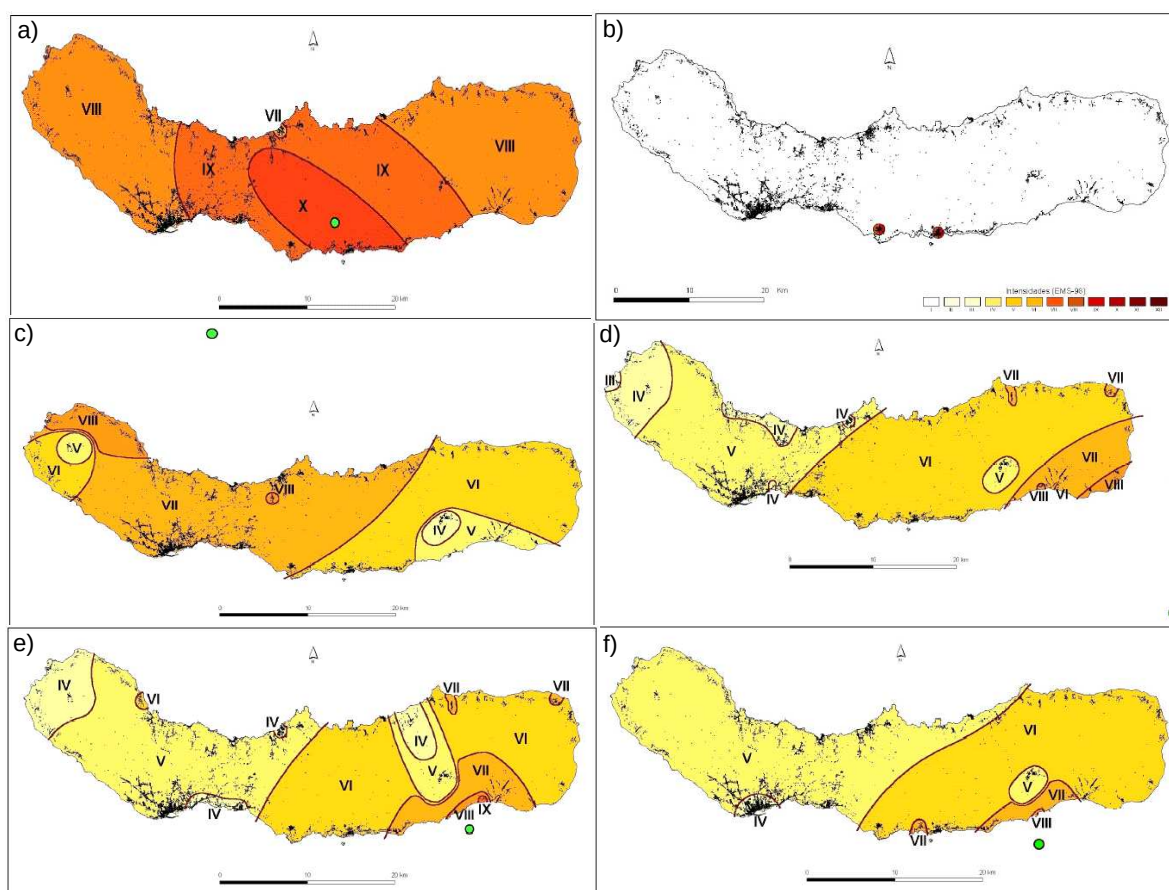


Figura 2.8 – Cartas de isossistas, intensidades EMS-98, dos sismos de: a) 22 de Outubro de 1522, b) 26 de Julho de 1591, c) 16 de Abril de 1852, d) 5 de Agosto de 1932, e) 27 de Abril de 1935 e f) 26 de Junho de 1952. Os pontos a verde representam a localização aproximada dos epicentros (modificado de Silveira, 2002).

Segundo Silveira (2002), a análise das cartas de isossistas destes sismos permitiu constatar que a zona das Furnas é caracterizada por valores de intensidade sísmica anómalos. Nesta zona as intensidades sísmicas são sistematicamente mais baixas, facto que, de acordo com Silveira (2002), pode estar associado à presença de uma câmara magmática sob este aparelho vulcânico.

2.4.3. Sismicidade Local no Período em Estudo

No período compreendido entre Julho de 2005 e Dezembro de 2011, foram registados, na área envolvente ao Vulcão das Furnas (Figura 2.9), cerca de 2333 eventos sísmicos com magnitudes de duração (Md) que oscilaram entre 0,1 e 3,8 (CVARG/CIVISA, dados não publicados).

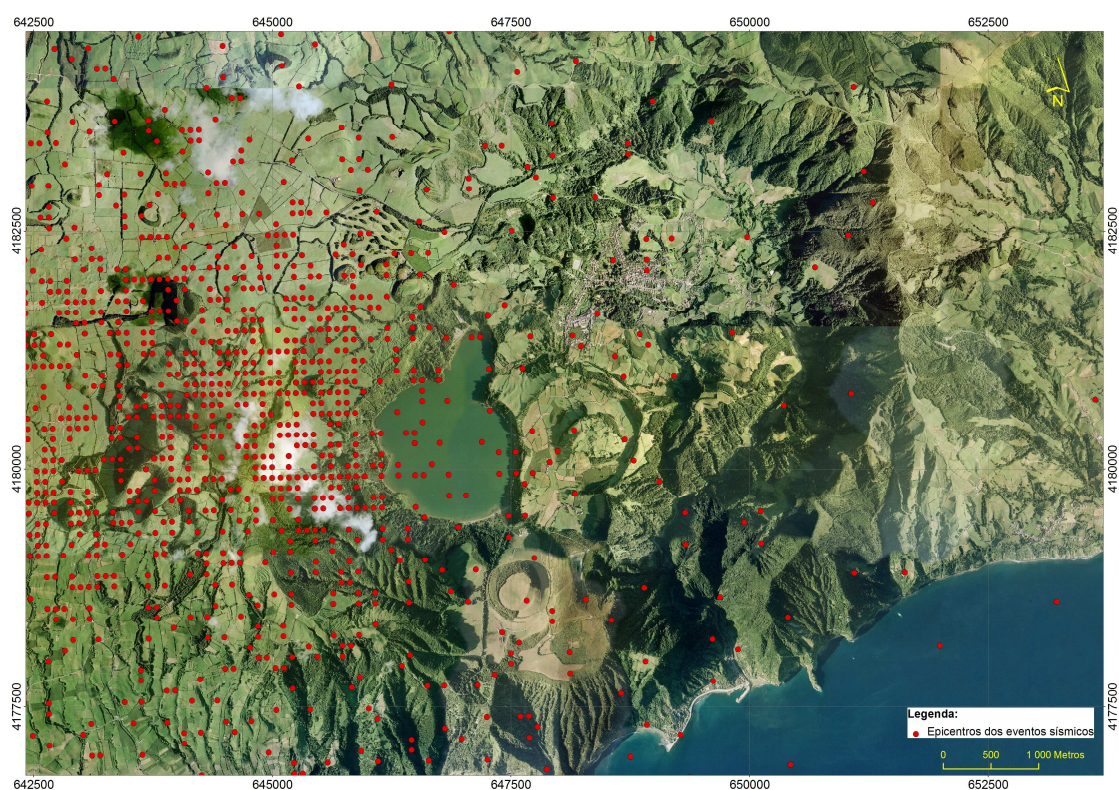


Figura 2.9 – Sismicidade na área envolvente ao Vulcão das Furnas para o período compreendido entre Julho de 2005 e Dezembro de 2011 (CVARG/CIVISA, dados não publicados).

O elevado número de eventos sísmicos registados em 2005 (Tabela 2.1), assim como o elevado número de epicentos localizados na zona W do Vulcão das Furnas (Figura 2.9), estão associados à crise sísmica de 2005 que ocorreu na zona central da ilha de S. Miguel compreendendo o sistema vulcânico do Fogo e estendendo-se até à região da Lagoa do Congro. Esta corresponde actualmente à zona sismogénica mais activa da ilha de S. Miguel tendo sido registados mais de 17 000 eventos desde 1997, apresentando na sua maioria magnitudes de duração ≤ 2 e profundidades que oscilam entre 0 e 10 Km (Silva *et al.*, 2012). A actividade sísmica associada a esta área expressa-se recorrentemente sob a forma de enxames sísmicos, tendo sido identificados entre 2002 e 2010 quatro episódios principais: Abril de 2003, Outubro de 2004, Maio/Setembro de 2005 e Setembro de 2006. Na crise sísmica de 2005, que corresponde à maior registada desde que existe instrumentação instalada na região, foram registados mais de 6000 eventos num período de 6 meses; após este pico de actividade a sismicidade tem diminuído gradualmente mantendo-se, no entanto, esta região como a mais activa na ilha de S. Miguel e uma das mais activas dos Açores (Silva *et al.*, 2012).

Tabela 2.1 – Estatística descritiva anual da sismicidade local no período em estudo.

Ano	Número total de eventos sísmicos	Magnitude máxima (Md)	Magnitude mínima (Md)	Magnitude média (Md)
2005*	1186	3,8	0,2	1,3
2006	369	2,6	0,4	1,3
2007	256	2,7	0,1	1,5
2008	263	2,6	0,5	1,4
2009	63	2,5	0,5	1,5
2010	101	2,7	0,4	1,5
2011	95	2,5	0,4	1,3

*De Julho a Dezembro

2.5. Zonas de Desgaseificação

São diversos os fenómenos de vulcanismo secundário que podem ser observados à superfície do Vulcão das Furnas, reflectindo o seu presente estado de actividade. Neste vulcão, é possível observar a presença de campos fumarólicos, nascentes termais e de água fria gasocarbónica (Figura 2.10), e várias zonas de desgaseificação difusa através dos solos.

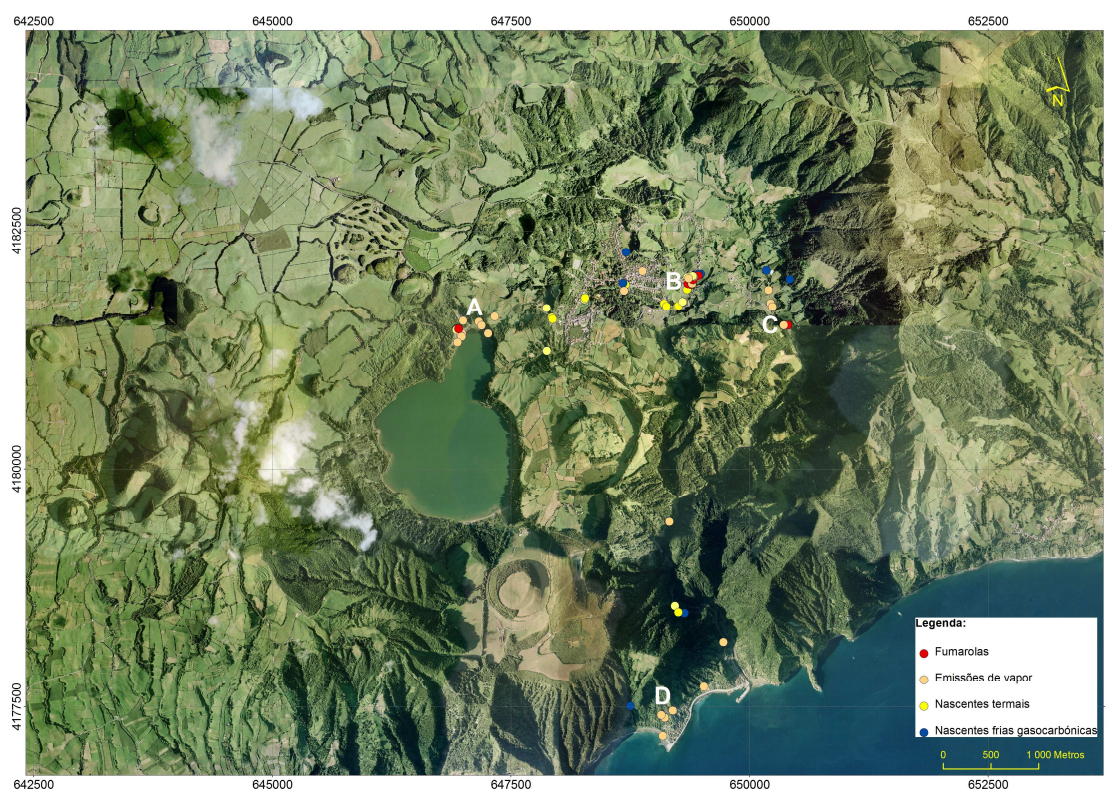


Figura 2.10 – Ortofotomapa com a localização das manifestações hidrotermais no Vulcão das Furnas (modificado de Costa, 2006; Viveiros, 2010). Localização dos campos fumarólicos: A- Lagoa das Furnas; B- Freguesia das Furnas; C- Ribeira dos Tambores e D- Ribeira Quente.

O Vulcão das Furnas apresenta emanações gasosas, passíveis de serem observadas, agrupadas em quatro campos fumarólicos: Lagoa das Furnas, Freguesia das Furnas e Ribeira dos Tambores, localizados no interior da caldeira, e o campo fumarólico da Ribeira Quente, que se estende para o flanco S deste vulcão (Ferreira,

1994). O campo fumarólico da Lagoa das Furnas localiza-se na margem N da Lagoa das Furnas, o da Freguesia das Furnas localiza-se, tal como o próprio nome indica, na freguesia com a mesma designação e é o maior dos quatro (Fotografia 2.3), o da Ribeira dos Tambores situa-se a SE do campo fumarólico da Freguesia das Furnas e estas fumarolas/emissões de vapor emanam a partir de uma fissura existente no domo traquítico do Pico das Caldeiras (Ferreira e Oskarsson, 1999). O campo fumarólico da Ribeira Quente é o mais disperso, incluindo as emanações gasosas distribuídas ao longo da ribeira da Ribeira Quente e as localizadas na freguesia com o mesmo nome (Ferreira, 1994).



Fotografia 2.3 – Campo fumarólico da Freguesia das Furnas.

A composição química destas fumarolas é, para além da presença de vapor de água, maioritariamente CO_2 juvenil e como constituintes subordinados apresenta H_2S , H_2 , CH_4 , N_2 , O_2 e Ar (Ferreira, 1994; Ferreira e Oskarsson, 1999; Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2005). Uma origem magmática dos gases destas fumarolas e de outros

fluidos hidrotermais é suportada pelas razões elevadas de $^3\text{He}/^4\text{He}$ obtidas em diversos estudos e que oscilam entre 4,06 e 4,90 R_a (Tolstikhin *et al.*, 1991) e 5,23 e 6,07 R_a (Jean-Baptiste *et al.*, 2009), pelos valores obtidos para a composição isotópica do carbono $\delta^{13}\text{C}$ presente no CO_2 que oscilaram entre -3,3 e -6,1 ‰ (Ferreira e Oskarsson, 1999; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010) e pelos valores de $\delta^{34}\text{S}$ presente no H_2S que variaram entre -0,7 e -2,1 ‰ (Ferreira e Oskarsson, 1999). Também a diminuição da presença de ^{14}C em plantas C3, quando estas surgem em ou junto a zonas de desgaseificação anómala, sugere uma absorção de CO_2 de origem magmática desprovido de ^{14}C (Pasquier-Cardin *et al.*, 1999).

No Vulcão das Furnas surgem à superfície diferentes tipos de nascentes: nascentes de águas ortotermiais e nascentes termais. Estas nascentes podem ainda ser gasocarbónicas (Costa, 2006; Freire 2006). As nascentes gasocarbónicas surgem associadas à zona de anomalia de desgaseificação difusa de CO_2 da caldeira, enquanto que, as nascentes termais derivam de aquíferos pouco profundos, localizados a cerca de 100 a 200 m de profundidade e com temperaturas próximas dos 160°C. O aquecimento destas águas é resultado provável da presença, na sua proximidade, de corpos plutónicos resultantes das últimas erupções intra-caldeira (Cruz *et al.*, 1999).

Ao longo das últimas duas décadas foram vários os trabalhos desenvolvidos no Vulcão das Furnas com o intuito de melhor compreender os fenómenos de desgaseificação difusa através dos solos que nele ocorrem. Dos trabalhos referentes a esta temática salientam-se os relacionados com a determinação da concentração de CO_2 (e.g. Baubron *et al.*, 1994a; 1994b; Oskarsson *et al.*, 1999; Baxter *et al.*, 1999; Sousa 2003), do fluxo de CO_2 (e.g. Viveiros, 2003, 2010; Viveiros *et al.*, 2008a, 2009, 2010, 2012; Rinaldi *et al.*, 2012) e da concentração de radão (e.g. Baxter *et al.*, 1999; Silva, 2006). Ao longo dos próximos capítulos, sempre que se considere relevante, serão efectuadas referências a estes trabalhos.

3. CARTOGRAFIA DA EMISSÃO DE ^{222}Rn NO SOLO

3.1. Nota Prévia

A libertação de gases em regiões vulcânicas ocorre, quer em períodos de actividade eruptiva, quer em períodos de repouso de vulcões. A desgaseificação difusa através dos solos representa uma importante fracção do total de gases libertados por um vulcão, sendo tão significativa como a quantidade de gases libertada ao nível de crateras em actividade (*e.g.* Allard *et al.*, 1991).

A desgaseificação difusa não ocorre de modo uniforme no edifício vulcânico, estando a presença de elevadas concentrações de gases à superfície terrestre condicionada pela presença de zonas de maior permeabilidade, como zonas de falhas, que possibilitam a ascensão de gases existentes em zonas mais profundas até à superfície. Por outro lado, a presença de zonas hidrotermais e para o caso específico do radão o tipo de rochas existentes também condicionam a concentração e/ou o transporte de gases até à superfície.

Neste capítulo apresentam-se as distribuições espaciais das concentrações de radão e de CO_2 no solo para toda a caldeira do Vulcão das Furnas incluindo, no flanco S, a freguesia da Ribeira Quente, assim como, a cartografia de anomalias térmicas. São identificadas zonas de desgaseificação anómala, possíveis estruturas tectónicas e zonas com potencial para exploração geotérmica.

3.2. Radão no Solo

As rochas vulcânicas libertam constantemente radão em resultado do decaimento do urânio (^{238}U). A presença de radão e o modo como este se encontra distribuído à superfície terrestre depende essencialmente das características geológicas da área, como o tipo de rochas presente, as propriedades do solo e a presença de falhas, e das variações dos parâmetros meteorológicos (Schumann e Gundersen, 1996). A transferência de átomos de radão (^{222}Rn) a partir das rochas ou do solo até à superfície terrestre compreende três processos distintos: emanação, migração e exalação. A emanação corresponde à libertação dos átomos de radão da fase sólida, rochas ou solo, a migração corresponde ao transporte deste gás até à superfície e finalmente, a exalação, corresponde à passagem do radão do solo para a atmosfera (Wiegand, 2001).

As concentrações elevadas de radão no solo estão normalmente associadas à presença de determinado tipo de rochas (e.g. granitos e traquitos) (Tabela 3.1) e a sua libertação das rochas e do solo está fortemente condicionada pelo tipo de minerais onde o urânio e o rádio (^{226}Ra) estão alojados (Kresl *et al.*, 1993; Appleton, 2005; Bossew e Lettner, 2007).

Tabela 3.1 – Concentração de ^{238}U em rochas magmáticas (modificado de Wiegand, 2001 e referências nele citadas).

Tipos de Rochas Mágmatícas	Concentração de ^{238}U (Bq/Kg)	
	Média	Mínimo - Máximo
Rochas Ácidas	44	38 - 250
Rochas Intermédias	19	13 - 100
Rochas Básicas	11	4 - 13
Rochas Ultra-básicas	1	0,1 - 1

Sendo o radão um gás, apresenta grande mobilidade podendo deixar a fase sólida à qual os átomos de rádio estão confinados e, por difusão ou pelo recuo resultante da emissão α , abandonar o local onde se formou (Gasparini e Mantovani, 1978; Yu *et al.*, 2006). Aquando do decaimento do rádio para radão é libertada uma energia de aproximadamente 4 MeV, sendo a maior parte transferida para a partícula α e apenas 86,24 keV correspondem à energia de recuo do radão (Sun e Furbish, 1995). O átomo de radão recém-formado pode, de acordo com Schumann e Gundersen (1996):

- (a) sofrer um deslocamento pequeno e permanecer retido na malha do mineral onde se forma (Figura 3.1- Letras A e C);
- (b) sofrer deslocamento, atravessar o poro e ser incorporado no grão adjacente (Figura 3.1- Letra G);
- (c) ser libertado para os poros existentes na rocha ou no solo (Figura 3.1- Letras B, D, E e F).

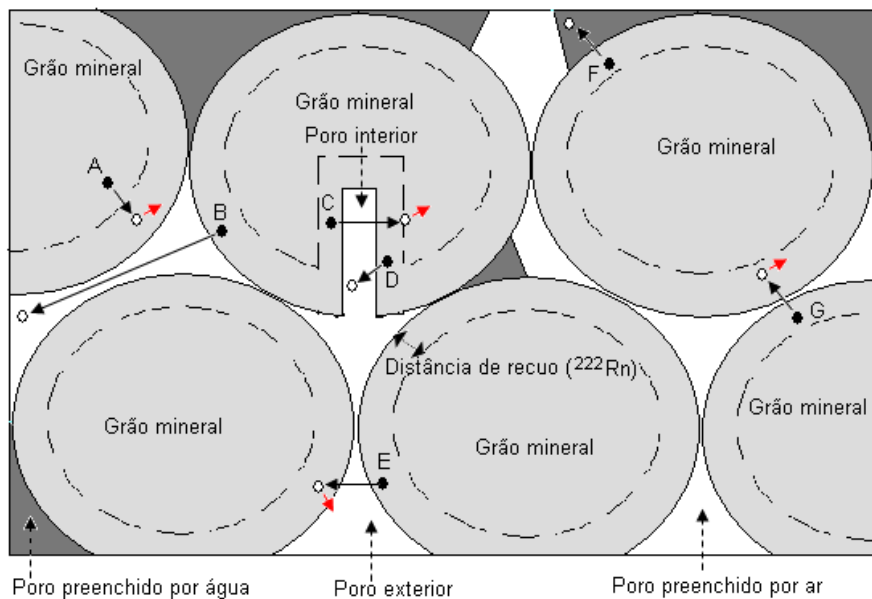


Figura 3.1 – Representação esquemática do processo de emissão do radão. Emissão dos átomos de radão representados pelas letras B, D, E e F. Os átomos de radão que não se conseguiram libertar estão representados pelas letras A, C e G. Nota: no caso do átomo D apenas se considera que ele emanou se conseguir chegar ao poro exterior. As setas a preto representam a distância percorrida pelos átomos de radão por recuo e as setas a vermelho a distância percorrida por difusão (modificado de Sakoda *et al.*, 2011).

À fracção de átomos libertados dá-se a designação de coeficiente de emissão do radão (Schumann e Gundersen, 1996; Greeman e Rose, 1996), sendo a distância percorrida pelo átomo de radão condicionada pelo meio onde o átomo se encontra e para onde se desloca. A distância média percorrida por um átomo de radão associada ao efeito de recuo é de 30-50 nm em material sólido, de 95 nm na água e de 64000 nm no ar (Semkow, 1990 e referências nele citadas; Greeman e Rose, 1996).

As características do solo como a porosidade, a permeabilidade, a densidade, o tamanho e a forma dos grãos, a distribuição do rádio no grão mineral, o teor de água no solo, a temperatura e as variações de parâmetros meteorológicos influenciam o coeficiente de emissão deste gás (Greeman e Rose, 1996; Schumann e Gundersen, 1996; Chaudhuri *et al.*, 2010; Sakoda *et al.*, 2010, 2011)

O transporte do radão até à superfície ocorre preferencialmente em zonas permeáveis como falhas e fracturas e é controlado pelas características físicas das rochas presentes na zona como, por exemplo, a porosidade e a permeabilidade (King *et al.*, 1996; Ciotoli *et al.*, 1999; Baubron *et al.*, 2002; Annunziatellis *et al.*, 2003; LaBrecque e Cordoves, 2003; Burton *et al.*, 2004; Inceoz *et al.*, 2006; Laiolo *et al.*, 2012).

As marés terrestres conseguem deformar a Terra e provocar alterações de pressão nos poros e no material crustal saturado em fluidos influenciando assim o transporte do radão (Kies *et al.*, 1999; Aumento, 2002).

Por outro lado, a circulação de água e de gases (O_2 , He, H, CO_2 , CH_4 e N_2) possibilita o transporte do radão (Kresl *et al.*, 1993; Etiope e Lombardi, 1995; Guerra e Lombardi, 2001; Fu *et al.*, 2008). Também variações de parâmetros meteorológicos como o vento (direcção e velocidade), pressão barométrica, temperatura do solo e percolação de água das chuvas influenciam a movimentação destes gases no solo e, consequentemente, influenciam a libertação de radão à superfície (Coutinho, 2000).

O transporte de gases no solo ou através de fracturas existentes no material rochoso é consequência da presença de dois tipos de campos de forças: gradientes de concentração e gradientes de pressão. Quando a movimentação de gases é induzida por um gradiente de concentração designa-se por difusão. Neste tipo de transporte o gás movimenta-se das zonas de maior concentração para as zonas de menor concentração, em todas as direcções, de forma a que a sua concentração nas rochas ou no solo se distribua uniformemente (Etiope e Martinelli, 2002). Este transporte rege-se pela lei de Fick (equação 3.1):

$$(3.1) \quad F = -D_m \frac{dC}{dz}$$

Em que F corresponde ao fluxo do gás, D_m corresponde ao coeficiente de difusão molecular (m^2/s) e dC corresponde à variação da concentração do gás (kg/m^3) segundo a direcção dz . O coeficiente de difusão molecular é uma constante específica de cada gás que depende da temperatura, da pressão e do meio. No caso do radão, o coeficiente de difusão molecular no ar é $0,12 \text{ cm}^2/\text{s}$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) e na água é $1,37 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) (Etiope e Martinelli, 2002 e referências nele citadas). Uma vez que o coeficiente de difusão molecular não tem em conta a interacção com os poros, é necessário calcular o coeficiente de difusão molecular efectivo (D_e) de acordo com a equação (3.2) que se segue:

$$(3.2) \quad D_e = D_m n$$

Em que D_m corresponde ao coeficiente de difusão molecular (m^2/s) e n diz respeito à porosidade efectiva do meio (%) (Etiope e Martinelli, 2002).

Por outro lado, quando a movimentação de gases é resultante de um gradiente de pressão, adquire a designação de transporte por advecção, passando o gás a movimentar-se das zonas de maior pressão para as zonas de menor pressão. No caso específico em que o movimento advectivo é provocado por um gradiente geotérmico,

este tipo de transporte assume a designação de convecção (Etiope e Martinelli, 2002). O fluxo do gás (F), neste caso, pode ser descrito do seguinte modo (equação 3.3):

$$(3.3) \quad F = Cv$$

Em que C corresponde à concentração (kg/m^3) e v à velocidade do gás (m/s).

Uma vez que na natureza estes dois processos raramente ocorrem de forma isolada, a movimentação de determinado gás resulta da sua combinação. Enquanto a difusão assume um papel importante em espaços capilares e rochas com poros pequenos, o gradiente de pressão assume grande relevo em rochas muito porosas ou em zonas fracturadas. Deste modo, o fluxo total (F) de um determinado gás pode ser descrito pela seguinte equação (equação 3.4):

$$(3.4) \quad F = -nD_m \frac{dC}{dz} + Cv$$

Em que $nD_m \frac{dC}{dz}$ representa a componente de difusão e Cv a componente de advecção. Na realidade o que se constata é que quando o transporte por advecção está presente, o transporte por difusão pode ser negligenciado (Etiope e Martinelli, 2002).

No caso específico do radão é necessário ter em consideração não só as leis que regem os transportes de gases descritos, como também o seu decaimento radioactivo. Para além disto, como a quantidade deste gás presente no solo é normalmente demasiado pequena (10^{-10} ppm), é preciso ter em linha de conta a existência de outros gases presentes em maiores quantidades (e.g. CO_2 , CH_4 e N_2) e cujos gradientes de pressão podem contribuir para fazer deslocar o radão, funcionando assim como gases de transporte ou de arraste (Etiope e Lombardi, 1995; Etiope e Martinelli, 2002).

Esses gradientes de pressão podem ser induzidos de acordo com Etiope e Martinelli (2002) por factores como tensões tectónicas, variações litostáticas, fracturação de rochas, formação localizada de um gás, recarga e descarga de aquíferos e de outros reservatórios de fluidos em profundidade. Em zonas mais superficiais este processo é influenciado por parâmetros meteorológicos.

No início da década de 80 surge uma nova teoria proposta por Kristiansson e Malmqvist, designada por teoria do geogás, para explicar o transporte do radão (Malmqvist e Kristiansson, 1984; Christenson *et al.*, 1988). Esta teoria preconiza que a movimentação de radão no solo está associada à existência de um microfluxo natural de gases designado por geogás. Esta teoria é suportada pelos factos que se seguem (Etiope e Lombardi, 1996; Etiope e Martinelli, 2002 e referências nele citadas):

- (a) A ascensão de microfluxo de gases ao longo de falhas e fracturas é um fenómeno muito comum na crosta terrestre;
- (b) O tipo de transporte que rege a ascensão do microfluxo é a advecção e o geogás corresponde a uma mistura natural de gases constituída por gases de arraste que transportam gases raros (Figura 3.2);
- (c) A ascensão do geogás ocorre de um modo rápido;
- (d) Quando o geogás encontra um meio aquoso forma um fluxo de microbolhas (Figura 3.3);
- (e) As microbolhas conseguem transportar elementos traço (gases e partículas sólidas) ao longo de grandes distâncias.

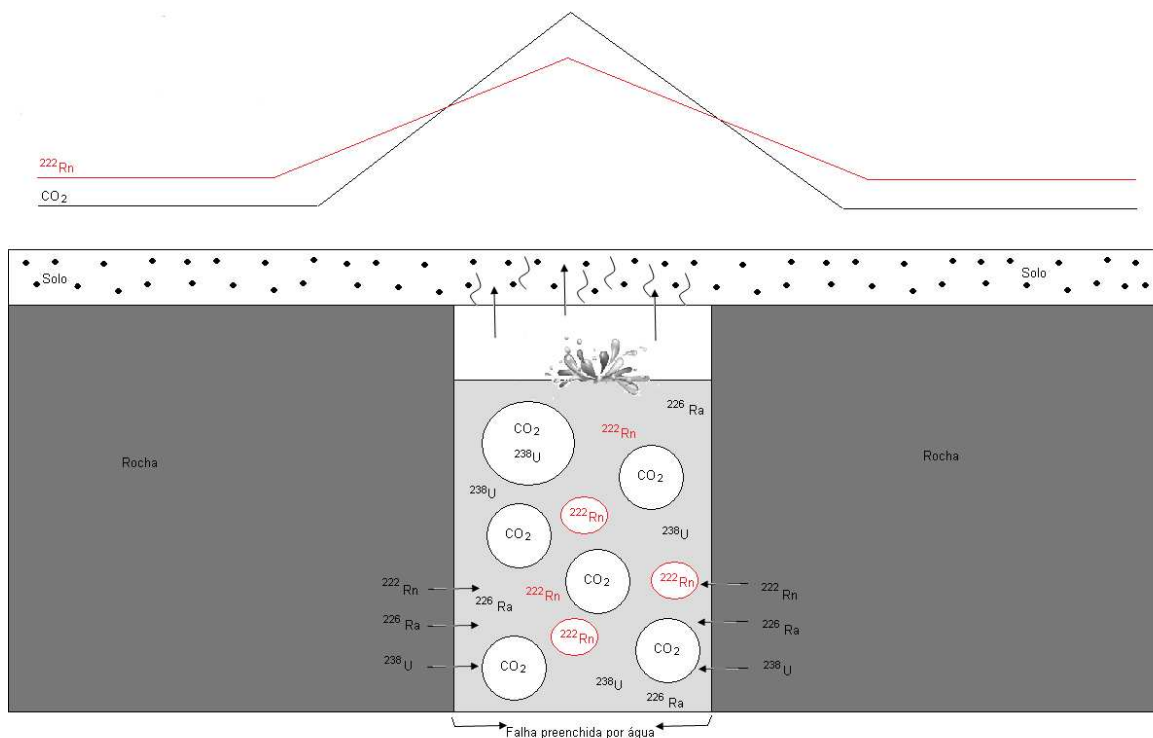


Figura 3.2 – Representação esquemática do transporte de radão ao longo de falhas tendo como gás de arraste o CO_2 (modificado de Etiope e Lombardi, 1995).

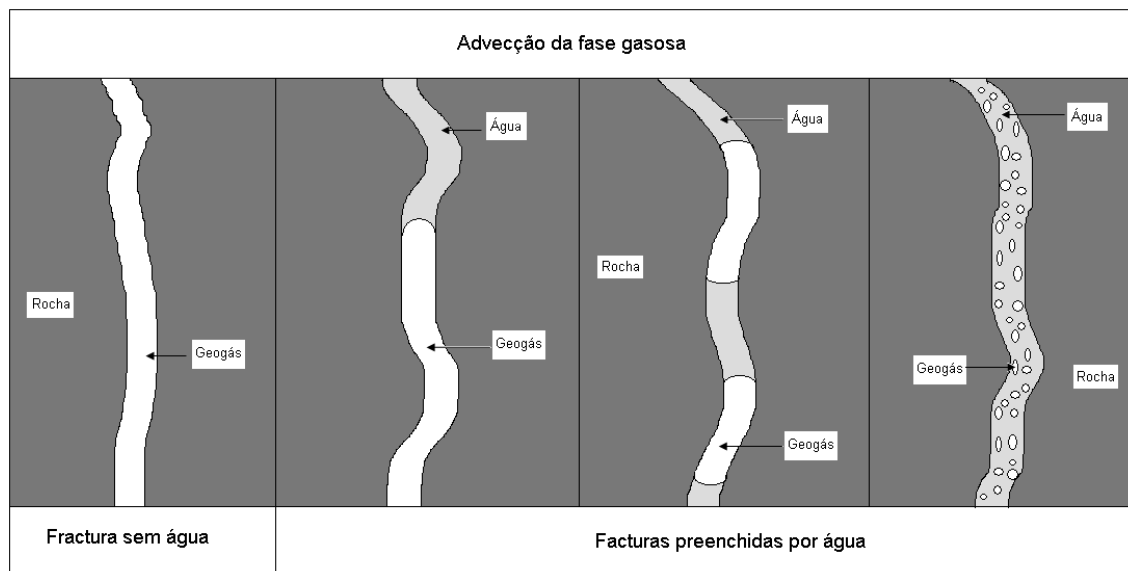


Figura 3.3 – Representação esquemática da migração, por advecção, do geogás em fraturas sem água e preenchidas por água (modificado de Etiope e Martinelli, 2002).

3.3. Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos dados

3.3.1. Equipamento

3.3.1.1. Detector de ^{222}Rn

O equipamento utilizado para a realização da cartografia de radão no solo corresponde a um detector de partículas α , o RAD7, fabricado pela DurrIDGE Company, Inc. (EUA) (Figura 3.4). Este equipamento permite por um lado, a detecção de partículas α através da presença de um detector sólido de silício (material semiconductor) que converte a radiação α num sinal eléctrico e por outro lado, a identificação do isótopo emissor dessa partícula, através da respectiva energia libertada, pela aplicação da espectrometria de partículas α (DurrIDGE Company, 2011a).



Figura 3.4 – Equipamento RAD7 utilizado na medição da concentração de ^{222}Rn (DurrIDGE Company, 2011a).

O RAD7 apresenta o espectro de energia de partículas α numa escala que varia entre os 0 e os 10 MeV. Esta escala apresenta-se dividida em 8 janelas, correspondendo cada uma delas a diferentes intervalos de energia (Figura 3.5). A concentração de ^{222}Rn é contabilizada através das janelas A - polónio 218 (^{218}Po) e C – polónio 214 (^{214}Po) e o torão (^{220}Rn) é contabilizado pelas janelas B – polónio 216 (^{216}Po) e D polónio 212 (^{212}Po). As restantes janelas têm como principal função o diagnóstico de funcionamento do equipamento, sendo a janela E uma janela de energias elevadas e as janelas F, G e H reflectem as restantes energias traduzidas em termos de ruído. Existe ainda uma janela extra, a janela O, que corresponde ao somatório das contagens nas janelas de diagnóstico (DurrIDGE Company, 2011a).

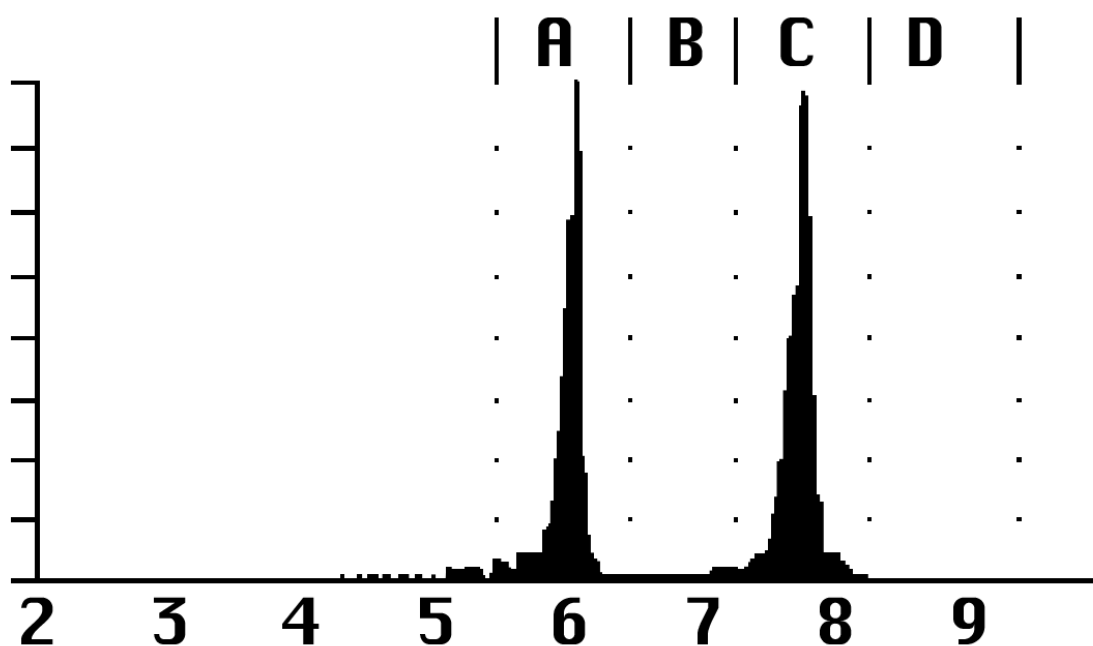


Figura 3.5 – Espectro de energias alfa (modificado de DurrIDGE Company, 2011a).

Para a medição da concentração de radão no solo, o RAD7 foi programado para funcionar em modo *Sniff*. Neste modo apenas são contabilizadas as partículas α detectadas na janela A, isto é, as partículas α resultantes do decaimento do ^{218}Po . Este modo de amostragem permite uma medição rápida, uma vez que, como o ^{218}Po

tem um tempo de semi-vida de apenas 3 minutos, demorará cerca de 15 minutos para que a contagem atinja o equilíbrio com a concentração de ^{222}Rn . Este equipamento tem uma gama de detecção que oscila entre os 4 e os 400 000 Bq/m³, com uma precisão de $\pm 5\%$ (DurrIDGE Company, 2011a).

3.3.1.2. Detector de CO₂

A cartografia da concentração de CO₂ no solo foi efectuada com recurso a um detector GA2000 da *Geotechnical Instruments*. A medição da concentração de CO₂ é efectuada através de um detector de infravermelhos com uma precisão de $\pm 0,5\%$ vol., $\pm 1\%$ vol. e $\pm 3\%$ vol. para os intervalos de concentrações entre 0 e 5; 5 e 15 e para valores superiores a 15 %vol., respectivamente. Este detector apresenta um tempo de resposta de aproximadamente 20 segundos (Geotechnical Instruments, 2009).



Figura 3.6 – Equipamento GA2000 utilizado na medição da concentração de CO₂ (Geotechnical Instruments, 2009).

3.3.2. Amostragem

A amostragem da concentração de radão, de CO_2 e da temperatura do solo foi realizada ao longo de várias campanhas entre 2005 e 2010. Estas campanhas decorreram nos meses de Verão, em períodos sem pluviosidade, de modo a minimizar a influência dos parâmetros meteorológicos. As condições meteorológicas dos períodos de amostragem foram controladas através da observação dos dados obtidos pelas estações de fluxo de CO_2 instaladas no interior da caldeira do Vulcão das Furnas e que têm acoplados sensores meteorológicos (Anexo I). A primeira campanha foi efectuada em 2005 abrangendo toda a área da freguesia das Furnas e a metodologia aplicada encontra-se descrita em Silva (2006). Entre 2007 e 2010 foram realizadas medições no interior da caldeira, no bordo e no flanco S do Vulcão das Furnas, incluindo a área da freguesia da Ribeira Quente. No total foram realizadas 489 medições da concentração de radão e da temperatura do solo (Figura 3.7).

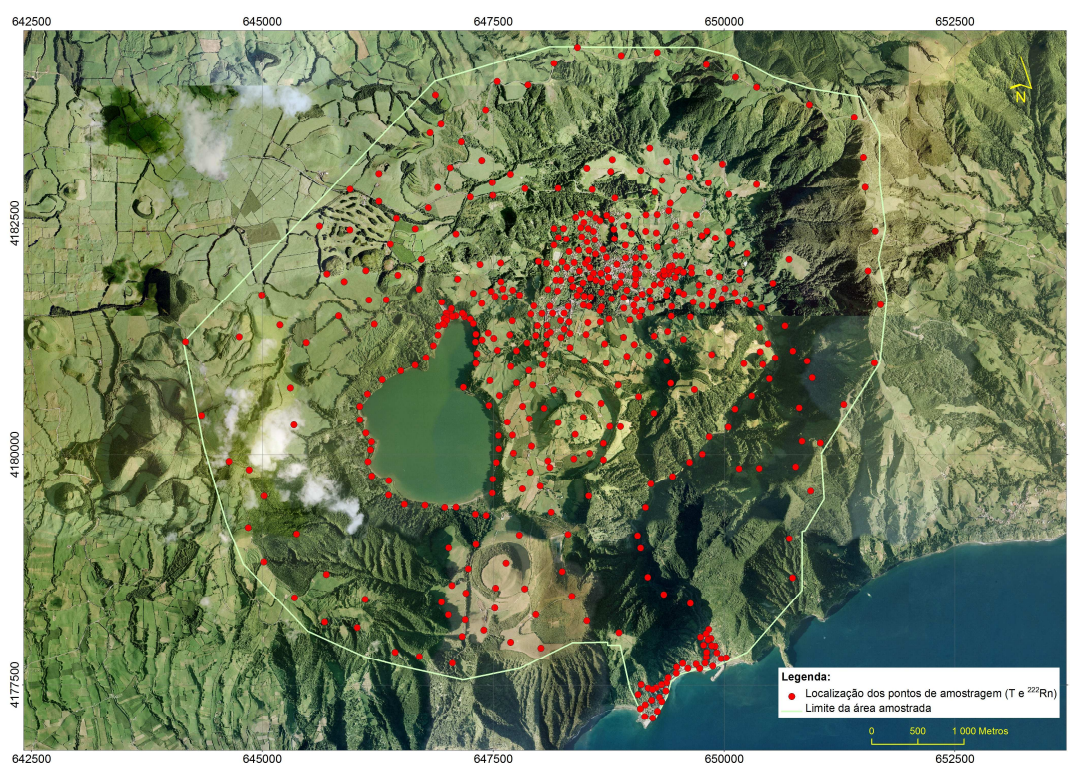


Figura 3.7 – Localização dos pontos de amostragem da concentração de ^{222}Rn e da temperatura do solo (UTM-WGS84, zona 26S).

Relativamente à concentração de CO_2 no solo foram realizadas 319 amostragens. A esta informação foram adicionados os dados obtidos em trabalhos anteriores realizados na área correspondente à freguesia das Furnas por Sousa (2003). A cartografia final contém, neste caso, um total de 1538 pontos de amostragem (Figura 3.8).

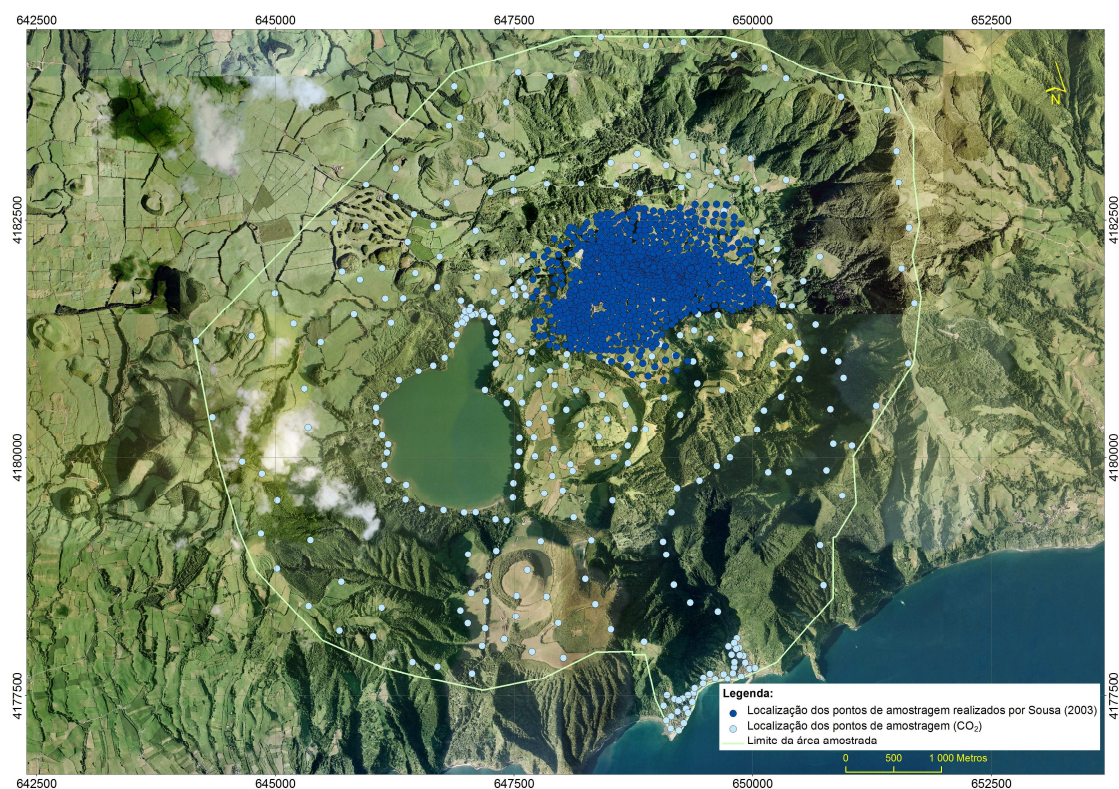


Figura 3.8 – Localização dos pontos de amostragem da concentração de CO_2 no solo (UTM-WGS84, zona 26S).

A medição da concentração de radão no solo foi efectuada a aproximadamente 60 cm de profundidade através da introdução de uma sonda no solo (Fotografia 3.1). O gás presente no solo foi introduzido no detector com um fluxo de aspiração de 0,5 L/min. Tal como referido anteriormente, a amostragem foi efectuada em modo *Sniff*, o que permite uma medição relativamente rápida da concentração de radão presente no solo através da contabilização das partículas α resultantes do decaimento do ^{218}Po . Em cada ponto de amostragem a medição decorreu durante um período de

20 minutos, em quatro ciclos de cinco minutos cada, sendo a média dos dois últimos ciclos registada e a humidade no interior do detector verificada. Foram validados os dados obtidos em condições de humidade no interior do detector inferiores ou iguais a 10 %, uma vez que valores superiores provocam uma subavaliação dos dados de concentração de radão obtidos. Entre cada medição foi introduzido ar atmosférico no detector durante cerca de 10 minutos, em modo de purga (*Purge*), de forma a proceder à limpeza do detector e evitar que as partículas α que permanecessem no interior do aparelho fossem contabilizadas na amostragem seguinte. Neste processo o detector deixa de fazer contagens e a câmara de amostragem é limpa de todos os resíduos.



Fotografia 3.1 – Medição da concentração de ^{222}Rn no solo. Legenda: A - detector de ^{222}Rn ; B - sonda de ferro; C - detector de CO_2 ; D - termómetro e E - GPS.

A medição da concentração de CO_2 no solo foi, à semelhança do descrito para a amostragem da concentração de radão, efectuada a aproximadamente 60 cm de profundidade através da introdução de uma sonda no solo. O gás presente no solo foi

introduzido no detector com um fluxo de aspiração de 0,55 L/min até que o valor de concentração deste gás estabilizasse no visor. Entre cada medição foi também introduzido ar atmosférico no detector até que o valor de concentração de CO_2 voltasse a atingir o valor de 0 %vol..

A medição da temperatura do solo foi efectuada a aproximadamente 15 cm de profundidade, no orifício deixado pela sonda de amostragem, com um termómetro T51 *Rotronic*, que apresenta uma gama de detecção que oscila entre os -70 e os 500 °C. Os vários pontos amostrados foram georeferenciados com o auxílio de um GPS (*Global Positioning System*), da GARMIN, modelo GPSmap 76S e foram ainda assinalados nos ortofotomapas da área em estudo (1:5000).

Neste estudo não foi utilizada uma malha de amostragem regular tendo a localização dos pontos de amostragem sido condicionada pela topografia e/ou presença de estruturas geológicas, construções efectuadas pelo homem, autorização de acesso a propriedades privadas e presença de água em níveis superficiais. Os pontos apresentam uma distribuição aleatória, sendo a malha mais densa nas zonas habitadas e sempre que foram encontrados locais de concentração mais elevada dos gases em estudo (Figura 3.7 e 3.8).

3.3.3. Recolha e Análise Estatística dos Dados

Os dados de concentração de radão registados foram transferidos para um computador portátil através de *software* específico, o CAPTURE 1.2 (DurrIDGE Company). Normalmente esta operação foi efectuada a cada 10 medições. Ao ficheiro de dados obtido (formato *Microsoft Excel*) foi adicionada informação complementar para cada ponto que incluiu a respectiva referência, as coordenadas M e P, a concentração de CO_2 e a temperatura do solo.

Aos dados obtidos foram aplicadas duas análises estatísticas: a abordagem estatística através de representação gráfica (GSA – *Graphical Statistical Approach*) e a simulação sequencial Gaussiana (sGs – *Sequential Gaussian Simulation*). A abordagem estatística através de representação gráfica (GSA) permite identificar valores de ruído de fundo, assim como o limiar de valores anómalos de dados geoquímicos e baseia-se em gráficos de probabilidade acumulada que possibilitam a identificação da presença de diferentes populações nos dados obtidos (Sinclair, 1974). Esta metodologia tem sido amplamente aplicada em trabalhos associados à análise espacial de gases (CO_2 e ^{222}Rn) em regiões vulcânicas (e.g. Chiodini *et al.*, 1998; Cardellini *et al.*, 2003; Hernández *et al.*, 2004; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010). A aplicação deste método requer que os dados sigam uma distribuição normal ou log-normal. Como os dados obtidos não seguem uma distribuição normal foi necessário proceder à sua transformação logarítmica (Figura 3.9). Os dados log-transformados foram utilizados na construção de gráficos de probabilidade acumulada, o que permitiu para além da identificação de diferentes populações log-normais, calcular a média, o desvio padrão e a proporção de cada população identificada (Sinclair, 1974). A média e o intervalo de confiança de 90 % da média foram calculados a partir do estimador *T-Sichel* (David, 1977).

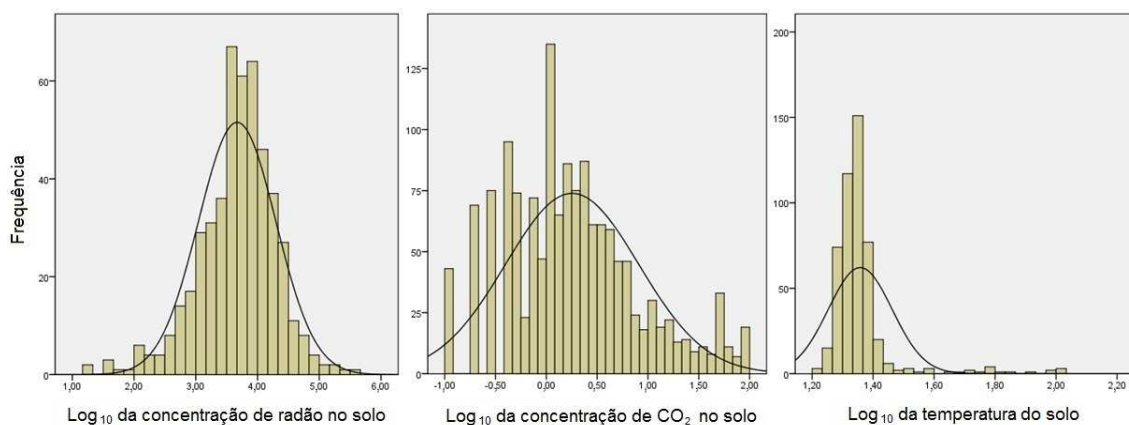


Figura 3.9 – Histogramas dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn e de CO_2 e de temperatura do solo.

A aplicação da simulação sequencial Gaussiana (sGs) permite a produção de várias simulações da distribuição espacial da variável através da aplicação do

algoritmo descrito por Deutsch e Journel (1998). Nos últimos anos a simulação estocástica, isto é, o processo de produzir realizações alternativas equiprováveis da variável (Deutsch e Journel, 1998), tem sido aplicada à análise espacial de dados geoquímicos (e.g. Cardellini *et al.*, 2003; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010). Quando comparada com o *Kriging*, a simulação estocástica apresenta, por um lado, a vantagem de respeitar os dados originais nas realizações que são efectuadas, não atenuando os valores extremos e, por outro lado, permite o cálculo da incerteza associada às realizações efectuadas (Isaaks e Srivastava, 1989; Deutsch e Journel, 1998). A simulação sequencial Gaussiana é condicional e sequencial, isto é, o valor de cada ponto simulado depende dos dados originais e dos dados previamente simulados. Esse processo repete-se até que todos os pontos tenham sido simulados (Deutsch e Journel, 1998). A sequência de etapas necessárias para a aplicação da simulação sequencial Gaussiana está descrita na figura que se segue (Figura 3.10):

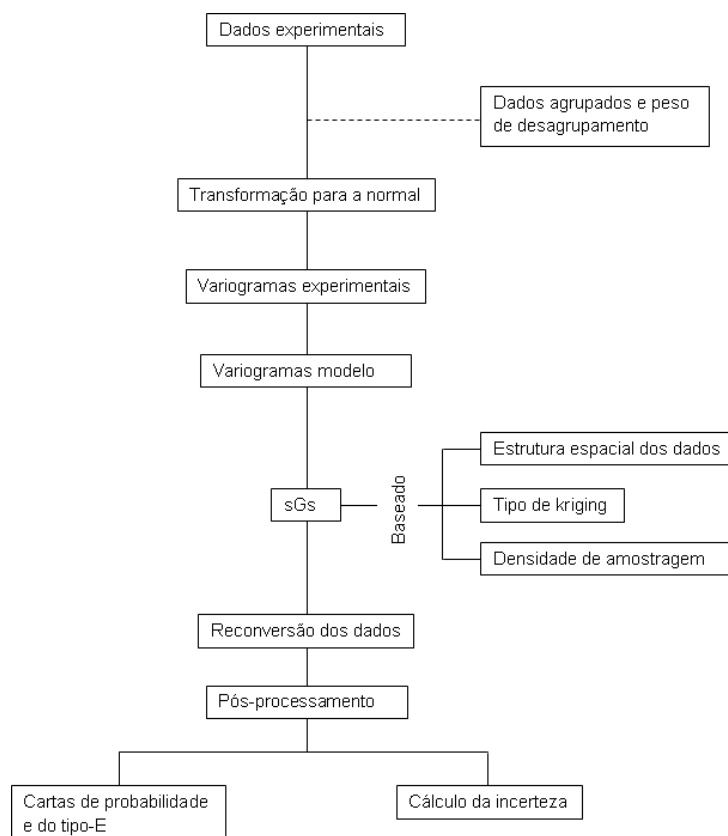


Figura 3.10 – Esquema dos procedimentos a seguir na aplicação da simulação sequencial Gaussiana (modificado de Viveiros 2010 e referências nele citadas).

Deste modo, os dados de concentração de radão, de CO_2 e de temperatura do solo foram analisados no que se refere à presença de dados agrupados (*Cell declustering*). Assim, foi identificado um valor médio mínimo de desagrupamento para células de 100 m no caso dos dados de concentração de radão, de 397 m no que diz respeito aos dados de concentração de CO_2 no solo e de 567 m no que se refere à temperatura do solo (Figura 3.11). O peso de desagrupamento (*Decluster weight*) foi atribuído de modo a que as áreas com maior número de pontos de amostragem recebem menos peso do que áreas com menos dados (Deutsch e Journel, 1998). Como os dados originais não seguem uma distribuição normal foi necessário transformá-los recorrendo à função *normal score transform* (Deutsch e Journel, 1998; Cardellini *et al.*, 2003).

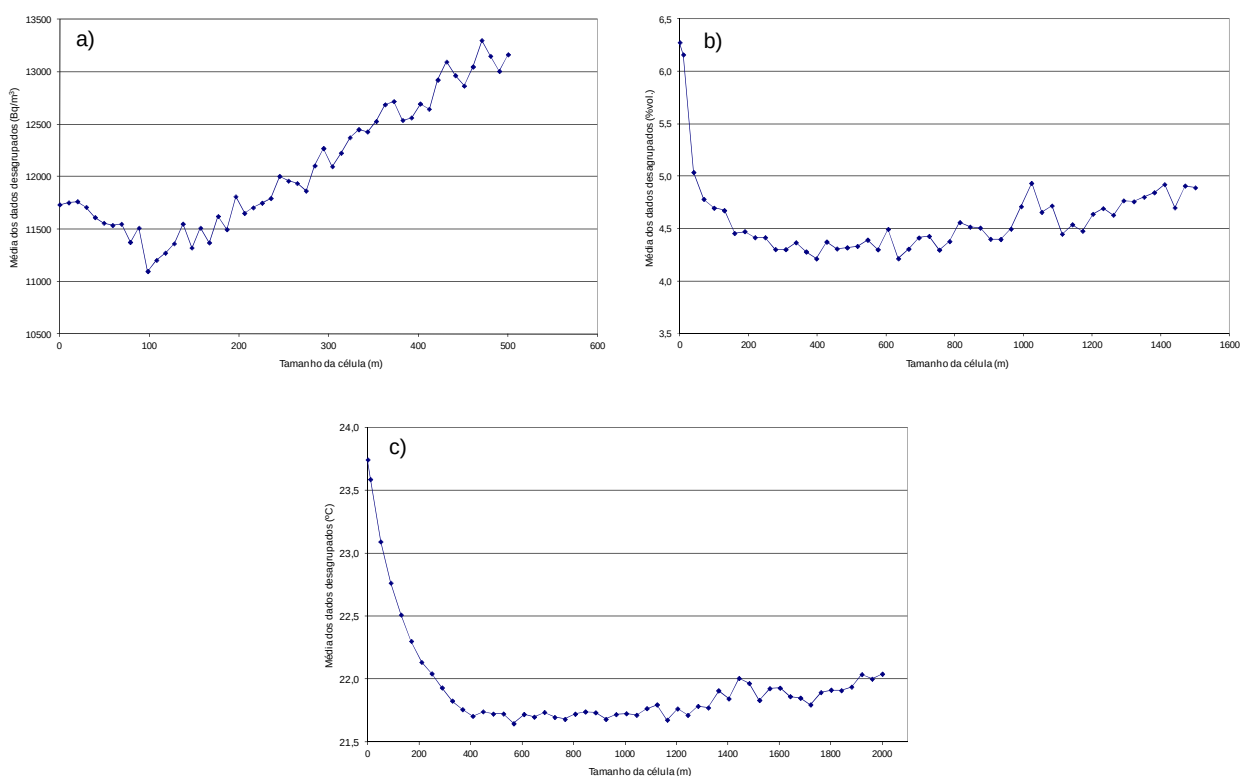


Figura 3.11 – Gráficos da dispersão da média dos dados desagrupados *versus* o tamanho das células: a) dados da concentração de ^{222}Rn no solo; b) dados da concentração de CO_2 no solo e c) dados da temperatura do solo.

Posteriormente foram calculados os variogramas experimentais de modo a modelar a estrutura espacial dos dados. Os variogramas modelos foram utilizados na simulação sequencial Gaussiana para efectuar 100 realizações de cada uma das variáveis em análise. As simulações foram executadas através do programa *sgsim* baseado no algoritmo da simulação sequencial Gaussiana proposto por Deutsch e Journel (1998) e que está incluído no *software winGslib* (versão 1.04). O método de interpolação utilizado corresponde ao *Kriging* simples que, de acordo com o teorema da estacionaridade que assume que a componente estrutural média (m) é constante, ou seja, não há nenhuma variação na tendência principal da região, é o método mais adequado quando se aplica uma abordagem multi-gaussiana com dados que apresentam uma distribuição normal (Deutsch e Journel, 1998). Neste caso, foram considerados 6 pontos vizinhos e um tamanho de célula de 50 m.

Finalmente os dados obtidos foram reconvertidos, passando de dados simulados com distribuição normal a valores com expressão nos dados originais, e foram construídas cartas de probabilidade e do tipo-E. Estas cartas foram posteriormente projectadas através da utilização de *software* ArcGis 10, desenvolvido pela ESRI. As cartas de probabilidade expressam a probabilidade do valor simulado em cada ponto ser superior a um valor limite previamente definido, enquanto as cartas do tipo-E mostram os valores “esperados” em qualquer localização, obtidos através do cálculo das médias de todas as simulações efectuadas para aquela localização (Cardellini *et al.*, 2003). Finalmente foi ainda efectuado o cálculo da incerteza associada às 100 realizações efectuadas.

3.4. Apresentação dos Resultados

3.4.1. Cartografia da Concentração de ^{222}Rn no Solo

Os valores de concentração de radão no solo no Vulcão das Furnas oscilaram entre 0 e 387 527 Bq/m³ e apresentam um valor médio de 11 733 Bq/m³. De modo a tentar identificar o ruído de fundo e o limite a partir do qual os valores deste gás no solo são considerados anómalos foi aplicada a análise estatística através da representação gráfica aos dados com distribuição log-normal. A análise gráfica dos dados, projectada aplicando a metodologia desenvolvida por Sinclair (1974), através da utilização da aplicação *chiodSC.exe* gentilmente cedida por G. Chiodini (Observatório Vesuviano), permitiu a identificação de três populações (Figura 3.12).

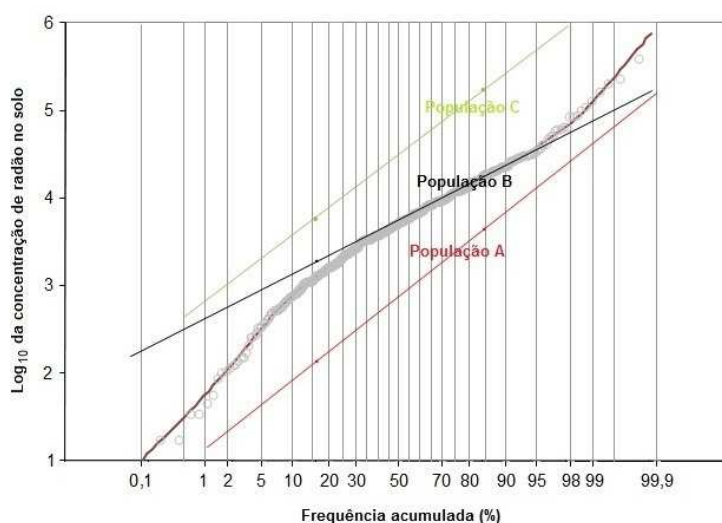


Figura 3.12 – Gráfico de probabilidade acumulada da concentração de ^{222}Rn no solo.

A proporção de cada população, assim como a média estimada e o intervalo de confiança de 90 % da média são apresentados na tabela 3.2. A população A apresenta uma média de 3538 Bq/m³ e representa 15 % do total dos dados. A população B apresenta um valor médio de 9835 Bq/m³ e representa 81 % do total dos

dados e a população C apresenta uma média de $117\,113\text{ Bq/m}^3$ representando 4 % do total dos dados. O ruído de fundo foi definido pelo percentil 90 da população A ($\sim 8000\text{ Bq/m}^3$) e para delimitar as zonas anómalas principais foi utilizado o limite definido pelo percentil 90 da população B ($\sim 20\,000\text{ Bq/m}^3$).

Tabela 3.2 – Estatística das populações identificadas nos dados de concentração de ^{222}Rn no solo e o intervalo de confiança de 90 % da média

População	Proporção (%)	Média da concentração de ^{222}Rn no solo (Bq/m^3)	Intervalo de confiança de 90 % da média (Bq/m^3)
A	15	3532	2134 - 7654
B	81	9835	8436 - 11 909
C	4	117 113	56 322 - 506 923

Foi construído o variograma omnidirecional dos dados (Figura 3.13) para a análise da estrutura espacial dos dados e realização da cartografia da concentração de radão no solo. O variograma modelo apresenta uma estrutura mista gaussiana e exponencial. A cartografia do tipo E pode ser observada na figura 3.14.

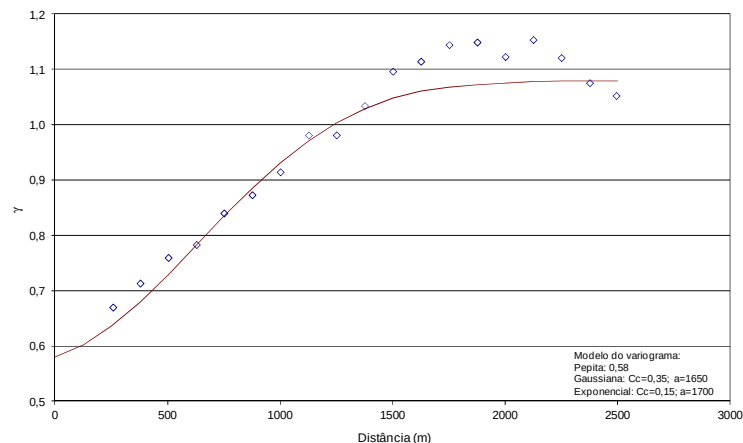


Figura 3.13 – Variograma obtido e modelado da concentração de ^{222}Rn no solo (normal score): Cc – silo ou patamar e a – amplitude (m).

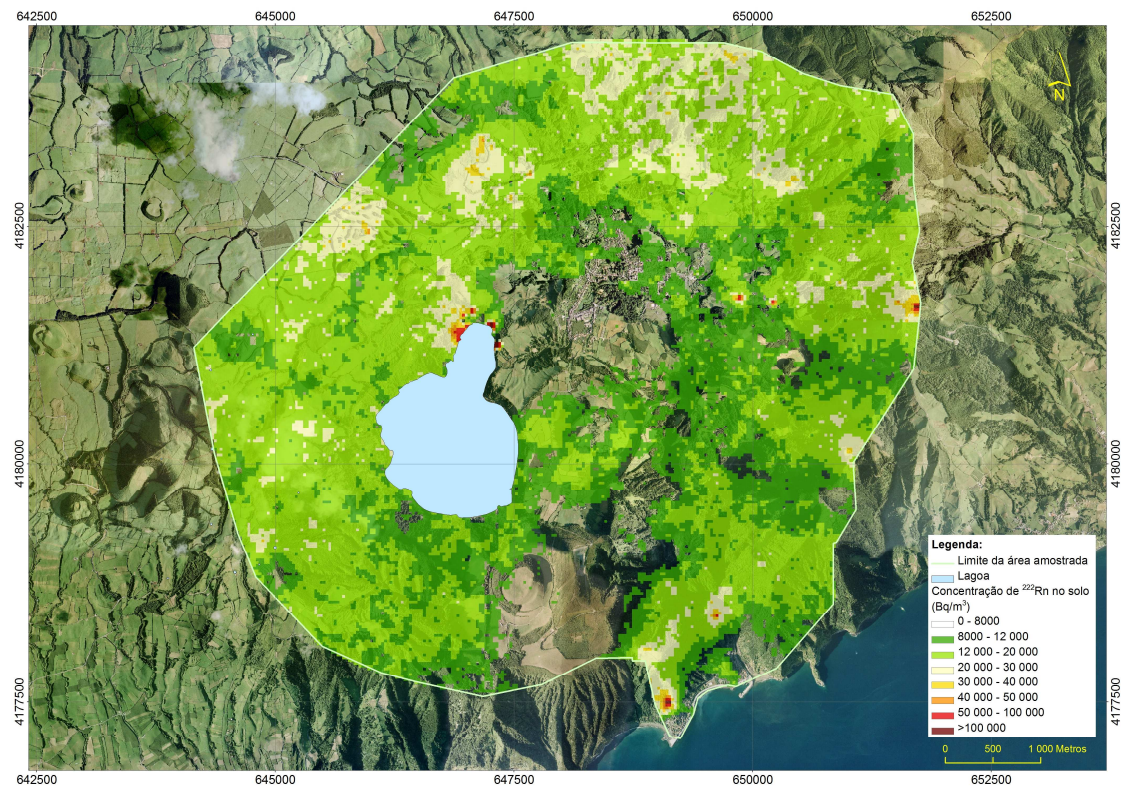


Figura 3.14 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no solo (cartografia do tipo-E).

Com base na média e desvio padrão do somatório total do valor das células (valor simulado pela área de cada célula) das 100 simulações realizadas foi calculada a incerteza associada. O valor do somatório oscilou entre um mínimo de $51,5 \times 10^{10}$ (unidades arbitrárias) e um máximo de $53,4 \times 10^{10}$ sendo o valor do total das 100 realizações efectuadas de $52,6 \times 10^{10}$ (Figura 3.15). O coeficiente de variação é aproximadamente 0,6 %.

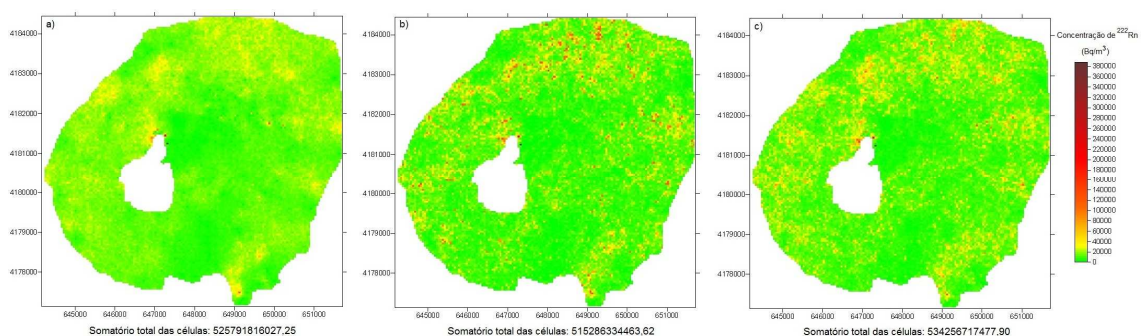


Figura 3.15 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no solo: a) cartografia realizada com base no total das 100 realizações efectuadas (cartografia do tipo-E); b) cartografia referente à realização mínima estimada e c) cartografia referente à realização máxima estimada.

3.4.2. Cartografia da Concentração de CO_2 no Solo

Para a realização da cartografia da concentração de CO_2 no solo foi adoptada a mesma metodologia descrita no ponto anterior. Os valores de concentração de CO_2 no solo no Vulcão das Furnas oscilaram entre 0 e 100 %vol., com um valor médio de 6 %vol.. Em 1994 foram publicados os primeiros trabalhos de desgaseificação difusa associados à concentração de CO_2 no solo no Vulcão das Furnas e que cobriu a área da freguesia das Furnas (Baubron *et al.*, 1994a). Estes autores definiram um ruído de fundo de 1,5 %vol. para este vulcão. Este valor tem sido adoptado, nos últimos anos, por diversos autores que desenvolveram estudos de desgaseificação difusa de concentração de CO_2 no solo na ilha de S. Miguel (*e.g.* Sousa, 2003; Marcos *et al.*, 2003; Ferreira *et al.*, 2005; Marcos, 2006). No presente trabalho optou-se pela aplicação da análise estatística através da representação gráfica aos dados com distribuição log-normal para a definição do ruído de fundo de modo a, por um lado, tentar comparar com o ruído de fundo utilizado em trabalhos anteriores e, por outro, uniformizar as metodologias aplicadas nas cartografias apresentadas. Esta análise permitiu a identificação de três populações (Figura 3.16).

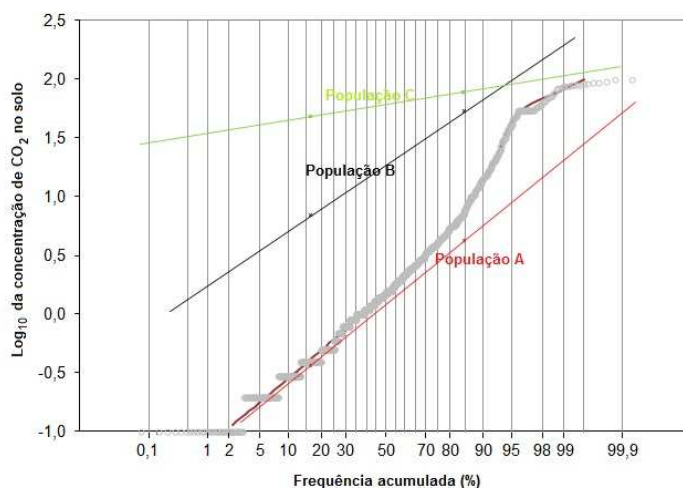


Figura 3.16 – Gráfico de probabilidade acumulada da concentração de CO_2 no solo.

A proporção de cada população, assim como a média estimada e o intervalo de confiança de 90 % da média são apresentados na tabela 3.3. A população A

apresenta uma média de 2,7 %vol. e representa 90 % do total dos dados. A população B apresenta um valor médio de 33,3 %vol. e representa 6,5 % do total dos dados e a população C apresenta uma média de 64,8 %vol. representando 3,5 % do total dos dados. O ruído de fundo foi definido pelo percentil 90 da população A (~ 6 %vol.) e para delimitar as zonas anómalas principais optou-se por utilizar o limite de 15 %vol. que corresponde ao valor letal de concentração de CO_2 (Tabela 1.2), uma vez que o limite definido pelo percentil 90 da população B (~ 63 %vol.) corresponde a um valor demasiado elevado.

Tabela 3.3 – Estatística das populações identificadas nos dados de concentração de CO_2 no solo e o intervalo de confiança de 90 % da média

População	Proporção (%)	Média da concentração de CO_2 no solo (%vol.)	Intervalo de confiança de 90 % da média (%vol.)
A	90,0	2,7	2,4 – 2,9
B	6,5	33,3	27,4 – 42,4
C	3,5	64,8	55,9 – 67,4

Foi construído o variograma omnidirecional dos dados (Figura 3.17) para a realização da cartografia da concentração de CO_2 no solo. O variograma modelo apresenta uma estrutura mista esférica e exponencial. A cartografia do tipo E pode ser observada na figura 3.18.

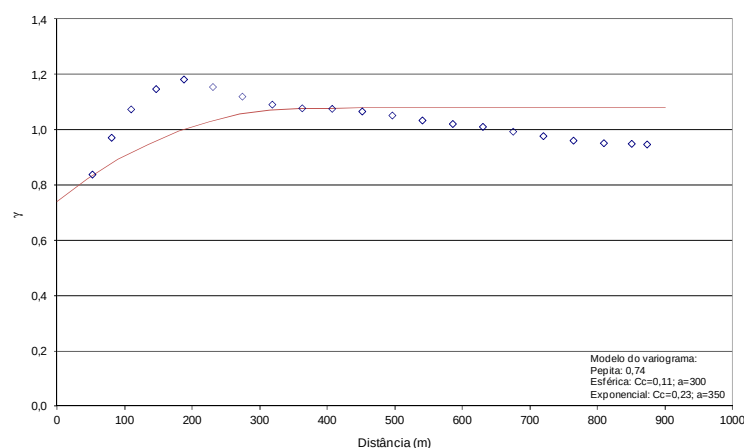


Figura 3.17 – Variograma obtido e modelado da concentração de CO_2 no solo (normal score): Cc – silo ou patamar e a – amplitude (m).

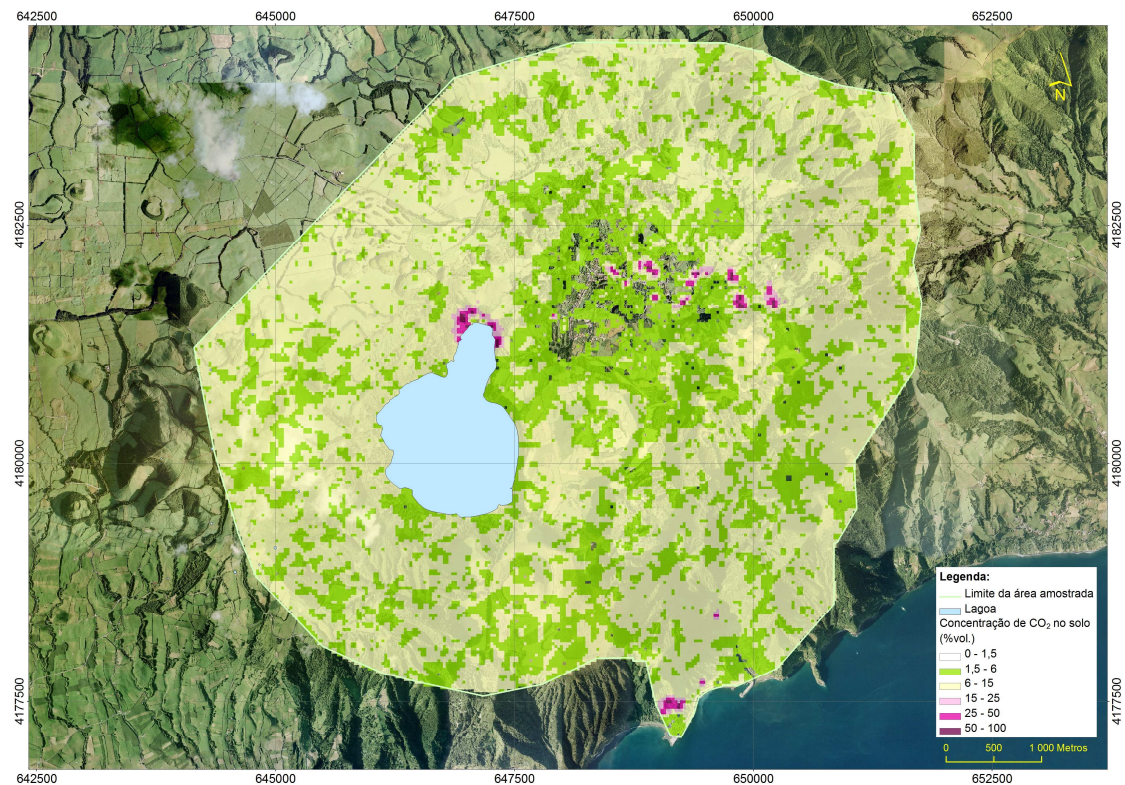


Figura 3.18 – Distribuição espacial da concentração de CO_2 no solo (cartografia do tipo-E).

À semelhança do descrito para o radão, também neste caso, foi calculada a incerteza associada à cartografia realizada. O valor do somatório oscilou entre um mínimo de $25,6 \times 10^7$ (unidades arbitrárias) e um máximo de $26,6 \times 10^7$ sendo o valor do total das 100 realizações efectuadas de $26,5 \times 10^7$ (Figura 3.19). O coeficiente de variação é aproximadamente 0,6 %.

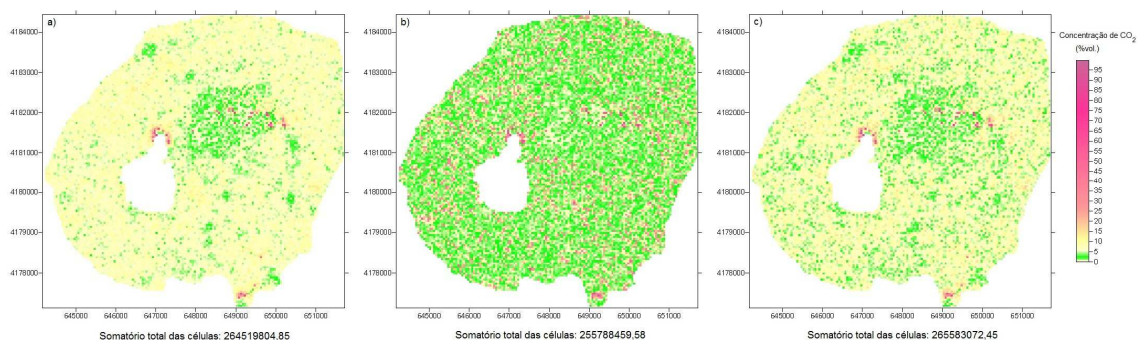


Figura 3.19 – Distribuição espacial da concentração de CO_2 no solo: a) cartografia realizada com base no total das 100 realizações efectuadas (cartografia do tipo-E); b) cartografia referente à realização mínima estimada e c) cartografia referente à realização máxima estimada.

3.4.3. Cartografia de Anomalias Térmicas

Os valores de temperatura do solo no Vulcão das Furnas oscilaram entre 16,5 e 100 °C e apresentam um valor médio de 23,7 °C. Também neste caso, e pelos motivos descritos anteriormente, foi aplicada a análise estatística através da representação gráfica aos dados com distribuição log-normal que permitiu a identificação de duas populações (Figura 3.20).

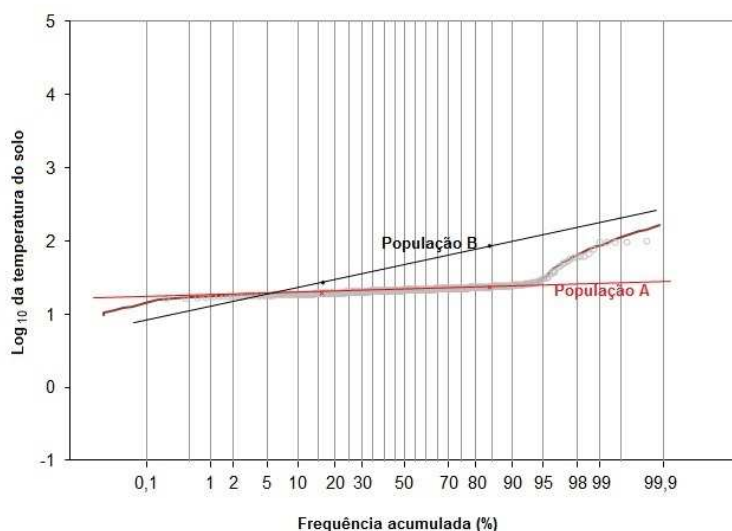


Figura 3.20 – Gráfico de probabilidade acumulada da temperatura do solo.

A proporção de cada população, assim como a média estimada e o intervalo de confiança de 90 % da média são apresentados na tabela 3.4. A população A apresenta uma média de 22 °C e representa 94 % do total dos dados e a população B apresenta um valor médio de 59,7 °C e representa 6 % do total dos dados. O ruído de fundo foi definido pelo percentil 90 da população A (~25 °C) e para delimitar as zonas anómalas principais foi utilizado o valor máximo da temperatura do ar registado pelas estações GFUR1 e GFUR2 (~ 30 °C). Este valor corresponde à influência máxima que a temperatura do ar poderia exercer sobre a temperatura do solo em determinado ponto.

Tabela 3.4 – Estatística das populações identificadas nos dados de temperatura do solo e o intervalo de confiança de 90 % da média

População	Proporção (%)	Média da temperatura do solo (°C)	Intervalo de confiança de 90 % da média (°C)
A	94	22,0	21,8 - 22,1
B	6	59,7	49,4 – 77,0

Foi construído o variograma omnidirecional dos dados (Figura 3.21) para a realização da cartografia da temperatura do solo. O variograma modelo apresenta uma estrutura mista esférica e exponencial. A cartografia do tipo E pode ser observada na figura 3.22.

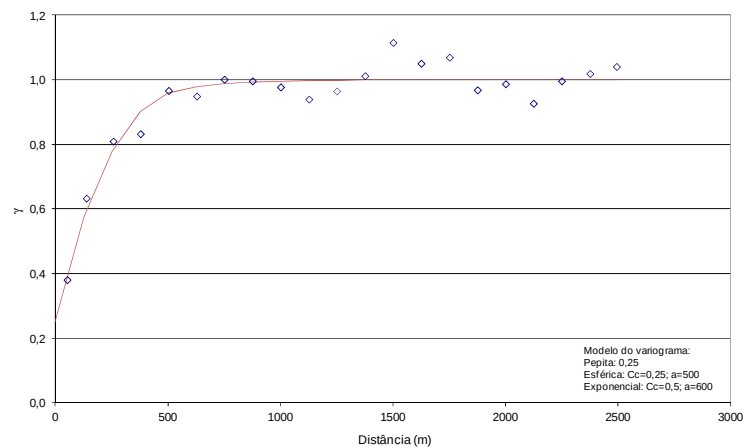


Figura 3.21 – Variograma obtido e modelado da temperatura do solo (normal score): Cc – silo ou patamar e a – amplitude (m).

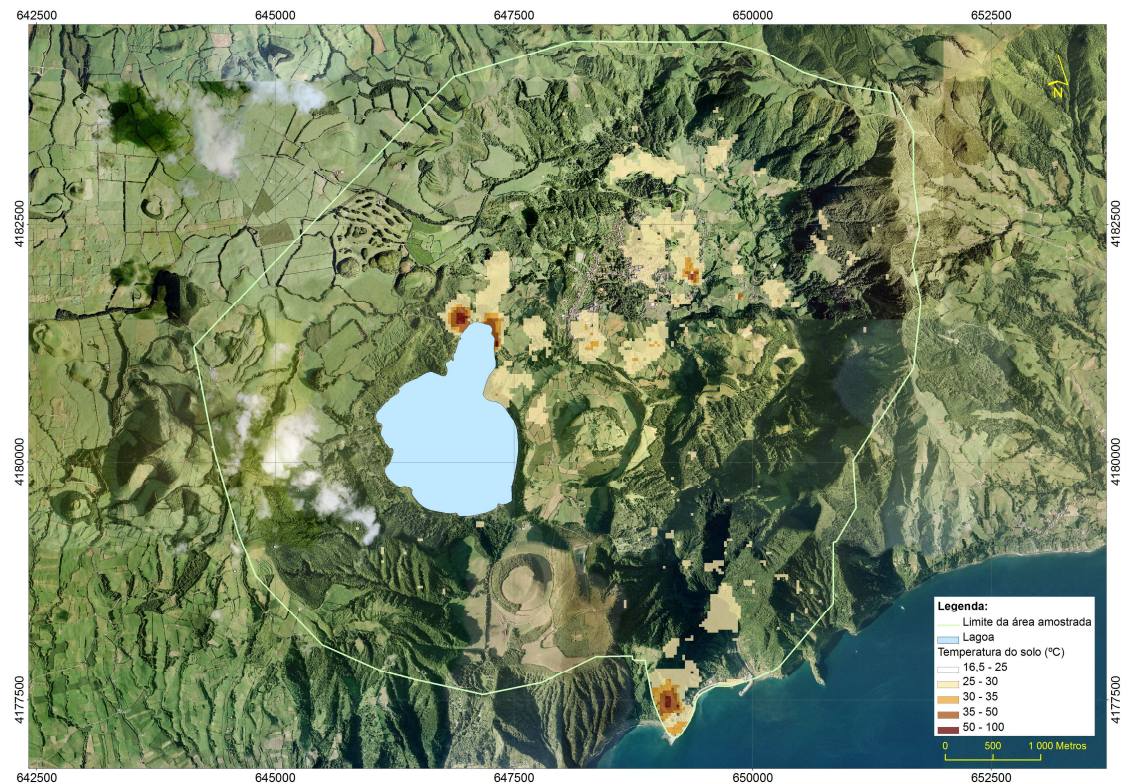


Figura 3.22 – Distribuição espacial da temperatura do solo (cartografia do tipo-E).

Também neste caso, foi calculada a incerteza associada à cartografia realizada. O valor do somatório oscilou entre um mínimo de $90,6 \times 10^7$ (unidades arbitrárias) e um máximo de $91,1 \times 10^7$ sendo o valor do total das 100 realizações efectuadas de 91×10^7 (Figura 3.23). O coeficiente de variação é aproximadamente 0,1 %.

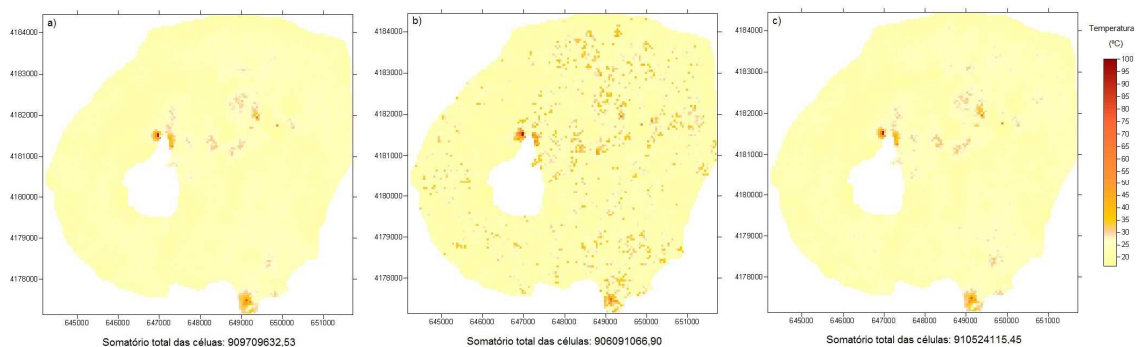


Figura 3.23 – Distribuição espacial da temperatura do solo: a) cartografia realizada com base no total das 100 realizações efectuadas (cartografia do tipo-E); b) cartografia referente à realização mínima estimada e c) cartografia referente à realização máxima estimada.

3.5. Discussão

3.5.1. Zonas Anómalas Principais

Os valores de concentração de radão no solo obtidos no Vulcão das Furnas são da mesma ordem de grandeza de valores deste gás no solo presentes em outros vulcões do planeta (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Valores máximos e mínimos de concentração de ^{222}Rn no solo obtidos em diversas regiões vulcânicas.

Vulcões	^{222}Rn no solo (Bq/m^3)	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Arenal (Costa Rica) ⁽¹⁾	111 (média anual)	2331 (média anual)
Poás (Costa Rica) ⁽¹⁾	259 (média anual)	42 550 (média anual)
Galeras (Colombia) ⁽²⁾	222	56 240
Cañadas Caldeira (Canárias, Espanha) ⁽³⁾	37	73 630
Alban Hills (Itália) ⁽⁴⁾	1480	367 780
Etna (Itália) ⁽⁵⁾	232	104 300
Furnas (Açores, Portugal)	0	387 527

⁽¹⁾ Williams-Jones *et al.*, 2000

⁽²⁾ Heiligmann *et al.*, 1997

⁽³⁾ Hernández *et al.*, 2004

⁽⁴⁾ Annunziatellis *et al.*, 2003

⁽⁵⁾ Giammanco *et al.*, 2007

A aplicação da análise estatística através da representação gráfica aos dados de concentração de radão no solo medidos no Vulcão das Furnas permitiu a identificação de três populações distintas: A, B e C. Uma vez que a actividade eruptiva intra-caldeira do Vulcão das Furnas tem apresentado um carácter essencialmente

explosivo extruindo material de composição traquítica (s.l.), as diferentes populações identificadas devem ser resultado de diferentes tipos de transporte do radão e de diferentes permeabilidades e não estar relacionadas com a presença de diferentes tipos de rocha. No entanto, e apesar do material extruído por este vulcão apresentar uma composição relativamente homogénea, foi calculada a taxa de exalação de radão do solo e dos diferentes produtos vulcânicos na tentativa de compreender a diferente contribuição de cada um deles. Assim, foi recolhida uma amostra de solo, de escoada lávica traquítica, de *lapilli* pomítico e de cinzas pomíticas do interior da caldeira do Vulcão das Furnas (Figura 3.24).

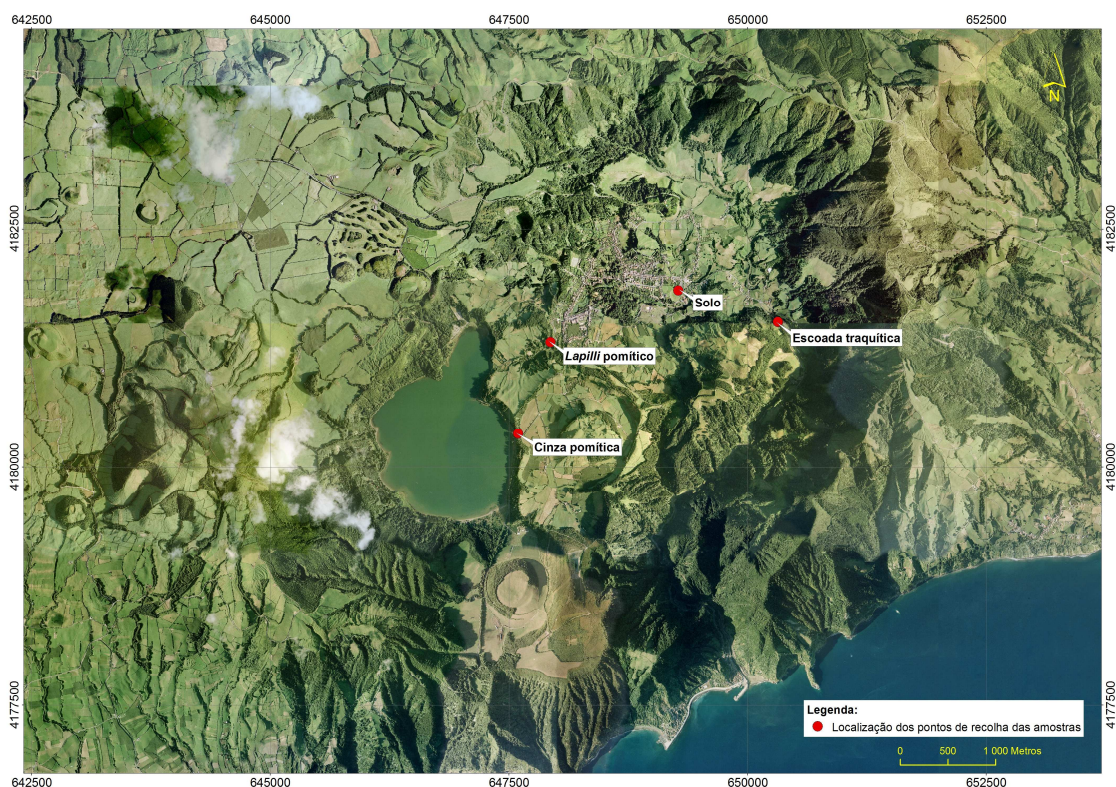


Figura 3.24 – Localização dos pontos de recolha de amostras para o cálculo da taxa de exalação de radão.

No laboratório as amostras recolhidas foram colocadas num recipiente fechado com um volume de 5 L e foi efectuada a amostragem da concentração de radão em ciclos de 30 minutos, com um fluxo de aspiração de 0,2 L/min, durante aproximadamente dois meses (Fotografia 3.2). Por fim foi calculada a taxa de

exalação de radão das amostras através da aplicação da equação 3.5 (Ramola e Choubey, 2003):

$$(3.5) \quad E_x = CV\lambda / M \left[T + 1/\lambda (e^{-\lambda} - 1) \right]$$

E_x - taxa de exalação de radão (Bq/kg.h),

C - concentração de radão medida (Bq/m³.h),

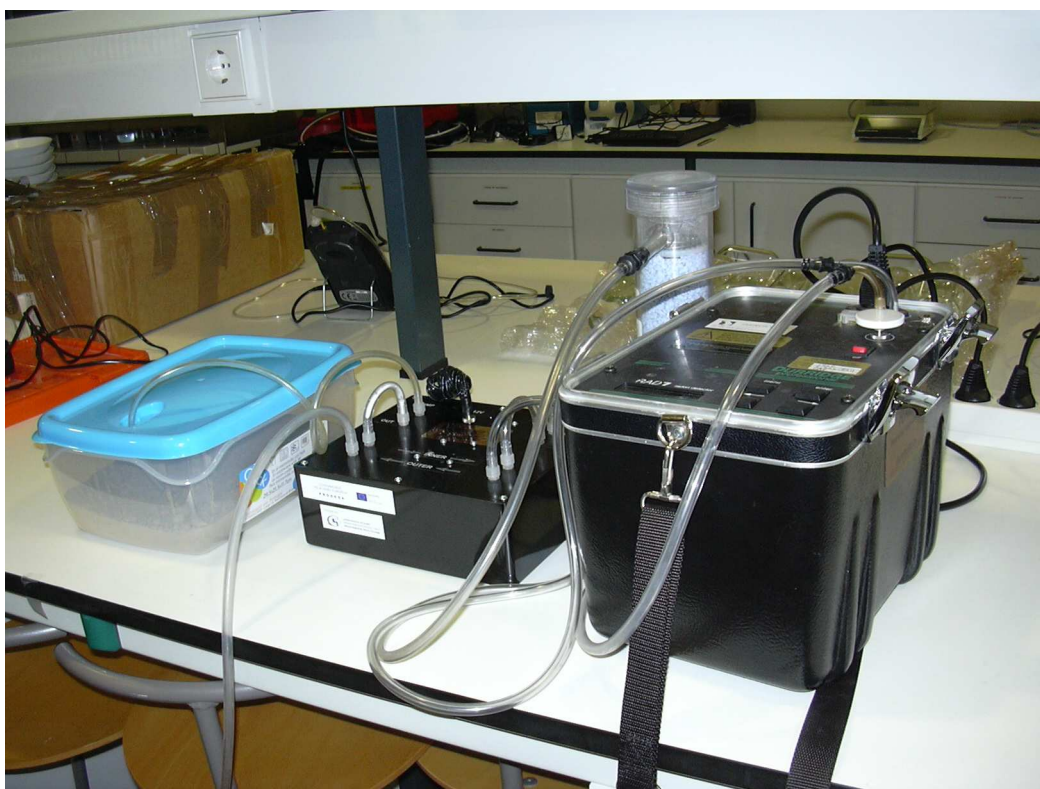
V - volume do recipiente (m³),

λ - constante de decaimento do radão (h⁻¹)*,

M - massa da amostra (kg),

T - tempo de exposição (h).

*A constante de decaimento do radão corresponde a um valor de 0,0000021.s⁻¹ (Savovic *et al.*, 2011).



Fotografia 3.2 – Medição da concentração de ^{222}Rn em produtos vulcânicos do Vulcão das Furnas.

A taxa de exalação de radão, calculada para as amostras analisadas, apresenta valores muito próximos no que diz respeito ao solo, *lapilli* pomítico e cinzas pomíticas (Tabela 3.6). No caso da escoada lávica traquítica os valores calculados são mais baixos resultado provável de uma menor fracturação e, conseqüentemente, de uma menor área de superfície de emanação do radão.

Tabela 3.6 – Taxa de exalação calculada para as amostras analisadas e informação utilizada no seu cálculo.

Amostra	^{222}Rn (Bq/m ³ .h)	Tempo (h)	Massa (kg)	Taxa de Exalação (Bq/kg.h)
Solo	102327,20	1484,0	1,4188	$18,4 \times 10^{-4}$
Escoada traquítica	82354,12	1528,5	2,3517	$8,7 \times 10^{-4}$
<i>Lapilli</i> pomítico	77497,30	1484,0	0,9069	$21,8 \times 10^{-4}$
Cinza pomítica	106138,90	1592,0	1,3198	$19,1 \times 10^{-4}$

A população A compreende os valores de concentração de radão no solo mais baixos, que representam o ruído de fundo para este vulcão, sendo o radão medido provavelmente resultado da libertação deste gás de rochas ou do solo existente nas zonas vizinhas. Neste caso, o tipo de transporte mais provável corresponde à difusão. A população B representa os valores intermédios entre os valores de ruído de fundo e os valores anómalos. O tipo de transporte provavelmente presente neste caso deverá corresponder à advecção, sendo o radão transportado de maiores distâncias provavelmente devido à presença de um gás de arraste (e.g. CO_2 , CH_4) (Etiope e Martinelli, 2002). Finalmente a população C, que compreende os valores de concentração de radão mais elevados, deverá ser resultado do transporte deste gás de distâncias superiores às da população B. Neste caso, os tipos de transporte mais prováveis correspondem à advecção e convecção, quando na presença de um gradiente geotérmico mais elevado, em zonas muito permeáveis como, por exemplo, zonas de falhas e crateras.

O valor de ruído de fundo de 8000 Bq/m³, definida pela população A, é também suportado por algumas medições da concentração de radão no solo efectuadas no

Vulcão das Sete Cidades, em Julho de 2011. Este vulcão, à semelhança do Vulcão das Furnas, corresponde a um vulcão central com caldeira cujo material extruído apresenta uma composição traquítica (s.l.). Os valores de concentração de radão no solo medidos oscilaram entre os 16 e 8110 Bq/m³ (Figura 3.25). De facto, neste vulcão não estão presentes campos fumarólicos sendo os valores de concentração de CO₂ no solo baixos no interior da caldeira. Os valores de concentração de CO₂ no solo são inferiores a 23 %vol., correspondendo cerca de 51 % das amostragens a valores inferiores a 1,5 %vol. e em apenas 8 % das amostragens efectuadas estes valores são superiores a 6 %vol. (Queiroz, 1997; CVARG/CIVISA, dados não publicados). Assim, neste caso, o transporte de radão por advecção parece ser reduzido sugerindo que as rochas traquíticas e os solos resultantes podem emanar quantidades de radão da ordem de grandeza da obtida para a população A das Furnas.

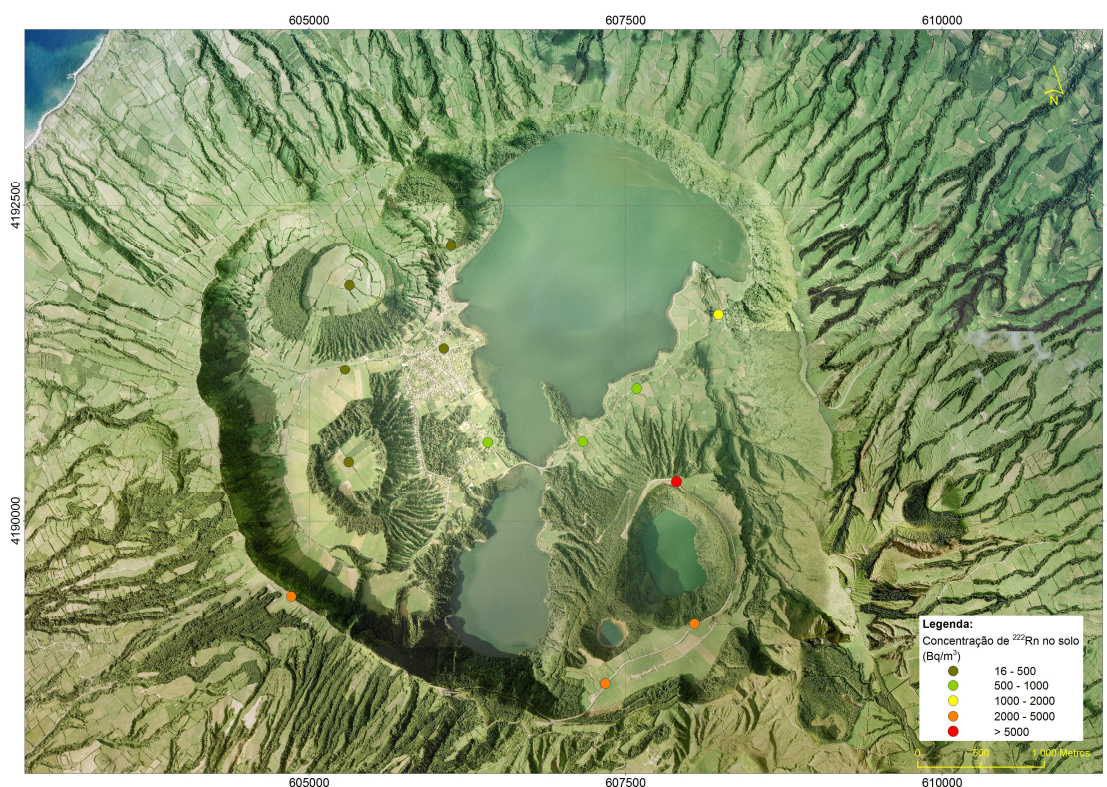


Figura 3.25 – Localização dos pontos de amostragem e valores de concentração de ^{222}Rn no solo medidos no Vulcão das Sete Cidades.

A análise da distribuição espacial da concentração de radão no solo no Vulcão das Furnas possibilitou a identificação de 10 zonas principais de desgaseificação

difusa anómala deste gás (Figura 3.26). No caso particular da anomalia designada por R4 a área abrangida compreende toda a zona anómala, mais dispersa, localizada na extremidade N da área de amostragem.

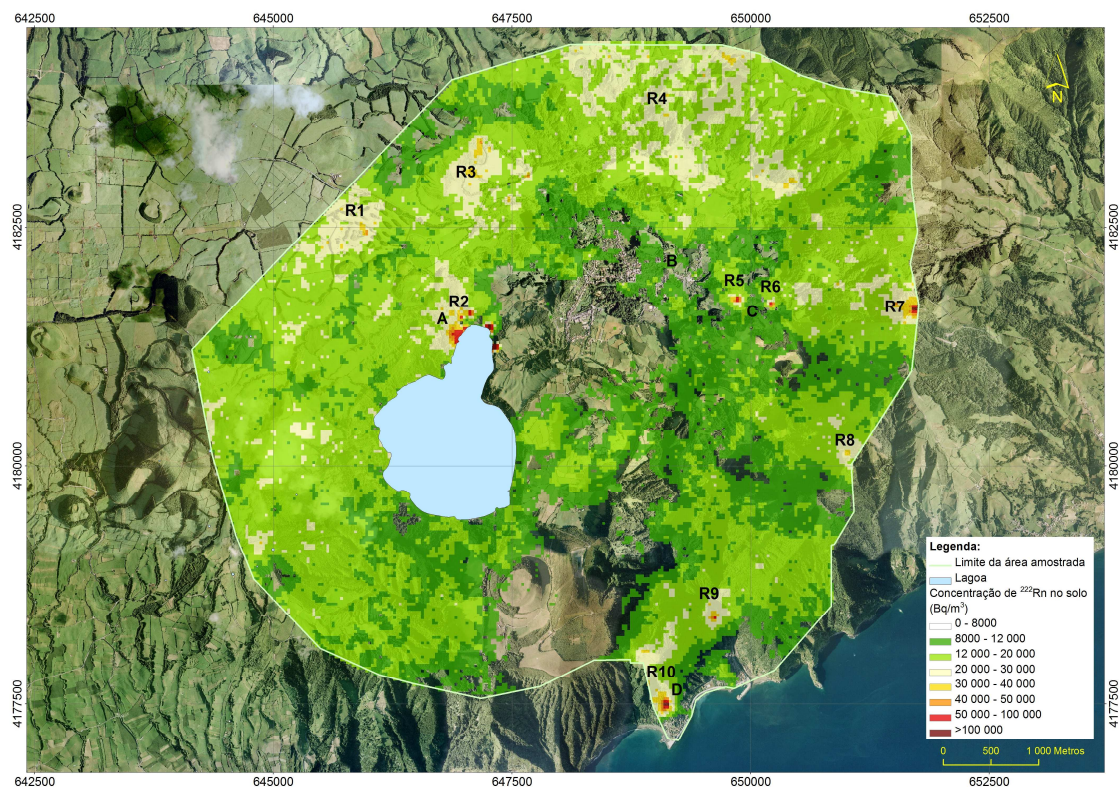


Figura 3.26 – Localização das principais zonas anómalas de concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R10) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.

Na cartografia da concentração de CO_2 no solo, apresentada neste trabalho, foram incluídas as medições efectuadas na zona da freguesia das Furnas por Sousa (2003), uma vez que as mesmas foram realizadas em condições muito semelhantes às efectuadas neste trabalho, ou seja, mesma metodologia e mesmo tipo de detector (infravermelhos). Não obstante o levantamento da concentração de CO_2 no solo efectuado por Sousa (2003) ter sido realizado há cerca de 10 anos, o mesmo não apresentou alterações significativas relativamente ao efectuado por Baubron *et al.* (1994a) o que na altura apontou para uma estabilidade temporal das zonas anómalas (Figura 3.27). Para além disso, trabalhos mais recentes que se centraram na medição do fluxo de CO_2 neste vulcão, realizados por Viveiros (2010) e Viveiros *et al.* (2010);

2012) confirmaram que as zonas anómalas são semelhantes para a área comum amostrada (Figura 3.28).

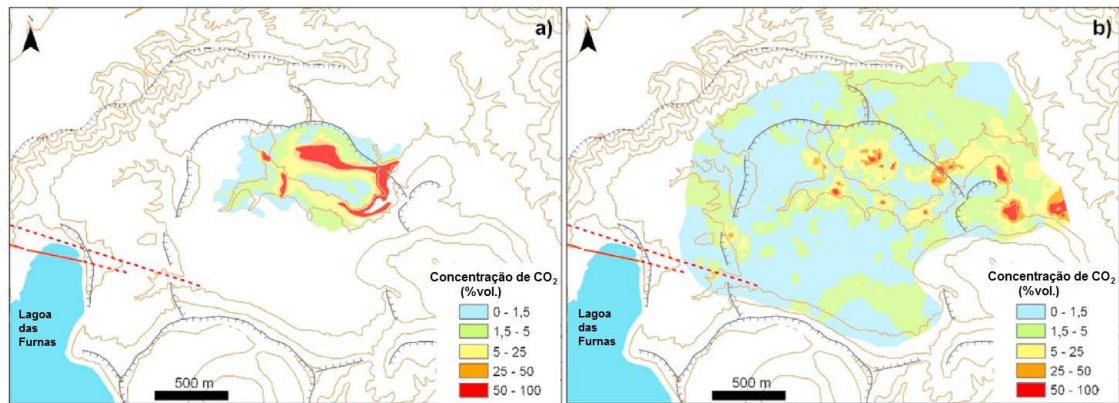


Figura 3.27 – Cartografia da concentração de CO_2 no solo para a área da freguesia das Furnas de acordo com: a) Baubron *et al.* (1994a) e b) Sousa (2003) (modificado de Viveiros *et al.*, 2010).

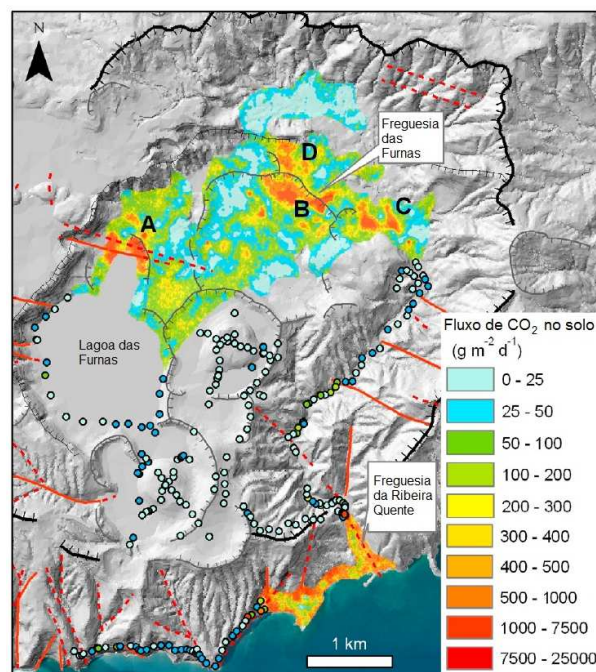


Figura 3.28 – Cartografia do tipo-E para o fluxo de CO_2 no solo para a caldeira do Vulcão das Furnas e freguesia da Ribeira Quente. Os perfis realizados não permitiram a realização de interpolação e os pontos estão representados por uma escala de cores. A, B, C e D representam as principais estruturas de desgaseificação difusa (DDS) identificadas na caldeira do Vulcão das Furnas (modificado de Viveiros *et al.*, 2010).

A aplicação da análise estatística através da representação gráfica aos dados de concentração de CO_2 no solo medidos no Vulcão das Furnas permitiu a identificação de três populações distintas: A, B e C. A população A compreende os valores de concentração de CO_2 no solo mais baixos, que representam o ruído de fundo para este vulcão, sendo o CO_2 medido provavelmente resultado de uma contribuição biogénica ou da mistura de uma contribuição biogénica e hidrotermal à semelhança do proposto por Viveiros (2010) relativamente ao fluxo de CO_2 neste vulcão. Apesar do ruído de fundo definido ser superior ao determinado em trabalhos anteriores (e.g. Baubron *et al.*, 1994a) é, por um lado, bastante próximo do ruído de fundo identificado, em trabalhos mais recentes (Viveiros *et al.*, 2008b) para o Vulcão do Fogo (5 %vol.) e por outro, encontra-se enquadrado nos valores determinados por Etiope (1999) como resultantes da mistura de uma contribuição biogénica e endógena (3 a 6 %vol.). As populações B e C representam os valores de concentração de CO_2 no solo superiores aos valores de ruído de fundo devendo ser resultado de uma importante contribuição de profundidade (hidrotermal/vulcânica). A distinção entre estas duas populações deverá resultar de diferentes tipos de transporte (advectivo/convectivo) e de uma maior ou menor permeabilidade das zonas de ascensão deste gás até à superfície, estando a população C associada a transporte do tipo convectivo em zonas muito permeáveis.

A realização da cartografia da concentração de CO_2 numa área mais extensa do que a anteriormente realizada por Sousa (2003) permitiu a identificação de outras zonas de desgaseificação anómala deste gás (Figura 3.29). Assim, às zonas de desgaseificação anómala da concentração de CO_2 no solo previamente identificadas, juntam-se quatro novas zonas C1, C12, C13 e C14. Estas zonas anómalas são também coincidentes com zonas anómalas de fluxo de CO_2 no solo identificadas por Viveiros (2010) e Viveiros *et al.* (2010) (Figura 3.28).

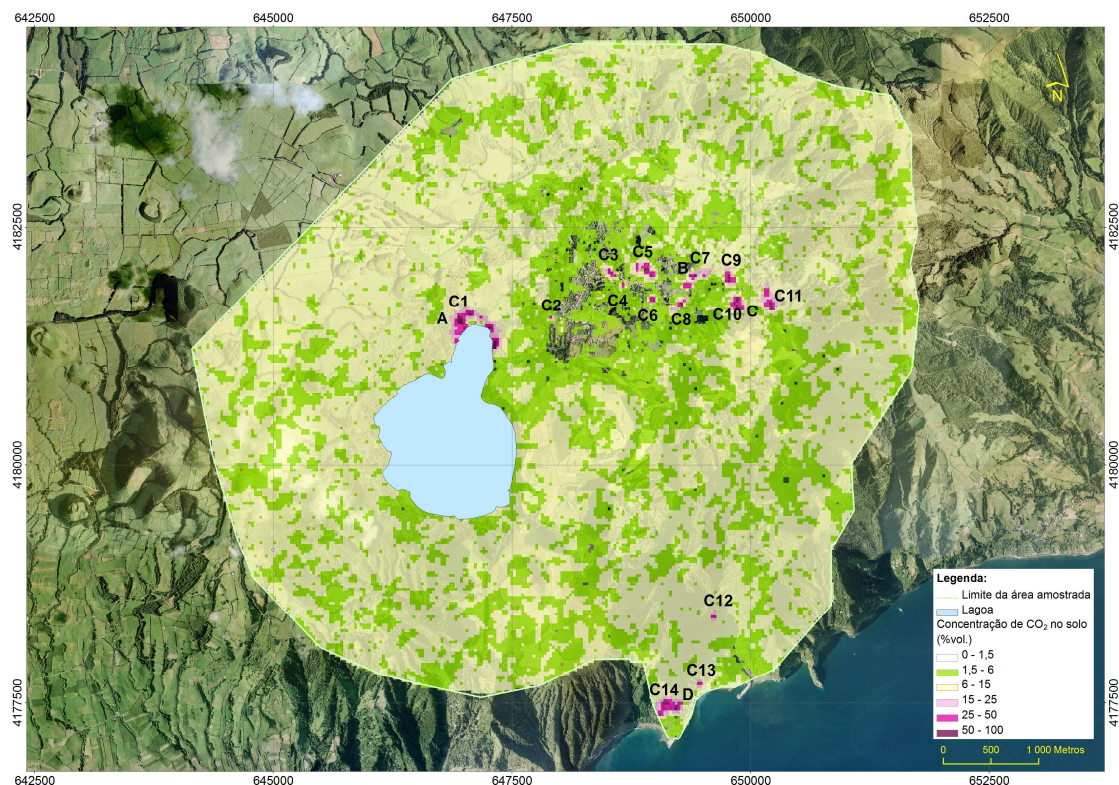


Figura 3.29 – Localização das principais zonas anómalas de concentração de CO_2 no solo (C1 a C14) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.

A aplicação da análise estatística através da representação gráfica aos dados de temperatura do solo medidos no Vulcão das Furnas permitiu a identificação de duas populações distintas: A e B. A população A compreende os valores de temperatura do solo mais baixos, que representam o ruído de fundo para este vulcão, sendo a temperatura medida efeito essencialmente da influência da temperatura do ar. A população B representa valores mais elevados de temperatura do solo resultado de uma contribuição de profundidade (e.g. sistema hidrotermal).

As principais zonas de anomalia térmica identificadas no Vulcão das Furnas estão identificadas na figura 3.30, estando as mais importantes ($T > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) associadas aos quatro campos fumarólicos existentes: Lagoa das Furnas (T1), Freguesia das Furnas (T6), Ribeira dos Tambores (T7) e Ribeira Quente (T9).

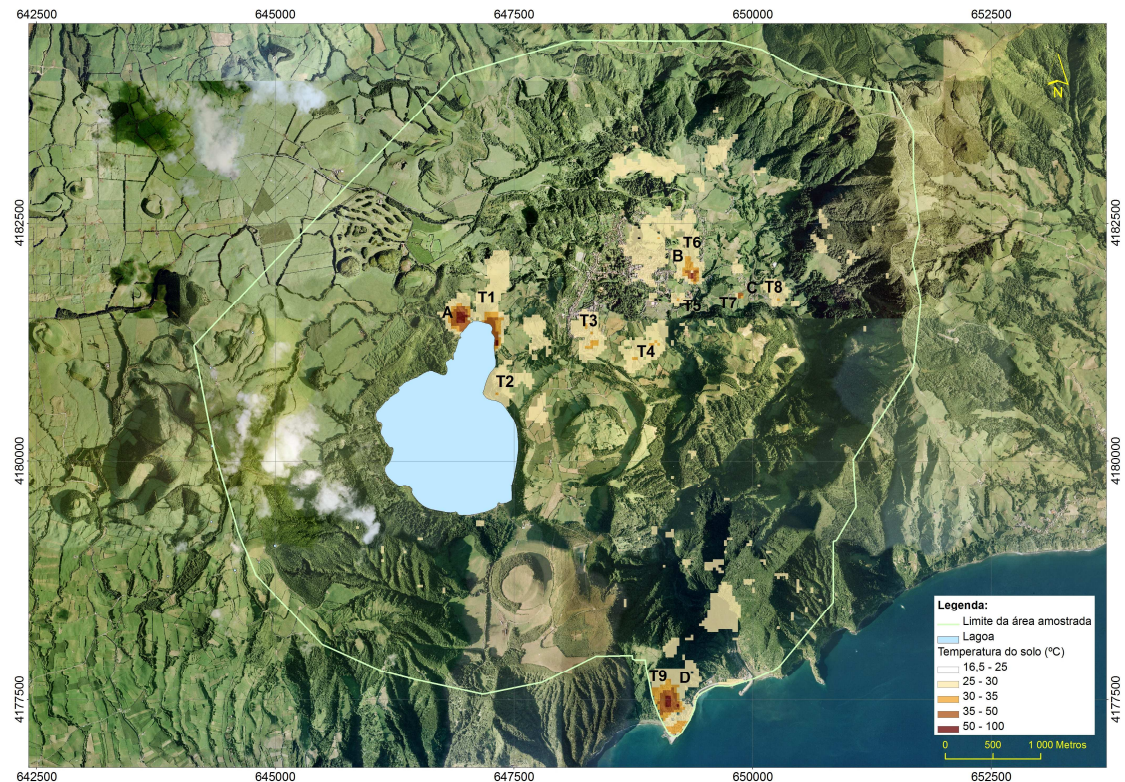


Figura 3.30 – Localização das principais zonas de anomalia térmica (T1 a T9) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.

As zonas de anomalia térmica identificadas na freguesia das Furnas no presente trabalho são, de um modo geral, semelhantes às identificadas em trabalhos anteriores (Sousa, 2003). No entanto, existem zonas de anomalia térmica como as T3 e T6 identificadas por Sousa (2003) (Figura 3.31) que na cartografia aqui apresentada correspondem a valores de temperatura inferiores, ou pelo contrário, zonas como as T3 e T4 (Figura 3.30) que na presente cartografia apresentam temperaturas e áreas superiores às anteriormente identificadas por Sousa (2003), devendo as diferenças encontradas ser resultado das diferentes malhas utilizadas ou pontos amostrados. A realização da cartografia da temperatura do solo, numa área mais vasta do que a realizada em trabalhos anteriores, permitiu a identificação de outras zonas anómalas localizadas na proximidade da Lagoa das Furnas (T1 e T2) e na freguesia da Ribeira Quente (T9) (Figura 3.30).

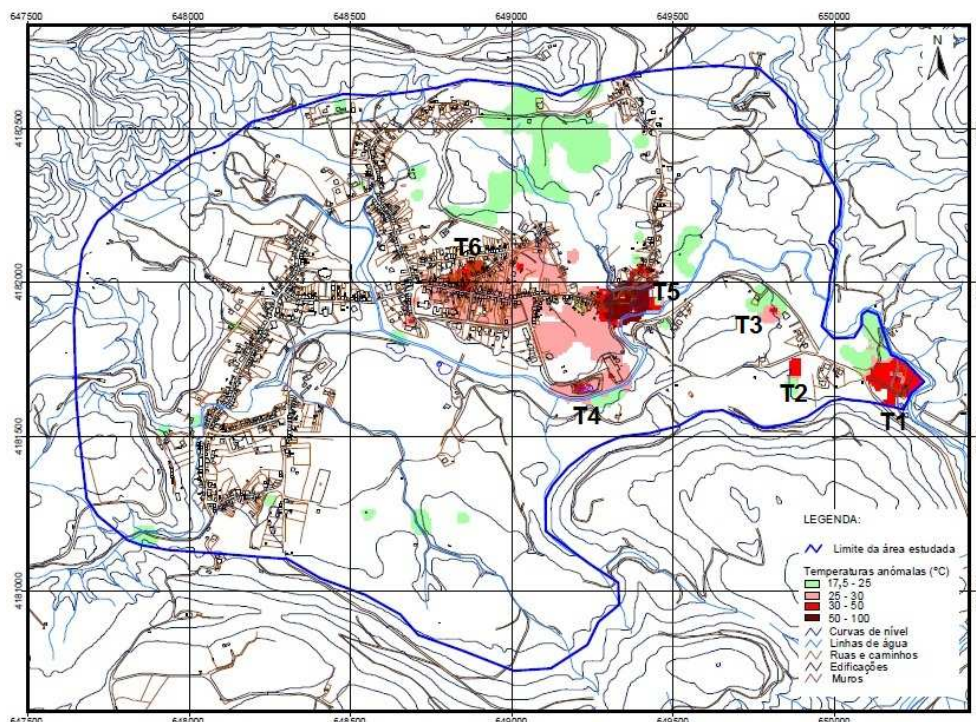


Figura 3.31 – Distribuição da anomalia térmica na área da freguesia das Furnas (modificado de Sousa, 2003).

As anomalias identificadas nas três cartografias apresentadas estão mais circunscritas nas zonas onde foi possível efectuar uma malha mais apertada (Figuras 3.7 e 3.8). Nas zonas anómalas associadas ao bordo de caldeiras ou a crateras, algumas com expressão significativa nas cartografias apresentadas (e.g. R2, R4, R7 e R10 na figura 3.26 e T1 e T9 na figura 3.30), não foi possível apertar a malha uma vez que estas zonas apresentam declives muito acentuados, por vezes próximos dos 90°, impossibilitando a realização de pontos de amostragem nestas áreas.

O valor de concentração de radão mais elevado ($387\,527\text{ Bq/m}^3$) foi obtido na zona da anomalia R2 (Figura 3.26), na zona do campo fumarólico da Lagoa das Furnas. Esta é igualmente uma importante zona anómala em termos de concentração de CO_2 , representada pela anomalia C1 (Figura 3.29), e de temperatura, representada pela anomalia T1 (Figura 3.30).

A análise comparativa entre as zonas de desgaseificação anómala de radão e de CO_2 permitiu identificar zonas comuns importantes, zonas de importante desgaseificação de radão que não estão associadas a uma significativa

desgaseificação de CO_2 e zonas anómalas de CO_2 sem grande expressão na cartografia de radão (Figuras 3.26 e 3.29). A projecção da concentração de radão *versus* a concentração de CO_2 no solo permite também a identificação de três linhas de tendência (A, B e C) (Figura 3.32).

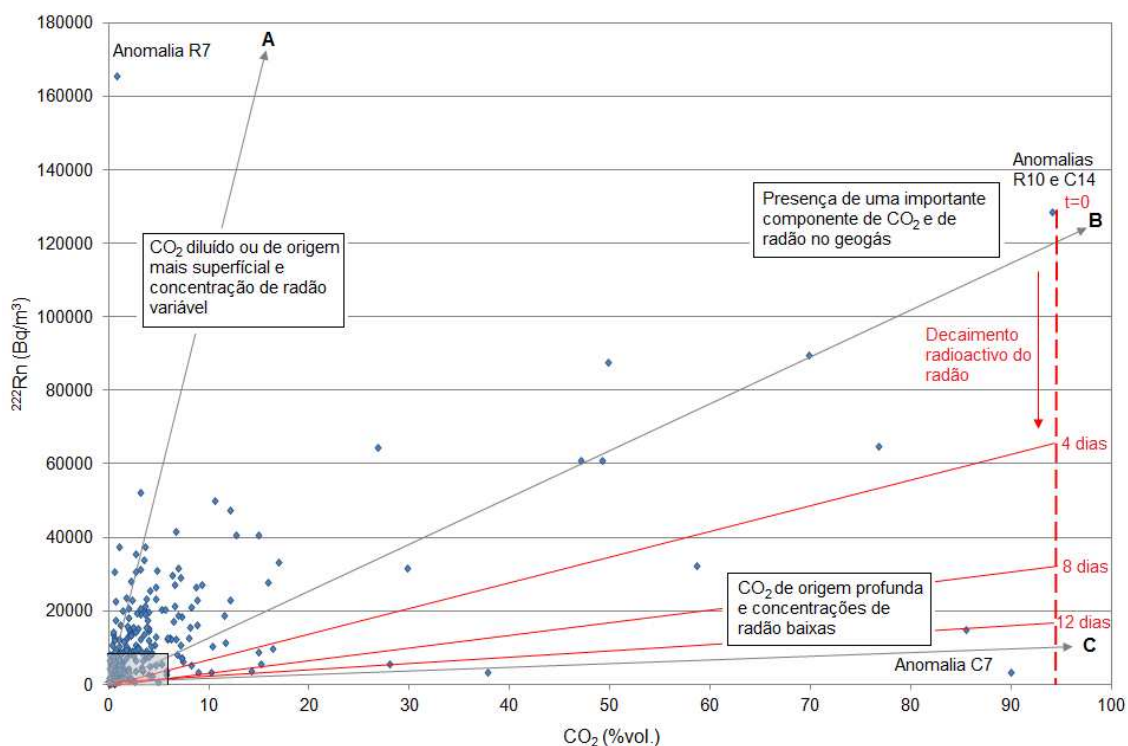


Figura 3.32 – Concentração de ^{222}Rn *versus* concentração de CO_2 . Medições de ^{222}Rn e CO_2 efectuadas no mesmo ponto de amostragem. O sombreado a cinza representa os valores de ruído de fundo e as linhas vermelhas o decaimento radioactivo teórico do radão.

As zonas de importante desgaseificação anómala de radão e de CO_2 correspondem às anomalias R2 e C1, R5 e C10, R6 e C11, R9 e C12 e R10 e C14 (Figuras 3.26, 3.29 e 3.32 B). Todas estas zonas anómalas comuns correspondem ainda a zonas de temperatura do solo superior ao ruído de fundo ($> 25\text{ }^\circ\text{C}$) (Figura 3.30). Esta associação sugere que tais anomalias devam estar relacionadas com a dinâmica associada ao sistema hidrotermal e com a ascensão destes gases através de zonas de maior fraqueza, ascendendo os dois gases até à superfície através de transporte do tipo convectivo. Outras zonas anómalas como as R1, R3, R4, R7 e R8, que correspondem a zonas sem anomalia térmica e a zonas de

concentração de CO_2 que oscilam entre 6 e 15 %vol., podem resultar do facto do CO_2 funcionar como gás de arraste em relação ao radão, como frequentemente é sugerido (e.g. Etiope e Martinelli, 2002), através da presença zonas de maior permeabilidade (e.g. falhas, crateras e caldeiras) ou do transporte do radão até à superfície através da presença de outro gás de arraste que não o CO_2 (Figura 3.32 A). No caso da anomalia R7 esta deve resultar do segundo caso uma vez que esta anomalia, bastante importante na cartografia de radão, não têm expressão significativa na cartografia da concentração de CO_2 no solo. Inversamente existem zonas anómalas de concentração de CO_2 no solo (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9) que não se encontram associadas à presença de importantes zonas anómalas de radão, isto é, correspondem a zonas de concentração de radão inferiores a 20 000 Bq/m^3 e em alguns casos a zonas com valores inferiores ao ruído de fundo definido ($< 8000 \text{ Bq/m}^3$) (Figura 3.32 C). A ausência de anomalia de radão no campo fumarólico da Freguesia das Furnas, que corresponde à zona anómala C7 na cartografia da concentração de CO_2 no solo, poderá ser atribuída ao favorecimento da dissolução do urânio e do rádio por acção dos fluidos hidrotermais, remobilizando-o deste local. Eventualmente, e se as condições geoquímicas o permitirem, o ião formado UO_2^{2+} poderá ser posteriormente depositado noutro local ao ligar-se ao ião CO_3^{2-} , originando uma forma insolúvel de carbonato de urânio (UO_2CO_3), tal como observado, por exemplo, na Hungria (Tóth *et al.*, 1997). Por outro lado, o próprio radão pode estar a ser retido dissolvido na água subterrânea e no fluido hidrotermal sendo libertado através de nascentes e fumarolas ou pode ter decaído devido a um período de transporte até à superfície mais longo. As zonas de concentração anómala de CO_2 no solo C2 (na zona das Águas Quentes) e C8 (jardim localizado à frente do Centro Termal) correspondem a zonas onde o nível de água é muito superficial, pelo que a não detecção de anomalias de radão nestes locais pode estar relacionada, por um lado, com a impossibilidade de apertar muito a malha de amostragem uma vez que, em alguns pontos, não foram encontradas condições propícias à realização da amostragem, por outro lado, o próprio radão poder estar a ser dissolvido na água presente nestes locais. As restantes zonas anómalas da concentração de CO_2 no solo, sem ou com muito pouca expressão na cartografia de concentração de radão no solo, podem resultar de situações semelhantes às anteriormente descritas.

3.5.2. Zonas de Desgaseificação Anómala e Estruturas Vulcano-tectónicas

A análise da distribuição espacial das zonas anómalas de concentração de radão no solo permitiu constatar que as anomalias mais importantes estão associadas à presença dos campos fumarólicos da Lagoa das Furnas (R2), da Ribeira dos Tambores (R5 e R6) e da Ribeira Quente (R9 e R10) e a E na zona da interceptação de uma cratera com o bordo da caldeira (R7) (Figura 3.33). Existem ainda zonas anómalas associadas a bordos de caldeiras (R4, R7, R8 e R10), à presença de crateras (R2, R3, R5 e R7) e à presença de falhas (R1, R6, R8, R9 e R10). Assim, por vezes, a mesma zona anómala está associada à presença/intersecção de diferentes estruturas.

As zonas anómalas mais importantes estão associadas à presença de campos fumarólicos uma vez que estes reúnem excelentes condições para o transporte convectivo de radão até à superfície já que correspondem a: (a) zonas com anomalias térmicas facilitando assim a emanção do radão do solo e/ ou das rochas (Figura 3.30); (b) zonas de desgaseificação anómala de CO_2 (Figura 3.29) e (c) zonas de elevada permeabilidade em consequência da proximidade ao bordo da caldeira e à presença de falhas e crateras. A excepção corresponde ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas que apresenta valores mais baixos de concentração de radão no solo relativamente aos restantes campos fumarólicos deste vulcão, tal como descrito anteriormente.

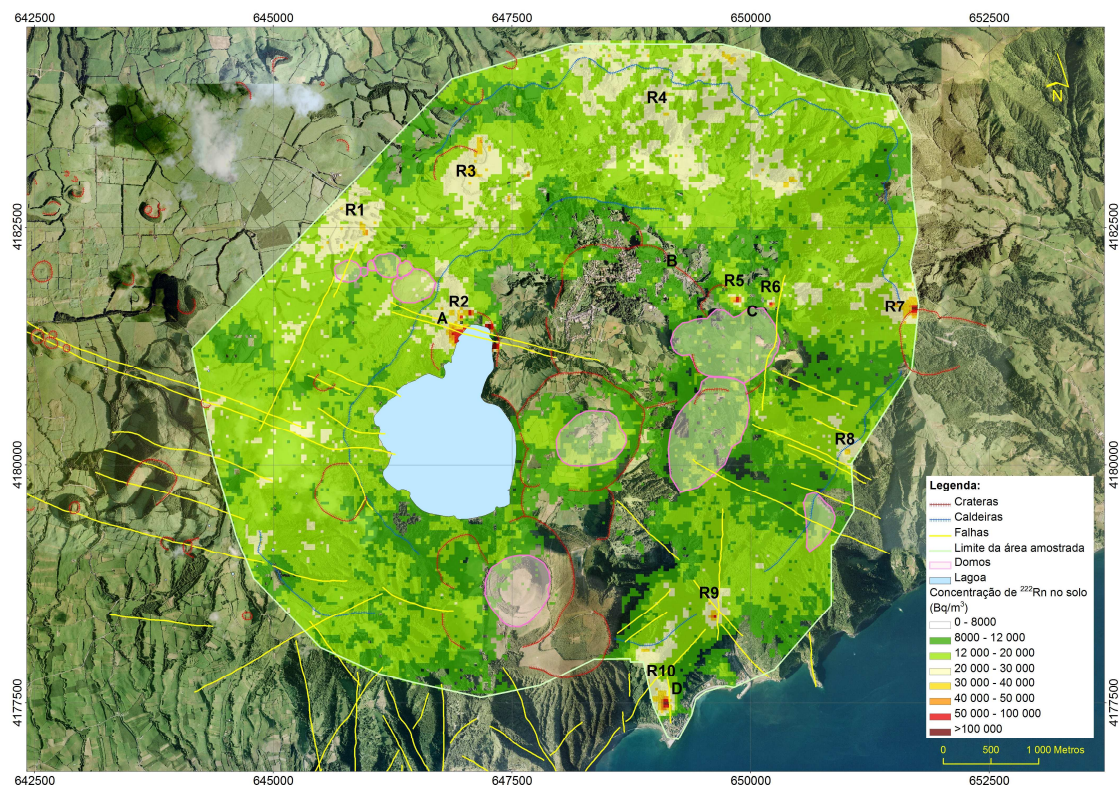


Figura 3.33 – Localização das principais zonas anómalas da concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R10), das principais estruturas vulcano-tectônicas (Gaspar *et al.*, 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.

Outra importante zona anómala corresponde à anomalia R7, associada a uma zona de elevada permeabilidade, resultado da intersecção do bordo da caldeira com a presença de uma cratera. As restantes zonas anómalas, apesar de apresentarem valores máximos de concentração de radão no solo inferiores às zonas anteriormente descritas, surgem também associadas a zonas bastante permeáveis resultado da presença dos limites de caldeiras, crateras e falhas. A presença destas estruturas, para além de facilitar a ascensão de gases, permite ainda aumentar a área de emissão do radão das rochas devido ao incremento da fracturação. Assim, em zonas de concentração de CO_2 entre 6 e 15 %vol. surgem à superfície zonas de desgaseificação anómalas de radão (R1, R3, R4, R7 e R8). Nestas zonas o tipo de transporte de radão até à superfície deverá provavelmente corresponder à advecção dado tratar-se de zonas sem anomalia térmica.

As áreas relacionadas com a actividade eruptiva mais recente do Vulcão das Furnas, isto é, com os domos resultantes das erupções que decorreram em 1439-43 e 1630 (Figura 2.5) apresentam valores de concentração de radão no solo baixos sendo mesmo, no topo destas estruturas, inferiores ao valor de ruído de fundo definido para este vulcão (8000 Bq/m^3). Estes valores baixos de concentração de radão no solo associados à presença de domos poderão resultar, por um lado, de uma mais baixa taxa de exalação do radão das escoadas traquíticas presentes como consequência de uma menor fracturação (Tabela 3.4) e, por outro lado, dos valores de concentração de CO_2 no solo relativamente baixos, entre 1,5 e 15 %vol., presentes nestas estruturas (Figura 3.29). A tendência para a presença de valores relativamente baixos de CO_2 nestas estruturas foi também descrita em trabalhos anteriores (Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010) (Figura 3.28). Assim, nestas estruturas, o radão deve ser transportado para níveis superficiais essencialmente por difusão.

Relativamente às zonas anómalas presentes na cartografia da concentração de CO_2 no solo estas estão associadas, à semelhança do verificado na cartografia da concentração de radão no solo, a importantes estruturas vulcano-tectónicas (Figura 3.34). As zonas anómalas mais significativas surgem associadas aos quatro campos fumarólicos presentes neste vulcão: Lagoa das Furnas (C1); Freguesia das Furnas (C7); Ribeira dos Tambores (C10 e C11) e Ribeira Quente (C12, C13 e C14). Outras zonas anómalas surgem ainda associadas ao bordo e ao interior da cratera da erupção responsável pela extrusão do depósito Furnas “C” (C2, C3, C4, C5, C6, C7 e C8), a crateras de menores dimensões (C1, C9 e C10) ou ainda associadas a zonas de falha (C1, C11, C12 e C14).

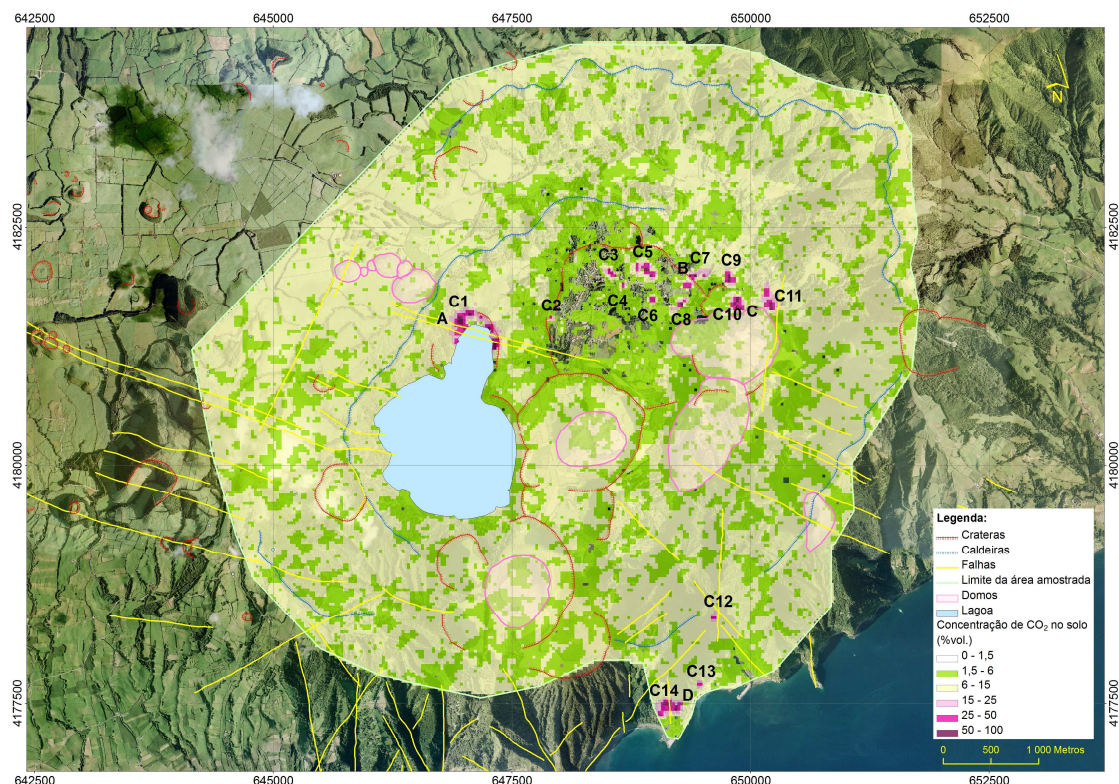


Figura 3.34 – Localização das principais zonas anômalas da concentração de CO_2 no solo (C1 a C14), das principais estruturas vulcano-tectônicas (Gaspar *et al.*, 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.

3.5.3. Alinhamentos de Desgaseificação Difusa

Para melhor identificar a provável extensão das zonas anômalas de desgaseificação difusa foram produzidas cartas de probabilidade que expressam a probabilidade do valor simulado em cada ponto ser superior a um valor limite previamente definido (Cardellini *et al.*, 2003). As cartas de probabilidades foram efectuadas tendo como valor limite os valores de ruído de fundo anteriormente definidos. Assim, na realização da carta de probabilidade referente à concentração de radão no solo foi calculada a probabilidade do valor deste gás ser superior a 8000 Bq/m^3 (Figura 3.35), enquanto que, na carta de probabilidade referente à concentração de CO_2 no solo foi calculada a probabilidade do valor deste gás no solo ser superior a 6 %vol. (Figura 3.36). As zonas anômalas correspondem às que apresentam uma probabilidade superior a 50 % de ultrapassarem os limites definidos.

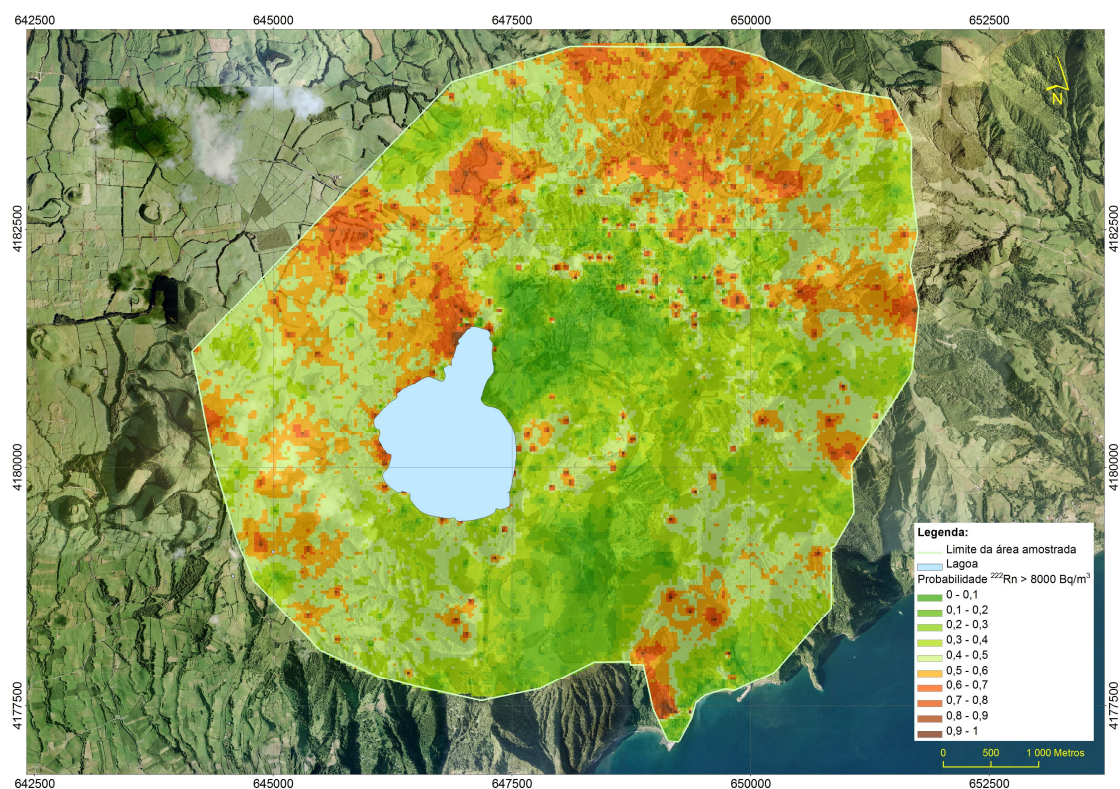


Figura 3.35 – Cartografia da probabilidade da concentração de ^{222}Rn no solo ser superior a 8000 Bq/m³.

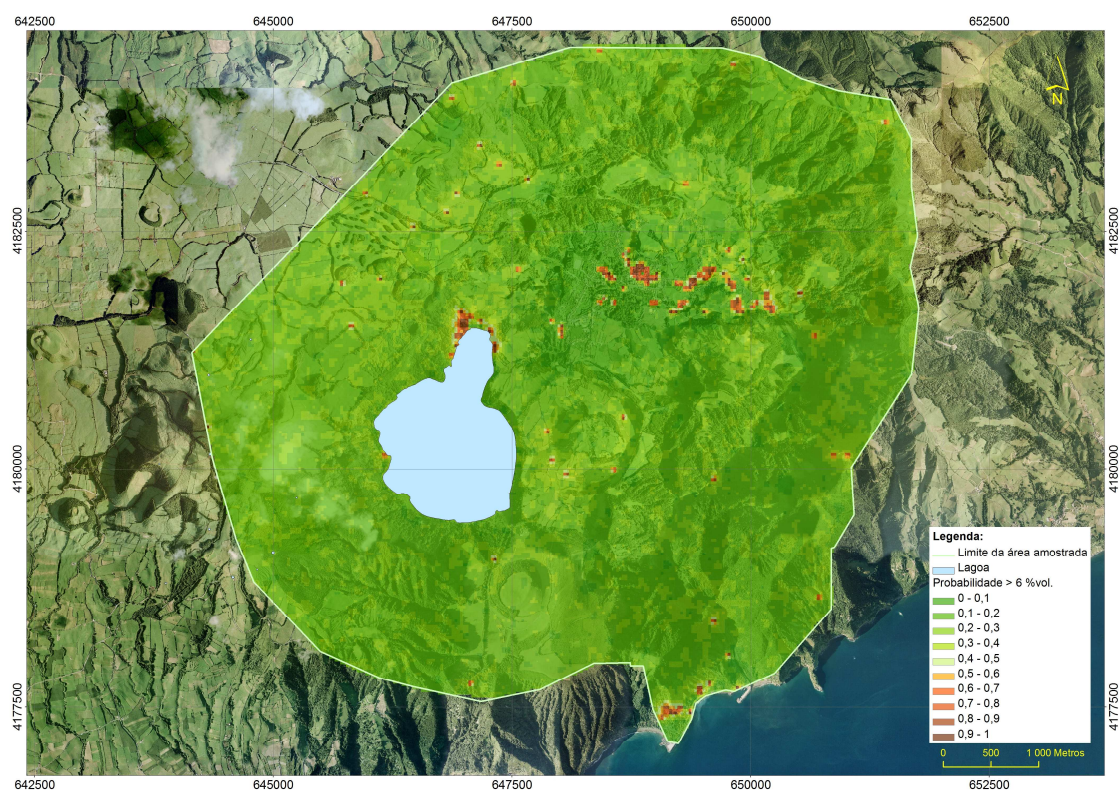


Figura 3.36 – Cartografia da probabilidade da concentração de CO₂ no solo ser superior a 6 %vol..

A análise das cartas de probabilidade da concentração de radão e de CO_2 no solo possibilitou, por um lado, evidenciar a importância de algumas zonas anómalas como, por exemplo, a zona a SW da Lagoa das Furnas (R11) no caso da cartografia de radão no solo, e por outro lado, traçar alguns alinhamentos de desgaseificação de direcção NE-SW, NW-SE e E-W (Figuras 3.37 e 3.38).

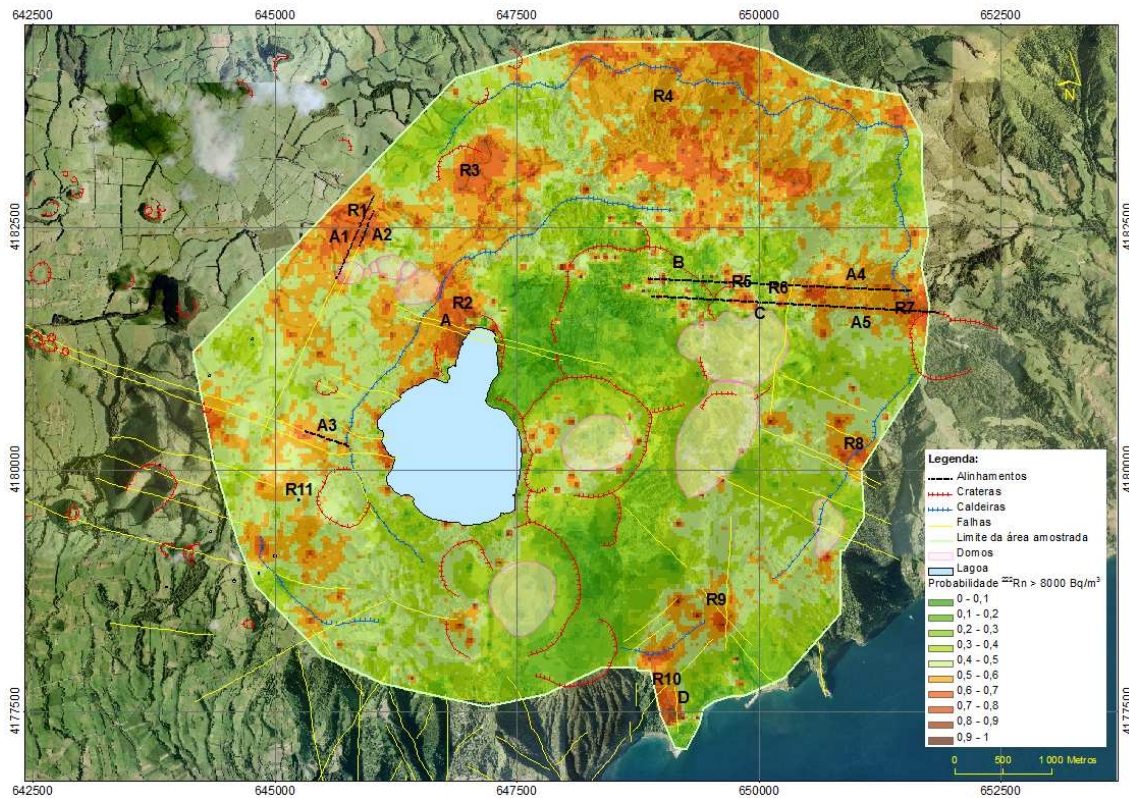


Figura 3.37 – Cartografia da probabilidade da concentração de ^{222}Rn no solo ser superior a 8000 Bq/m^3 e localização: 1- das principais zonas anómalas da concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R11), 2- das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar *et al.*, 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas), 3- dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente e 4- dos alinhamentos de desgaseificação identificados (A1 a A5).

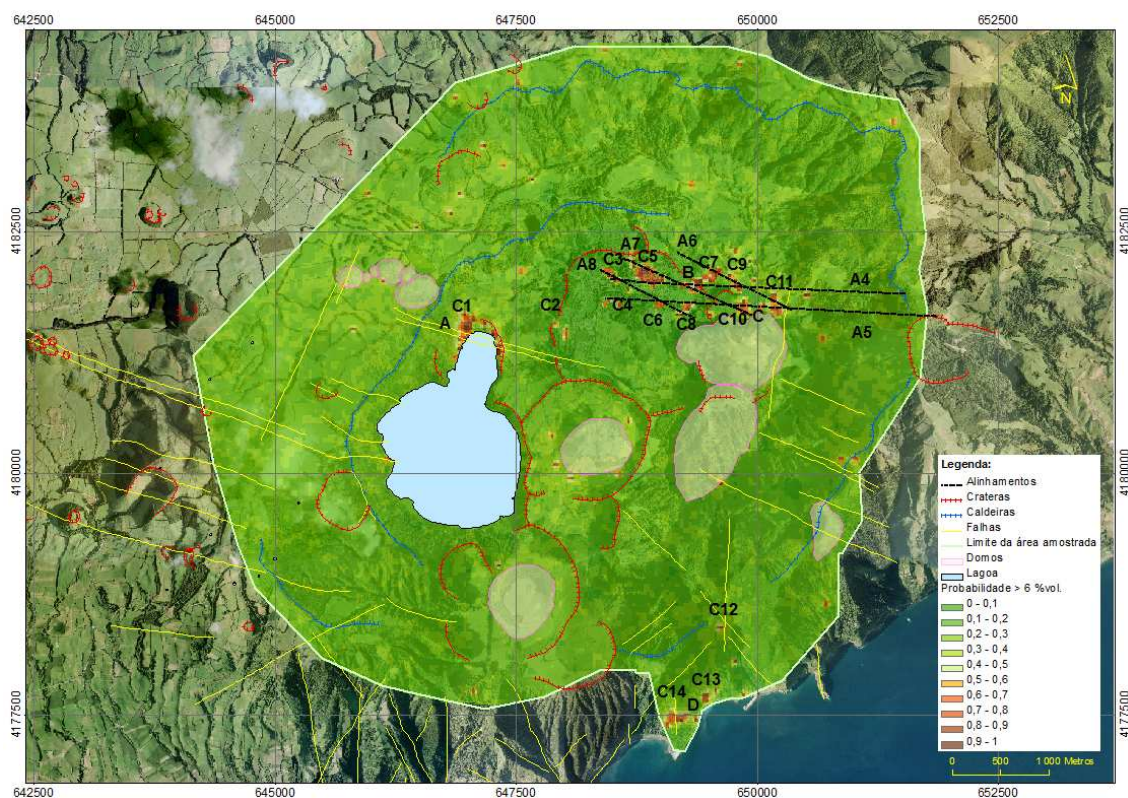


Figura 3.38 – Cartografia da probabilidade da concentração de CO_2 no solo ser superior a 6 %vol. e localização: 1- das principais zonas anómalas da concentração de CO_2 no solo (C1 a C14), 2- das principais estruturas volcano-tectônicas (Gaspar *et al.*, 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas), 3- dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente e 4- dos alinhamentos de desgaseificação identificados (A4 a A8).

Os alinhamentos A1 e A2 associados à zona anómala de radão R1 e o alinhamento A3 associado à zona anómala R11, surgem associados à presença de zonas de falhas e podem constituir a expressão à superfície da continuidade destas falhas. Foram também identificados alinhamentos comuns às duas cartografias apresentadas. Estes correspondem aos alinhamentos A4 e A5 e estão expressos na cartografia de radão no solo através das anomalias R5, R6 e R7 e na cartografia de CO_2 no solo pelas zonas anómalas C3, C5 e C9 e pelas anomalias C4, C6, C8, C10 e C11, respectivamente. Os alinhamentos A6, A7 e A8 (Figura 3.38) com representação apenas na cartografia de CO_2 no solo através das zonas anómalas C7, C9 e C11, das zonas C5, C7 e C10 e das anomalias C3, C6 e C8, respectivamente, aparecem associados à zona interior de estruturas circulares como a cratera associada à

erupção emissora do depósito Furnas “C”. As anomalias C7, C8, C9 e C10 sugerem ainda a presença de uma estrutura circular (A9) (Figura 3.39).

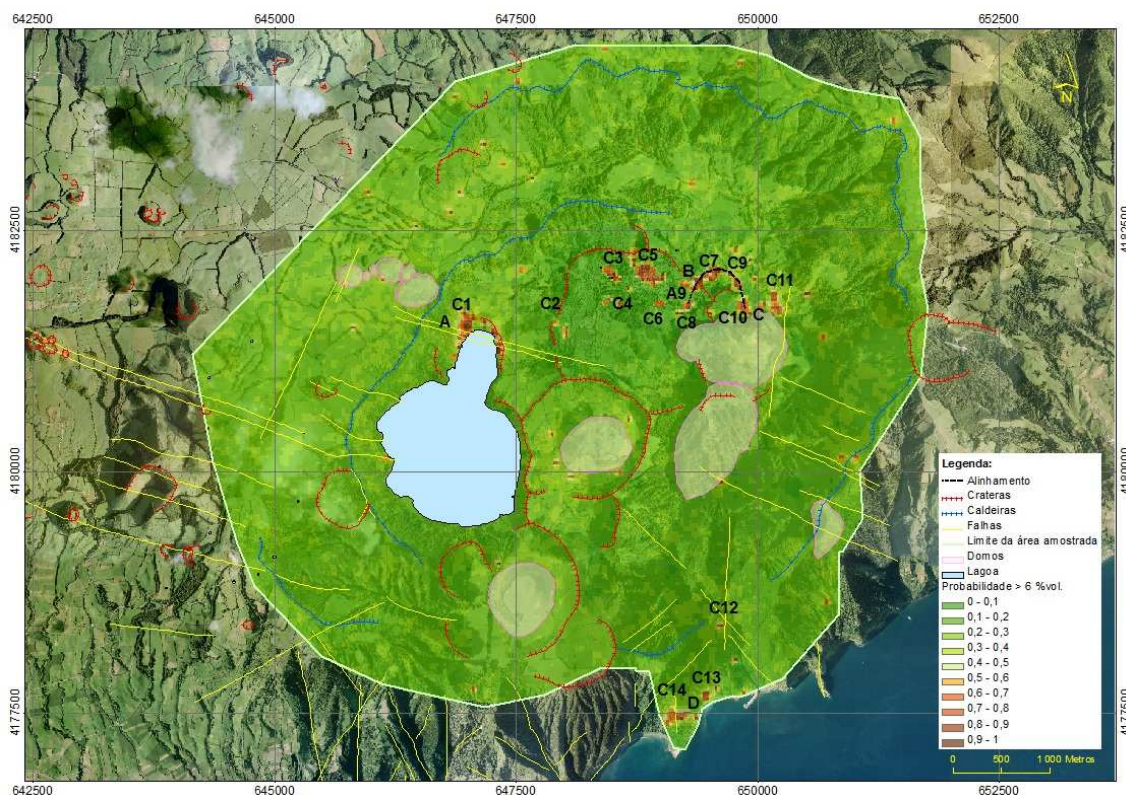


Figura 3.39 – Cartografia da probabilidade da concentração de CO_2 no solo ser superior a 6 %vol. e localização: 1- das principais zonas anômalas da concentração de CO_2 no solo (C1 a C14), 2- das principais estruturas volcano-tectônicas (Gaspar *et al.*, 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas), 3- dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente e 4- do alinhamento de desgaseificação circular identificado (A9).

Alguns dos alinhamentos identificados (A4, A5, A7 e A8) aproximam-se dos traçados em trabalhos realizados anteriormente que incidiram sobre a concentração de CO_2 no solo (Sousa, 2003), correspondendo, os alinhamentos A4 e A5 aos alinhamentos identificados como A1 e A2 por Sousa (2003) (Figura 3.40), e sobre o fluxo de CO_2 no solo (Viveiros, 2010), correspondendo, neste caso, o alinhamento A7 ao alinhamento de desgaseificação 1' e o alinhamento A8 ao 2' (Figura 3.41). Por outro lado, os alinhamentos definidos pelas anomalias da concentração de radão e de

CO_2 no solo apresentam direcções similares às indicadas em trabalhos anteriores como é o caso de alguns acidentes tectónicos cartografados por Gaspar *et al.* (1995).

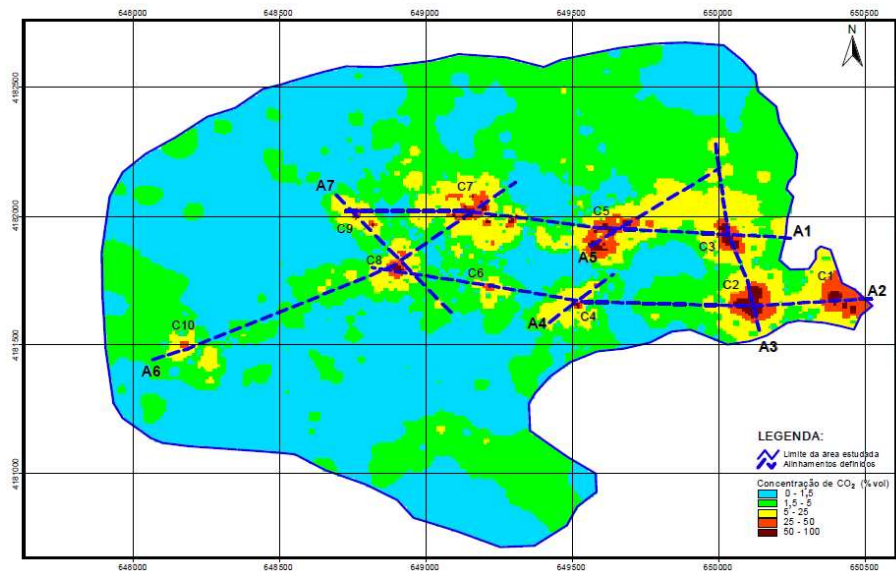


Figura 3.40 – Alinhamentos definidos pelas anomalias de CO_2 (modificado de Sousa, 2003).

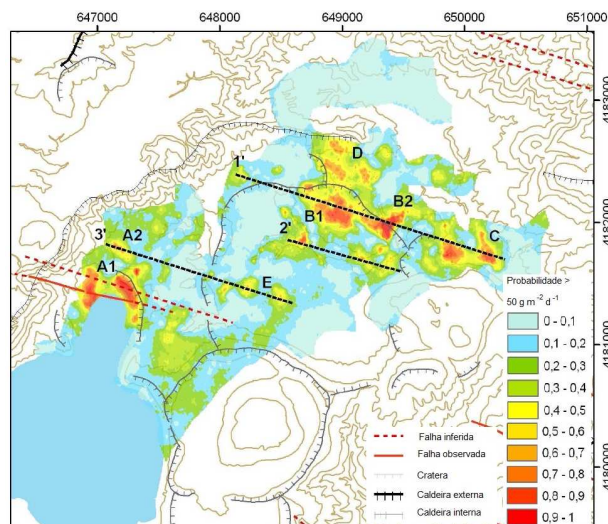


Figura 3.41 – Cartografia de probabilidade do fluxo de CO_2 no solo na caldeira do Vulcão das Furnas. A escala mostra a probabilidade do fluxo de CO_2 no solo exceder $50 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. As letras “A” a “E” assinalam zonas de desgaseificação específicas e as linhas 1’ a 3’ representam alinhamentos de desgaseificação (modificado de Viveiros, 2010).

3.5.4. Zonas de Interesse para Exploração Geotérmica

A cartografia da desgaseificação difusa do radão tem sido considerada uma importante ferramenta em termos de prospecção de campos geotérmicos, uma vez que, anomalias de radão elevadas permitem identificar a presença de falhas activas e os furos geotérmicos mais produtivos estão normalmente associados a áreas de elevada concentração de radão (Balcázar *et al.*, 1990). Assim, a análise da distribuição espacial da concentração de radão no solo permitiu identificar três zonas com potencial interesse em termos de exploração geotérmica (Figura 3.42). Estas zonas estão associadas à presença de campos fumarólicos correspondendo a zonas que apresentam anomalias térmicas e anomalias de concentração de CO_2 , com valores máximos de 100 °C e de 100 %vol., respectivamente. As zonas identificadas apresentam grande permeabilidade devido à presença de falhas, crateras e à sua proximidade ao bordo de caldeiras. A eventual exploração das zonas 2 (R5 e R6) e 3 (R10) está consideravelmente condicionada pela proximidade às freguesias das Furnas e Ribeira Quente, respectivamente. A zona 1 (R2) será a zona com maior potencial uma vez que corresponde, por um lado, ao local onde foram medidos os valores de concentração de radão no solo mais elevados (387 527 Bq/m³) e por outro, à área onde foi identificado maior número de pontos de amostragem cujas medições da concentração de radão no solo apresentavam valores bastante elevados (> 50 000 Bq/m³). Esta zona já havia sido mencionada, em trabalhos anteriores (Quintino, 1969), como a zona com maior potencial para a realização de furos de prospecção para a avaliação do potencial geotérmico do Vulcão das Furnas, tendo por base dados de hidrogeologia (e.g. quimismo e temperatura de nascentes).

Relativamente à zona anómala R7, apesar dos valores de concentração de radão no solo serem bastante elevados (165 603 Bq/m³) e de corresponder também a uma zona bastante facturada, esta não foi identificada, nesta fase, como sendo uma zona com potencial para exploração geotérmica uma vez que, tal como já referido, por um lado, não corresponde a uma zona anómala de concentração de CO_2 e de temperatura e, por outro, os valores mais elevados foram identificados apenas num

ponto de amostragem correspondendo os pontos vizinhos, localizados a N e a S da anomalia, a valores inferiores a 20 000 Bq/m³. Estudos futuros deverão ser efectuados na zona mais a E, nomeadamente o levantamento da concentração de radão, de CO₂ e de temperatura do solo, de modo a melhor caracterizar essa anomalia e a reavaliar o seu potencial em termos de exploração geotérmica.

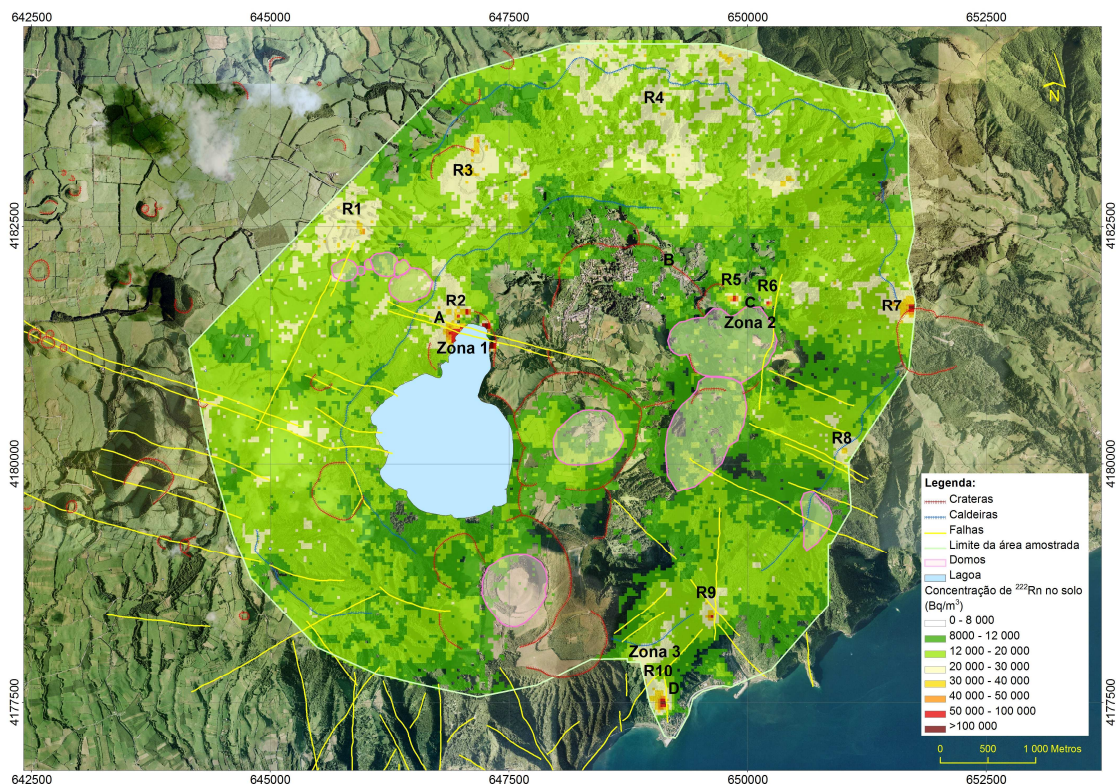


Figura 3.42 – Localização das principais zonas com eventual interesse para exploração geotérmica (zona 1, 2 e 3), das anomalias da concentração de ^{222}Rn no solo (R1 a R10), das principais estruturas vulcano-tectónicas (Gaspar *et al.*, 1995; Viveiros 2010 e referências nele citadas) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente.

A informação fornecida pela cartografia de radão obtida, nomeadamente a identificação das zonas com potencial para exploração geotérmica, deverá ser integrada/complementada com dados fornecidos por outras técnicas de geofísica e de geoquímica de forma a delimitar as zonas cuja exploração possa vir a ser economicamente rentável. Apesar de apenas aquando da execução de furos de prospecção ser possível avaliar a rentabilidade da exploração do reservatório a identificação de zonas com potencial para exploração permite reduzir o número de

furos a realizar e, conseqüentemente, reduzir os custos de prospecção (Balcázar *et al.*, 1990).

3.5.5. Considerações Gerais

A realização da cartografia de concentração de radão, de CO_2 e de temperatura do solo, permitiu identificar diversas áreas anômalas e a realização de algumas observações, nomeadamente:

- 1- O Vulcão das Furnas, mesmo estando num período de repouso, apresenta uma importante e contínua desgaseificação difusa através dos solos;
- 2- As zonas mais importantes de desgaseificação anómala da concentração de radão no solo estão associadas à presença zonas de grande permeabilidade relacionadas com a presença de zonas de falhas, crateras e ao bordo de caldeiras. Três destas zonas estão ainda associadas à presença de campos fumarólicos;
- 3- As zonas mais importantes de desgaseificação anómala da concentração de CO_2 no solo estão também associadas a zonas de grande permeabilidade devido à presença de zonas de falhas e crateras. Os campos fumarólicos deste vulcão correspondem evidentemente a importantes áreas de emissão deste gás;
- 4- Os domos traquíticos presentes no Vulcão das Furnas, e em especial os relacionados com as erupções históricas deste vulcão, apresentam valores de concentração de radão e de CO_2 no solo baixos sendo mesmo, no topo destas estruturas, inferiores ao valor de ruído de fundo definido para este vulcão. Estes resultados estão em concordância com os resultados das taxas de exalação de radão, obtidas em laboratório para as rochas traquíticas, devendo resultar de uma menor fracturação/permeabilidade destas estruturas;
- 5- As zonas de anomalia térmica mais importantes surgem associadas à presença dos quatro campos fumarólicos existentes no Vulcão das Furnas;

- 6- Existem zonas anómalas comuns da concentração de radão, de CO_2 e de temperatura do solo, evidenciando o facto destes gases serem transportados por convecção até à superfície;
- 7- Existem zonas anómalas da concentração de radão, que correspondem a valores na cartografia de CO_2 no solo compreendidos entre 6 e 15 %vol., evidenciando o facto do CO_2 poder funcionar como gás de arraste, promovendo assim o transporte do radão até à superfície através de zonas de maior fraqueza;
- 8- A análise estatística gráfica dos dados log-transformados de concentração de radão no solo permitiu a identificação de três populações associadas provavelmente a diferentes permeabilidades e tipos de transporte deste gás até às zonas mais superficiais do solo;
- 9- A análise estatística gráfica dos dados log-transformados de concentração de CO_2 no solo permitiu a identificação de três populações associadas provavelmente a diferentes origens (biogénica *versus* hidrotermal), a tipos de transporte distintos e a diferenças de permeabilidade das zonas de ascensão deste gás até à superfície;
- 10- A análise estatística gráfica dos dados log-transformados de temperatura do solo permitiu a identificação de duas populações associadas, provavelmente, a variações da temperatura do ar e a uma contribuição de profundidade;
- 11- A análise da distribuição da concentração de radão no solo permitiu a identificação de três potenciais zonas de interesse para exploração de recursos geotérmicos.

A realização da cartografia da desgaseificação difusa da concentração de radão e de CO_2 no solo, assim como a identificação das zonas de anomalia térmica presentes, em períodos quiescentes, no Vulcão das Furnas permite a identificação do nível de referência deste vulcão constituindo uma importante ferramenta, quer em termos de monitorização sismovulcânica, para comparação no futuro, facilitando assim a identificação da reactivação deste sistema vulcânico, quer em termos de uma eventual exploração geotérmica dos recursos existentes. Por outro lado, como as

anomalias de radão e de CO_2 surgem associadas a zonas de falhas e a estruturas vulcânicas e estas correspondem a zonas permeáveis preferenciais para a ascensão de magma até à superfície, a cartografia de anomalias de radão e de CO_2 pode contribuir para a identificação de zonas prováveis para a abertura de novas condutas. A identificação de zonas de desgaseificação anómalas constitui ainda uma importante ferramenta de apoio na tomada de decisão, por parte das entidades governamentais, no que diz respeito ao ordenamento de território e a questões relacionadas com a saúde pública.

4. MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO SOLO

4.1. Nota Prévia

A constituição da rede de monitorização permanente de geoquímica de gases do CVARG/CIVISA teve início em 2001 com a instalação da primeira estação de fluxo de CO_2 no solo (GFUR1) no Vulcão das Furnas. Actualmente esta rede é constituída por sete estações distribuídas por três ilhas: S. Miguel, Terceira e Graciosa. Na ilha de S. Miguel estão instaladas cinco estações, duas no Vulcão das Furnas (GFUR2 e GFUR3) e três no Vulcão do Fogo (GFOG2, GFOG3 e GFOG4). Na ilha Terceira está instalada uma estação nas Furnas do Enxofre (GTER1) e na ilha Graciosa a estação está instalada na gruta lávica da Furna do Enxofre (GGRC1).

Em 2005 foi efectuado um primeiro ensaio de monitorização contínua de radão no solo no Vulcão das Furnas (Silva, 2006) uma vez que a amostragem contínua deste gás no solo pode constituir uma importante fonte de informação acerca de fenómenos que ocorrem em profundidade. As anomalias de radão podem preceder, acompanhar ou suceder a ocorrência de eventos sísmicos uma vez que as variações de pressão/tensão associadas a estes fenómenos criam as condições propícias à libertação do radão das rochas e ao seu transporte através dos fluidos existentes nos espaços intersticiais. Por outro lado, algumas anomalias deste gás têm também sido associadas a intrusões magmáticas, quer como consequência da fracturação associada a este fenómeno, quer devido ao aumento da temperatura em profundidade (Cox, 1980).

Na realização do ensaio de monitorização contínua de radão no Vulcão das Furnas, foi utilizado o equipamento RAD7 que, numa primeira fase, foi instalado no

jardim do Centro Termal das Furnas. Posteriormente o equipamento foi transferido para junto do campo fumarólico da Freguesia das Furnas e numa terceira fase para as imediações do campo fumarólico da Lagoa das Furnas. Estes três pontos de amostragem localizam-se na proximidade das estações de fluxo de CO_2 GFUR1, GFUR3 e GFUR2, respectivamente, permitindo assim a utilização dos dados dos parâmetros meteorológicos e do fluxo de CO_2 para a interpretação das variações de radão registadas. Neste capítulo pretende-se identificar quais os factores externos que influenciam as variações da concentração de radão no solo e filtrar essa influência de forma a possibilitar a identificação de anomalias associadas a fenómenos de profundidade. Para tal será aplicada a análise de regressão múltipla e a análise espectral às séries temporais de concentração de radão no solo obtidas no Vulcão das Furnas.

4.2. Factores Externos que Influenciam a Concentração de ^{222}Rn no Solo

O radão produzido pelo decaimento do ^{238}U presente nas rochas, no solo ou no magma desempenha um importante papel no processo de desgaseificação da Terra, tendo sido as suas variações, quer espaciais, quer temporais, associadas a eventos sísmicos e/ou vulcânicos (e.g. Viñas *et al.*, 2007; Laiolo *et al.*, 2012). No entanto, variações deste gás medidas à superfície terrestre podem ser resultado de variações de factores externos e não de processos que ocorrem em profundidade. Assim sendo, é fundamental identificar quais os factores externos que provocam essas variações e extrair essas influências, de modo a que se possa fazer uma interpretação correcta das variações de radão obtidas.

A concentração de radão medida nas camadas superficiais do solo é fortemente influenciada por variações dos parâmetros meteorológicos como a temperatura do solo, a pressão barométrica, a pluviosidade, a humidade do solo e a velocidade do vento (Toutain e Baubron, 1999; Planinic *et al.*, 2001; Cigolini *et al.*, 2009; Kumar *et al.*, 2009; Laiolo *et al.*, 2012).

Trabalhos realizados no Vulcão Stromboli (Cigolini *et al.*, 2009; Laiolo *et al.*, 2012) permitiram verificar oscilações da concentração de radão no solo associadas a variações da temperatura do solo e da pressão barométrica. Estes autores observaram uma correlação positiva entre a emissão de radão e a temperatura do solo. Relativamente à influência da pressão barométrica, esta não parece influenciar de modo tão linear a concentração deste gás no solo, apresentando em alguns locais uma influência positiva, enquanto que, noutros apresenta uma influência negativa.

Trabalhos realizados na região de Osijek (Croácia) permitiram verificar incrementos acentuados da concentração de radão no solo associados a incrementos da pluviosidade (Planinic *et al.*, 2001). Outro parâmetro que também influencia a

concentração de radão no solo e que está associado à pluviosidade, corresponde à humidade do solo. Trabalhos realizados no Vulcão Irazu (Costa Rica) permitiram observar variações da emissão de radão, cerca de 2 a 4 vezes superiores aos valores de base, associados a incrementos da humidade do solo (Toutain e Baubron, 1999).

A influência da velocidade do vento na concentração de radão no solo foi analisada em estudos realizados na Índia, numa zona de falhas na região do Vale Kangra (Himalaias). Neste estudo observaram-se diminuições da concentração de radão associadas a incrementos da velocidade do vento, resultado, por um lado, da diluição deste gás e por outro lado, da sua remoção à superfície do solo (Kumar *et al.*, 2009 e referências nele citadas).

Para além dos parâmetros meteorológicos, a concentração de radão no solo pode ainda ser influenciada por variações associadas a outros parâmetros como por exemplo, as marés terrestres (Cigolini *et al.*, 2009; Laiolo *et al.*, 2012).

4.3. Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados

4.3.1. Configuração de Amostragem do Equipamento e Armazenamento de Dados

Para a realização da amostragem em contínuo da concentração de radão no solo foi utilizado o equipamento RAD7 descrito no capítulo anterior (3.3.1.1). Este equipamento foi programado para funcionar em modo *Auto*. Neste modo o equipamento RAD7 funciona em modo *Sniff* durante as três primeiras horas de amostragem, sendo utilizadas no cálculo da concentração de radão, apenas as contagens da janela A resultantes do decaimento do ^{218}Po . Após este período de amostragem, este equipamento passa automaticamente a funcionar em modo *Normal* passando a contabilizar, para além das contagens da janela A, as contagens efectuadas na janela C, isto é, a concentração do radão presente no solo passa a ser contabilizada com base no decaimento do ^{218}Po e do ^{214}Po , aumentando assim a precisão da amostragem. Este modo de operação permite, por um lado, que todos os dados possam ser utilizados desde o início da amostragem, e por outro, que se beneficie da maior precisão fornecida pelo modo *Normal* (DurrIDGE Company, 2011a). De acordo com a capacidade de armazenamento do equipamento os dados foram recolhidos uma vez por mês.

4.3.2. Fases de Amostragem

O ensaio de monitorização contínua de radão no solo decorreu em três fases associadas a três pontos de amostragem distintos. Na primeira fase o equipamento

RAD7 foi instalado no jardim do Centro Termal das Furnas no mesmo abrigo da estação permanente de fluxo de CO_2 GFUR1 (local 1, Figura 4.1). A amostragem foi efectuada a uma profundidade de aproximadamente 80 cm através da introdução de uma sonda no solo, ligada ao equipamento de medição de radão através de tubos de silicone, de uma unidade dessecante e de um filtro de 0,45 microns. A alimentação de energia ao equipamento foi fornecida directamente pela instalação eléctrica do Centro Termal das Furnas e o período de amostragem decorreu entre 18 de Agosto de 2005 e 16 de Janeiro de 2006 (Silva, 2006). Após este período, e devido a obras no Centro Termal, foi necessário remover as estações instaladas neste local.



Figura 4.1 – Monitorização contínua de ^{222}Rn no solo: a) Localização dos pontos de amostragem: Local 1- Jardim do Centro Termal e Local 2- Campo fumarólico da Freguesia das Furnas; b) Estação de ^{222}Rn instalada no interior do abrigo da estação de fluxo de CO_2 GFUR1 e c) Abrigo da estação de fluxo de CO_2 GFUR3, à esquerda, e abrigo da estação de ^{222}Rn à direita.

A 23 de Janeiro de 2008 deu-se início à segunda fase com a reinstalação do equipamento RAD7 e da estação de fluxo de CO_2 junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas (local 2, Figura 4.1). A estação de fluxo foi renomeada por GFUR3. Depois de um período inicial de operação, a estação deixou de funcionar a 29 de Fevereiro de 2008. Após diversos testes verificou-se que o detector era muito sensível aos elevados índices de sulfureto de hidrogénio (H_2S), danificando-se com alguma facilidade. Por este motivo foi necessário proceder à selecção de um terceiro ponto de monitorização.

A terceira fase teve início a 20 de Janeiro de 2009, tendo-se optado pela instalação da estação de radão junto ao local onde se encontra a estação de fluxo de CO_2 GFUR2, ou seja, nas imediações do campo fumarólico da Lagoa das Furnas (local 3, Figura 4.2). A 17 de Fevereiro de 2009 a estação voltou a deixar de funcionar, desta vez devido ao furto do painel solar que fornecia energia. O sistema voltou a ser reposto no dia 13 de Abril de 2009. A amostragem prosseguiu até 1 de Fevereiro de 2011. Na selecção dos pontos de amostragem foram tidos em conta não só os valores de concentração de radão obtidos na zona, mas também a proximidade às estações de fluxo de CO_2 e, consequentemente, aos sensores meteorológicos acoplados.

A amostragem de radão no solo foi efectuada, nos pontos de amostragem 2 e 3, a aproximadamente 60 cm de profundidade pela introdução de uma sonda no solo. A sonda foi ligada ao equipamento RAD7 através da utilização de tubos de silicone. Neste circuito foram ainda introduzidos uma unidade dessecante e um filtro de 0,45 microns. A instalação de um painel solar permitiu o fornecimento de energia.

Cada medição em modo *Auto* correspondeu a um ciclo de 60 minutos. No início de cada ciclo de amostragem a aspiração foi efectuada continuamente durante os primeiros cinco minutos com um fluxo correspondente de 0,5 L/min. No restante tempo a aspiração foi feita apenas no primeiro minuto em cada cinco com um fluxo correspondente de 0,5 L/min. A contagem decorreu ao longo de todo o ciclo e o valor final corresponde à média dos decaimentos de partículas α por segundo por metro

cúbico de ar amostrado. A manutenção foi efectuada duas vezes por semana, de modo a tentar manter baixos os níveis de humidade no detector.



Figura 4.2 – Monitorização contínua de ^{222}Rn no solo junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas: a) Localização do ponto de amostragem 3 e b) Abrigo da estação de ^{222}Rn à esquerda e abrigo da estação de fluxo de CO_2 GFUR2 à direita.

4.3.3. Análise Estatística dos Dados

A correcção relativamente à humidade no interior do detector e a validação dos dados de radão obtidos foram efectuadas com recurso ao *software* Capture versão 4.8.1 fornecido pela DurrIDGE Company. A estes conjuntos de dados foram adicionadas todas as informações referentes a variações no fluxo de CO_2 e a parâmetros meteorológicos, nomeadamente no que se refere à pressão barométrica,

temperatura e humidade relativa do ar, temperatura e humidade do solo, pluviosidade e velocidade do vento, adquiridas pelas estações permanentes de fluxo de CO_2 GFUR1, GFUR2 e GFUR3, pertencentes à rede de monitorização geoquímica do CVARG/CIVISA. De modo a compreender a influência estatística dos factores externos em estudo na variação da concentração de radão no solo foi aplicada a análise de regressão múltipla e a análise espectral às séries de dados obtidas.

A análise de regressão múltipla foi aplicada através da utilização do método *Stepwise* (Draper e Smith, 1981; Freund e Wilson, 1998). Para tal foi utilizado o *software* SPSS (*Statistical Packages for the Social Sciences*), versão 16. Nesta análise a concentração de radão no solo foi considerada a variável dependente e os parâmetros meteorológicos em análise, assim como o fluxo de CO_2 no solo, foram considerados as variáveis independentes, de acordo com a equação que se segue (Equação 4.1, Freund e Wilson, 1998; Pestana e Gageiro, 1998):

$$(4.1) \quad Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_kX_k + \varepsilon_i, \\ i = 1, 2, \dots, n$$

Em que:

Y = variável dependente;

X = variável independente;

B_0 = constante, valor médio de Y quando X é zero;

B = declive da recta;

ε_i = variável aleatória residual que descreve os efeitos em Y_i não explicados por X_i .

A aplicação de modelos de regressão múltipla a séries de dados requer que a população em análise apresente uma distribuição normal. Os dados em geoquímica normalmente não seguem esta distribuição, pelo que, é necessário, por vezes, recorrer à sua conversão numa escala logarítmica de modo a que a distribuição dos dados convertidos se aproxime da normal (Draper e Smith, 1981). Assim sendo, e

após confirmar que os dados de concentração de radão no solo obtidos não seguem uma distribuição normal, procedeu-se à transformação logaritmica dos dados e verificou-se que também estes não apresentam uma distribuição normal (Figura 4.3). No entanto, a análise da distribuição dos dados log-transformados permitiu constatar um padrão na sua distribuição, nomeadamente com a identificação de três grupos de dados distintos: um grupo associado aos valores mais baixos, outro de valores intermédios e um terceiro grupo ao qual estão associados os valores de concentração de radão mais elevados. Apesar destes dados não seguirem uma distribuição log-normal foi aplicada a análise de regressão múltipla a estes conjuntos de dados com o objectivo de testar a normalidade dos resíduos obtidos. Como os resíduos obtidos apresentam uma distribuição semelhante aos dados originais (Anexo II), optou-se pela aplicação da análise de regressão múltipla a cada um dos grupos identificados, tentando na divisão dos dados a aproximação, tanto quanto possível, a uma distribuição normal ou log-normal.

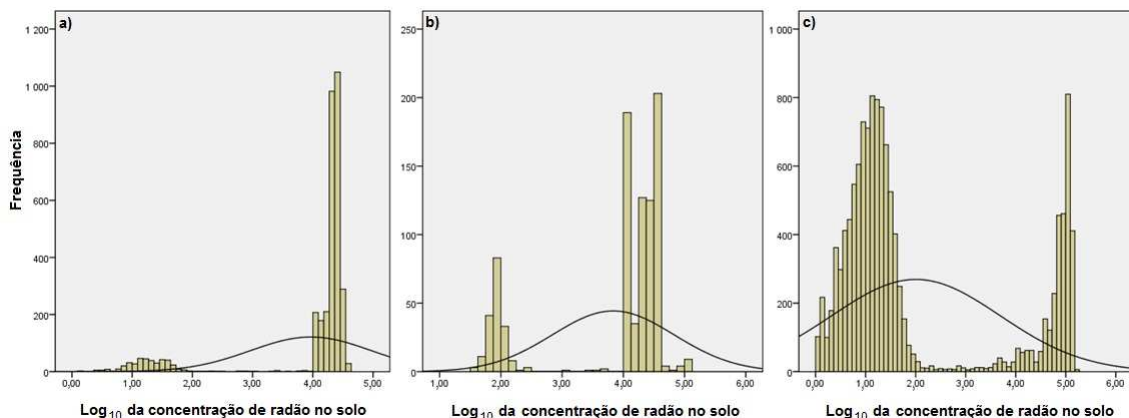


Figura 4.3 – Histogramas dos dados log-transformados da concentração de radão no solo: a) no local 1 - jardim do Centro Termal das Furnas, b) no local 2 – junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas e c) no local 3 – junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas.

No modelo de regressão múltipla aplicado apenas foram incluídas as variáveis independentes com significância de acordo com o teste t de *student* e que fomentam um aumento do R^2 ajustado superior a 1 %. O teste t de *student* permite confirmar se cada variável independente é estatisticamente significativa na explicação da variável dependente, sendo a hipótese nula para cada variável independente sem poder explicativo rejeitada para um nível de significância seleccionado de 0,01 e o R^2

ajustado fornece informações sobre a capacidade explicativa do modelo. Ao modelo foi ainda aplicado o teste F de *Snedcor* que permite a validação de todas as variáveis introduzidas no modelo como um todo (Draper e Smith, 1981; Freund e Wilson, 1998).

A aplicação da análise de regressão múltipla requer a não existência de multicolinearidade entre as variáveis independentes. O cálculo do VIF (*variance inflation factor*) permite verificar a existência de multicolinearidade entre as variáveis independentes, sendo excluídas as variáveis com um VIF superior a 10 (Freund e Wilson, 1998).

Outro factor a ter em consideração é a existência de variáveis independentes cujo comportamento não se traduz por uma linha recta mas por curvas (Viveiros, 2003). Este é o caso, por exemplo, de variáveis que apresentam comportamento de funções quadráticas em que é necessário calcular o ponto de estacionaridade, obtido por derivação das equações obtidas, de modo a compreender o comportamento destas variáveis (Draper e Smith, 1981; Freund e Wilson, 1998).

O modelo aplicado corresponde ao que reunindo todos os requisitos anteriormente descritos apresente maior poder explicativo para as oscilações da variável dependente.

Às séries temporais de dados obtidas foi ainda aplicada a análise espectral através da utilização do *software Tsoft*, versão 2.1.15, desenvolvido por uma equipa do *Royal Observatory of Belgium* (Van Camp e Vauterin, 2005; Vauterin e Van Camp, 2011: Manual *Tsoft*, <http://seismologie.oma.be/TSOFT/tsoft.html>). Este *software*, concebido inicialmente para a análise das variações das marés terrestres, pode ser aplicado a todo o tipo de séries temporais, permitindo a análise de dados como, por exemplo, eventos sísmicos e parâmetros meteorológicos (Van Camp e Vauterin, 2005). A aplicação deste tipo de análise, no domínio da frequência, permite: (a) identificar variações cíclicas diárias das séries de dados obtidos (espectro); (b) detectar variações sazonais (espectrograma) e (c) identificar relações de amplitude, atraso entre variáveis e coeficientes de correlação entre diferentes

frequências (*Transfer function*) (Van Camp e Vauterin, 2005; Viveiros, 2010; Vauterin e Van Camp, 2011).

No *software Tsoft* o filtro aplicado, no domínio das frequências, corresponde à FFT (*Fast Fourier Transform*), que decompõe sinais periódicos em funções de senos e cossenos (Harris, 1978). Como cada ponto do sinal filtrado depende de todos os pontos do canal filtrado, os resultados são influenciados, quer pelo limite no tempo da série, quer pela presença de interrupções horárias na sequência de dados (Van Camp e Vauterin, 2005). Assim, para a aplicação desta análise foram seleccionados períodos com o mínimo de interrupções na sequência de dados. Quando apenas existia interrupção de uma hora de dados, esta foi interpolada pelo cálculo da média entre o valor anterior e o posterior da respectiva série de dados, no caso em que se verificou duas ou mais horas de interrupção de dados, foram retiradas as 24 horas associadas a esse dia.

O espectro das séries temporais foi calculado com base na FFT de modo a analisar a presença de variações cíclicas diárias, tendo sido seleccionado um intervalo de incremento de 3600 segundos e a janela com a função *Hanning* que permite forçar os pontos das extremidades para zero. As amplitudes foram projectadas em gráficos lineares em ciclos por dia (cpd). Com o intuito de tentar identificar possíveis variações sazonais foi calculado o espectrograma das séries temporais utilizando a aplicação *Moving Window Spectrum*, sendo o número de pontos a transformar de 512 e o número de pontos entre transformações de 128.

Nos casos em que o espectro permitiu identificar a presença de variações cíclicas diárias nas séries temporais da concentração de radão no solo, foi aplicada a *Transfer function*, com blocos de tamanho 256, entre a concentração de radão no solo e os parâmetros meteorológicos que apresentaram variações cíclicas, de modo a tentar compreender os processos responsáveis por estas variações.

4.4. Apresentação dos Resultados

4.4.1. Local 1 - Jardim do Centro Termal das Furnas

O ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no solo no ponto de amostragem 1 decorreu, tal como referido anteriormente, entre 18 de Agosto de 2005 e 16 de Janeiro de 2006. Uma análise preliminar destes dados foi efectuada por Silva (2006). A representação gráfica da variação temporal da concentração de radão no solo pode ser observada na figura 4.4. A ausência de dados verificada no período de 21 de Setembro a 3 de Outubro é resultante de problemas ocorridos durante a transferência de dados.

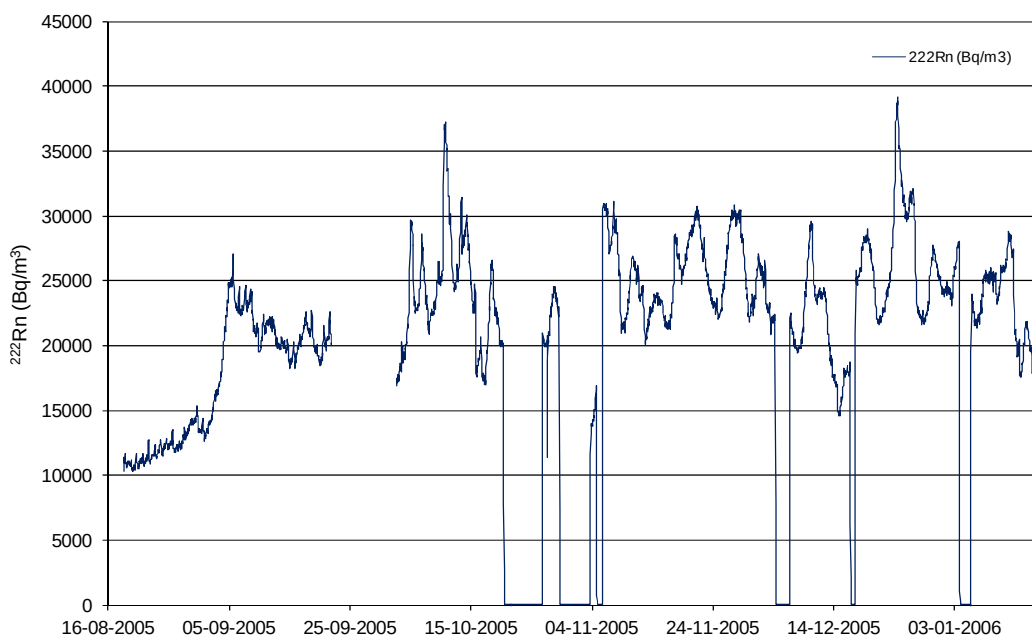


Figura 4.4 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas.

A informação referente à estatística descritiva dos dados de concentração de radão obtidos, assim como dos parâmetros meteorológicos analisados e dos dados de fluxo de CO_2 para o período em estudo, estão sintetizados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn obtidos no ponto de amostragem 1, do fluxo de CO_2 e dos parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR1.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
^{222}Rn (Bq/m^3)	19558,0	8816,0	22100,0	0,0	39200,0	3362
Humidade relativa do ar (%)	97,1	4,2	98,1	55,2	98,1	3621
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	16,3	4,1	16,1	3,2	29,7	3621
Pressão barométrica (hPa)	1000,0	7,0	1001,0	974,0	1017,0	3621
Fluxo de CO_2 (ppm/s)	16,7	4,1	16,2	0,1	64,4	3621
Pluviosidade (mm/h)	0,2	1,0	0,0	0,0	23,0	3618
Temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$)	18,9	2,3	18,4	15,2	22,7	3618
Humidade do solo (%)	13,8	3,1	14,2	6,2	21,2	3621
Velocidade do vento (m/s)	0,3	0,5	0,0	0,0	4,0	3621

Para tentar compreender que parâmetros externos influenciam as variações de concentração de radão neste local de amostragem e, de que modo essa influência é exercida, Silva (2006) efectuou uma análise comparativa onde é possível observar as variações temporais da concentração deste gás relativamente às oscilações de cada variável analisada através da construção de gráficos (Anexo III). Nesta análise os factores que parecem exercer alguma influência sobre a concentração de radão no solo são: a pressão barométrica, a pluviosidade/humidade do solo e as variações do fluxo de CO_2 . Para melhor evidenciar as relações existentes foram seleccionados determinados períodos de amostragem. A pressão barométrica surge apresentando uma relação inversa (Figura 4.5) enquanto a pluviosidade/humidade do solo (Figura 4.6) e o fluxo de CO_2 (Figura 4.7) apresentam uma relação directa com a concentração de radão no solo.

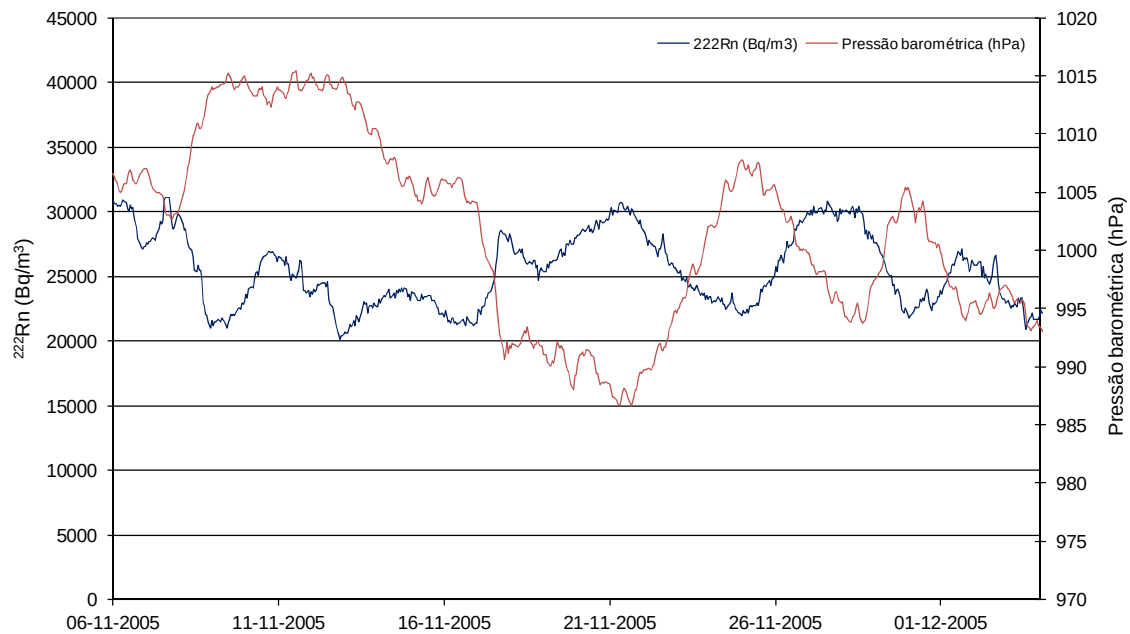


Figura 4.5 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pressão barométrica no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas para o período compreendido entre 6 de Novembro e 3 de Dezembro de 2005.

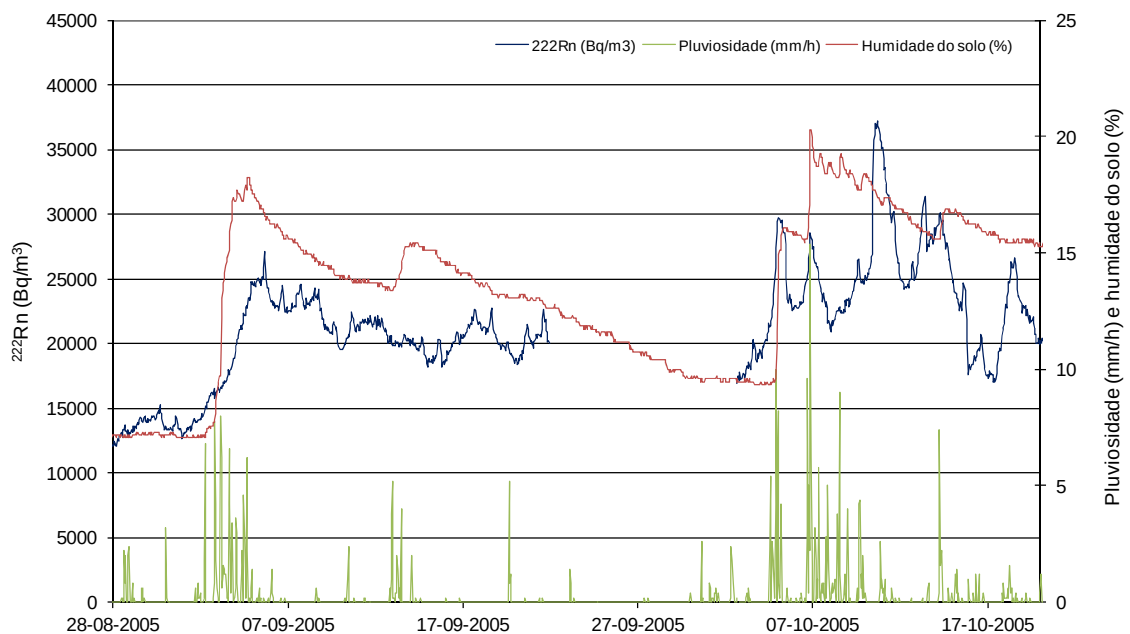


Figura 4.6 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo, da pluviosidade e da humidade do solo no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas para o período compreendido entre 28 de Agosto e 19 de Outubro de 2005.

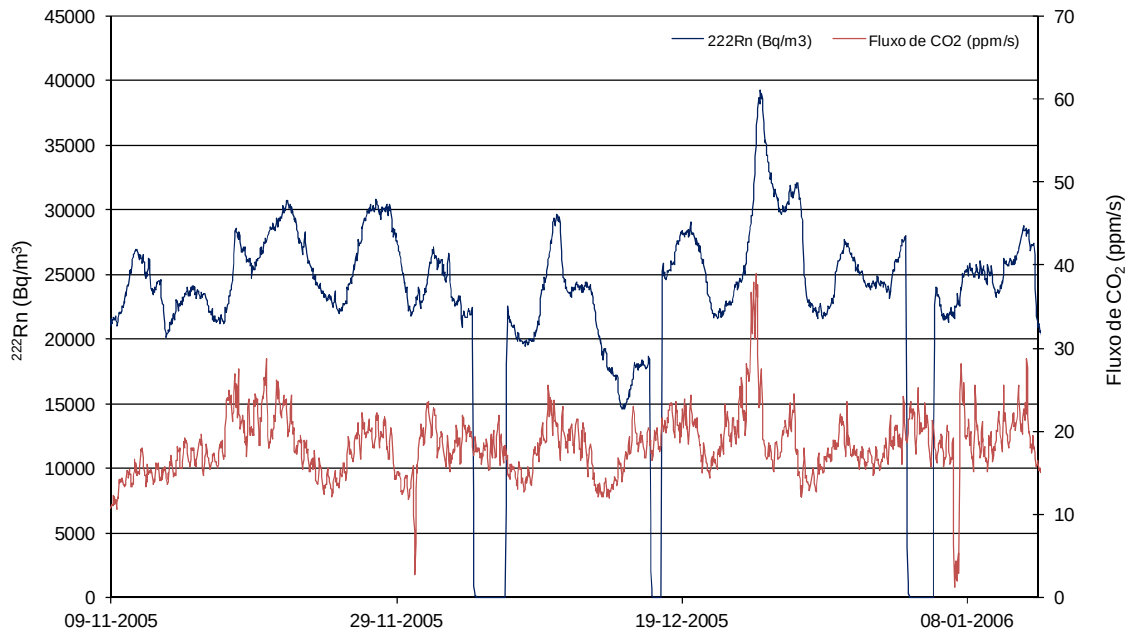


Figura 4.7 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas para o período compreendido entre 9 de Novembro de 2005 e 16 de Janeiro de 2006.

De modo a tentar confirmar estas relações foi aplicada a análise de regressão múltipla aos dados em estudo. Para essa análise foi necessário, tal como referido anteriormente, dividir este conjunto de dados de modo a tentar aproximar a sua distribuição, tanto quanto possível, da normal. Tendo em atenção a análise da distribuição dos dados log-transformados (Figura 4.3 a)), optou-se pela sua divisão em 3 grupos nomeadamente: (1) o grupo A1 que compreende todos os dados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 , tendo sido utilizados, neste caso, os dados log-transformados; (2) o grupo B1 que compreende os dados dos 8000 aos $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e finalmente (3) o grupo C1 que corresponde a todos os valores superiores a $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ (Figura 4.8). A análise de regressão múltipla foi aplicada aos dados de concentração de radão ou aos dados log-transformados tendo em atenção os histogramas obtidos e consequentemente, a proximidade da distribuição dos dados à normal.

Os coeficientes de correlação de *Pearson* referentes aos dados de cada um dos grupos anteriormente descritos, ao fluxo de CO_2 e aos parâmetros meteorológicos em análise estão sintetizados na tabela 4.2.

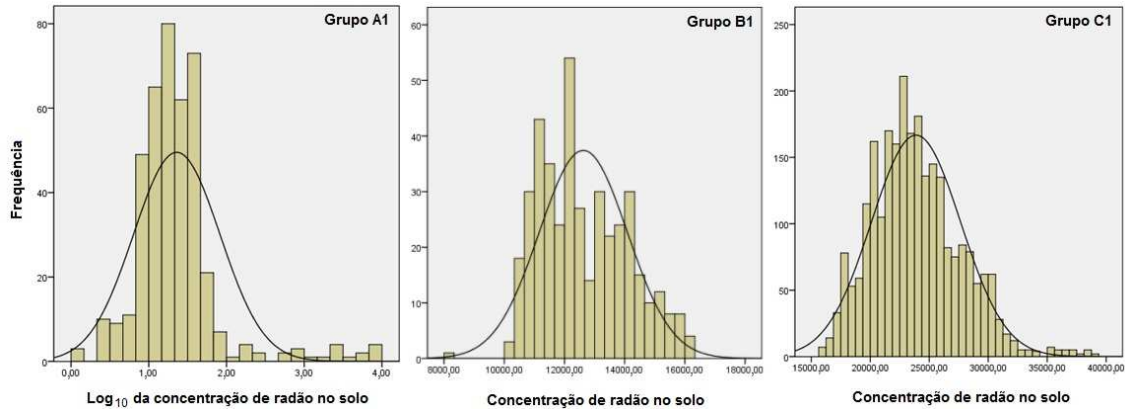


Figura 4.8 – Histogramas dos dados da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 1: Grupo A1 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (dados log-transformados), Grupo B1 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo compreendidos entre 8000 Bq/m^3 e $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e Grupo C1 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo superiores a $16\,000 \text{ Bq/m}^3$.

Tabela 4.2 – Coeficientes de correlação de *Pearson* das variáveis analisadas durante o período em estudo.

Grupo	Variáveis	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$	^{222}Rn	Humidade relativa do ar	Temperatura do ar	Pressão barométrica	Fluxo de CO_2	Pluviosidade	Temperatura do solo	Humidade do solo	Velocidade do vento
A1	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$	1,000		0,153	-0,081	0,240	0,005	-0,054	-0,298	-0,358	-0,230
	Humidade relativa do ar	0,153		1,000	-0,305	-0,040	0,211	0,039	-0,119	-0,084	-0,165
	Temperatura do ar	-0,081		-0,305	1,000	-0,227	0,192	0,045	0,114	-0,156	0,282
	Pressão barométrica	0,240		-0,040	-0,227	1,000	-0,322	-0,198	-0,491	-0,415	-0,325
	Fluxo de CO_2	0,005		0,211	0,192	-0,322	1,000	0,299	-0,055	0,169	0,249
	Pluviosidade	-0,054		0,039	0,045	-0,198	0,299	1,000	0,118	0,167	0,192
	Temperatura do solo	-0,298		-0,119	0,114	-0,491	-0,055	0,118	1,000	0,352	0,185
	Humidade do solo	-0,358		-0,084	-0,156	-0,415	0,169	0,167	0,352	1,000	0,336
	Velocidade do vento	-0,230		-0,165	0,282	0,325	0,249	0,192	0,185	0,336	1,000
B1	^{222}Rn		1,000	0,136	-0,108	-0,570	0,409	0,157	-0,434	0,425	0,108
	Humidade relativa do ar		0,136	1,000	-0,477	-0,147	0,171	0,074	-0,042	0,058	-0,329
	Temperatura do ar		-0,108	-0,477	1,000	-0,178	0,296	0,046	0,459	-0,548	0,395
	Pressão barométrica		-0,570	-0,147	-0,178	1,000	-0,722	-0,208	-0,196	0,036	-0,166
	Fluxo de CO_2		0,409	0,171	0,296	-0,722	1,000	0,140	0,278	-0,329	0,071
	Pluviosidade		0,152	0,074	0,046	-0,208	0,140	1,000	0,032	-0,329	0,017
	Temperatura do solo		-0,434	-0,042	0,459	-0,196	0,278	0,032	1,000	-0,901	0,061
	Humidade do solo		0,425	0,056	-0,548	0,036	-0,329	-0,039	-0,901	1,000	-0,051
	Velocidade do vento		0,108	-0,329	0,395	-0,166	0,071	0,017	0,061	-0,051	1,000
C1	^{222}Rn		1,000	0,019	-0,020	-0,337	0,398	0,060	-0,338	0,371	0,142
	Humidade relativa do ar		0,019	1,000	-0,216	0,001	0,090	0,034	-0,117	-0,031	-0,075
	Temperatura do ar		-0,200	-0,216	1,000	-0,071	-0,120	0,029	0,442	-0,147	0,232
	Pressão barométrica		-0,337	0,001	-0,071	1,000	-0,366	-0,236	-0,181	-0,335	-0,196
	Fluxo de CO_2		0,398	0,090	-0,120	-0,366	1,000	0,179	-0,328	-0,155	0,171
	Pluviosidade		0,060	0,034	0,029	-0,236	0,179	1,000	0,113	0,073	0,151
	Temperatura do solo		-0,338	-0,117	0,442	-0,181	-0,328	0,113	1,000	0,008	-0,086
	Humidade do solo		0,371	-0,031	-0,147	-0,335	-0,155	0,073	0,008	1,000	-0,012
	Velocidade do vento		0,142	-0,075	0,232	-0,196	0,171	0,151	-0,086	-0,012	1,000

A aplicação da análise de regressão múltipla aos dados do grupo A1 permitiu verificar que, no modelo proposto, isto é, no modelo com maior poder explicativo para a variação da concentração de radão no solo, as variáveis com significância estatística ($P < 0,01$) são a humidade do solo e a temperatura do solo (Tabela 4.3), em concordância com os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 4.2) onde também estas duas variáveis são as que apresentam maior correlação com os dados de radão log-transformados. Neste modelo a humidade e a temperatura do solo explicam 15,8 % das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no solo, segundo o R^2 ajustado obtido. Estas variáveis apresentam uma correlação inversa com a variável dependente de acordo com o sinal do coeficiente β .

Tabela 4.3 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn log-transformados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (Grupo A1).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	4,07	0,34		12,09	0,00		
Humidade do solo	-0,08	0,01	-0,29	-6,01	0,00	0,126	1,14
Temperatura do solo	-0,08	0,02	-0,20	-4,06	0,00	0,032	1,14

Variável dependente: Log_{10} da concentração de ^{222}Rn no solo ($\leq 8000 \text{ Bq/m}^3$)

Número total de observações: 415

Somatório do R^2 Ajustado: 0,158

Teste F: 832,85

0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A aplicação da análise anteriormente referida aos dados do grupo B1 permitiu verificar que, no modelo proposto, as variáveis com significância estatística ($P < 0,01$) são a pressão barométrica, a temperatura do solo e a humidade do solo (Tabela 4.4). Estas variáveis são também as que apresentam maior correlação com os dados de concentração de radão de acordo com os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 4.2). De acordo com este modelo estas variáveis explicam 73,6 % do total das variações da concentração de radão no solo (R^2 ajustado). A pressão barométrica apresenta uma correlação inversa com a concentração de radão no solo enquanto a temperatura e a humidade do solo têm comportamento de função

quadrática. No caso da temperatura do solo, esta influencia de forma positiva as variações da concentração de radão no solo para valores inferiores a 18,3 °C, passando a apresentar uma influência negativa para valores de temperatura superiores a esse valor. A humidade do solo, por seu lado, influencia positivamente as variações da concentração de radão no solo para valores inferiores a 10,9 %, passando essa influência a negativa para valores de humidade do solo superiores a esse valor. Os valores de VIF para a temperatura e para a humidade do solo são superiores a 10 como resultado de ambas exibirem comportamento de função quadrática apresentando portanto multicolinearidade com as variáveis (temperatura do solo)² e (humidade do solo)², respectivamente. Essa multicolinearidade é no entanto aceitável uma vez que se tratam das mesmas variáveis físicas.

Tabela 4.4 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn compreendidos entre 8000 e 16 000 Bq/m³ (Grupo B1).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R ² ajustado	VIF
Constante	144631,14	17933,10		8,07	0,00		
Pressão barométrica	-209,94	9,39	-0,67	-22,37	0,00	0,323	1,28
(Temperatura do solo) ²	-214,87	40,00	-7,32	-5,37	0,00	0,310	2614,00
Humidade do solo	1998,03	224,84	3,56	8,89	0,00	0,047	226,22
(Humidade do solo) ²	-92,07	9,01	-0,37	-10,22	0,00	0,038	181,18
Temperatura do solo	7859,48	1566,10	6,75	5,02	0,00	0,018	2547,00
Variável dependente: Concentração de ^{222}Rn no solo (8000 a 16 000 Bq/m ³)							
Número total de observações: 373							
Somatório do R ² Ajustado: 0,736							
Teste F: 208,17							
0,00**							

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

No que se refere à análise de regressão múltipla aplicada aos dados do grupo C1, esta permitiu identificar a humidade do solo, o fluxo de CO₂ e a temperatura do solo como as variáveis com significância estatística ($P < 0,01$) no modelo proposto (Tabela 4.5). Estas variáveis são também as que apresentam maior correlação com os dados de concentração de radão de acordo com os coeficientes de correlação de

Pearson calculados (Tabela 4.2). Estas variáveis são responsáveis, de acordo com o R^2 ajustado obtido, por 40,5 % das variações da concentração de radão no solo. A humidade do solo e o fluxo de CO_2 no solo influenciam de forma positiva as variações da concentração de radão no solo, enquanto a temperatura do solo apresenta comportamento de função quadrática influenciando de forma positiva a concentração de radão no solo para temperaturas inferiores a 17,6 °C, valor a partir do qual passa a exercer uma influência negativa. Também neste caso os valores de VIF para a temperatura do solo são superiores a 10 como resultado desta variável exibir comportamento de função quadrática, sendo essa multicolinearidade aceitável uma vez que se trata da mesma variável física.

Tabela 4.5 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn superiores a 16 000 Bq/m^3 (Grupo C1).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-31700,94	5209,49		-6,09	0,00		
Humidade do solo	893,71	32,84	0,43	27,21	0,00	0,191	1,03
Fluxo de CO_2	365,03	15,62	0,39	23,38	0,00	0,158	1,15
(Temperatura do solo) ²	-122,27	14,82	-2,73	-8,25	0,00	0,042	458,86
Temperatura do solo	4249,67	559,20	2,51	7,60	0,00	0,014	458,19

Variável dependente: Concentração de ^{222}Rn no solo (> 16 000 Bq/m^3)
Número total de observações: 2495
Somatório do R^2 Ajustado: 0,405
Teste F: 347,51 0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A análise espectral foi aplicada à série temporal da concentração de radão no solo, neste ponto de amostragem, tendo em consideração o período compreendido entre 3 de Outubro de 2005 e 16 de Janeiro de 2006, uma vez que, este corresponde ao período com menos interrupções na aquisição de dados. O espectro resultante não permitiu identificar variações cíclicas diárias (Figura 4.9). Para este conjunto de dados não foi calculado o espectrograma, uma vez que, o período de dados, aproximadamente três meses, é demasiado reduzido para possibilitar a identificação de variações sazonais.

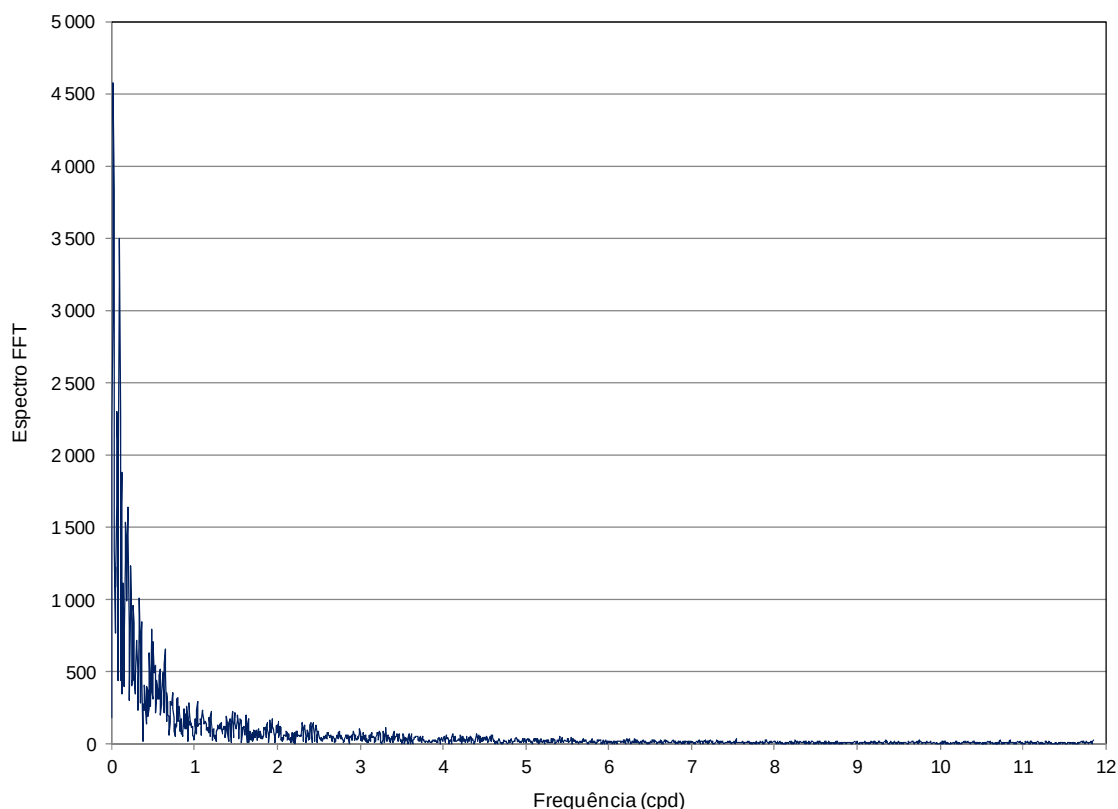


Figura 4.9 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 1, para o período compreendido entre 3 de Outubro de 2005 e 16 de Janeiro de 2006.

4.4.2. Local 2 – Campo Fumarólico da Freguesia das Furnas

A recolha de dados no ponto de amostragem 2 reporta-se ao período compreendido entre 23 de Janeiro e 29 de Fevereiro de 2008 correspondendo portanto a um período de amostragem reduzido. A variação temporal da concentração de radão neste ponto de amostragem pode ser observada na figura 4.10.



Figura 4.10 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 2 localizado junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas.

A estatística descritiva dos dados de concentração de radão obtidos no ponto de amostragem 2, assim como dos parâmetros meteorológicos e dos dados de fluxo de CO_2 obtidos pela estação GFUR3 para o período em estudo, estão sintetizados na tabela 4.6.

À semelhança da metodologia aplicada no ponto de amostragem anterior, também para os dados obtidos neste local, foi efectuada uma análise comparativa onde é possível observar as variações temporais da concentração deste gás relativamente às oscilações de cada variável analisada através da construção de gráficos (Anexo III). Nesta análise não foi possível identificar nenhuma variável com influência nas variações da concentração de radão no solo neste ponto de amostragem, facto que deverá resultar do reduzido período de amostragem.

Tabela 4.6 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn obtidos no ponto de amostragem 2, do fluxo de CO_2 e dos parâmetros meteorológicos registados pela estação GFUR3.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
^{222}Rn (Bq/m^3)	19535,0	16030,0	18900,0	33,0	104000,0	884
Humidade relativa do ar (%)	97,3	3,6	98,1	59,2	98,1	884
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	24,5	7,8	27,3	8,3	37,3	884
Pressão barométrica (hPa)	999,0	8,0	1002,0	982,0	1016,0	884
Fluxo de CO_2 (ppm/s)	25,4	10,1	26,5	0,1	56,8	880
Pluviosidade (mm)	0,3	1,3	0,0	0,0	16,0	883
Temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$)	27,8	1,0	27,5	26,8	30,3	357
Humidade do solo (%)	15,0	1,4	14,6	11,4	21,9	357
Velocidade do vento (m/s)	6,1	7,4	2,1	0,0	37,5	763

Ao conjunto de dados obtidos foi aplicada a análise de regressão múltipla, não com o intuito de construir um modelo explicativo para a variação da concentração de radão neste ponto de amostragem uma vez que, por um lado, o reduzido período de amostragem e por outro, a avaria de alguns sensores meteorológicos inviabilizam a construção de um modelo robusto, mas na simples tentativa de reconhecer a influência de algum dos parâmetros em análise. Também neste caso foi necessário dividir o conjunto de dados obtidos de modo a tentar aproximar a sua distribuição, tanto quanto possível, da normal. Tendo em atenção a análise da distribuição dos dados log-transformados (Figura 4.3 b)), optou-se pela sua divisão em 3 grupos nomeadamente: (1) o grupo A2 que corresponde a todos os dados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 , tendo sido utilizados os dados log-transformados; (2) o grupo B2 que compreende os dados dos 8000 aos $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e (3) o grupo C2 que corresponde aos valores superiores a $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ (Figura 4.11). Esta divisão é semelhante à efectuada para o ponto de amostragem 1.

Os coeficientes de correlação de *Pearson* referentes aos dados de cada um dos grupos de concentração de radão anteriormente descritos, ao fluxo de CO_2 e aos parâmetros meteorológicos em análise estão sintetizados na tabela 4.7.

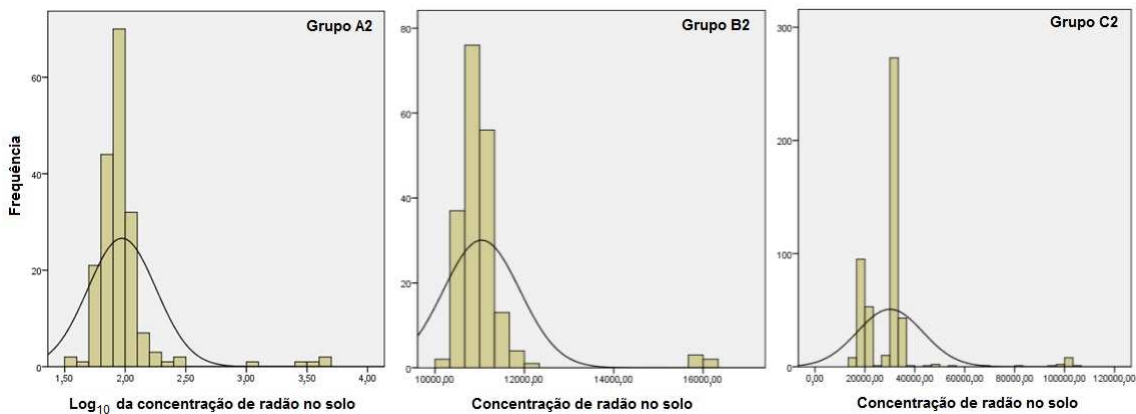


Figura 4.11 – Histogramas dos dados da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 2: Grupo A2 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (dados log-transformados), Grupo B2 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo compreendidos entre 8000 Bq/m^3 e $16\,000 \text{ Bq/m}^3$ e Grupo C2 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo superiores a $16\,000 \text{ Bq/m}^3$.

Tabela 4.7 – Coeficientes de correlação de *Pearson* das variáveis analisadas durante o período em estudo.

Grupo	Variáveis	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$	^{222}Rn	Humidade relativa do ar	Temperatura do ar	Pressão barométrica	Fluxo de CO_2	Pluviosidade	Temperatura do solo	Humidade do solo	Velocidade do vento
A2	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$	1,000		-0,226	-0,470	0,151	-0,056	0,349	0,713	0,043	-0,197
	Humidade relativa do ar	-0,226		1,000	0,639	-0,229	0,118	-0,123	-0,107	-0,265	-0,110
	Temperatura do ar	-0,470		0,639	1,000	-0,478	0,299	-0,123	-0,322	-0,240	-0,259
	Pressão barométrica	0,151		-0,229	-0,478	1,000	-0,190	-0,105	-0,136	0,527	0,241
	Fluxo de CO_2	-0,056		0,118	0,299	-0,190	1,000	-0,036	-0,089	0,212	-0,104
	Pluviosidade	0,349		-0,123	-0,123	-0,104	-0,036	1,000	0,374	0,042	-0,222
	Temperatura do solo	0,713		-0,107	-0,322	-0,136	-0,089	0,374	1,000	-0,302	-0,506
	Humidade do solo	0,043		-0,265	-0,240	0,527	0,212	0,042	-0,302	1,000	0,119
	Velocidade do vento	-0,197		-0,110	-0,259	0,241	-0,104	-0,222	-0,506	0,119	1,000
B2	^{222}Rn		1,000	-0,023	-0,883	0,660	-0,303	-0,101			-0,084
	Humidade relativa do ar		-0,023	1,000	0,353	-0,295	0,001	0,310			0,064
	Temperatura do ar		-0,883	0,353	1,000	-0,678	0,331	0,074			0,120
	Pressão barométrica		0,660	-0,295	-0,678	1,000	-0,496	-0,086			0,275
	Fluxo de CO_2		-0,303	0,001	0,331	-0,496	1,000	0,322			-0,227
	Pluviosidade		-0,101	0,031	0,074	-0,086	0,322	1,000			-0,108
	Temperatura do solo								1,000		
	Humidade do solo									1,000	
	Velocidade do vento		-0,084	0,640	0,120	0,275	-0,227	-0,108			1,000
C2	^{222}Rn		1,000	0,110	0,296	0,716	0,181	-0,029	-0,429	0,222	-0,167
	Humidade relativa do ar		0,110	1,000	0,502	-0,050	0,377	-0,109	-0,304	-0,072	0,182
	Temperatura do ar		0,296	0,502	1,000	0,043	0,843	-0,029	-0,838	-0,124	0,231
	Pressão barométrica		0,716	-0,050	0,043	1,000	-0,013	0,048	-0,256	0,460	-0,435
	Fluxo de CO_2		0,181	0,377	0,843	-0,013	1,000	0,194	-0,736	0,028	0,145
	Pluviosidade		-0,029	-0,109	-0,029	0,048	0,194	1,000	0,810	0,412	-0,208
	Temperatura do solo		-0,429	-0,304	-0,838	-0,256	-0,736	0,081	1,000	0,060	-0,332
	Humidade do solo		0,222	-0,072	-0,124	0,460	0,028	0,412	0,060	1,000	-0,281
	Velocidade do vento		-0,167	0,182	0,231	-0,435	0,145	-0,208	-0,332	-0,281	1,000

A análise de regressão múltipla aplicada aos dados do grupo A2 permitiu verificar que, no modelo seleccionado, as variáveis com significância estatística ($P < 0,01$) são a temperatura do solo, a humidade do solo e a velocidade do vento

(Tabela 4.8), em discordância com os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 4.7) onde as variáveis que apresentam maior correlação com os dados de radão log-transformados são a temperatura do solo, a temperatura do ar e a pluviosidade. Segundo esse modelo, estas variáveis explicam 61,5 % das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no solo de acordo com o R^2 ajustado obtido, exercendo uma influência positiva sobre estes dados.

Tabela 4.8 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn log-transformados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 (Grupo A2).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-12,64	1,09		-13,55	0,00		
Temperatura do solo	0,57	0,04	0,92	15,49	0,00	0,505	1,46
Humidade do solo	0,09	0,02	0,29	5,68	0,00	0,071	1,10
Velocidade do vento	0,01	0,00	0,23	4,09	0,00	0,039	1,35

Variável dependente: Log_{10} da concentração de ^{222}Rn no solo ($\leq 8000 \text{ Bq/m}^3$)

Número total de observações: 161

Somatório do R^2 Ajustado: 0,615

Teste F: 86,03

0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A aplicação da análise anteriormente referida aos dados do grupo B2 não foi possível devido à não existência de casos válidos suficientes para a construção do modelo. Este facto deve-se à avaria dos sensores que permitem a leitura da temperatura e da humidade do solo.

A análise de regressão múltipla aplicada aos dados do grupo C2 permitiu identificar as variáveis pressão barométrica e temperatura do ar como tendo significância estatística ($P < 0,01$) no modelo proposto (Tabela 4.9). De acordo com os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 4.2), as variáveis que apresentam maior correlação com a concentração de radão no solo, neste ponto de amostragem, são a pressão barométrica e a temperatura do solo. No modelo, estas

variáveis são responsáveis por 57,8 % das variações da concentração de radão no solo, influenciando esta variável de forma positiva.

Tabela 4.9 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn superiores a 16 000 Bq/m³ (Grupo C2).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R ² ajustado	VIF
Constante	-4246000,00	319425,84		-13,29	0,00		
Pressão barométrica	4230,68	317,57	0,71	13,32	0,00	0,510	1,00
Temperatura do ar	1131,43	225,61	0,27	5,02	0,00	0,068	1,00
Variável dependente: Concentração de ^{222}Rn no solo (> 16 000 Bq/m ³)							
Número total de observações: 152							
Somatório do R ² Ajustado: 0,578							
Teste F: 104,39							
0,00**							

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

Dado o reduzido período de amostragem, sem interrupções significativas na aquisição de dados, não foi aplicada a análise espectral à série temporal da concentração de radão no solo adquirida no ponto de amostragem 2.

4.4.3. Local 3 – Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas

O ensaio de monitorização contínua de radão no solo, no ponto de amostragem 3, decorreu entre 20 de Janeiro de 2009 e 1 de Fevereiro de 2011. A representação gráfica da variação temporal da concentração de radão no solo pode ser observada na figura 4.12. Na figura 4.13 está representada a mesma série temporal, mas com a escala ampliada de modo a permitir observar as variações dos valores mais baixos. A ausência de dados verificada é resultante de problemas técnicos ocorridos durante a amostragem, em que o equipamento se desligava sem motivo aparente. A exceção corresponde à ausência de dados entre 7 de Fevereiro e

13 de Abril de 2009, que corresponde ao período que decorreu entre o roubo do painel solar e a sua substituição.

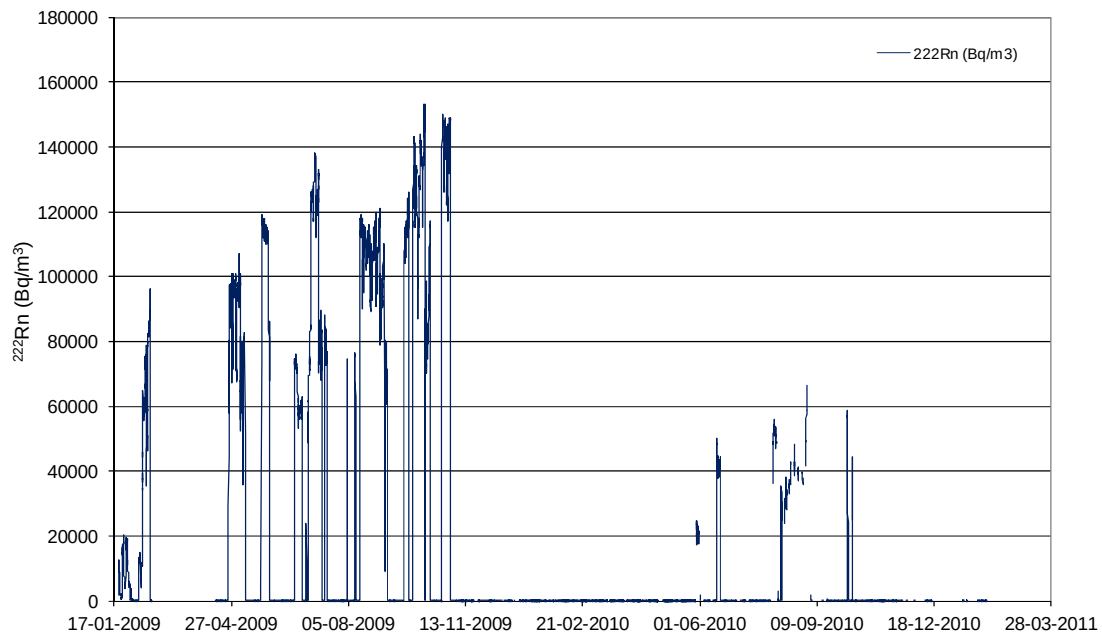


Figura 4.12 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas.

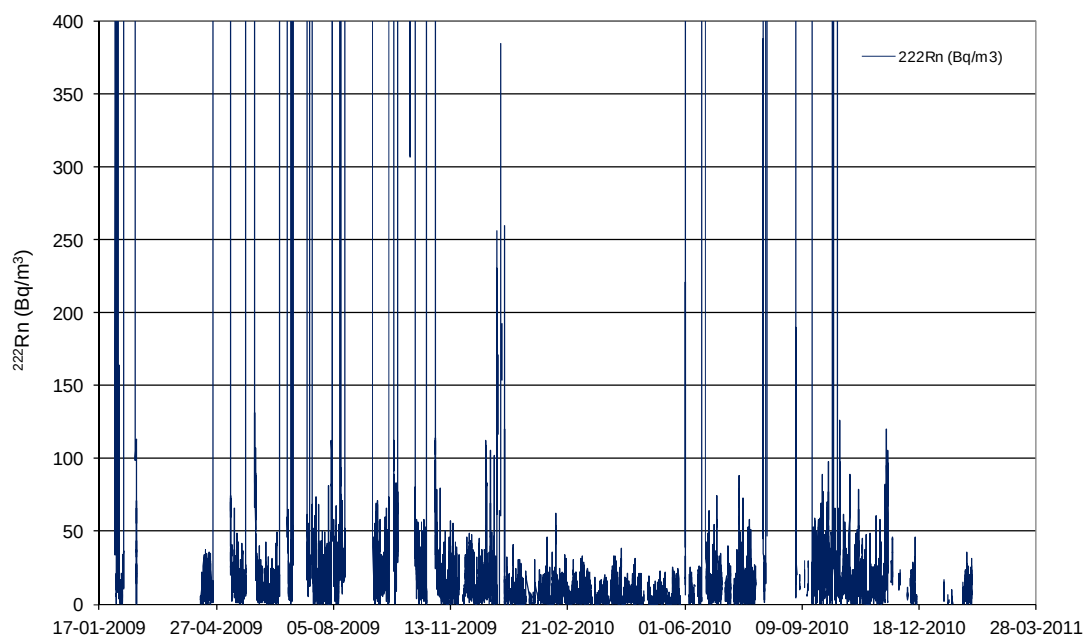


Figura 4.13 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas, com ampliação da escala.

A informação referente à estatística descritiva dos dados de concentração de radão obtidos, assim como dos parâmetros meteorológicos analisados e dos dados de fluxo de CO_2 para o período em estudo, estão sintetizados na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn obtidos no ponto de amostragem 3, do fluxo de CO_2 e dos parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR2.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
^{222}Rn (Bq/m^3)	19297,0	39672,0	17,0	0,0	153000,0	13322
Humidade relativa do ar (%)	87,3	8,6	90,0	46,0	99,3	15648
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	16,4	4,0	16,3	5,0	29,2	15647
Pressão barométrica (hPa)	985,0	9,0	987,0	948,0	1003,0	15597
Fluxo de CO_2 (ppm/s)	20,2	4,9	20,4	0,6	39,7	15004
Pluviosidade (mm/h)	0,2	1,1	0,0	0,0	35,0	15591
Temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$)	21,2	4,6	22,1	12,1	29,8	15726
Humidade do solo (%)	19,4	5,8	19,3	8,0	42,5	15727
Velocidade do vento (m/s)	0,9	0,9	0,6	0,0	8,8	15645

Numa abordagem preliminar, no sentido de detectar a influência dos parâmetros monitorizados nas variações da concentração de radão no solo, foi efectuada uma análise comparativa onde é possível observar as variações temporais da concentração deste gás relativamente às oscilações de cada variável analisada através da construção de gráficos (Anexo III). Desta análise os parâmetros que parecem exercer influência na variação da concentração de radão são o fluxo de CO_2 e a velocidade do vento. Para melhor evidenciar as relações existentes foram seleccionados determinados períodos de amostragem. As variações do fluxo de CO_2 aparentam, de uma forma geral, ter uma relação directa com as variações da concentração de radão neste ponto de amostragem (Figura 4.14). As variações da velocidade do vento, por outro lado, aparentam ter uma relação inversa com as variações da concentração de radão (Figura 4.15).

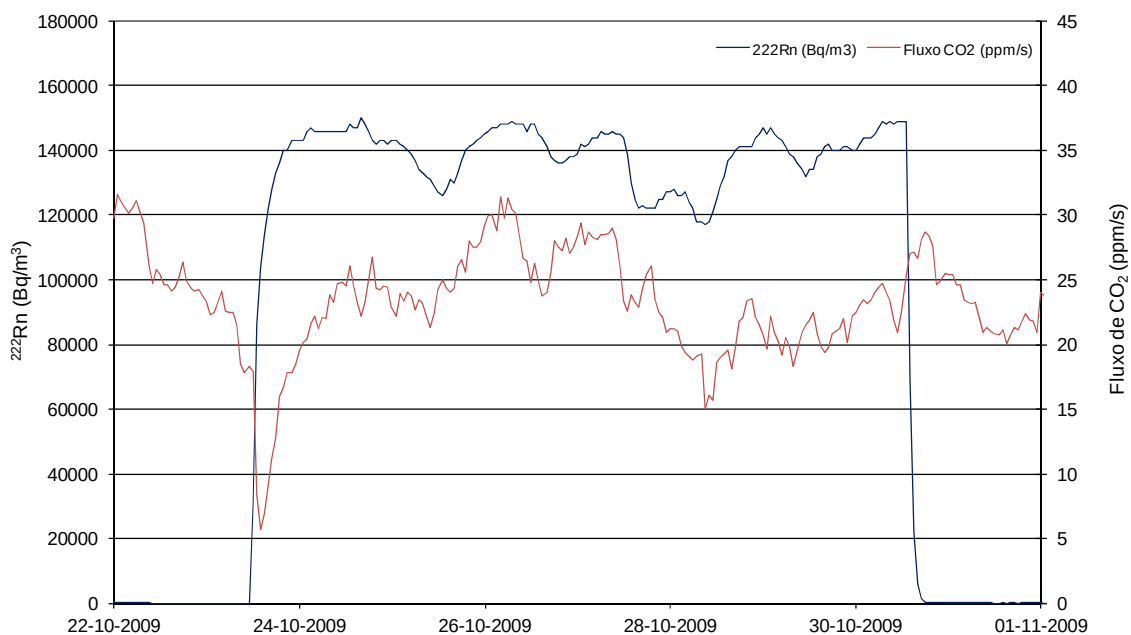


Figura 4.14 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas para o período compreendido entre 22 de Outubro e 1 de Novembro de 2009.

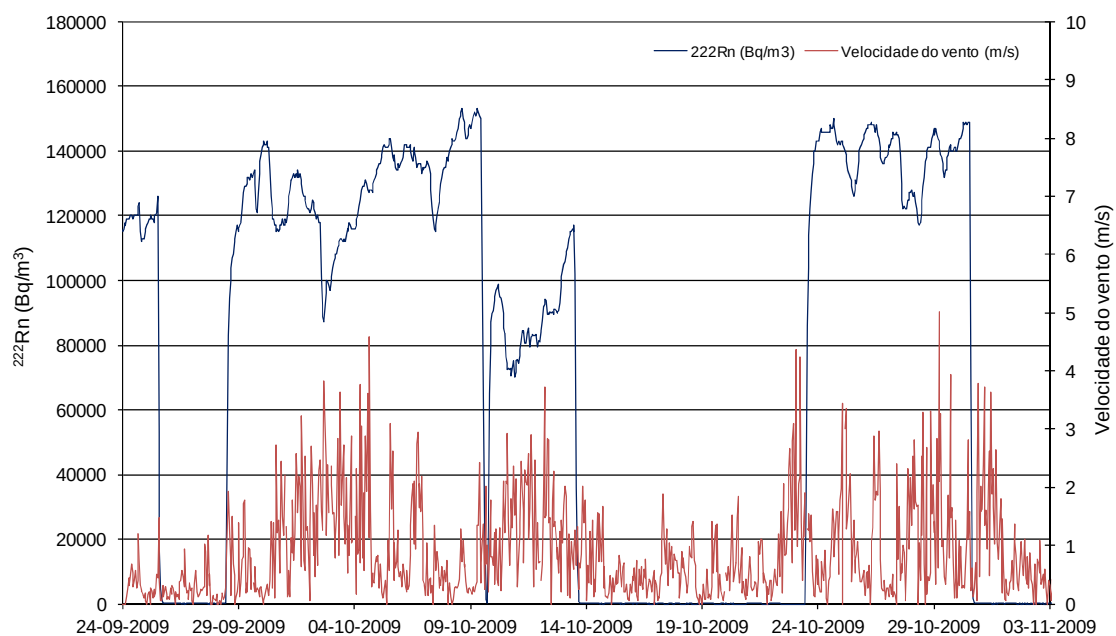


Figura 4.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da velocidade do vento no ponto de amostragem 3 localizado junto ao campo fumarólico da Lagoa das Furnas para o período compreendido entre 24 de Setembro e 3 de Novembro de 2009.

Para a aplicação da análise de regressão múltipla aos dados obtidos, foi necessário, à semelhança do descrito nos pontos de amostragem anteriores, dividir este conjunto de dados de modo a tentar aproximar a sua distribuição, tanto quanto possível, à normal. Tendo em atenção a análise da distribuição dos dados log-transformados (Figura 4.3 c)), optou-se pela sua divisão em 3 grupos nomeadamente: (1) o grupo A3 que inclui todos os dados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m³, tendo sido analisados os dados log-transformados; (2) o grupo B3 que corresponde aos dados compreendidos entre os 8000 e os 50 000 Bq/m³ e finalmente (3) o grupo C3 que corresponde a todos os valores superiores a 50 000 Bq/m³ (Figura 4.16).

Os coeficientes de correlação de *Pearson* referentes aos dados de cada um dos grupos anteriormente descritos, ao fluxo de CO₂ e aos parâmetros meteorológicos em análise estão sintetizados na tabela 4.11.

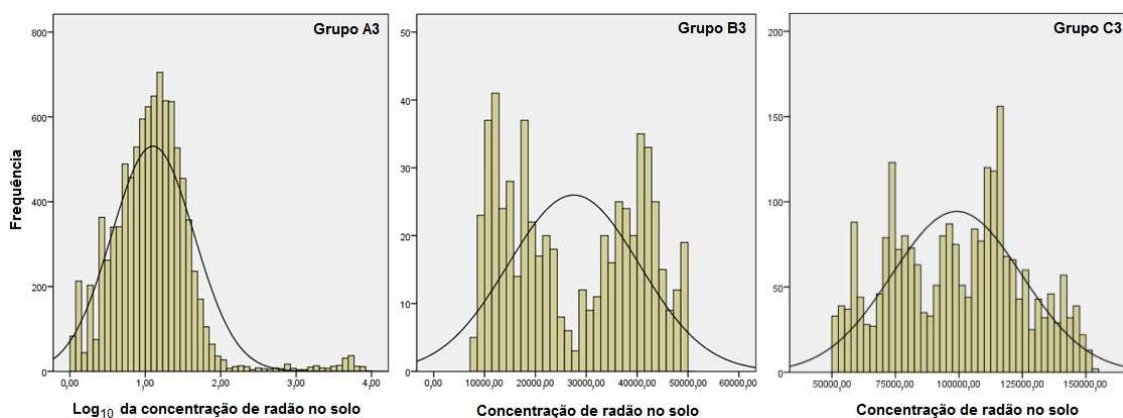


Figura 4.16 – Histogramas dos dados da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3: Grupo A3 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo inferiores ou iguais a 8000 Bq/m³ (dados log-transformados), Grupo B3 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo compreendidos entre 8000 Bq/m³ e 50 000 Bq/m³ e Grupo C3 - Valores de concentração de ^{222}Rn no solo superiores a 50 000 Bq/m³.

Tabela 4.11 – Coeficientes de correlação de *Pearson* das variáveis analisadas durante o período em estudo.

Grupo	Variáveis	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$	^{222}Rn	Humidade relativa do ar	Temperatura do ar	Pressão barométrica	Fluxo de CO_2	Pluviosidade	Temperatura do solo	Humidade do solo	Velocidade do vento
A3	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$	1,000		0,131	0,113	0,135	0,250	-0,141	0,419	-0,327	-0,351
	Humidade relativa do ar	0,131		1,000	-0,361	-0,168	-0,021	0,165	-0,084	0,217	-0,126
	Temperatura do ar	0,113		-0,361	1,000	0,361	-0,174	-0,096	0,563	-0,570	0,033
	Pressão barométrica	0,135		-0,168	0,361	1,000	-0,007	-0,191	0,387	-0,608	-0,270
	Fluxo de CO_2	0,250		-0,021	-0,174	-0,007	1,000	-0,134	0,267	-0,029	-0,192
	Pluviosidade	-0,141		0,165	-0,096	-0,191	-0,134	1,000	-0,134	0,352	0,170
	Temperatura do solo	0,419		-0,084	0,563	0,387	0,267	-0,134	1,000	-0,653	-0,244
	Humidade do solo	-0,327		0,217	-0,570	-0,608	-0,029	0,352	-0,653	1,000	0,297
	Velocidade do vento	-0,351		-0,126	0,033	-0,270	-0,192	0,170	-0,244	0,297	1,000
B3	^{222}Rn		1,000	-0,220	-0,016	0,072	0,002	-0,016	0,438	-0,241	-0,064
	Humidade relativa do ar		-0,220	1,000	-0,467	-0,205	-0,019	0,172	-0,089	0,249	-0,093
	Temperatura do ar		-0,016	-0,467	1,000	0,316	-0,173	-0,092	0,594	-0,553	0,033
	Pressão barométrica		0,196	-0,293	-0,148	1,000	0,002	-0,202	0,323	-0,612	-0,280
	Fluxo de CO_2		0,114	-0,144	-0,091	0,002	1,000	-0,141	0,232	-0,024	-0,231
	Pluviosidade		0,010	0,119	0,088	-0,202	-0,141	1,000	-0,121	0,342	0,164
	Temperatura do solo		0,048	-0,037	0,523	0,323	0,232	-0,121	1,000	-0,639	-0,246
	Humidade do solo		-0,016	0,066	-0,581	-0,612	-0,024	0,342	-0,639	1,000	0,297
	Velocidade do vento		-0,282	0,026	0,239	-0,280	-0,231	0,162	-0,246	0,297	1,000
C3	^{222}Rn		1,000	0,135	0,003	-0,444	0,065	0,100	0,332	0,436	0,081
	Humidade relativa do ar		0,135	1,000	-0,315	-0,284	0,001	0,158	0,143	0,25	-0,187
	Temperatura do ar		0,083	-0,315	1,000	-0,130	-0,275	0,020	0,511	-0,104	0,283
	Pressão barométrica		-0,444	-0,284	-0,130	1,000	0,188	-0,186	-0,308	-0,572	-0,292
	Fluxo de CO_2		0,065	0,001	-0,275	0,188	1,000	-0,202	-0,283	0,056	-0,278
	Pluviosidade		0,100	0,158	0,020	-0,186	-0,202	1,000	0,060	0,241	0,099
	Temperatura do solo		0,332	0,143	0,511	-0,308	-0,283	0,060	1,000	-0,243	0,036
	Humidade do solo		0,436	0,250	-0,104	-0,572	0,056	0,241	-0,243	1,000	0,243
	Velocidade do vento		0,081	-0,187	0,263	-0,292	-0,278	0,099	0,036	0,243	1,000

A análise de regressão múltipla aplicada aos dados do grupo A3 identificou a temperatura do solo, a velocidade do vento, a humidade relativa do ar e o fluxo de CO_2 como as variáveis com significância estatística ($P < 0,01$) no modelo com maior poder explicativo para a variação da concentração de radão no solo (Tabela 4.12). No que se refere aos coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 4.11), estes estão em concordância, de um modo geral, com os resultados obtidos pela regressão nomeadamente no que se refere às variáveis temperatura do solo, velocidade do vento e fluxo de CO_2 , no entanto, a humidade do solo surge como tendo uma maior correlação com os dados log-transformados da concentração de radão no solo relativamente à variável humidade relativa do ar. No modelo aplicado, estas variáveis explicam cerca de 27 % das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no solo de acordo com o R^2 ajustado obtido. As variáveis temperatura do solo, humidade relativa do ar e fluxo de CO_2 exercem uma influência positiva nos dados log-transformados da concentração de radão no solo, enquanto que, a velocidade do vento exerce uma influência negativa.

Tabela 4.12 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn log-transformados inferiores ou iguais a 8000 Bq/m³ (Grupo A3).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-0,44	0,05		-8,26	0,00		
Temperatura do solo	0,04	0,00	0,34	35,75	0,00	0,176	1,14
Velocidade do vento	-0,13	0,01	-0,23	-23,97	0,00	0,065	1,11
Humidade relativa do ar	0,01	0,00	0,13	14,62	0,00	0,017	1,03
Fluxo de CO ₂	0,01	0,00	0,12	12,40	0,00	0,012	1,10

Variável dependente: Log₁₀ da concentração de ^{222}Rn no solo ($\leq 8000 \text{ Bq/m}^3$)

Número total de observações: 8994

Somatório do R^2 Ajustado: 0,270

Teste F: 832,85 0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A análise de regressão múltipla foi aplicada aos dados do grupo B3 não com o intuito de construir um modelo explicativo para a variação da concentração de radão uma vez que, estes dados não seguem uma distribuição que se aproxime da normal (Figura 4.16), mas na simples tentativa de reconhecer a influência de algum dos parâmetros em análise. Neste caso, as variáveis com significância estatística ($P < 0,01$) são a velocidade do vento e a humidade relativa do ar (Tabela 4.13). Estas variáveis são também as que apresentam maior correlação com os dados de concentração de radão de acordo com os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 4.11). De acordo com o modelo seleccionado estas variáveis explicam 12 % do total das variações da concentração de radão no solo (R^2 ajustado), influenciando de forma negativa a variação da concentração de radão no solo.

Tabela 4.13 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn compreendidos entre 8000 e 50 000 Bq/m³ (Grupo B3).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	57467,06	4839,32			0,00		
Velocidade do vento	-3215,16	574,64	-0,28	-5,60	0,00	0,077	1,00
Humidade relativa do ar	-246,12	56,97	-0,21	-4,32	0,00	0,043	1,00

Variável dependente: Concentração de ^{222}Rn no solo (8000 a 50 000 Bq/m³)

Número total de observações: 363

Somatório do R^2 Ajustado: 0,120

Teste F: 25,64

0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

Relativamente aos dados do grupo C3, ao aplicar a análise de regressão múltipla foi possível verificar que a humidade do solo, temperatura do solo e o fluxo de CO_2 são as variáveis com significância estatística ($P < 0,01$) no modelo aplicado (Tabela 4.14). Os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 4.11) estão, de um modo geral, em concordância com estes resultados, nomeadamente no que se refere às variáveis humidade do solo e temperatura do solo, no entanto a pressão barométrica surge como tendo uma maior correlação com as variações da concentração de radão no solo relativamente à variável fluxo de CO_2 . No modelo aplicado estas variáveis são responsáveis por 50,4 % (R^2 ajustado) das variações da concentração de radão no solo. As variáveis fluxo de CO_2 e humidade do solo exercem uma influência positiva, enquanto que, a temperatura do solo apresenta um comportamento de função quadrática. A temperatura do solo influencia de modo negativo a concentração de radão no solo para temperaturas inferiores a 24,2 °C, valor a partir do qual passa a exercer uma influência positiva. Como resultado do seu comportamento de função quadrática, os valores de VIF para a temperatura do solo são superiores a 10, sendo essa multicolinearidade aceitável, pelo motivo anteriormente descrito.

Tabela 4.14 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para valores de concentração de ^{222}Rn superiores a 50 000 Bq/m³ (Grupo C3).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R ² ajustado	VIF
Constante	1122000,00	63947,50		17,55	0,00		
(Temperatura do solo) ²	1972,03	101,69	10,11	19,39	0,00	0,209	1223,00
Humidade do solo	4049,44	100,11	0,75	40,45	0,00	0,188	1,56
Fluxo de CO ₂	2317,11	134,92	0,28	17,18	0,00	0,065	1,21
Temperatura do solo	-95386,87	5188,76	-9,51	-18,38	0,00	0,042	1204,00
Variável dependente: Concentração de ^{222}Rn no solo (> 50 000 Bq/m ³)							
Número total de observações: 2231							
Somatório do R ² Ajustado: 0,504							
Teste F: 568,457					0,00**		

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A análise espectral foi aplicada à série temporal da concentração de radão no solo no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 13 de Maio de 2009 e 20 de Novembro de 2010. O período seleccionado corresponde ao conjunto de dados que apresenta menos interrupções horárias durante a sua aquisição. O espectro resultante não permitiu identificar variações cíclicas diárias (Figura 4.17), no entanto, o espectrograma calculado permitiu verificar a existência de um comportamento sazonal, meses de Verão *versus* meses de Inverno (Figura 4.18 a) e b)). O espectrograma associado aos meses de Inverno permitiu identificar variações cíclicas da concentração de radão no solo associadas a um ciclo por dia. Para confirmar este comportamento, foi efectuado o cálculo do espectro em separado para os meses de Verão (Figura 4.19), onde não foi possível identificar variações cíclicas, e para os meses de Inverno (Figura 4.20), que permitiu a confirmação das variações evidenciadas pelo espectrograma. O período invernal compreende os meses de Novembro a Abril e esta divisão foi efectuada tendo em atenção: (a) o espectrograma obtido para a concentração de radão no solo e (b) o ano hidrológico (Marques *et al.*, 2008). Uma divisão anual semelhante foi também observada para os dados de fluxo de CO₂ registados neste local de amostragem (Viveiros, 2010). Os dados em análise neste período de Inverno correspondem a dados pertencentes ao grupo A3 (≤ 8000 Bq/m³).

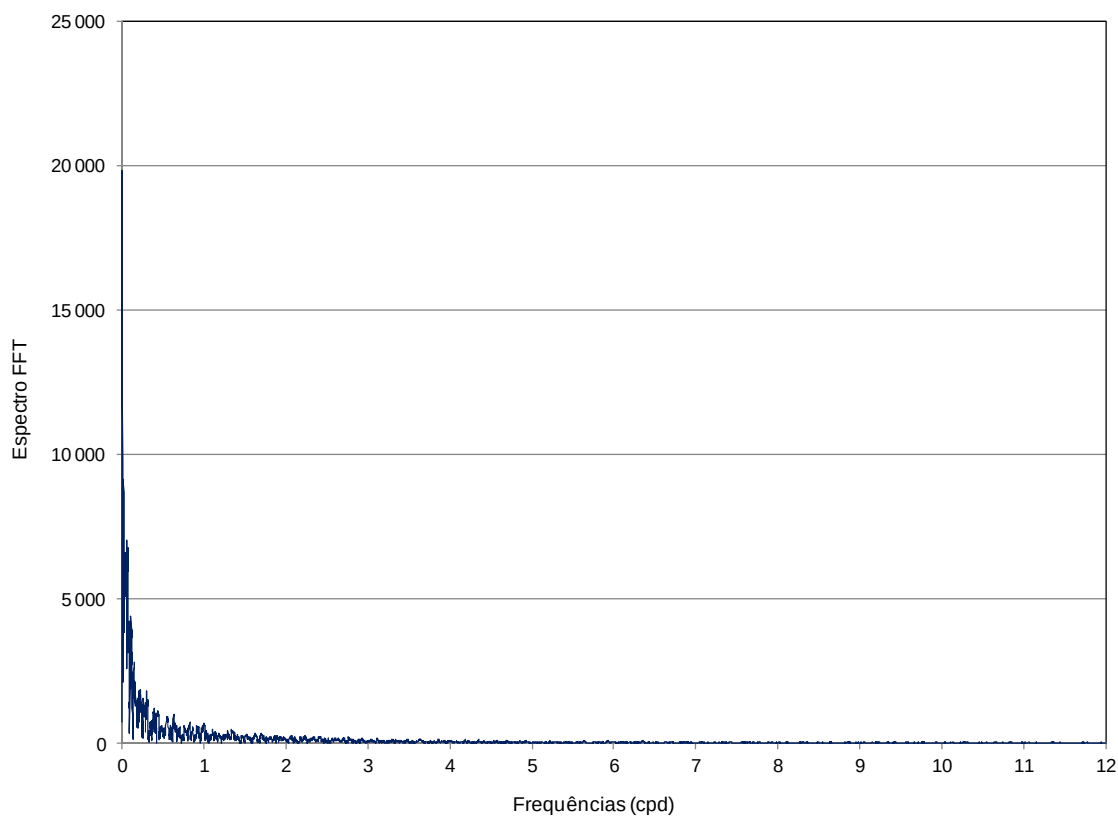


Figura 4.17 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 13 de Maio de 2009 e 20 de Novembro de 2010.

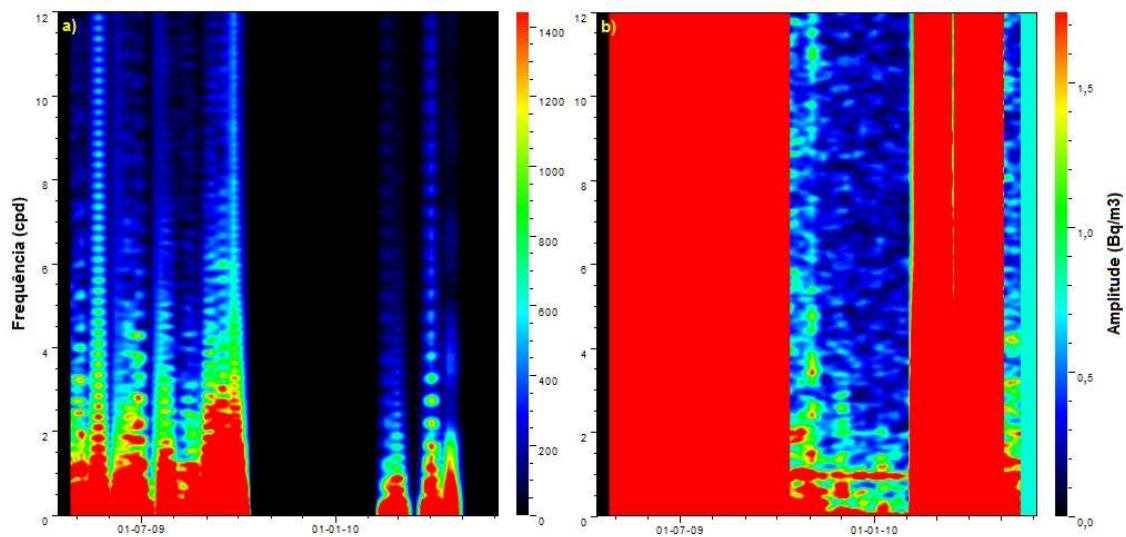


Figura 4.18 – Espectrograma da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 13 de Maio de 2009 e 20 de Novembro de 2010: a) Verão e b) Inverno.

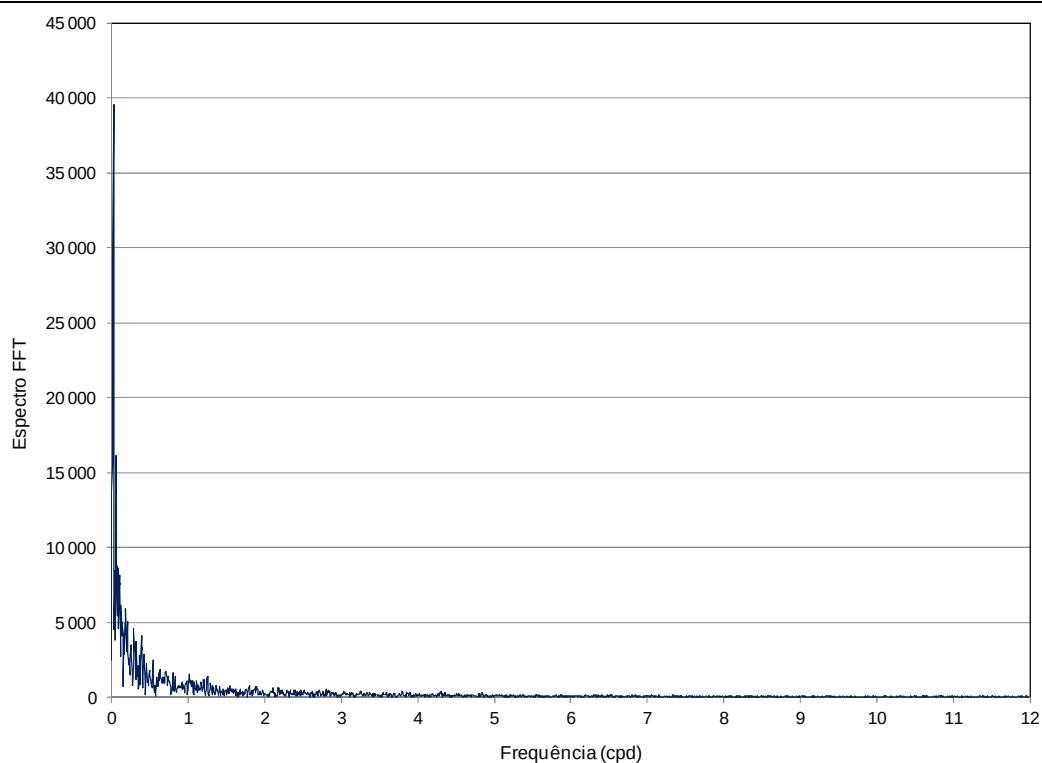


Figura 4.19 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 13 de Maio e 31 de Outubro de 2009 (Verão).

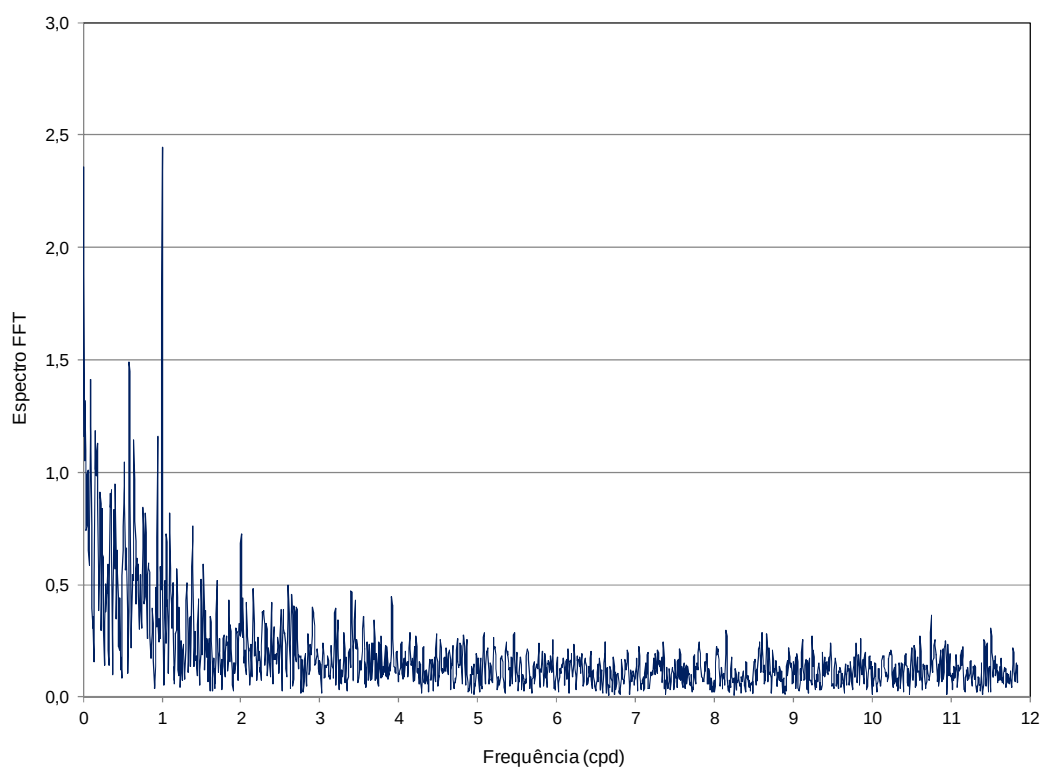


Figura 4.20 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 1 de Novembro de 2009 e 25 de Abril de 2010 (Inverno).

O coeficiente de correlação e o atraso entre as variações da concentração de radão no solo para os meses de Inverno e dos parâmetros meteorológicos em análise (temperatura e humidade relativa do ar, temperatura e humidade do solo, pressão barométrica, pluviosidade e velocidade do vento) foram calculados para as frequências associadas a um ciclo por dia, através da aplicação da função “*Transfer*”, tendo sido considerados apenas os coeficientes de correlação superiores a 0,5 (os espectros destas variáveis podem ser consultados no Anexo IV). Nesta análise a temperatura do ar, a humidade relativa do ar e a velocidade do vento (Tabela 4.15) surgem como os parâmetros meteorológicos com correlação superior a 0,5 com a concentração de radão no solo associada a um ciclo por dia. A concentração de radão no solo apresenta um atraso de aproximadamente 12 horas relativamente à temperatura do ar, de 9 horas relativamente à velocidade do vento e de 3 horas no que diz respeito à humidade relativa do ar.

Tabela 4.15 – Correlação e atraso entre a concentração de ^{222}Rn no solo e os parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR2, para o período de amostragem compreendido entre 1 de Novembro de 2009 e 25 de Abril de 2010 (Inverno).

Concentração de ^{222}Rn no solo (Bq/m^3)	Correlação (r)	Atraso (h)
Outras Variáveis	1 cpd	
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	0,95	~ 12
Humidade relativa do ar (%)	0,81	~ 3
Velocidade do vento (m/s)	0,65	~ 9

Uma vez que a série temporal de dados, neste ponto de amostragem, se estende por um período superior a um ano foi possível ainda fazer a análise das baixas frequências que permitem detectar comportamentos sazonais. A análise do espectro obtido (Figura 4.21) permitiu identificar variações periódicas associadas a 340, 48, 25 e 15 dias.

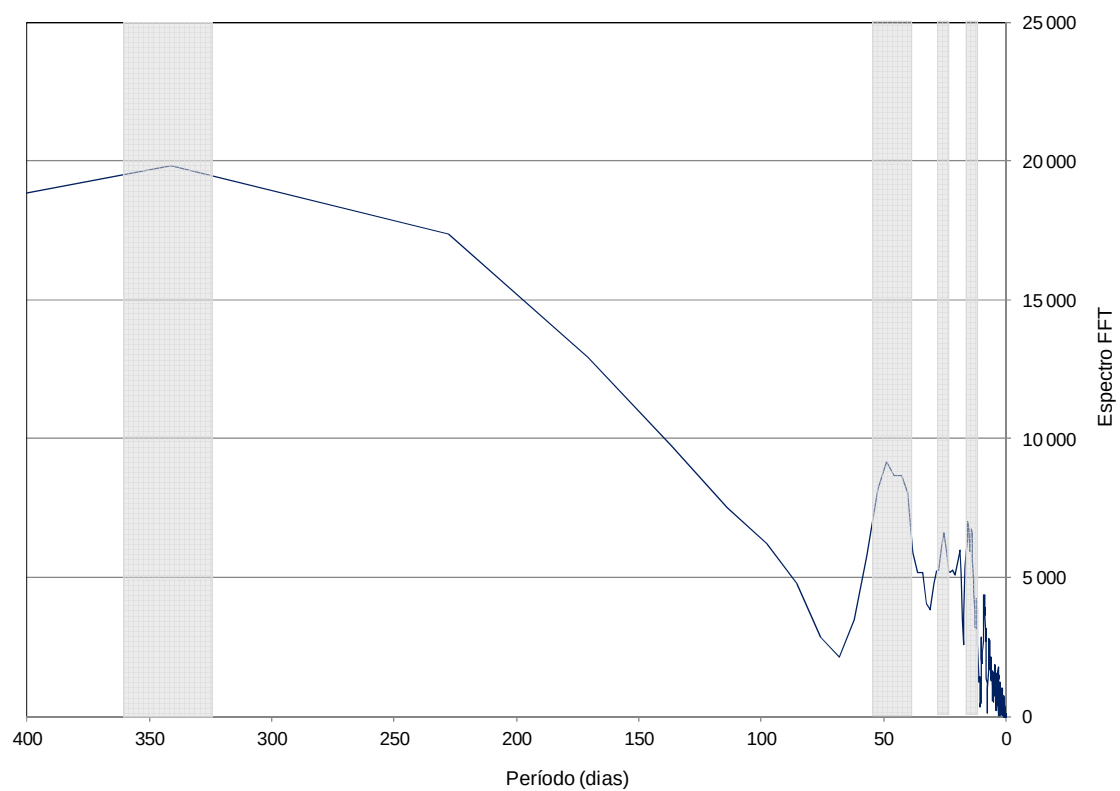


Figura 4.21 – Espectro de amplitudes de baixas frequências da concentração de ^{222}Rn no solo no ponto de amostragem 3. A sombreado cinza estão assinalados os incrementos associados a 340, 48, 25 e 15 dias.

4.5. Discussão

4.5.1. Análise de Regressão Múltipla

4.5.1.1. Modelos, Dados Previstos e Resíduos

A aplicação da análise de regressão múltipla, aos diversos grupos das séries de dados obtidos, permitiu a construção de uma equação que corresponde ao modelo proposto para cada grupo de dados assim como a projecção gráfica das variações temporais da concentração de radão prevista por esse modelo e os resíduos calculados pela diferença entre as concentrações de radão observadas e as previstas. Os resíduos correspondem às variações da concentração de radão que não podem ser explicadas pelo modelo e que podem estar relacionados com fenómenos de profundidade ou com parâmetros que não estão a ser considerados na análise.

As equações 4.1, 4.2 e 4.3 representam os modelos de regressão propostos para os grupos de dados do ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas.

(4.1) Grupo A1

$$\text{Log}_{10}\left[^{222}\text{Rn}\right] = 4,07 - 0,08 \times H_{\text{solo}} - 0,08 \times T_{\text{solo}}$$

(4.2) Grupo B1

$$\left[^{222}\text{Rn}\right] = 144631,14 - 209,94 \times P_{\text{bar}} - 214,87 \times (T_{\text{solo}})^2 + 1998,03 \times H_{\text{solo}} - 92,07 \times (H_{\text{solo}})^2 + 7859,48 \times T_{\text{solo}}$$

(4.3) Grupo C1

$$\left[^{222}\text{Rn}\right] = -31700,94 - 893,71 \times H_{\text{solo}} + 365,03 \times \text{CO}_{2_fluxo} - 122,27 \times (T_{\text{solo}})^2 + 4249,67 \times T_{\text{solo}}$$

Em que:

H_{solo} - Humidade do solo

T_{solo} - Temperatura do solo

P_{bar} - Pressão barométrica

CO_{2_fluxo} - Fluxo de CO_2

A projecção gráfica dos dados previstos pelo modelo, assim como dos resíduos calculados para estes grupos, podem ser observados nas figuras 4.22 e 4.23. Na figura 4.23 estão representados os modelos de regressão das equações 4.2 ($8000 < ^{222}\text{Rn} \leq 16\,000 \text{ Bq/m}^3$) e 4.3 ($^{222}\text{Rn} > 16\,000 \text{ Bq/m}^3$). No entanto, a concentração de radão prevista, assim como os resíduos referentes a cada modelo em separado, podem ser consultados no Anexo V.

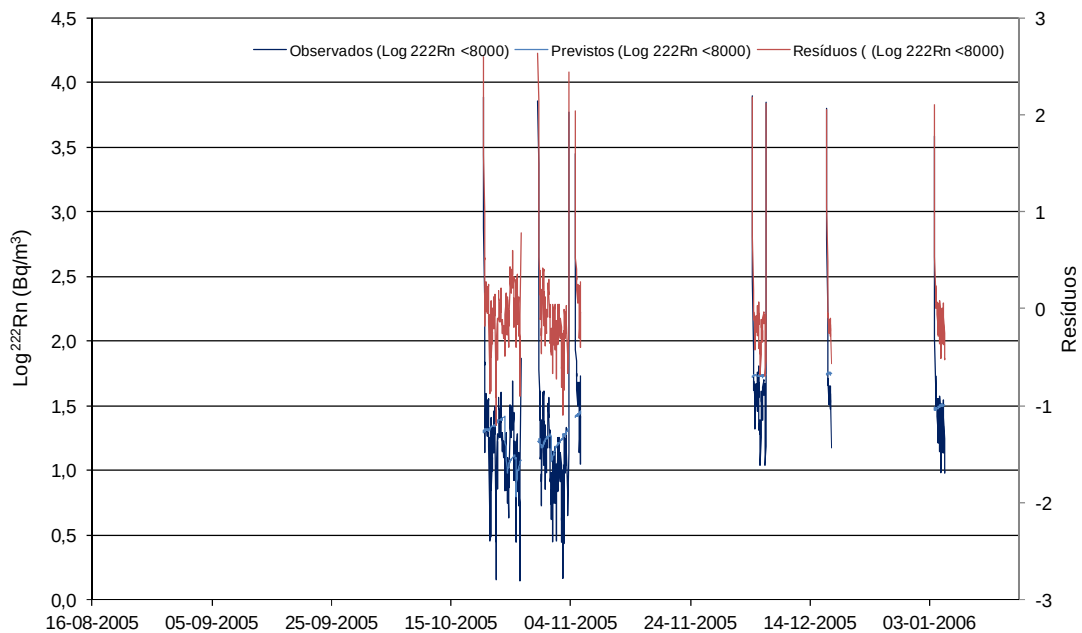


Figura 4.22 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo log-transformados observados no grupo A1, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.1 e dos resíduos calculados.

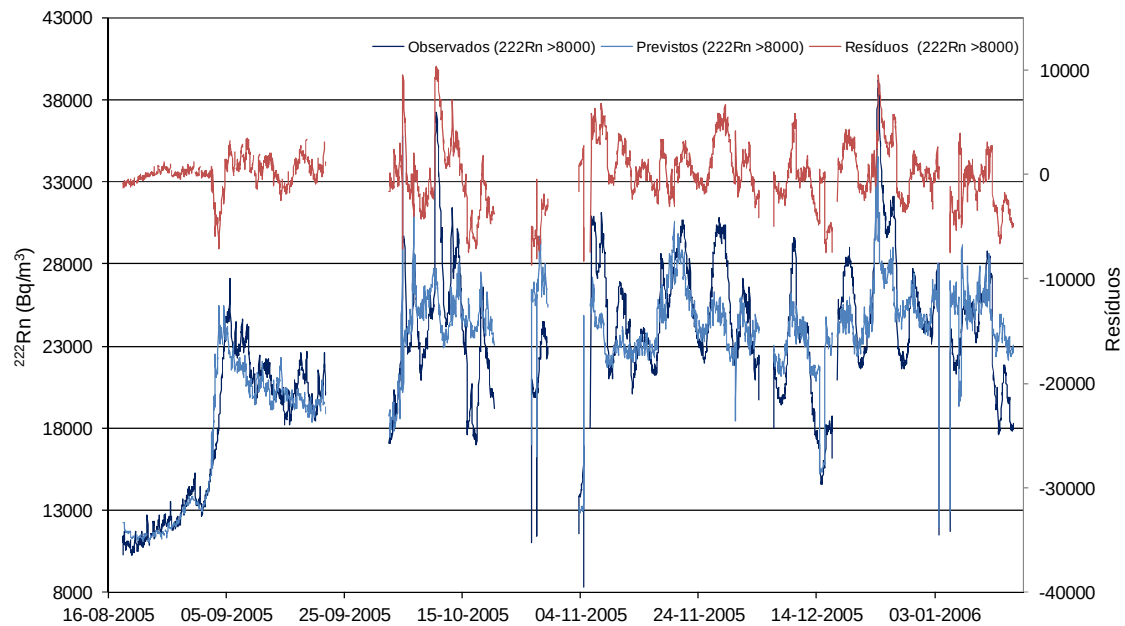


Figura 4.23 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo observados nos grupo B1 e C1, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.2 para valores de concentração de ^{222}Rn compreendidos entre 8000 e 16 000 Bq/m^3 e da equação 4.3 para valores de concentração de ^{222}Rn superiores a 16 000 Bq/m^3 e dos respectivos resíduos calculados.

Relativamente à aplicação da análise de regressão múltipla aos dados obtidos no ponto de amostragem 2, localizado junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas, tal como já referido anteriormente, esta não teve como objectivo principal a construção de um modelo explicativo para a variação da concentração de radão, mas consiste numa simples tentativa de reconhecer a influência de algum dos parâmetros em análise.

Os modelos de regressão propostos para os grupos de dados A3 e C3 do ponto de amostragem 3, localizado nas imediações do campo fumarólico da Lagoa das Furnas, podem ser traduzidos pelas equações 4.4 e 4.5. Tal como referido anteriormente, a aplicação da análise de regressão múltipla aos dados do grupo B3 teve como principal objectivo a tentativa de identificar variáveis que influenciem as variações da concentração de radão e não a construção de um modelo, uma vez que estes dados não seguem uma distribuição próxima da normal. A projecção gráfica dos dados previstos nos modelos, assim como dos resíduos calculados para estes grupos, podem ser observados nas figuras 4.24 e 4.25.

(4.4) Grupo A3

$$\text{Log}_{10}\left[^{222}\text{Rn}\right] = -0,44 + 0,04 \times T_{\text{solo}} - 0,13 \times V_{\text{vento}} + 0,01 \times RH_{\text{ar}} + 0,01 \times CO_{2_fluxo}$$

(4.5) Grupo C3

$$\left[^{222}\text{Rn}\right] = 1122000 + 1972,03 \times (T_{\text{solo}})^2 + 4049,44 \times H_{\text{solo}} - 2317,11 \times CO_{2_fluxo} - 95386,87 \times T_{\text{solo}}$$

Em que:

T_{solo} - Temperatura do solo

V_{vento} - Velocidade do vento

RH_{ar} - Humidade relativa do ar

CO_{2_fluxo} - Fluxo de CO_2

H_{solo} - Humidade do solo

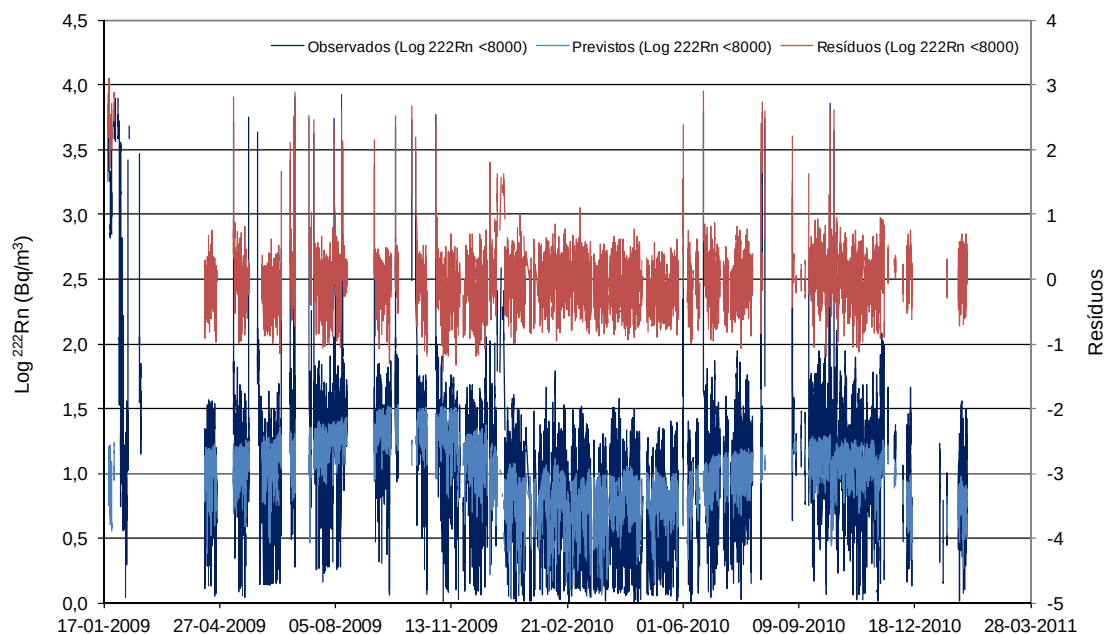


Figura 4.24 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo log-transformados observados no grupo A3, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.4 e dos resíduos calculados.

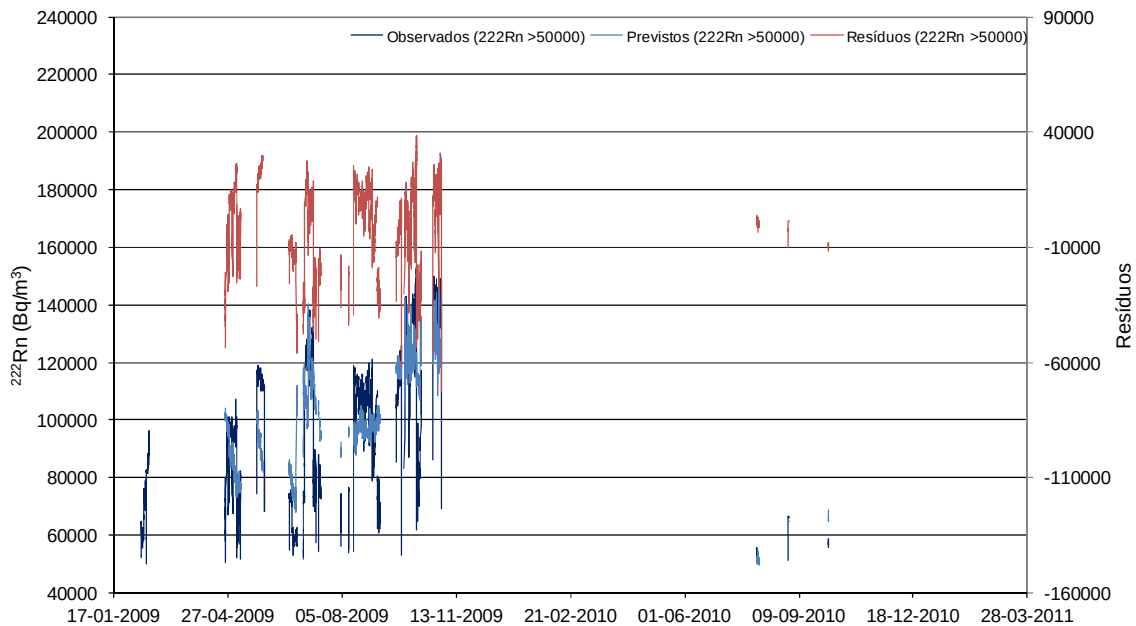


Figura 4.25 – Variação temporal dos valores de concentração de ^{222}Rn no solo observados no grupo C3, dos valores previstos pelo modelo de regressão da equação 4.5 e dos respectivos resíduos calculados.

4.5.1.2. Grupos A – Valores Baixos de Concentração de ^{222}Rn

Os modelos aplicados aos grupos de dados A, isto é, ao conjunto de dados log-transformados referentes a concentrações de radão no solo inferiores ou iguais a 8000 Bq/m^3 , para os pontos de amostragem 1, 2 e 3 permitiram explicar entre 15,8 e 61,5 % das variações dos dados de radão obtidos e verificar que a temperatura do solo é a variável independente comum aos três modelos. Enquanto que, no modelo referente ao ponto de amostragem 1 localizado no jardim do Centro Termal das Furnas, esta variável tem uma influência negativa, nos pontos de amostragem 2 e 3 esta variável passa a ter uma influência positiva. Este facto pode estar associado à localização do ponto de amostragem 1 numa zona sem anomalia térmica, enquanto que, os pontos de amostragem 2 e 3, estando localizados nas imediações dos campos fumarólicos da Freguesia e da Lagoa das Furnas, respectivamente, estão sob a influência de anomalias térmicas. A temperatura do solo no ponto de amostragem 1 apresenta valores médios de $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e máximos de $22,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tabela 4.1), no ponto de amostragem 2 os valores médios deste parâmetro correspondem a $27,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e os

valores máximos a 30,3 °C (Tabela 4.6) e no ponto de amostragem 3 os valores médios de temperatura do solo correspondem a 21,2 °C e os máximos a 29,8 °C (Tabela 4.10), ou seja, os valores médios da temperatura do solo nos pontos de amostragem 2 e 3 são respectivamente superiores ou muito próximos dos valores de temperatura do solo máximos no ponto de amostragem 1. Nos pontos de amostragem 2 e 3 a temperatura do solo surge precisamente como a variável independente com maior poder explicativo nos modelos, explicando 50,5 % e 17,6 %, respectivamente, do total das variações da concentração de radão, enquanto que, no modelo do ponto de amostragem 1 essa variável explica cerca de 3,2 % da variação deste gás (Tabela 4.16).

Tabela 4.16 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados dos grupos A.

Grupo	Variáveis	Influência	Poder explicativo (%)
A1	Humidade do solo	-	12,6
	Temperatura do solo	-	3,2
	Poder explicativo total		15,8
	Número de observações		415
A2	Temperatura do solo	+	50,5
	Humidade do solo	+	7,1
	Velocidade do vento	+	3,9
	Poder explicativo total		61,5
	Número de observações		161
A3	Temperatura do solo	+	17,6
	Velocidade do vento	-	6,5
	Humidade relativa do ar	+	1,7
	Fluxo de CO ₂	+	1,2
	Poder explicativo total		27,0
	Número de observações		8994

Estes conjuntos de dados compreendem valores de concentração de radão baixos quando comparados com os restantes grupos de dados de cada ponto de amostragem. No que se refere aos grupos A1 e A2 estes valores poderão ser resultado de problemas de ordem técnica no funcionamento do detector uma vez que, no que diz respeito ao grupo A1, o modelo apenas explica 15,8 % do total das variações observadas e relativamente ao grupo A2, apesar do poder explicativo do modelo ser bastante superior 61,5 %, o número de casos válidos introduzidos no modelo é de apenas 161 pelo facto do detector de radão ter sido afectado pelas elevadas concentrações de sulfureto de hidrogénio presentes neste ponto de monitorização. Neste trabalho optou-se por incluir estes dados na análise uma vez que, nesta fase não foi possível confirmar esta hipótese. Esta poderá ser também a explicação para os valores de concentração de radão baixos observados no grupo A3, no entanto, o facto: (a) destes valores baixos se manterem por períodos prolongados de tempo, (b) do modelo aplicado explicar cerca de 27 % da variação dos dados log-transformados da concentração de radão e ter um número de casos válidos bastante elevado (8994), (c) deste conjunto de dados ser influenciado de forma positiva pelo fluxo de CO_2 evidenciando a possibilidade deste último estar a transportar o radão para a superfície e (d) da projecção gráfica dos dados de radão log-transformados evidenciar uma variação sazonal, apresentando valores mais elevados nos meses de Verão do que no período invernal (Figura 4.24), poderão indiciar que as diminuições da concentração de radão neste ponto de amostragem possam estar associadas a outra origem como, por exemplo, uma acção conjunta da variação sazonal da temperatura (Figuras 4.26) e da humidade do solo (Figura 4.27). Neste caso, o incremento da temperatura do solo nos meses de Verão iria provocar um incremento da emissão de radão dos grãos minerais do solo e das rochas e a consequente diminuição da humidade do solo permitiria o transporte do gás emanado até à superfície. Os elevados valores de humidade do solo observados no ponto de amostragem 3 relativamente aos observados nos restantes pontos de amostragem (Tabelas 4.1 e 4.6), podem ser resultado, por um lado, da forte precipitação registada neste local, atingindo valores máximos de 35 mm/h (Tabela 4.10) e por outro, da proximidade ao nível de água da lagoa. Deste modo, no período invernal a presença de água no solo preenche os poros impedindo assim a passagem do radão. Um

comportamento sazonal semelhante ao anteriormente descrito, foi observado em medições efectuadas na falha de Amer, em Espanha (Font *et al.*, 2008).

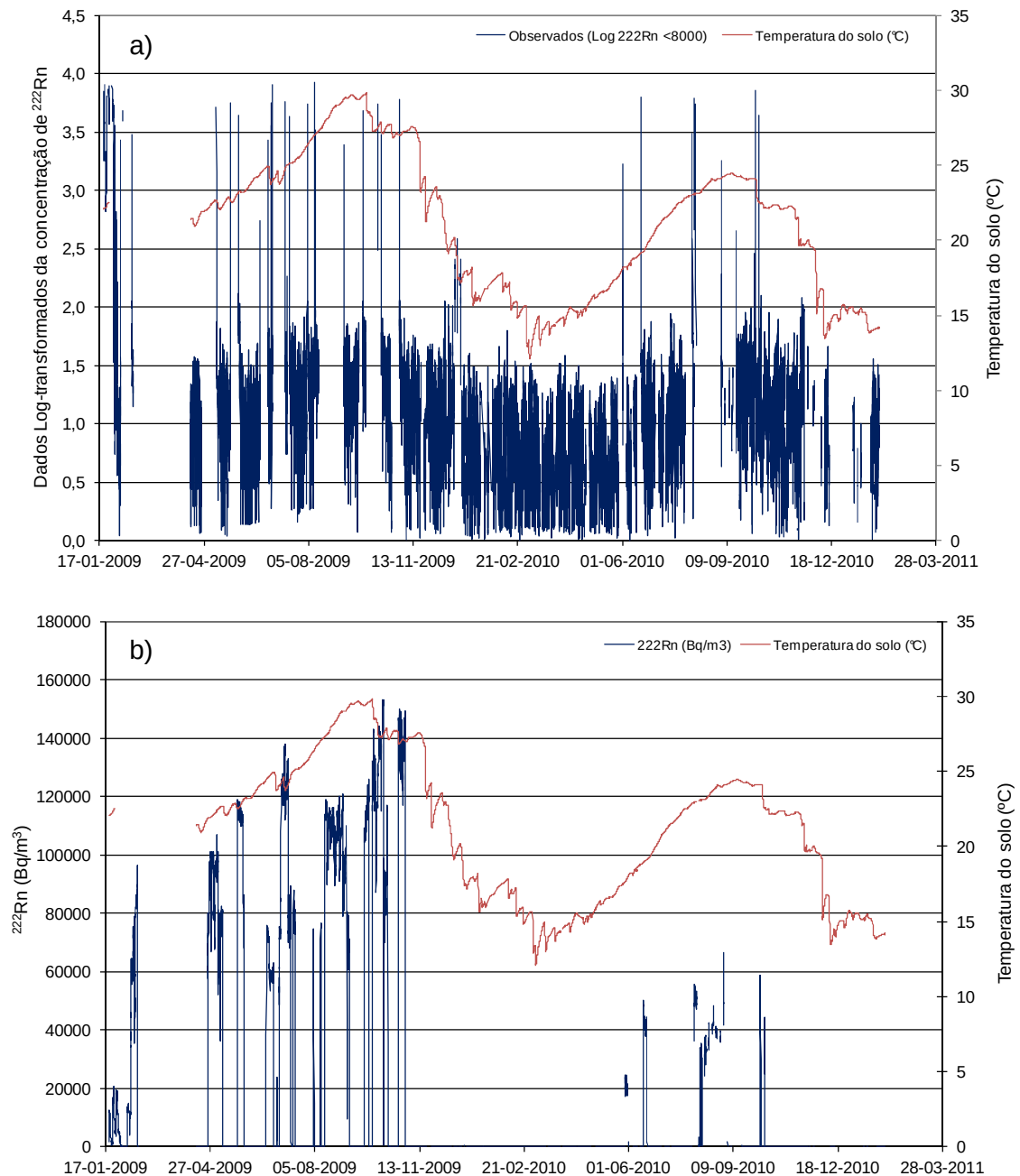


Figura 4.26 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura do solo no ponto de amostragem 3: a) dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn do grupo A3 e b) dados totais da concentração de ^{222}Rn no ponto de amostragem 3.

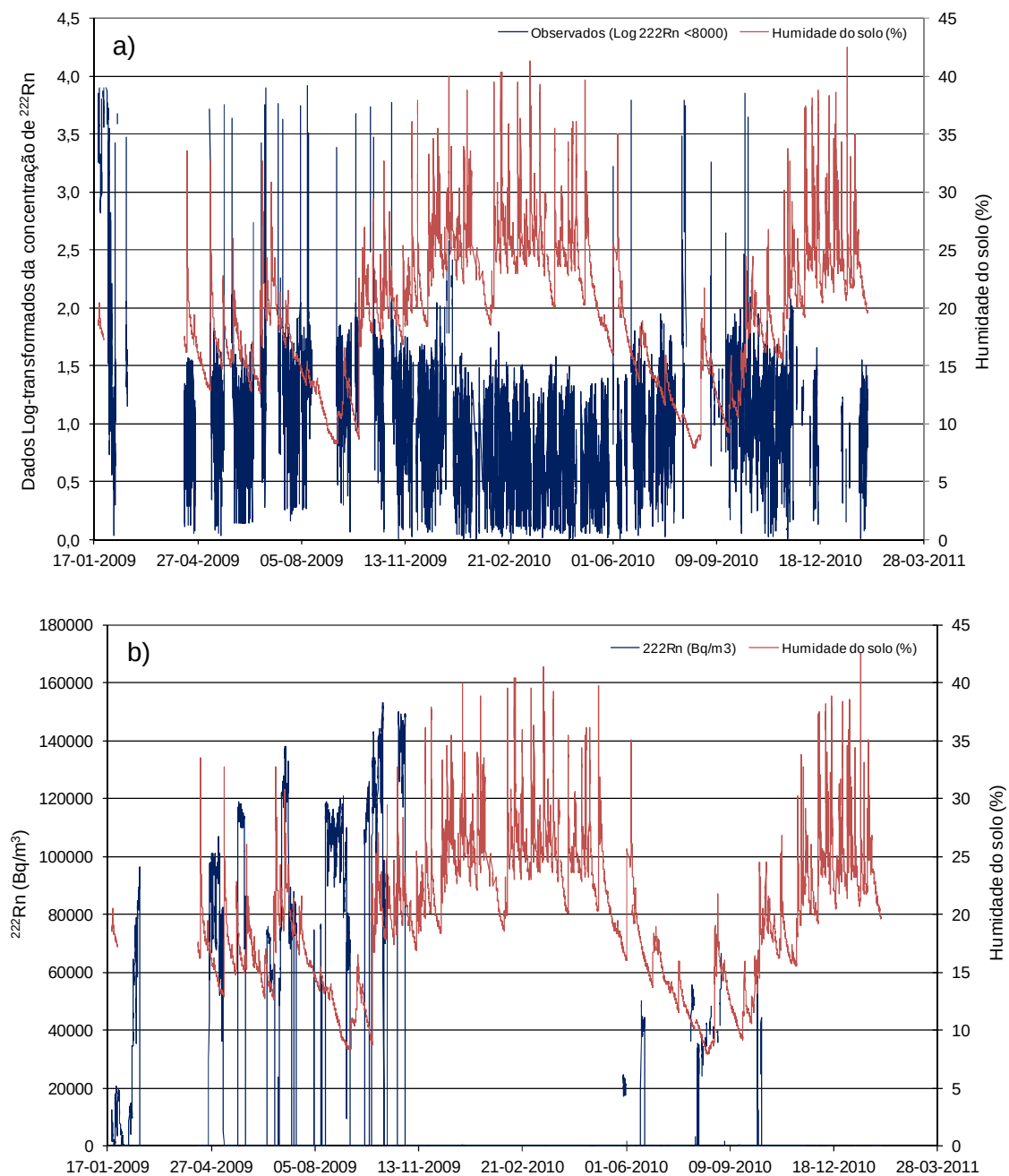


Figura 4.27 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da humidade do solo no ponto de amostragem 3: a) dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn do grupo A3 e b) dados totais da concentração de ^{222}Rn no ponto de amostragem 3.

4.5.1.3. Grupos B – Valores Intermédios de Concentração de ^{222}Rn

Os modelos aplicados aos grupos de dados B, ou seja, ao conjunto de dados de concentração de radão compreendido entre os 8000 e os 16 000 Bq/m³ para os dados do grupo B1 e entre os 8000 e os 50 000 Bq/m³ para os dados do grupo B3, permitiram explicar, respectivamente, cerca de 73,6 % e 12 % do total das variações da concentração de radão e constatar que não existem variáveis comuns na explicação da variação da concentração de radão no solo nestes pontos de amostragem para estes grupos de dados (Tabela 4.17).

Tabela 4.17 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados dos grupos B.

Grupo	Variáveis	Influência	Poder explicativo (%)
B1	Pressão barométrica	-	32,3
	(Temperatura do solo) ²	-	31,0
	Humidade do solo	+	4,7
	(Humidade do solo) ²	-	3,8
	Temperatura do solo	+	1,8
	Poder explicativo total		73,6
	Número de observações		373
B3	Velocidade do vento	-	7,7
	Humidade relativa do ar	-	4,3
	Poder explicativo total		12,0
	Número de observações		363

Estes grupos de dados estabelecem a ligação entre os grupos de dados com valores de concentração de radão baixos e os valores elevados. No que diz respeito ao grupo B1 estes dados poderão (a) corresponder à fase de recuperação de potenciais problemas do detector, (b) ser resultado de diminuições efectivas da concentração de radão neste ponto de amostragem em função da influência dos diversos parâmetros em análise ou (c) ser resultado de diminuições efectivas da

concentração de radão neste ponto de amostragem devido à influência de uma outra variável que não está a ser considerada nesta análise. Relativamente ao conjunto de dados do grupo B3 não foi possível obter um histograma que se aproximasse de uma distribuição normal, em virtude do conjunto de dados ser dominado pelos valores mais baixos e pelos mais elevados de concentração de radão (Figura 4.16).

4.5.1.4. Grupos C – Valores Elevados de Concentração de ^{222}Rn

Os modelos aplicados aos dados dos grupos C, que correspondem a concentrações de radão superiores a 16 000 Bq/m³ para os grupos C1 e C2 e a concentrações superiores a 50 000 Bq/m³ para os dados do grupo C3, têm uma capacidade explicativa entre 40,5 % e 57,8 % do total das variações da concentração de radão observadas (Tabela 4.18). As variáveis explicativas nos modelos dos grupos C1 e C3 são comuns e correspondem à humidade do solo, à temperatura do solo e ao fluxo de CO₂. Os dados do grupo C2 são influenciados pelas variações da pressão barométrica e da temperatura do ar.

A humidade do solo explica cerca de 19,1 % das variações observadas no conjunto de dados do grupo C1 e 18,8 % no grupo C3 e exerce sobre estes dois conjuntos de dados uma influência positiva. A temperatura do solo, por seu lado, apresenta um comportamento de função quadrática. Para o conjunto de dados do grupo C1, a (temperatura do solo)² e a temperatura do solo explicam, respectivamente, cerca de 4,2 % e 1,4 % do total das variações e apresenta um ponto de estacionaridade aos 17,6 °C, enquanto que, para o conjunto de dados do grupo C3 a (temperatura do solo)² justifica 20,9 % do total das variações e a temperatura do solo cerca de 4,2 % e o ponto de estacionaridade é aos 24,2 °C. Tal como referido para os dados dos grupos A, também neste caso a influência da temperatura do solo diverge de acordo com a localização do ponto de amostragem numa zona com ou sem anomalia térmica (Tabela 4.18). O fluxo de CO₂ exerce uma influência positiva sobre estes dois conjuntos de dados, explicando cerca de 15,8 % das variações dos dados do grupo C1 e 6,5 % dos dados do grupo C3.

Tabela 4.18 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados dos grupos C.

Grupo	Variáveis	Influência	Poder explicativo (%)
C1	Humidade do solo	+	19,1
	Fluxo de CO_2	+	15,8
	(Temperatura do solo) ²	-	4,2
	Temperatura do solo	+	1,4
	Poder explicativo total		40,5
	Número de observações		2495
C2	Pressão barométrica	+	51,0
	Temperatura do ar	+	6,8
	Poder explicativo total		57,8
	Número de observações		152
C3	(Temperatura do solo) ²	+	20,9
	Humidade do solo	+	18,8
	Fluxo de CO_2	+	6,5
	Temperatura do solo	-	4,2
	Poder explicativo total		50,4
	Número de observações		2231

Os grupos de dados C1 e C3 serão representativos das variações da concentração de radão nestes pontos de amostragem, pois os modelos apresentam um poder explicativo de cerca de 40,5 % e de 50,4 %, respectivamente, e um número de casos válidos de 2495 e de 2231, também respectivamente. Ainda no que se refere aos dados do grupo C3 estes poderão ser, à semelhança do descrito para o conjunto de dados A3, resultado de uma acção conjunta da variação sazonal da temperatura (Figuras 4.26) e da humidade do solo (Figura 4.27). Relativamente ao grupo C2, apesar do poder explicativo do modelo ser o mais elevado 57,8 %, o número de casos válidos introduzidos no modelo é de apenas 152 e, tal como referido anteriormente, o

detector de radão foi afectado pelas elevadas concentrações de sulfureto de hidrogénio presentes neste ponto de monitorização.

4.5.1.5. Local 1 – Jardim do Centro Termal das Furnas

No ponto de amostragem 1, os modelos aplicados aos grupos de dados A1, B1 e C1 apresentam um poder explicativo que oscila entre 15,8 % e 73,6 %. Estes modelos apresentam variáveis comuns que correspondem à humidade do solo e à temperatura do solo (Tabela 4.19).

Tabela 4.19 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados do ponto de amostragem 1.

Grupo	Variáveis	Influência	Poder explicativo (%)
A1	Humidade do solo	-	12,6
	Temperatura do solo	-	3,2
	Poder explicativo total		15,8
	Número de observações		415
B1	Pressão barométrica	-	32,3
	(Temperatura do solo) ²	-	31,0
	Humidade do solo	+	4,7
	(Humidade do solo) ²	-	3,8
	Temperatura do solo	+	1,8
	Poder explicativo total		73,6
	Número de observações		373
C1	Humidade do solo	+	19,1
	Fluxo de CO ₂	+	15,8
	(Temperatura do solo) ²	-	4,2
	Temperatura do solo	+	1,4
	Poder explicativo total		40,5
	Número de observações		2495

A humidade do solo exerce uma influência negativa sobre os dados do grupo A1, uma influência positiva no grupo de dados C1 e um comportamento de função quadrática para os dados do grupo B1. No conjunto de dados B1, a humidade do solo exerce uma influência positiva até aos 10,9 %, valor a partir do qual passa a exercer uma influência negativa. Relativamente à temperatura do solo, esta exerce uma influência negativa nos dados do grupo A1 e um comportamento de função quadrática para os dados dos grupos B1 e C1. Para o conjunto de dados B1 a temperatura do solo exerce uma influência positiva até aos 18,3 °C passando a negativa para valores superiores. No que se refere aos dados do grupo C1, esta variável influencia positivamente as variações da concentração de radão no solo até aos 17,6 °C, passando essa influência a negativa para valores de temperatura do solo superiores.

Quando se compara os resultados obtidos neste trabalho com os resultados da aplicação da análise de regressão múltipla considerando como variável independente o fluxo de CO_2 (Viveiros *et al.*, 2008a; Viveiros, 2010), neste ponto de amostragem, verifica-se que, de um modo geral, as variáveis com poder explicativo nestes modelos são semelhantes (humidade do solo, pressão barométrica e temperatura do solo) (Tabela 4.20). No entanto, o modelo aplicado ao fluxo de CO_2 inclui ainda a influência da pluviosidade o que não se verifica nos modelos aplicados à variação da concentração de radão no solo. Tal facto poderá estar associado, por um lado, aos diferentes períodos de aquisição de dados e, por outro, às diferentes metodologias aplicadas, sendo a medição do fluxo de CO_2 efectuada à superfície enquanto que a medição da concentração de radão é efectuada a alguns centímetros de profundidade (80 cm).

Tabela 4.20 – Análise de regressão múltipla do modelo aplicado aos dados obtidos pela estação GFUR1 para o período compreendido entre Agosto de 2003 e Agosto de 2004 (modificado de Viveiros *et al.*, 2008a; Viveiros, 2010).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	5509,84	140,91		39,10	0,00		
Humidade do solo	3,65	0,29	0,13	12,76	0,00	0,259	1,64
Pressão barométrica	-5,05	0,14	-0,30	-36,75	0,00	0,102	1,41
Temperatura do solo	-16,49	0,35	-0,43	-46,74	0,00	0,082	1,16
Pluviosidade	28,50	1,09	0,37	26,10	0,00	0,056	3,39
(Pluviosidade) ²	-0,62	0,06	-0,14	-10,20	0,00	0,006	3,20

Variável dependente: Fluxo de CO_2 no solo

Número total de observações: 8461

Somatório do R^2 Ajustado: 0,505

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

Neste ponto de amostragem, e tal como referido anteriormente, o grupo de dados A1 poderá ser resultado de problemas associados ao funcionamento do detector. Relativamente aos dados dos grupos B1 e C1 é interessante verificar que, no modelo aplicado ao conjunto de dados B1, uma das variáveis que influencia as variações destes dados é a pressão barométrica, enquanto que, no modelo proposto para os dados do grupo C1, esta variável não tem significado estatístico e surge neste modelo a variável fluxo de CO_2 . Infelizmente a aquisição de dados neste ponto de amostragem teve que ser interrompida não permitindo perceber se efectivamente esta situação se manteria ou se as variações da concentração de radão passariam a ser explicadas, nestes dois grupos de dados, pelas variações do fluxo de CO_2 .

4.5.1.6. Local 2 – Campo Fumarólico da Freguesia das Furnas

No ponto de amostragem 2 os modelos aplicados aos grupos de dados A2 e C2 apresentam um poder explicativo que oscila entre 57,8 % e 61,5 %. No entanto o número de casos válidos introduzidos no modelo aplicado ao grupo de dados A2 é de

apenas 161 e ao grupo C2 é de 152. Para além deste facto, os modelos não apresentam variáveis comuns (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados do ponto de amostragem 2.

Grupo	Variáveis	Influência	Poder explicativo (%)
A2	Temperatura do solo	+	50,5
	Humidade do solo	+	7,1
	Velocidade do vento	+	3,9
	Poder explicativo total		61,5
	Número de observações		161
C2	Pressão barométrica	+	51,0
	Temperatura do ar	+	6,8
	Poder explicativo total		57,8
	Número de observações		152

Quando se comparam os resultados obtidos neste trabalho com os resultados da aplicação da análise de regressão múltipla aos dados obtidos pela estação GFUR3 para o período compreendido entre Abril de 2008 e Abril de 2009 (Tabela 4.22), considerando como variável independente o fluxo de CO_2 (Viveiros, 2010), verifica-se que para o modelo aplicado aos dados do grupo A2, as variáveis humidade do solo e temperatura do solo são comuns aos dois modelos. Relativamente ao grupo de dados C2, a variável comum corresponde à temperatura do ar, no entanto, esta variável não exerce o mesmo tipo de influência sobre os conjuntos de dados em análise.

Tabela 4.22 – Análise de regressão múltipla do modelo aplicado aos dados obtidos pela estação GFUR3 para o período compreendido entre 20 de Abril de 2008 e 30 de Abril de 2009 (modificado de Viveiros, 2010).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-323,22	26,85		-12,04	0,00		
Humidade do solo	79,78	1,26	0,62	63,10	0,00	0,292	1,17
Temperatura do solo	9,59	0,31	0,29	30,69	0,00	0,084	1,08
Humidade relativa do ar	-2,64	0,13	-0,22	-20,25	0,00	0,034	1,46
Temperatura do ar	-7,23	0,32	-0,24	-22,46	0,00	0,016	1,43

Variável dependente: Fluxo de CO_2 no solo

Número total de observações: 6923

Somatório do R^2 Ajustado: 0,426

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

Neste ponto de amostragem, e tal como referido anteriormente, os grupos de dados obtidos não permitem a obtenção de um modelo robusto devido ao número reduzido de dados. No caso do grupo B2 não existia um número de casos válidos que permitisse a aplicação desta metodologia. Por este motivo a análise efectuada a estes grupos de dados não é conclusiva.

4.5.1.7. Local 3 – Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas

No ponto de amostragem 3 os modelos aplicados aos grupos de dados A3, B3 e C3 apresentam um poder explicativo que oscila entre 12 % e 51,2 % (Tabela 4.23). Os modelos aplicados aos grupos de dados A3 e B3 apresentam como variáveis explicativas comuns a velocidade do vento e a humidade relativa do ar. A velocidade do vento exerce uma influência negativa nas variações destes dois conjuntos de dados, no entanto, a humidade relativa do ar exerce uma influência positiva no grupo A3 e uma influência negativa no grupo B3. Os modelos aplicados aos dados dos grupos A3 e C3 apresentam a temperatura do solo e o fluxo de CO_2 como variáveis comuns. A temperatura do solo influencia de forma positiva os dados do grupo A3, comportando-se como função quadrática relativamente aos dados do grupo C3,

exercendo uma influência negativa até aos 24,2 °C, passando após este valor a exercer uma influência positiva. O fluxo de CO_2 influencia positivamente estes dois conjuntos de dados.

Tabela 4.23 – Resumo dos resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados do ponto de amostragem 3.

Grupo	Variáveis	Influência	Poder explicativo (%)
A3	Temperatura do solo	+	17,6
	Velocidade do vento	-	6,5
	Humidade relativa do ar	+	1,7
	Fluxo de CO_2	+	1,2
	Poder explicativo total		27,0
	Número de observações		8994
B3	Velocidade do vento	-	7,7
	Humidade relativa do ar	-	4,3
	Poder explicativo total		12
	Número de observações		363
C3	(Temperatura do solo) ²	+	20,9
	Humidade do solo	+	18,8
	Fluxo de CO_2	+	6,5
	Temperatura do solo	-	4,2
	Poder explicativo total		50,4
	Número de observações		2231

Quando se comparam os resultados obtidos neste trabalho com os resultados da aplicação da análise de regressão múltipla aos dados obtidos pela estação GFUR2 para o ano de 2006 (Tabela 4.24), considerando como variável independente o fluxo de CO_2 (Viveiros, 2010), verifica-se que a variável velocidade do vento comum aos modelos aplicados aos grupos A3 e B3 surge também no modelo de regressão aplicado às variações de fluxo de CO_2 . Esta variável apresenta, nestas análises, uma influência negativa quer sobre as variações da concentração de radão, quer sobre as

variações do fluxo de CO_2 . A temperatura do solo surge como a variável comum aos modelos aplicados ao fluxo de CO_2 e dados dos grupos A3 e C3, exercendo uma influência positiva no fluxo de CO_2 e nos dados do grupo A3 e evidenciando comportamento de função quadrática no que se refere ao grupo C3, como anteriormente descrito.

Tabela 4.24 – Análise de regressão múltipla do modelo aplicado aos dados obtidos pela estação GFUR2 durante o ano de 2006 (modificado de Viveiros, 2010).

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-1555,30	120,07		-12,95	0,00		
Temperatura do solo	20,28	0,38	0,68	52,69	0,00	0,191	2,38
Temperatura do ar	-8,17	0,30	-0,33	-26,93	0,00	0,086	2,21
Pressão barométrica	1,41	0,12	0,12	11,73	0,00	0,049	1,51
(Humidade do solo) ²	-0,64	0,03	-1,41	-21,83	0,00	0,033	60,34
Pluviosidade	-5,76	0,81	-0,07	-7,15	0,00	0,024	1,42
Velocidade do vento	-10,92	0,89	-0,12	-12,30	0,00	0,009	1,27
Humidade do solo	26,90	1,20	1,42	22,46	0,00	0,002	57,93

Variável dependente: Fluxo de CO_2 no solo

Número total de observações: 8725

Somatório do R^2 Ajustado: 0,395

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

Neste ponto de amostragem surgem várias dúvidas relativamente à origem dos dados do grupo A3 podendo estes, por um lado, resultar de problemas associados ao funcionamento do detector e por outro, apresentar um comportamento sazonal como resultado da influência de variáveis externas. Esta segunda hipótese ganha alguma importância devido aos factos descritos no ponto 4.5.1.2. Relativamente aos dados dos grupos B3 e C3 é interessante verificar que a influência exercida pela velocidade do vento para o conjunto de dados B3 é substituída no modelo aplicado ao grupo C3 pelas variações de fluxo de CO_2 . Uma vez que a análise de regressão múltipla foi aplicada separadamente aos três grupos de dados as variações sazonais associadas aos diversos parâmetros meteorológicos poderão não ter sido consideradas na sua totalidade nos modelos seleccionados. Por exemplo, o modelo seleccionado para os dados do grupo A3, ao contrário do que se verifica para o modelo aplicado ao conjunto

de dados C3, não inclui a humidade do solo como uma das variáveis com poder explicativo apesar de aparentemente ser esta variável e a temperatura do solo as responsáveis pelas variações sazonais obtidas na concentração de radão neste ponto de amostragem (valores baixos *versus* valores elevados).

4.5.2. Análise Espectral

A análise espectral aplicada às séries temporais de dados obtidos, foi fortemente condicionada pelos reduzidos períodos de amostragem, não sendo mesmo possível aplicá-la aos dados do ponto de amostragem 2. A análise espectral aplicada aos dados do ponto de amostragem 1 não evidenciou comportamentos cíclicos. Assim, serão apenas discutidos os resultados obtidos pela aplicação da análise espectral à série de dados do ponto de amostragem 3. Esta análise permitiu verificar a existência de variações diárias e sazonais, tendo sido identificados incrementos quer na análise de altas frequências, quer na de baixas frequências (Tabela 4.25). As variações diárias da concentração de radão no solo estão associadas a um ciclo por dia observável nos dados obtidos nos meses de Inverno. Este comportamento cíclico associado a um ciclo por dia de séries temporais de radão no solo foi descrito anteriormente, por exemplo, em regiões vulcânicas, no Pico Alto na ilha Terceira (Aumento, 2002), em regiões graníticas em Israel (Steinitz *et al.*, 2007) e em zonas geotermiais no Nepal (Richon *et al.*, 2011).

Tabela 4.25 – Principais frequências identificadas na série temporal da concentração de radão no solo, nos meses de Inverno, no ponto de amostragem 3 e fenómenos com periodicidade semelhante (a) Han e Han, 2002 e referências nele citadas b) Groves-Kirkby *et al.*, 2006; c) Schureman, 1976).

Ponto de amostragem	Periodicidade (dias)	Fenómeno com periodicidade semelhante
3	~ 340	Translação da Terra (~ 365 dias)
	~ 48	Ciclo solar (múltiplo da rotação solar ~ 26 dias) ^{a)}
	~ 25	Ciclo solar (~ 26 dias) ^{a)}
	~ 15	Semi-ciclo lunar (~ 14 dias) ^{b)}
	1	Marés terrestres – Ciclo diário (~ 24 horas) ^{c)}

As variações da concentração de radão no solo apresentam valores mínimos por volta do meio-dia, entre as 12:00 e as 15:00 horas, e valores máximos de madrugada, entre as 24:00 e as 3:00 horas. A análise aplicada correlaciona as frequências associadas a um ciclo por dia da concentração deste gás no solo às variações da temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento. A concentração de radão no solo apresenta uma relação inversa com a temperatura do ar (Figura 4.28) e com a velocidade do vento, apresentando atrasos relativamente aos ciclos destas duas variáveis de 12 e 9 horas, respectivamente. As variações cíclicas diárias da velocidade do vento estão aproximadamente em fase com as variações cíclicas da temperatura do ar. Tal deve-se à ocorrência de variações periódicas da estabilidade atmosférica como resultado do aumento da temperatura durante o dia (Sol). Assim, durante a noite, período em que a temperatura do ar atinge os valores mínimos, a camada limite planetária apresenta uma estratificação estável e consequentemente observam-se incrementos da concentração de radão no solo, enquanto que, pelo contrário, durante o dia, período durante o qual são atingidos os valores máximos, devido aos gradientes de temperatura que se geram (temperatura do ar *versus* temperatura do solo), esta camada da troposfera torna-se instável exibindo turbulência o que contribui para os valores máximos de velocidade do vento no período da tarde e consequentemente para uma diminuição dos valores de concentração de radão no solo (Dai e Dessler, 1999; Singh *et al.*, 2005a).

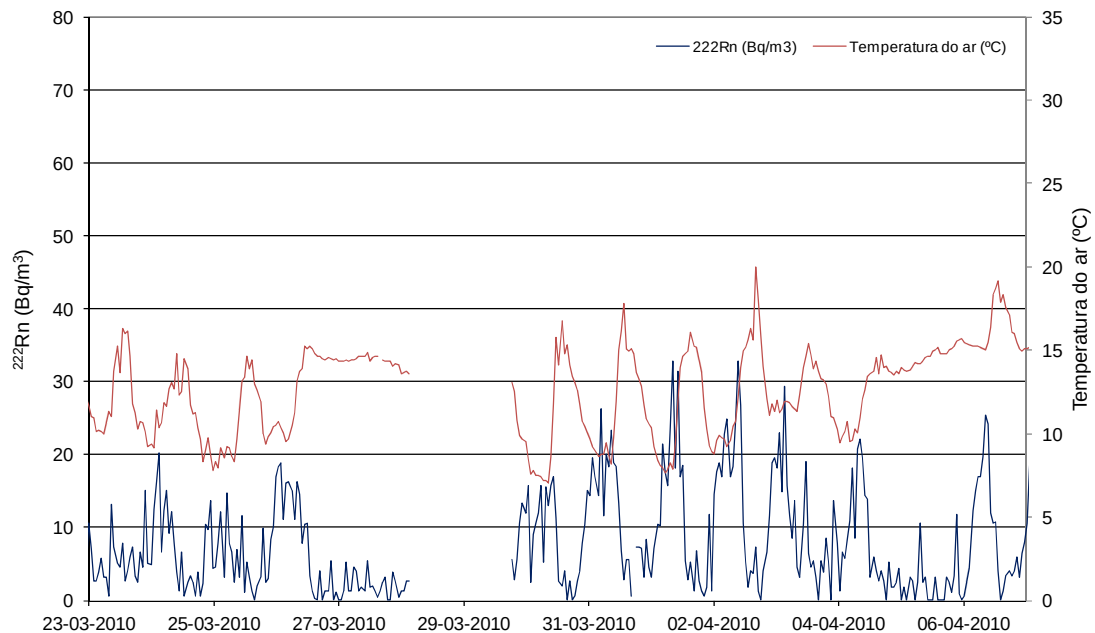


Figura 4.28 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura do ar, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 23 de Março e 7 de Abril de 2010.

Relativamente à humidade relativa do ar a concentração de radão apresenta uma relação directa, com um atraso de 3 horas (Figura 4.29). Estes resultados estão em concordância com os resultados obtidos na análise de regressão múltipla aplicada aos dados do grupo A3 no que se refere às variáveis humidade relativa do ar e velocidade do vento. A variável temperatura do ar não é considerada estatisticamente significativa no modelo de regressão aplicado a este conjunto de dados, resultado provável do facto do conjunto de dados em análise na regressão múltipla e na análise espectral não ser exactamente o mesmo.

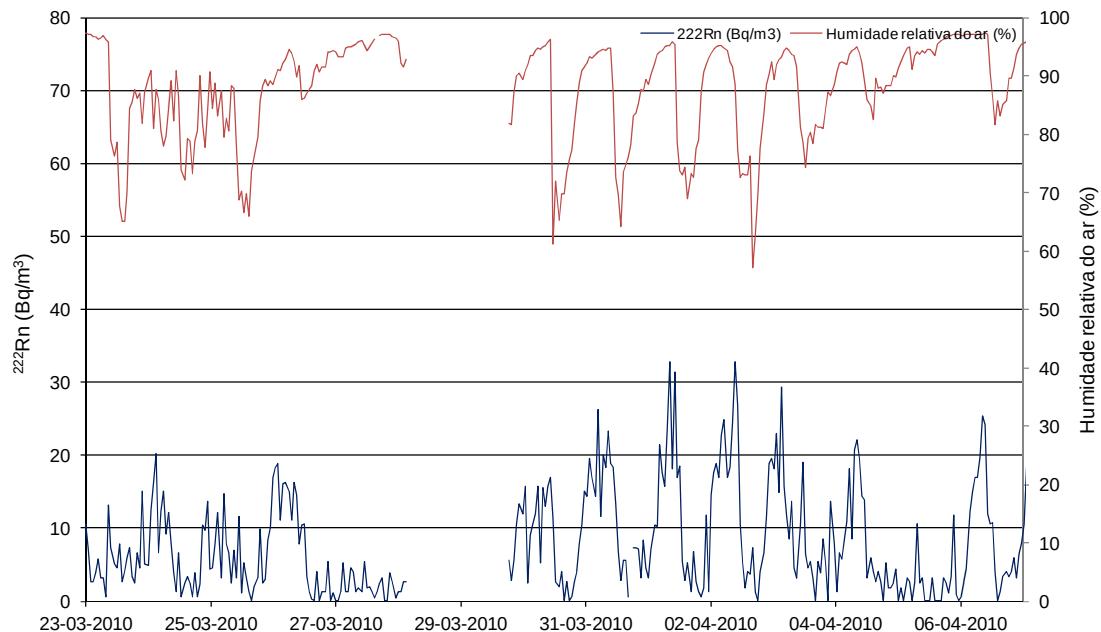


Figura 4.29 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da humidade relativa do ar, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 23 de Março e 7 de Abril de 2010.

As baixas frequências analisadas permitiram identificar ciclos anuais de aproximadamente 340 dias. A discrepância observada entre os ciclos observados (~340 dias) e os 365 dias correspondentes a um ano podem resultar do reduzido período de dados em análise, isto é, aproximadamente ano e meio, o que apenas permite a conclusão de um ciclo anual. Um período de amostragem que se prolongue por vários anos deverá provocar uma aproximação entre o número de dias obtidos no ciclo anual calculado e os 365 dias que completam um ano. As variações anuais observadas no período em análise são significativas, apresentando os valores de concentração de radão no solo para o período de Inverno uma média de 11 Bq/m³ e para o período de Verão uma média de 47 183 Bq/m³. Esta variação poderá ser resultado, tal como descrito no ponto 4.5.1.2, de uma acção conjunta da variação sazonal da temperatura e da humidade do solo. O incremento da temperatura do solo nos meses de Verão, como consequência do aumento da temperatura do ar, provocaria um incremento da emissão de radão dos grãos minerais do solo e das rochas e a consequente diminuição da humidade do solo permitiria o transporte do gás emanado até à superfície.

Foram ainda identificados ciclos de 48, 25 e de 15 dias. Os ciclos de 48 e 25 dias poderão estar associados aos períodos de rotação do Sol e os de 15 dias associados às fases da Lua (semi-ciclo lunar). Um comportamento cíclico das variações da concentração de radão no solo de aproximadamente 15 dias foi também identificado e associado às fases da Lua em estudos realizados no Vulcão Stromboli (Cigolini *et al.*, 2009). Em trabalhos realizados por Aumento (2002), no sistema vulcânico do Pico Alto, também foi identificada uma estreita relação entre as variações da concentração de radão no solo e o mês lunar.

Este tipo de comportamento, isto é, variações cíclicas diárias e sazonais, foi também identificado em séries temporais de fluxo de CO_2 no solo no Vulcão das Furnas, para os dados obtidos pelas estações GFUR1 e GFUR2 (Viveiros, 2010). Variações diárias associadas a um e dois ciclos por dia foram identificadas para as séries de dados obtidas nestas estações. As séries temporais de fluxo de CO_2 no solo evidenciaram um comportamento sazonal, apresentando, nos meses de Verão, frequências associadas a um e dois ciclos por dia. No entanto, nos meses de Inverno, as séries temporais de fluxo de CO_2 no solo obtidas nestas estações apresentam um comportamento distinto, a componente associada a dois ciclos por dia surge na série de dados da estação GFUR1, enquanto que, na da estação GFUR2 surgem frequências associadas a um ciclo por dia, componente esta também identificada na análise efectuada à série temporal da concentração de radão no solo, obtida neste local de amostragem (ponto de amostragem 3), para os meses de Inverno. As frequências associadas a um ciclo por dia, quer no caso da concentração de radão, quer no caso do fluxo de CO_2 no solo, estão correlacionadas com as mesmas variáveis, nomeadamente com a temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento. O comportamento cíclico semelhante observado nas variações diárias destes dois gases, isto é, valores máximos de madrugada e mínimos por volta do meio-dia, resulta de uma influência semelhante das variáveis identificadas sobre as variações destes dois gases. A análise de regressão múltipla aplicada à série de dados de concentração de radão no solo identifica a velocidade do vento e a humidade relativa do ar como variáveis com significância estatística enquanto que, no caso do fluxo de CO_2 são identificadas as variáveis velocidade do vento e temperatura

do ar. A variável comum, ou seja, a velocidade do vento exerce uma influência negativa sobre as variações destes dois gases. A análise das baixas frequências possibilitou ainda a identificação de comportamentos cíclicos associados a 340, 60 e 20 dias para os dados da estação GFUR1 e 270, 55 e 22 dias para os dados da estação GFUR2, ciclos estes semelhantes aos 340, 48 e 25-15 dias obtidos na análise dos dados de concentração de radão no solo.

4.5.3. Dados Filtrados e Actividade Sísmica

Os resíduos calculados, pela aplicação da análise de regressão múltipla, foram utilizados para tentar identificar anomalias associadas a actividade sísmica. Para tal foi calculado a média (μ) e o desvio padrão (σ) e foram considerados valores anómalos, aqueles que se desviam do intervalo $\mu \pm 2\sigma$ (Planinic *et al.*, 2001; Miklavcic *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2009; Viveiros, 2010). No caso particular dos dados obtidos nos meses de Inverno no ponto de amostragem 3, e uma vez que os resíduos obtidos pela análise de regressão múltipla continuam a evidenciar na análise espectral, variações diárias associadas a um ciclo por dia (Anexo VI), foi aplicado o filtro passa-baixo FFT (Anexo VI). No entanto, e apesar da aplicação deste filtro melhorar a remoção da influência de variáveis externas, como a sua aplicação só foi possível para um reduzido período do total da amostragem e o período filtrado apresenta várias interrupções na continuidade dos dados optou-se por, também neste caso, utilizar os resíduos obtidos pela aplicação da análise de regressão múltipla.

Durante o período em que decorreu a amostragem no local 1, isto é, no jardim do Centro Termal das Furnas, para o período compreendido entre 18 de Agosto de 2005 e 16 de Janeiro de 2006 foram registados no Vulcão das Furnas e área envolvente (Figura 2.14) cerca de 924 eventos sísmicos com magnitudes de duração (Md) que oscilaram entre 0,4 e 3,8 (CVARG/CIVISA, dados não publicados). Este elevado número de sismos está associado à crise sísmica de 2005, que ocorreu na zona central da ilha de S. Miguel (Fogo/Congro), e que para o período em análise

apresentou um pico de actividade no mês de Setembro. A variação temporal dos resíduos calculados e das magnitudes dos eventos sísmicos não permite a identificação de uma relação evidente entre estas duas variáveis (Figuras 4.30 e 4.31). Os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados entre a magnitude dos eventos sísmicos e os resíduos calculados são de 0,037 para os dados grupo A1 e 0,007 para os dados dos grupos B1 e C1.

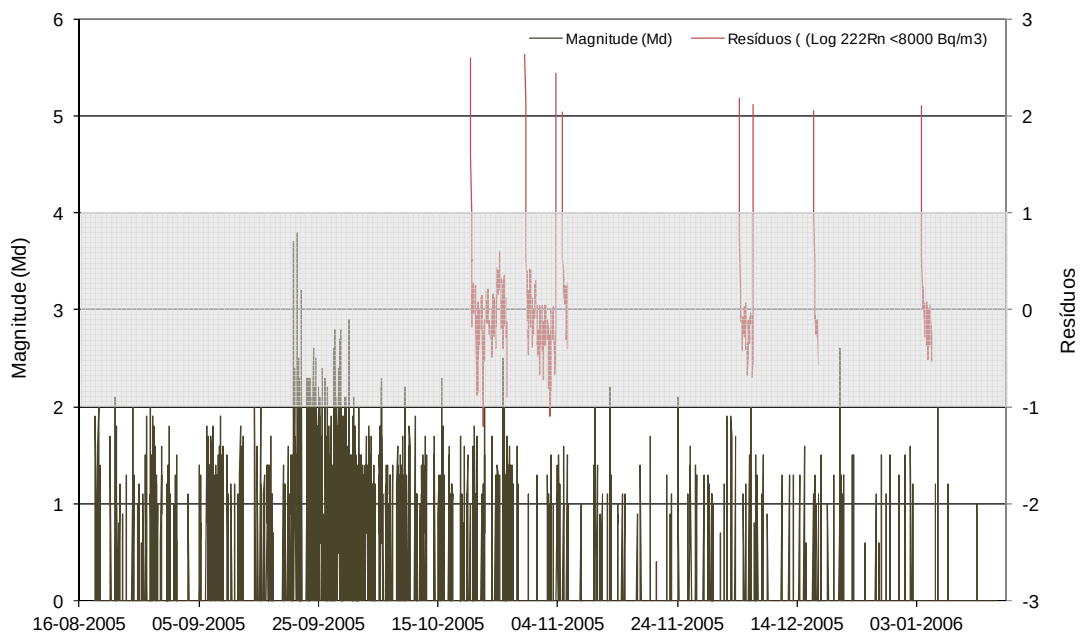


Figura 4.30 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para o grupo A1 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

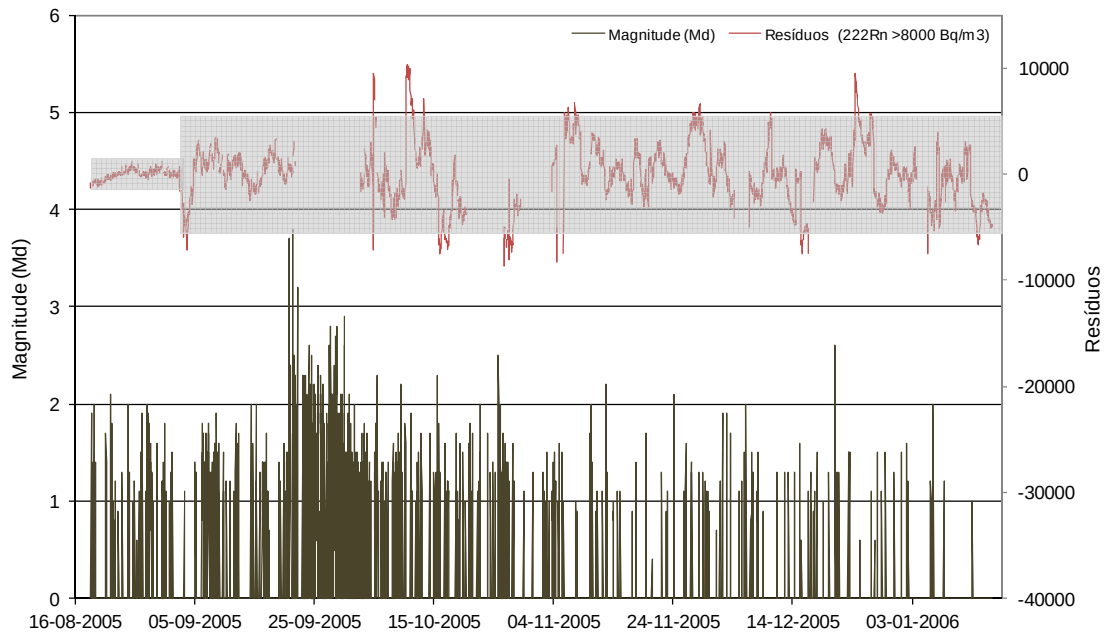


Figura 4.31 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para os grupos B1 e C1 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

Relativamente aos dados obtidos no ponto de amostragem 2, localizado junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas, tal como já foi referido anteriormente, a aplicação da análise de regressão múltipla não teve como objectivo principal a construção de um modelo explicativo pelo que, neste caso, não foram calculados os resíduos. Assim, foram projectados os dados de concentração de radão no solo obtidos neste ponto de amostragem. Durante o período em que decorreu a amostragem, isto é, no período compreendido entre 23 de Janeiro de 2008 e 29 de Fevereiro de 2008 foram registados, no Vulcão das Furnas e área envolvente, cerca de 16 eventos sísmicos com magnitudes de duração (Md) que oscilaram entre 0,8 e 2 (CVARG/CIVISA, dados não publicados). A variação temporal dos valores de concentração de radão obtidos e das magnitudes dos eventos sísmicos não permite a identificação de uma relação evidente entre estas duas variáveis (Figuras 4.32). O coeficiente de correlação de *Pearson* calculado para estas variáveis é de 0,203.

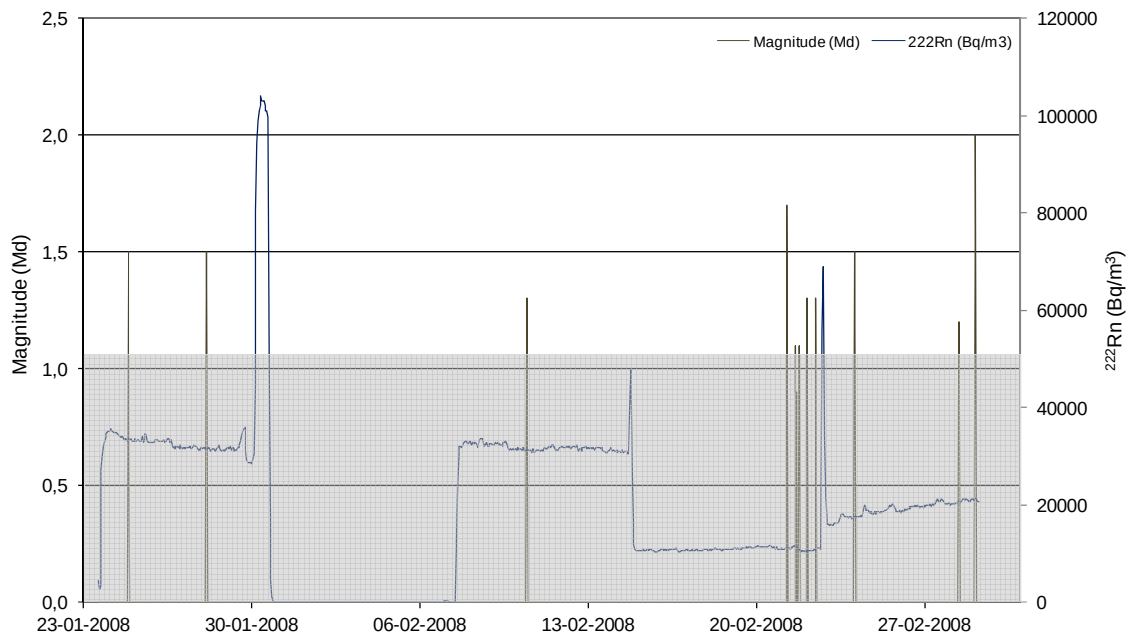


Figura 4.32 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo no local de amostragem 2 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

A amostragem no ponto 3, nas imediações do campo fumarólico da Lagoa das Furnas decorreu no período compreendido entre 20 de Janeiro de 2009 e 1 de Fevereiro de 2011. Durante este período foram registados, no Vulcão das Furnas e área envolvente, cerca de 162 eventos sísmicos com magnitudes de duração (Md) que oscilaram entre os 0,4 e os 2,7 (CVARG/CIVISA, dados não publicados). A variação temporal dos resíduos calculados e das magnitudes dos eventos sísmicos não permite a identificação de uma relação evidente entre estas duas variáveis (Figuras 4.33 e 4.34). Os coeficientes de correlação de *Pearson* calculados entre a magnitude dos eventos sísmicos e os resíduos calculados são de 0,143 e 0,005 para os dados do grupo A3 e para os dados do grupo C3, respectivamente.

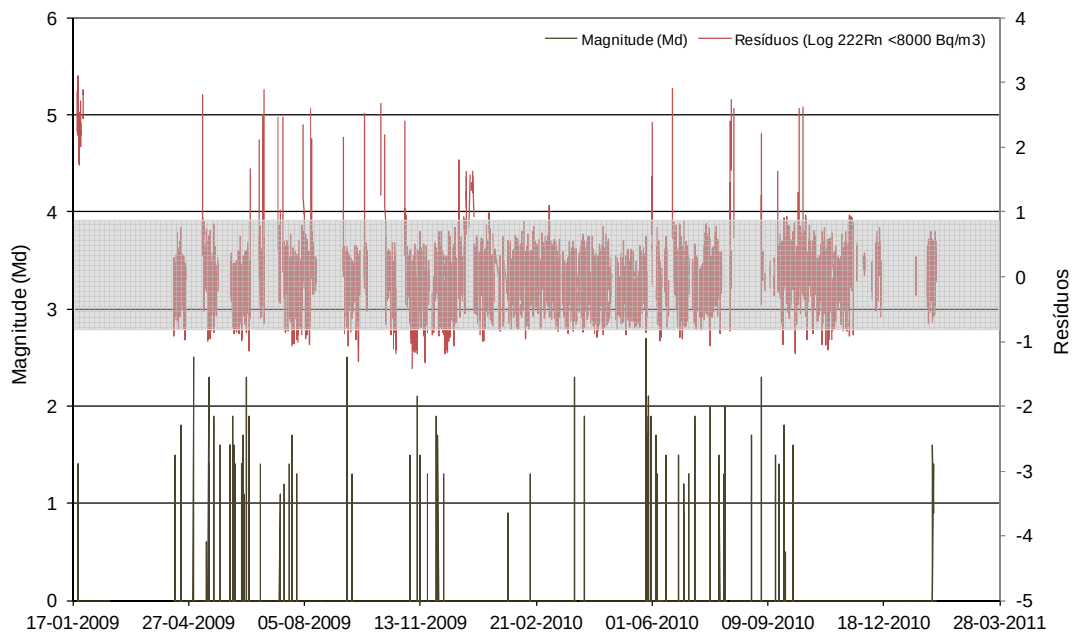


Figura 4.33 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para o grupo A3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

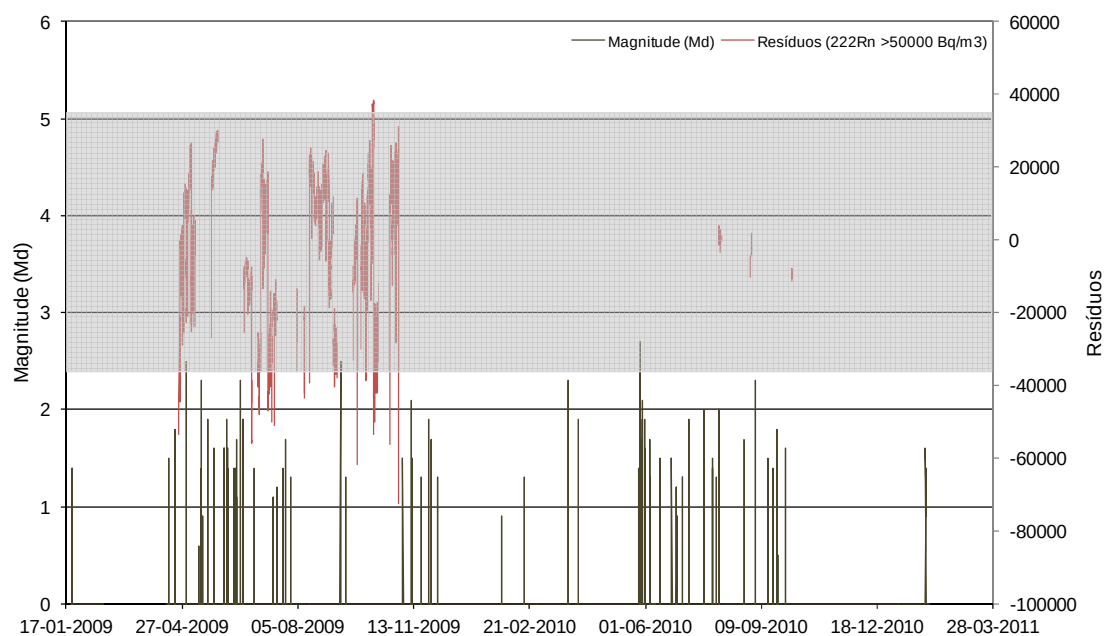


Figura 4.34 – Variação temporal dos resíduos de concentração de ^{222}Rn no solo calculados para o grupo C3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

4.5.4. Considerações Gerais

A análise de regressão múltipla aplicada aos diversos grupos de dados obtidos para cada ponto de amostragem permitiu constatar que as variáveis independentes com significância estatística ($P < 0,01$) que influenciam as variações da concentração de radão no solo são a temperatura do solo, a humidade do solo, a pressão barométrica, a velocidade do vento, a humidade relativa do ar, a temperatura do ar e o fluxo de CO_2 . O conjunto destas variáveis que exerce influência em determinado grupo de dados, diverge nos diferentes pontos de amostragem, podendo mesmo apresentar diferenças nos diferentes grupos de dados do mesmo ponto de amostragem. Por outro lado, a mesma variável não exerce sempre o mesmo tipo de influência nos diversos grupos de dados. Relativamente à aplicação da análise espectral, esta permitiu identificar variações cíclicas diárias, associadas a um ciclo por dia, no conjunto de dados correspondentes aos meses de Inverno do ponto de amostragem 3. Os parâmetros meteorológicos que apresentam correlação ($r > 0,5$) com estas variações cíclicas diárias da concentração de radão no solo correspondem à temperatura do ar, à humidade relativa do ar e à velocidade do vento. A análise das baixas frequências, dos dados obtidos neste ponto de amostragem, permitiu ainda identificar variações periódicas associadas a 340, 48, 25 e 15 dias.

A temperatura do solo exerce uma influência contrária sobre os pontos de amostragem localizados em zonas sem anomalia térmica ou com anomalia térmica. No ponto de amostragem 1, localizado numa zona sem anomalia térmica esta variável exerce uma influência negativa sobre os dados do grupo A1 e apresenta comportamento de função quadrática para os grupos de dados B1 e C1, exercendo uma influência positiva até ser atingido o ponto de estacionaridade de 18,3 °C e de 17,6 °C, respectivamente. Este comportamento é contrário ao expectável, uma vez que o incremento da temperatura facilita a emissão do radão do solo e das rochas facilitando a sua libertação para os espaços existentes nos poros dos solos ou nas fracturas das rochas (Gasparini e Mantovani, 1978; Cox, 1980). Assim sendo, este comportamento deverá resultar da sobreposição de outra variável que condicione o

transporte deste gás até à superfície, até mesmo porque os valores máximos de temperatura do solo (22,7 °C) registados neste ponto de amostragem são relativamente baixos (Tabela 4.1). Por outro lado, nos pontos de amostragem 2 e 3, localizados em zonas com anomalia térmica, esta variável exerce uma influência positiva sobre os dados dos grupos A2 e A3 e apresenta comportamento de função quadrática para os dados do grupo C3, exercendo uma influência negativa até 24,6 °C, valor a partir do qual passa a exercer uma influência positiva. Esta variável apresenta assim, nos pontos de amostragem 2 e 3, o comportamento expectável.

A humidade do solo exerce uma influência complexa sobre os diferentes conjuntos de dados. Esta variável apresenta comportamento de função quadrática para o grupo de dados B1, exercendo uma influência positiva até ser atingido o ponto de estacionaridade (10,9 %), passando a exercer uma influência negativa a partir deste ponto. A influência positiva deverá ser resultado, do preenchimento dos poros nas zonas mais superficiais do solo devido à presença de água que impedindo a libertação do radão para o ar atmosférico potencia o seu incremento na zona onde está a ser medido. A influência negativa deverá resultar de períodos de pluviosidade mais intensa o que promove, por um lado, a dissolução deste gás na água e por outro, o transporte do radão para zonas mais profundas do solo, impedindo assim a sua detecção (Garcia-Vindas e Monnin, 2005). A humidade do solo exerce uma influência negativa no conjunto de dados A1. Este comportamento deverá estar relacionado, por um lado, com o processo anteriormente descrito, ou seja, com a dissolução deste gás na água e o seu transporte para zonas mais profundas e por outro, com os baixos valores de concentração de radão associados a este conjunto de dados. A humidade do solo exerce uma influência positiva, nos grupos de dados A2, C1 e C3. Este comportamento poderá resultar do processo descrito anteriormente para o conjunto de dados B1, isto é, ser consequência da impermeabilização dos níveis mais superficiais potenciando o incremento deste gás na zona onde está a ser efectuada a sua medição. No que se refere aos grupos C1 e C3, este comportamento pode ainda resultar da presença de água nos poros do solo ou em fracturas existentes nas rochas, que impedindo que os átomos de radão libertados dos grãos minerais sejam incorporados nos grãos minerais adjacentes devido à menor distância percorrida por

estes átomos na água do que no ar, facilita assim a sua emissão (Sakoda *et al.*, 2011 e referências nele citadas). Este facto, associado à passagem de um fluxo de gases de arraste (e.g. CO_2), permite, por um lado, a sua remoção da fase líquida e por outro, o seu transporte para a zona onde está a ser medido. Relativamente ao grupo de dados A2, este comportamento poderá ainda resultar do diminuto número de casos válidos introduzidos neste modelo (161).

A pressão barométrica exerce uma influência negativa nas variações da concentração de radão dos dados pertencentes ao grupo B1. Nos períodos de diminuição da pressão barométrica ocorrem incrementos da concentração do radão resultantes da diminuição da pressão junto à superfície do solo, o que permite a ascensão do radão presente nos poros do solo até à superfície, pelo contrário, em períodos em que pressão barométrica é elevada, ocorre uma diminuição da concentração de radão, uma vez que este gás é forçado a permanecer em zonas mais profundas do solo (Clements e Wilkening, 1974; Pinault e Baubron, 1997). A pressão barométrica de acordo com a análise de regressão múltipla aplicada ao grupo de dados C2 parece exercer, neste caso, uma influência positiva. De facto neste modelo esta variável é responsável por 51 % do total das variações da concentração de radão no solo. No entanto, esta influência, que contraria o expectável, não deverá resultar da sobreposição da influência de outra variável, mas sim do diminuto número de casos válidos introduzidos neste modelo (152) pelo que poderão não ser suficientes para permitir outras interpretações.

A velocidade do vento exerce uma influência negativa sobre os conjuntos de dados dos grupos A3 e B3, resultando provavelmente, por um lado, da diluição da concentração de radão presente no solo e por outro, da sua remoção à superfície (Kumar *et al.*, 2009 e referências nele citadas). Por outro lado, esta variável influencia de modo positivo os dados do grupo A2. Este comportamento, contrário ao expectável, poderá resultar do diminuto número de casos válidos introduzidos neste modelo (161).

A humidade relativa do ar exerce uma influência positiva nas variações dos dados do grupo A3 uma vez que níveis de humidade elevados no ar inibem a

emanação do radão do solo para a atmosfera promovendo assim o incremento das concentrações deste gás nos níveis mais superficiais do solo (García-Talavera *et al.*, 2001). Por outro lado, a humidade relativa do ar exerce uma influência negativa nos dados do grupo B3, contrariamente ao que seria expectável. Assim sendo, este comportamento deverá resultar da sobreposição da influência de outra variável.

A temperatura do ar influencia de modo positivo as variações da concentração de radão no conjunto de dados do grupo C2, contrariamente ao que seria expectável. A aplicação da análise espectral ao conjunto de dados do grupo A3, para os meses de Inverno, permitiu verificar que esta variável influencia negativamente as variações da concentração de radão neste conjunto de dados. Este comportamento deverá ser resultado do facto da camada limite planetária apresentar uma estratificação estável quando a temperatura do ar atinge os valores mínimos, isto é, durante a noite, promovendo o incremento da concentração de radão no solo, enquanto que, durante o dia, ao serem atingidos os valores máximos de temperatura do ar, esta camada da troposfera torna-se instável, exibindo turbulência, o que contribui para os valores máximos de velocidade do vento no período da tarde e conseqüentemente para uma diminuição dos valores de concentração de radão no solo (Dai e Dessler, 1999; Singh *et al.*, 2005a).

O fluxo de CO_2 exerce uma influência positiva sobre as variações dos dados dos grupos A3, C1 e C3, podendo este comportamento estar associado ao transporte do radão até à superfície utilizando o CO_2 como gás de arraste (Etiope e Lombardi, 1995; Etiope e Martinelli, 2002).

O tipo de rocha que originou os solos e as características físicas destes solos (permeabilidade e porosidade) poderiam ser também factores condicionantes quer do processo de emanação, quer do transporte do radão até às zonas mais superficiais do solo. No entanto, nestes três pontos de amostragem, o tipo de produtos vulcânicos que originou estes solos é semelhante correspondendo a material traquítico (*s.l.*) emitido essencialmente pelo Vulcão das Furnas. Relativamente às características físicas destes solos, nomeadamente no que se refere à porosidade, à permeabilidade

e à granulometria, estudos realizados por Viveiros (2010) para os pontos de amostragem 2 e 3, permitiram verificar que estes solos apresentam características semelhantes não sendo, portanto, responsáveis pelas diferenças nas variações da concentração de radão observadas nestes pontos de amostragem. Relativamente ao ponto de amostragem 1, não foi possível aplicar este tipo de estudo uma vez que aquando das obras de reabilitação do Centro Termal das Furnas o local onde essa amostragem se realizava foi destruído.

Apesar de algumas das séries temporais obtidas nestes ensaios não apresentarem as condições ideais para a análise de dados geoquímicos como sejam: (a) uma duração superior a um ano de modo a que possam ser consideradas as variações sazonais e (b) uma distribuição que se aproxime da normal para a aplicação da análise de regressão múltipla, não deixam de ser interessantes algumas das observações efectuadas nomeadamente:

- 1- Os dados dos grupos A correspondem ao intervalo de dados relativos a valores de concentração de radão considerados como nível de base para o Vulcão das Furnas (Capítulo 3);
- 2- Os dados dos grupos B são influenciados exclusivamente por variações dos parâmetros meteorológicos;
- 3- Os dados dos grupos C são influenciados por parâmetros meteorológicos e por variações do fluxo de CO_2 . Este último exerce uma influência positiva relativamente à concentração de radão no solo evidenciando a capacidade do CO_2 funcionar como gás de arraste no transporte do radão para a superfície. A mesma influência não pôde ser verificada no ponto de amostragem 2 provavelmente devido à presença de H_2S no solo, que não permitiu o bom funcionamento do equipamento e consequentemente a aquisição de uma série de dados mais completa;
- 4- A temperatura do solo exerce uma influência diferente sobre as variações da concentração de radão, dependendo do facto do ponto de amostragem se localizar, ou não, numa zona de anomalia térmica.

A análise de séries temporais da concentração de radão no solo com o objectivo de identificar anomalias associadas a eventos de profundidade deverá, sempre que possível, conjugar a análise de regressão múltipla e a análise espectral, de modo a que nos casos em que sejam identificadas variações cíclicas nos resíduos obtidos se possam aplicar filtros para obter uma série temporal, tanto quanto possível, livre de influências de parâmetros externos, facilitando assim a interpretação de fenómenos de origem profunda.

5. MONITORIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn EM NASCENTES

5.1. Nota Prévia

O radão presente num sistema vulcânico não se encontra apenas nas rochas e no geogás existente nos solos, está também dissolvido nas águas subterrâneas que circulam no sistema e que afloram à superfície em nascentes constituindo, assim, excelentes indicadores dos processos que ocorrem em profundidade.

O Vulcão das Furnas apresenta diversas nascentes que podem ser classificadas, de acordo com a classificação de Schoeller (1962 *in* Custódio e Llamas, 1983), em nascentes ortotermais e nascentes termais (Costa, 2006; Freire, 2006). Nestes dois grupos existem ainda nascentes gasocarbónicas. As águas gasocarbónicas e/ou termais salientam as características específicas das águas de regiões vulcânicas, quer pela elevada concentração de CO_2 , quer pela amplitude de temperaturas que apresentam.

Neste capítulo pretende-se estudar as variações de radão em nascentes do Vulcão das Furnas a fim de identificar os factores externos que influenciam a variação da concentração de radão nestas águas e possíveis anomalias deste gás associadas a processos endógenos do sistema hidrotermal/vulcânico. Serão ainda analisadas as implicações em termos de saúde pública das concentrações de radão destas águas.

5.2. Radão na Água

O radão presente em águas subterrâneas pode ser o resultado, quer da sua emanção das rochas encaixantes, através de processos de difusão ou de recuo, quer do decaimento do rádio (^{226}Ra) dissolvido na água (Wollenberg *et al.*, 1985; Przylibski e Zebrowski, 1999; Przylibski *et al.*, 2001, 2002). A concentração de radão em águas subterrâneas depende ainda da conjugação de diversos factores relacionados não só com as características geológicas do local, como a presença de falhas e de zonas fracturadas, a porosidade e os conteúdos em urânio (^{238}U) e rádio (^{226}Ra) das rochas (Przylibski e Zebrowski, 1999; Horváth *et al.*, 2000; Choubey *et al.*, 2001; Przylibski *et al.*, 2001, 2002; Selvasekarapandian *et al.*, 2002; Voronov, 2004; Bonotto e Padron-Armada, 2008), como também com as características da própria água como a temperatura, a velocidade de circulação, a quantidade de água e o tempo de permanência em contacto directo com a rocha (Wollenberg *et al.*, 1985; Choubey *et al.*, 2000). Também as variações de parâmetros como a pressão, a precipitação e as marés terrestres podem influenciar a concentração de radão presente nestas águas (Garcia-Vindas e Monnin, 2005; Mullinger *et al.*, 2009; Chaudhuri *et al.*, 2010).

A temperatura da água desempenha um papel fundamental na concentração de radão presente. Os valores de concentração deste gás em nascentes frias são superiores aos valores encontrados em nascentes termais (Wollenberg *et al.*, 1985; Flexser *et al.*, 1987), uma vez que a solubilidade do radão na água ($0,225 \text{ g/cm}^3$ a 20°C) diminui com o incremento da temperatura (López *et al.*, 2004 e referências nele citadas). Contudo, as temperaturas mais elevadas provocam um incremento da interacção água/rocha e conseqüentemente um incremento na emanção do radão das rochas (D'Alessandro e Vita, 2003).

Águas com baixa concentração de radão (e.g. água da chuva) favorecem a dissolução do radão presente no solo, removendo-o, conduzindo a um incremento da concentração deste gás nas mesmas. Por outro lado, a infiltração destas águas facilita

o transporte deste gás para outros locais ou para zonas mais profundas (Garcia-Vindas e Monnin, 2005). O radão existente em aquíferos pode ser libertado, quer devido a variações de pressão, quer devido à passagem de gases de arraste como o CO_2 e o H_2S , concentrando-se em zonas superficiais dos solos. No entanto, se a água existente no aquífero se deslocar a uma velocidade que permita o transporte do radão antes do seu decaimento, então, a água poderá surgir na nascente ainda com uma grande concentração deste gás (Garcia-Vindas e Monnin, 2005).

As características físicas e químicas do radão fazem deste gás um excelente indicador relativamente à origem de massas de água (superficiais ou subterrâneas), possibilitando ainda a identificação da mistura de águas (Katz *et al.*, 1998; Mullinger *et al.*, 2009). Sendo um gás, as águas superficiais caracterizam-se por apresentarem valores de concentração de radão extremamente baixos devido à libertação deste para o ar atmosférico, enquanto que as águas subterrâneas são mais enriquecidas neste gás devido ao contacto com as rochas encaixantes (Mullinger *et al.*, 2009). A concentração de radão em águas subterrâneas, após ser atingido o equilíbrio de decaimento deste gás, oscila normalmente entre os 10 000 Bq/m^3 e os 100 000 Bq/m^3 (Schubert *et al.*, 2006). O estudo de radão na água tem sido ainda aplicado: (a) na prospecção de depósitos de urânio, (b) na identificação de falhas ocultas, (c) como precursor de eventos sísmicos e (e) na monitorização de água potável, em minas e em estâncias termais (Choubey *et al.*, 2000 e referências nele citadas). A Organização Mundial de Saúde recomenda como limite para a água de consumo uma concentração de 100 000 Bq/m^3 (WHO, 2008) e a Comissão das Comunidades Europeias (CEC, 2001/928/Euratom) recomenda que cada estado membro estabeleça o seu próprio limite para a água de consumo, podendo esse limite ser superior a uma concentração de 100 000 Bq/m^3 se a amostragem nacional o justificar. Assim, o limite recomendado para a água de consumo varia consideravelmente de país para país (Tabela 5.1) e oscila entre os 50 000 Bq/m^3 na República Checa e os 300 000 Bq/m^3 na Finlândia (Voronov, 2004). A média mundial de radão na água é de 10 000 Bq/m^3 (UNSCEAR, 1993).

Tabela 5.1 – Concentração de radão máxima permitida em águas de abastecimento público (US EPA, 1999¹; Horváth *et al.*, 2000²; Voronov, 2004³).

País	Concentração de radão (Bq/m ³)
Finlândia ³	300 000
Estados Unidos da América ¹	148 000
Suécia ³	100 000
Grã-Bretanha ²	100 000
Irlanda ³	100 000
Rússia ³	60 000
República Checa ³	50 000

5.3. Metodologia de Amostragem e Tratamento dos Dados

5.3.1. Equipamento

A monitorização regular de nascentes foi efectuada com recurso ao equipamento RAD7 descrito no capítulo 3 (3.3.1.1). Este equipamento e o repectivo conjunto de acessórios RAD H2O (Figura 5.1), permite a medição da concentração de radão na água e apresenta um limite de detecção entre 370 e 37 000 000 Bq/m³ (DurrIDGE Company, 2011b).



Figura 5.1 – Equipamento RAD7 e acessórios utilizados na medição da concentração de ^{222}Rn na água (DurrIDGE Company, 2011b).

5.3.2. Amostragem

5.3.2.1. Campo

A amostragem regular de nascentes do Vulcão das Furnas teve início em Dezembro de 2006 e continua em curso. Entre Dezembro de 2006 e Novembro de 2007, as amostragens foram efectuadas pontualmente em algumas das nascentes. Após esse período inicial, as amostragens passaram a ser efectuadas com uma periodicidade bimestral. Neste trabalho serão analisados e discutidos os dados adquiridos no período compreendido entre Dezembro de 2006 e Novembro de 2011. As nascentes em análise correspondem às águas: Água Azeda; Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis, Caldeirão, Água da Prata, Dr. Miguel Henrique, Quenturas I, Quenturas II, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno (Figura 5.2).

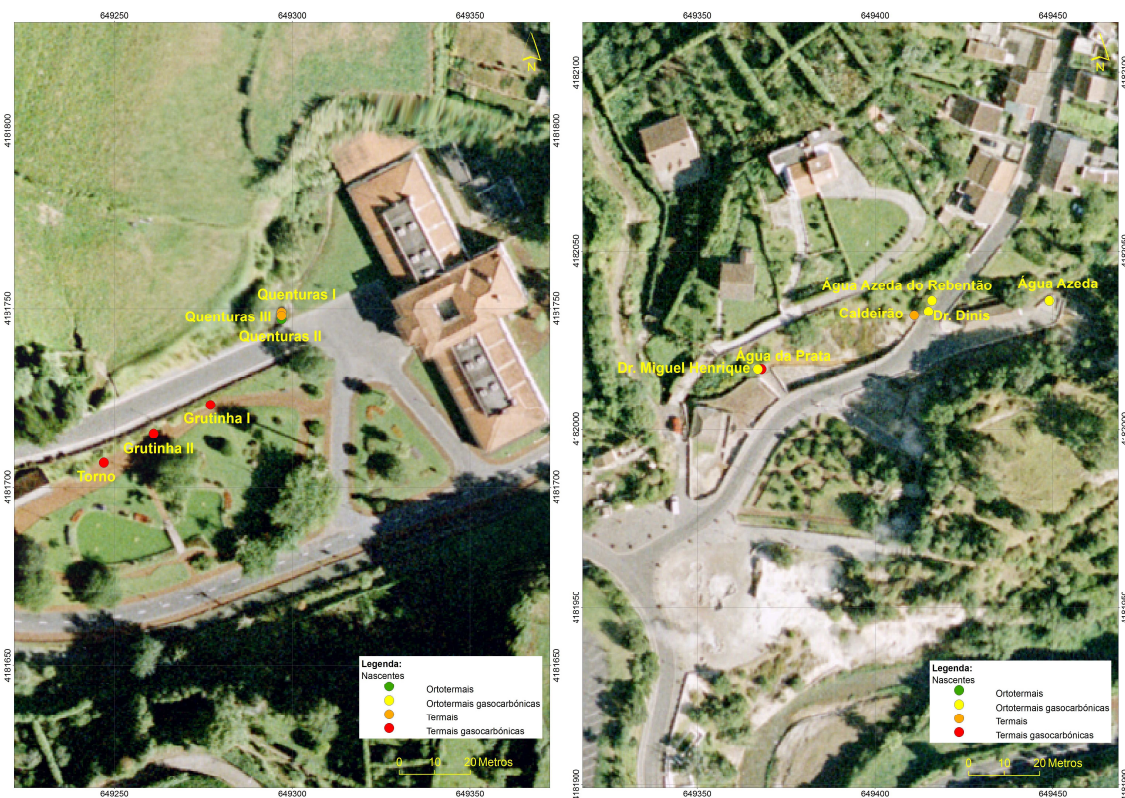


Figura 5.2 – Localização dos pontos de amostragem e tipos de nascentes monitorizadas.

Na selecção das nascentes a amostrar teve-se em consideração os diferentes tipos presentes neste vulcão, nomeadamente, nascentes: ortotermais, ortotermais gasocarbónicas, termais e termais gasocarbónicas (Figura 5.2) (Cruz *et al.*, 1999; Costa, 2006; Freire, 2006; Cruz *et al.*, 2010).

Em cada ponto de amostragem foram recolhidas duas amostras de água. Para tal, foi colocado um tubo no ponto de saída de água, ligado na outra extremidade a um frasco de 250 mL (Fotografia 5.1). Este frasco encontra-se no interior de um balde cheio de água do respectivo ponto de amostragem. A utilização deste tubo e a colocação do frasco de amostragem no interior do balde prende-se com o facto de se tentar minimizar o contacto da água amostrada com o ar atmosférico de modo a evitar, tanto quanto possível, as perdas de radão. Antes do início da amostragem, passa-se água do respectivo ponto de amostragem no tubo, no balde e no frasco. A amostragem decorre durante 10 minutos de modo a assegurar que a água no interior do frasco é proveniente do tubo e não da água existente previamente no balde. No final da amostragem, o frasco é fechado debaixo de água no interior do balde. Em cada ponto de amostragem foi também medida a temperatura da água.



Fotografia 5.1 – Recolha de água para posterior medição da concentração de ^{222}Rn .

5.3.2.2. Laboratório

No laboratório foi montado o circuito para a medição da concentração de radão nas águas amostradas. Este circuito é constituído pela estação de radão (RAD7) e pelos acessórios para a medição da concentração de radão na água (RAD H₂O), que consistem em tubos de silicone, num sistema de arejamento, num filtro e numa unidade dessecante pequena. A presença do sistema de arejamento permite, em circuito aberto, introduzir ar ambiente no detector e em circuito fechado, isto é, quando o sistema de arejamento é acoplado à amostra, a remoção do radão da fase líquida (Fotografia 5.2 a)). Antes da entrada no detector são colocados a unidade dessecante e o filtro para impedir a entrada de humidade e de impurezas que possam afectar o resultado das medições.

Antes do início de cada medição, em circuito aberto, foi introduzido ar ambiente no interior do detector de modo a remover o radão que eventualmente pudesse existir (modo *purge*). Este procedimento decorreu durante pelo menos 10 minutos ou até que a humidade no interior do detector atingisse valores iguais ou inferiores a 6 %. Durante as medições da concentração de radão na água, a temperatura no laboratório foi mantida num valor constante correspondente a 20 °C.

A medição da concentração de radão nas águas amostradas foi efectuada, em circuito fechado, através da aplicação do protocolo *Wat250*. De acordo com este protocolo a bomba do equipamento funciona por um período de 5 minutos durante o qual decorre o período de arejamento da amostra, isto é, é introduzido ar na amostra de modo a remover o radão dissolvido (Fotografia 5.2 b)). Este processo permite a remoção de aproximadamente 94 % do radão dissolvido na água. Após este período são aguardados mais 5 minutos, a seguir aos quais o equipamento efectua a medição da concentração de radão presente na amostra em quatro ciclos de 5 minutos cada (Fotografia 5.2 c)). Assim, cada análise da concentração de radão presente na água, demora cerca de 30 minutos a ser efectuada (Durrige Company, 2011b).



Fotografia 5.2 – Análise da concentração de radão na água: a) Equipamento montado em circuito fechado; b) processo de arejamento da amostra e c) medição da concentração de ^{222}Rn dissolvido na água.

5.3.3. Recolha e Tratamento de Dados

Os dados foram recolhidos no final de cada dia de trabalho no laboratório. A correcção relativamente à humidade no interior do detector e a validação dos dados obtidos foram efectuadas com recurso ao *software* Capture Versão 4.8.1 fornecido pela DurrIDGE Company. Os dados obtidos foram ainda corrigidos relativamente ao decaimento radioactivo do radão através da multiplicação dos valores de concentração pelo factor de correcção de decaimento (*FCD*). O cálculo deste factor tem em atenção o tempo de vida médio dos átomos do radão (132,4 horas) e o período de tempo que decorre entre a recolha e a análise da amostra e expressa-se pela equação 5.1 (DurrIDGE Company, 2011b):

$$(5.1) \quad FCD = \exp(T / 132,4)$$

Sempre que foi detectada a perda de radão numa das duas análises efectuadas em determinado ponto de amostragem, o resultado foi ignorado.

A estes conjuntos de dados foram adicionadas as informações referentes aos parâmetros ambientais, nomeadamente no que se refere à pressão barométrica, temperatura do ar, temperatura do solo, humidade do solo e pluviosidade, adquiridas pelos sensores meteorológicos acoplados à estação permanente de fluxo de CO_2 , GFUR3.

5.4. Apresentação dos Resultados

A representação gráfica da variação temporal da concentração de radão e da temperatura nas nascentes em análise podem ser observadas nas figuras 5.3 a 5.14. Nestes gráficos a concentração de radão corresponde, normalmente, à média dos dados obtidos nas duas amostras recolhidas em cada campanha. A exceção está relacionada com perdas de radão aquando da amostragem e/ou do transporte de uma das amostras até ao laboratório. A ausência de dados em Maio de 2011 deveu-se ao facto de não existir equipamento disponível para a análise laboratorial, uma vez que este havia sido enviado para calibração no fabricante.



Figura 5.3 – Nascente Água Azeda: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

5. MONITORIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn EM NASCENTES

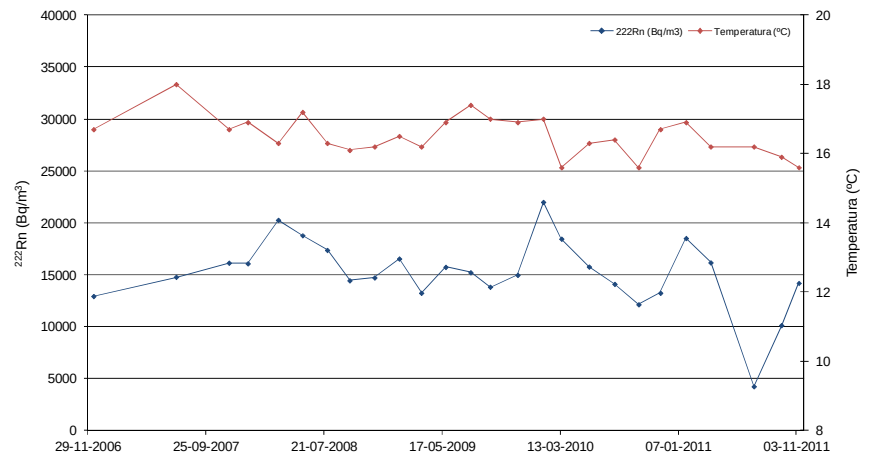


Figura 5.4 – Nascente Água Azeda do Rebentão: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

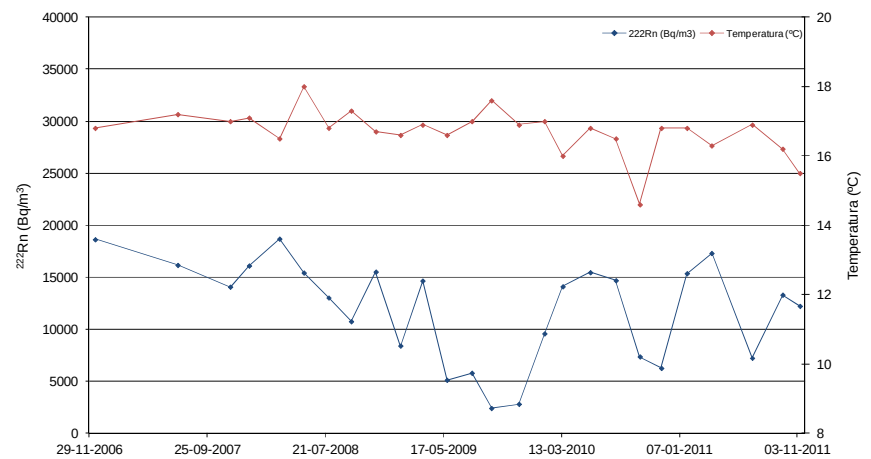


Figura 5.5 – Nascente Dr. Dinis: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

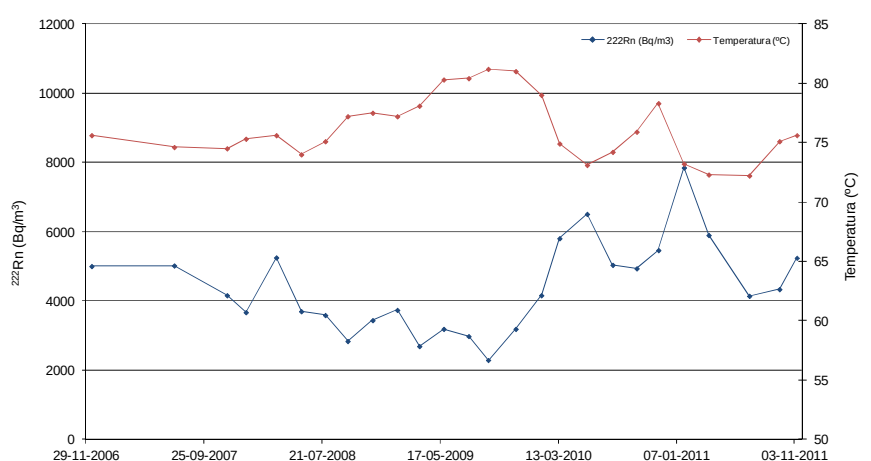


Figura 5.6 – Nascente do Caldeirão: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

5. MONITORIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn EM NASCENTES

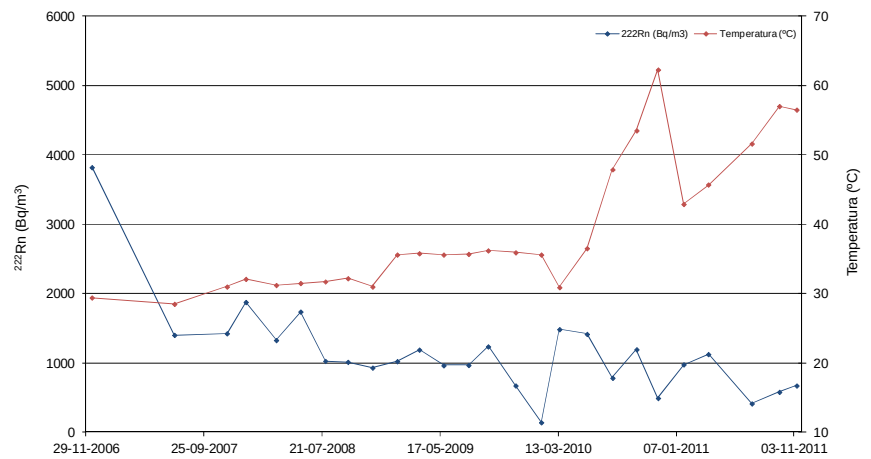


Figura 5.7 – Nascente Água da Prata: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

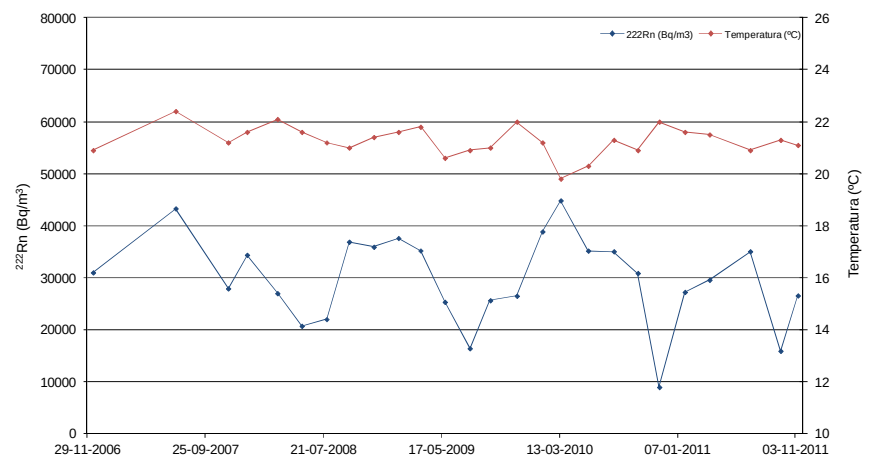


Figura 5.8 – Nascente Dr. Miguel Henrique: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

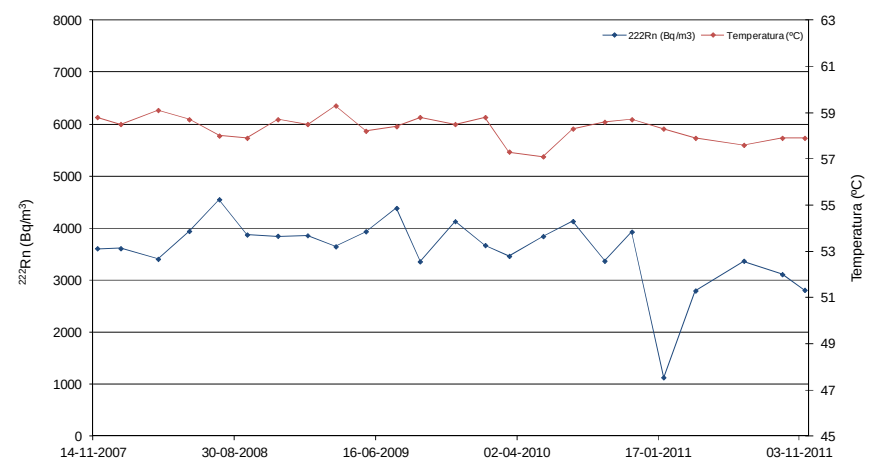


Figura 5.9 – Nascente Quenturas I: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

5. MONITORIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn EM NASCENTES

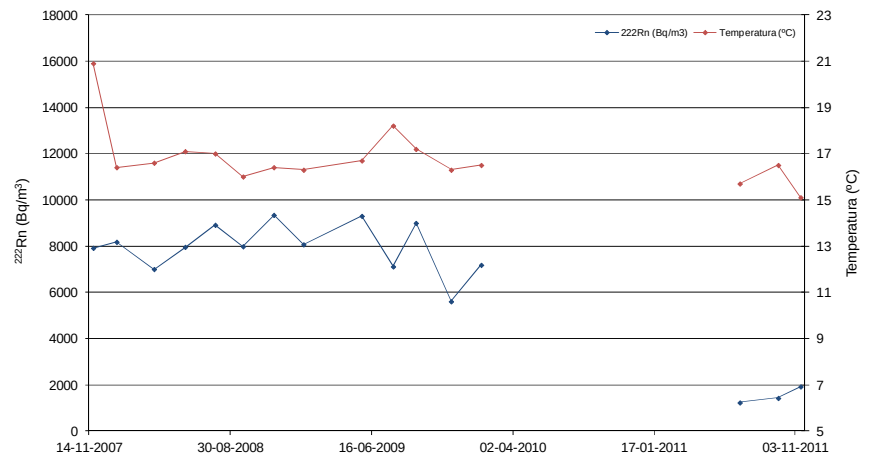


Figura 5.10 – Nascente Quenturas II: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita. A ausência de dados corresponde a um período em que esta nascente esteve sem caudal.

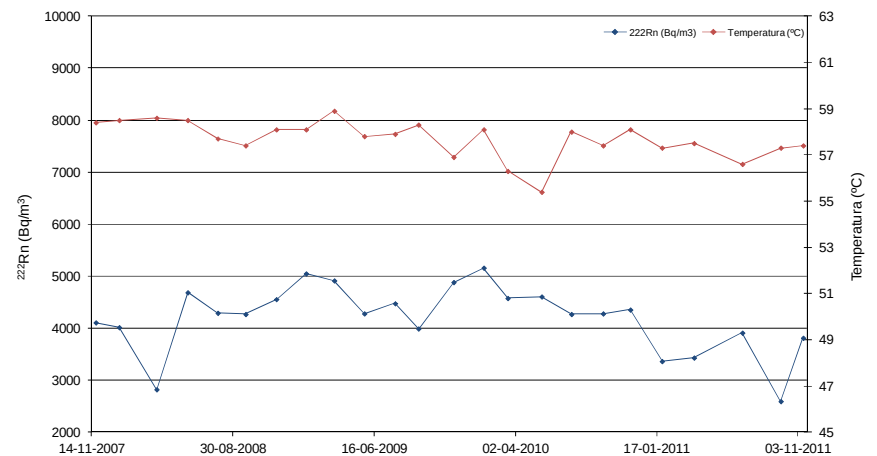


Figura 5.11 – Nascente Quenturas III: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

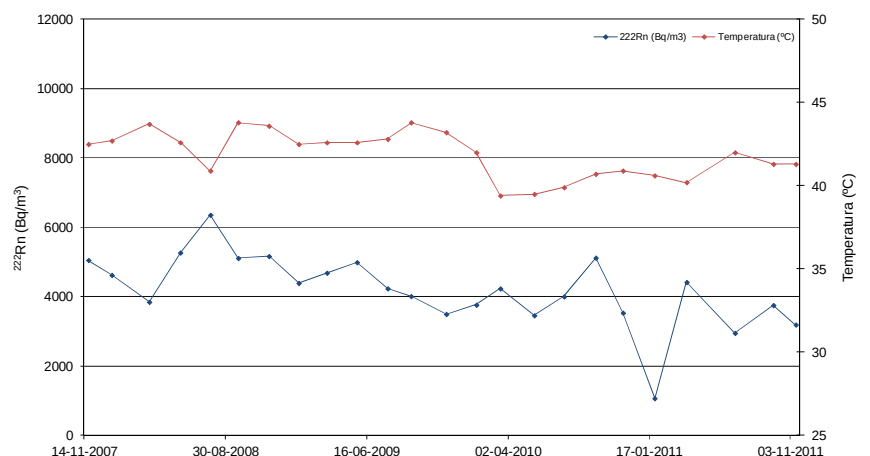


Figura 5.12 – Nascente Grutinha I: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

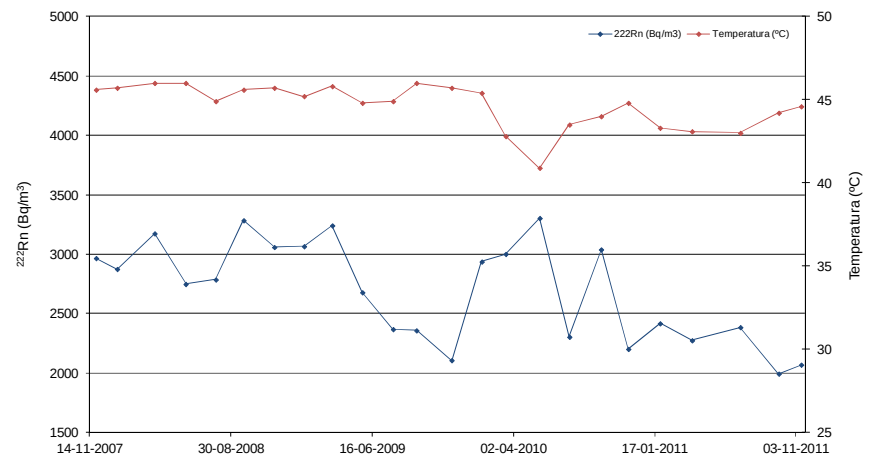
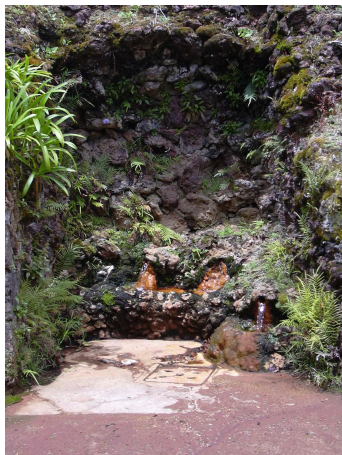


Figura 5.13 – Nascente Grutinha II: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

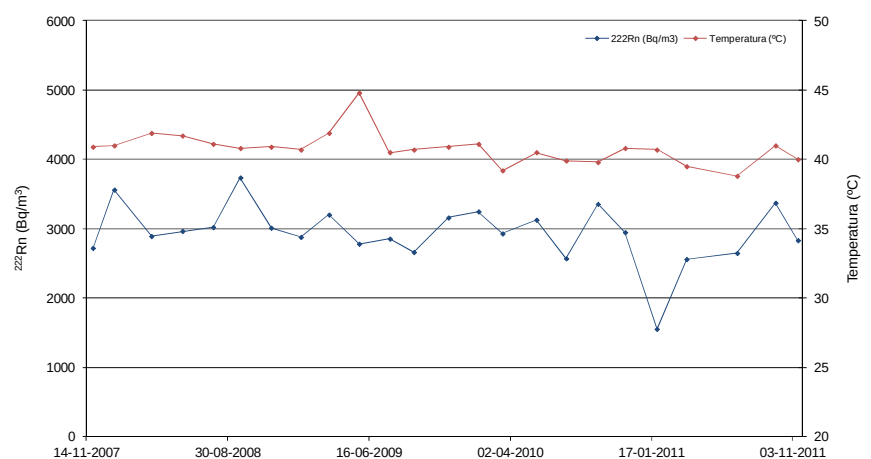


Figura 5.14 – Nascente do Torno: fotografia, à esquerda e variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura nesta nascente, à direita.

A informação referente à estatística descritiva dos dados de concentração de radão e da temperatura obtidos nas nascentes em análise está sintetizada na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn e de temperatura obtidos nas nascentes em análise.

Nascentes	Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
Água Azeda	^{222}Rn (Bq/m ³)	19429	6363	20703	1864	29895	26
	Temperatura (°C)	16,6	0,7	16,7	14,8	18,1	26
Água Azeda do Rebentão	^{222}Rn (Bq/m ³)	15152	3399	15095	4242	21982	26
	Temperatura (°C)	16,5	0,6	16,5	15,6	18,0	26
Dr. Dinis	^{222}Rn (Bq/m ³)	11946	4837	13689	2406	18709	26
	Temperatura (°C)	16,7	0,6	16,8	14,6	18,0	26
Caldeirão	^{222}Rn (Bq/m ³)	4386	1305	4154	2285	7846	26
	Temperatura (°C)	76,2	2,6	75,6	72,2	81,2	26
Água da Prata	^{222}Rn (Bq/m ³)	1189	677	1024	-----*	3820	26
	Temperatura (°C)	39,0	9,8	35,7	28,5	62,3	26
Dr. Miguel Henrique	^{222}Rn (Bq/m ³)	29765	8490	30221	8926	44834	26
	Temperatura (°C)	21,3	0,6	21,3	19,8	22,4	26
Quenturas I	^{222}Rn (Bq/m ³)	3574	676	3657	1127	4552	24
	Temperatura (°C)	58,3	0,5	58,5	57,1	59,3	24
Quenturas II	^{222}Rn (Bq/m ³)	6757	2768	7938	1229	9343	16
	Temperatura (°C)	16,8	1,3	16,5	15,1	20,9	16
Quenturas III	^{222}Rn (Bq/m ³)	4195	643	4281	2591	5159	24
	Temperatura (°C)	57,7	0,8	57,9	55,4	58,9	24
Grutinha I	^{222}Rn (Bq/m ³)	4196	1037	4234	1066	6355	24
	Temperatura (°C)	41,9	1,4	42,3	39,4	43,8	24
Grutinha II	^{222}Rn (Bq/m ³)	2693	422	2767	1993	3303	24
	Temperatura (°C)	44,6	1,3	44,9	40,9	46,0	24
Torno	^{222}Rn (Bq/m ³)	2941	422	2939	1555	3736	24
	Temperatura (°C)	40,8	1,2	40,8	38,8	44,8	24

* Valor abaixo do limite de detecção do equipamento

Para tentar compreender que parâmetros externos influenciam as variações de concentração de radão e temperatura nestas nascentes e de que modo essa influência é exercida, foram efectuados vários gráficos onde é possível analisar as variações temporais da concentração de radão e da temperatura da água nas nascentes amostradas relativamente às oscilações de cada parâmetro meteorológico (Anexo VII). Nesta análise os factores que parecem exercer alguma influência sobre a concentração de radão nestas nascentes são: a temperatura do solo, a pluviosidade e a humidade do solo. Nestes gráficos estão projectadas as amostragens realizadas a partir de Março de 2008, dado tratar-se da primeira amostragem realizada após a

instalação da estação GFUR3. De um modo geral, a temperatura do solo aparenta apresentar uma relação inversa enquanto a pluviosidade e a humidade do solo parecem apresentar uma relação directa com a concentração de radão nestas nascentes (Figuras 5.15 a 5.23). A excepção corresponde às nascentes das águas Quenturas I e Grutinha I cujas variações da concentração de radão sugerem uma relação directa com a temperatura do solo e uma relação inversa com a pluviosidade e humidade do solo (Figuras 5.24 e 5.25). Estas relações podem, no entanto, não corresponder às relações reais que estão dependentes dos tempos de residência destas águas e que serão discutidas no ponto 5.5.2. Relativamente à nascente Quenturas II, não foi possível efectuar a amostragem, durante um período de aproximadamente um ano e meio (Figura 5.10), por falta de caudal. Sendo assim, nesta fase, não é possível identificar relações entre as variações da concentração de radão e da temperatura nesta água e as variações dos parâmetros meteorológicos (Anexo VII).

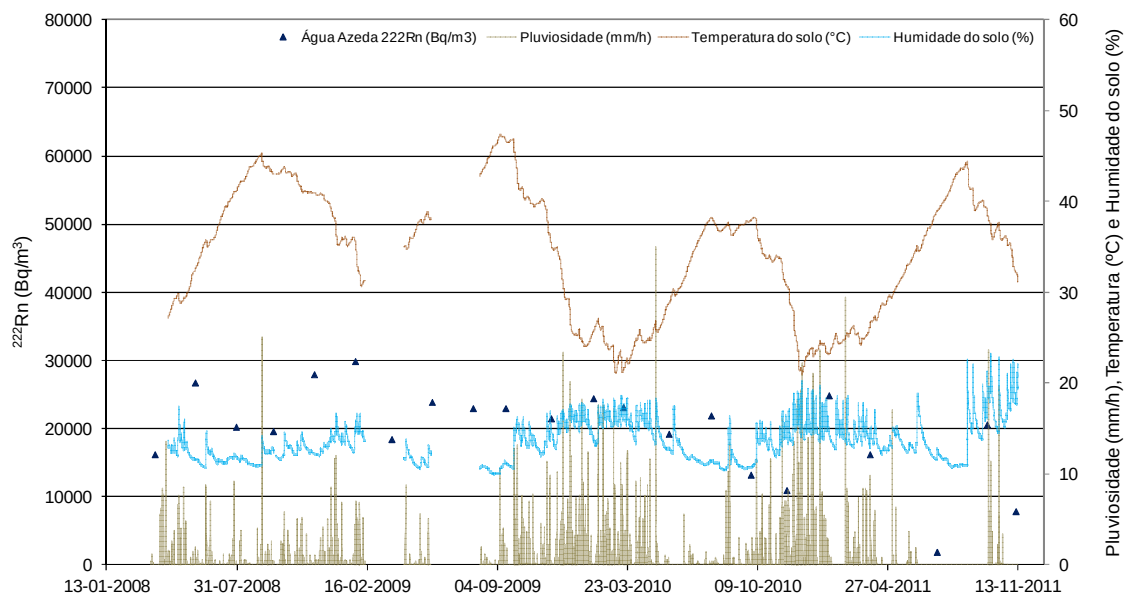


Figura 5.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

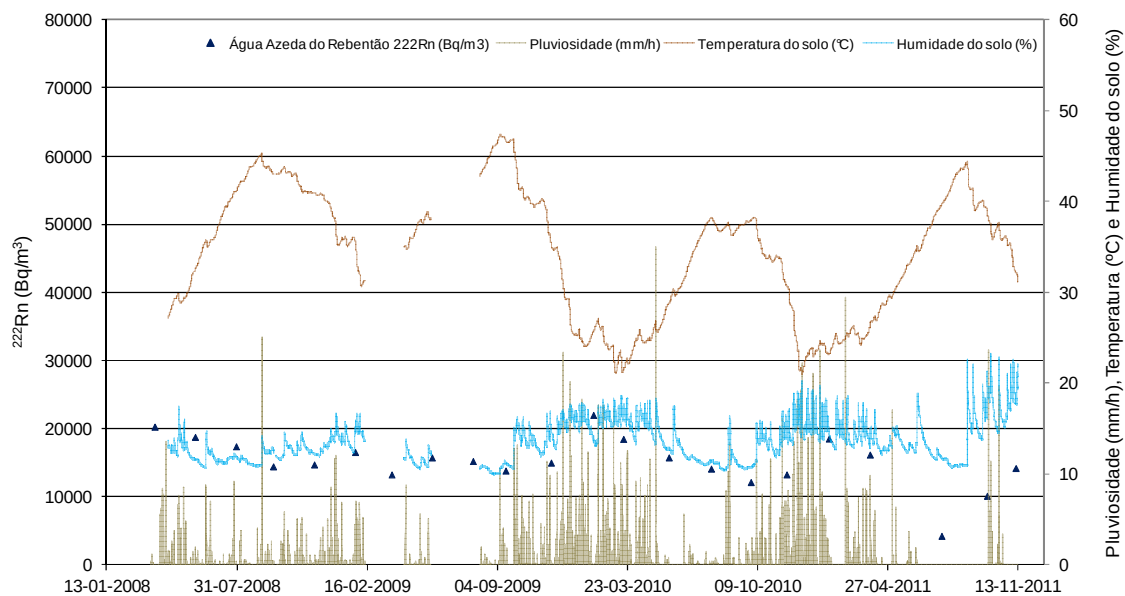


Figura 5.16 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda do Rebentão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

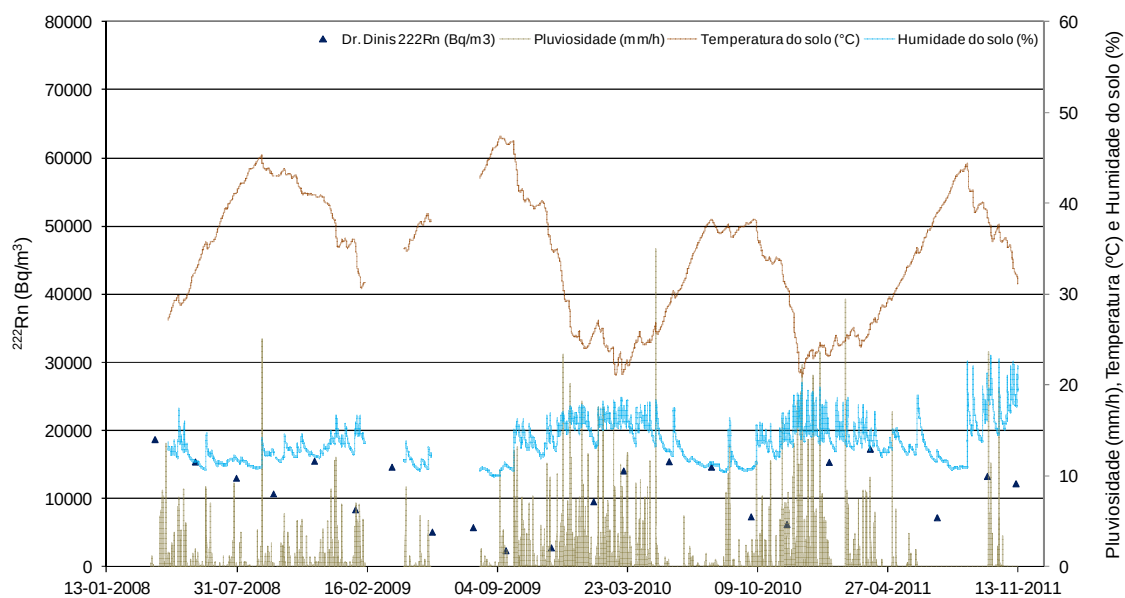


Figura 5.17 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Dinis, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

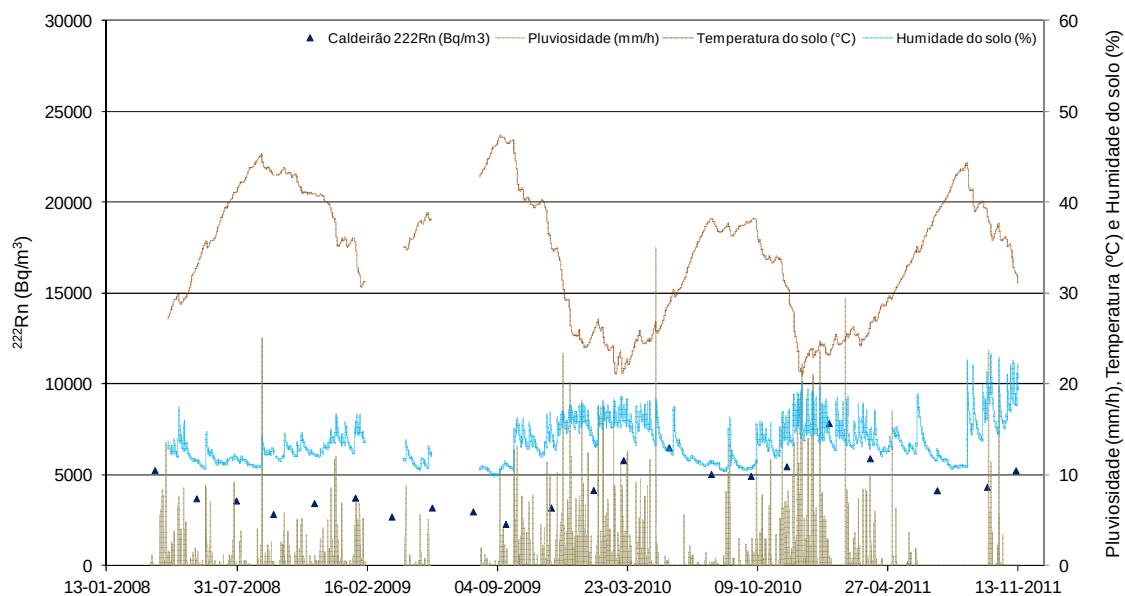


Figura 5.18 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Caldeirão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

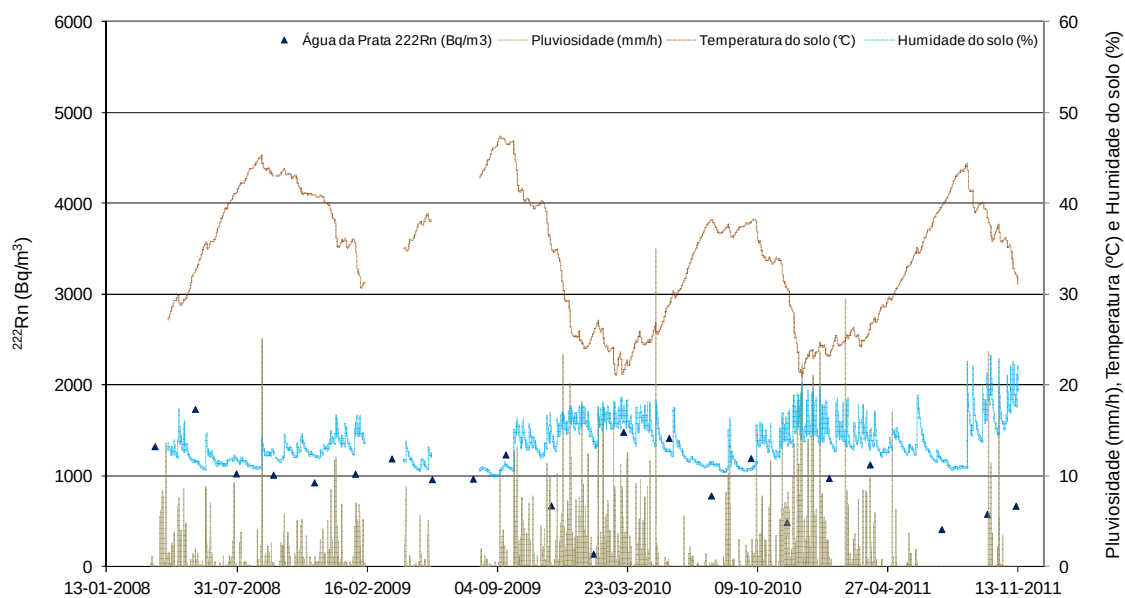


Figura 5.19 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água da Prata, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

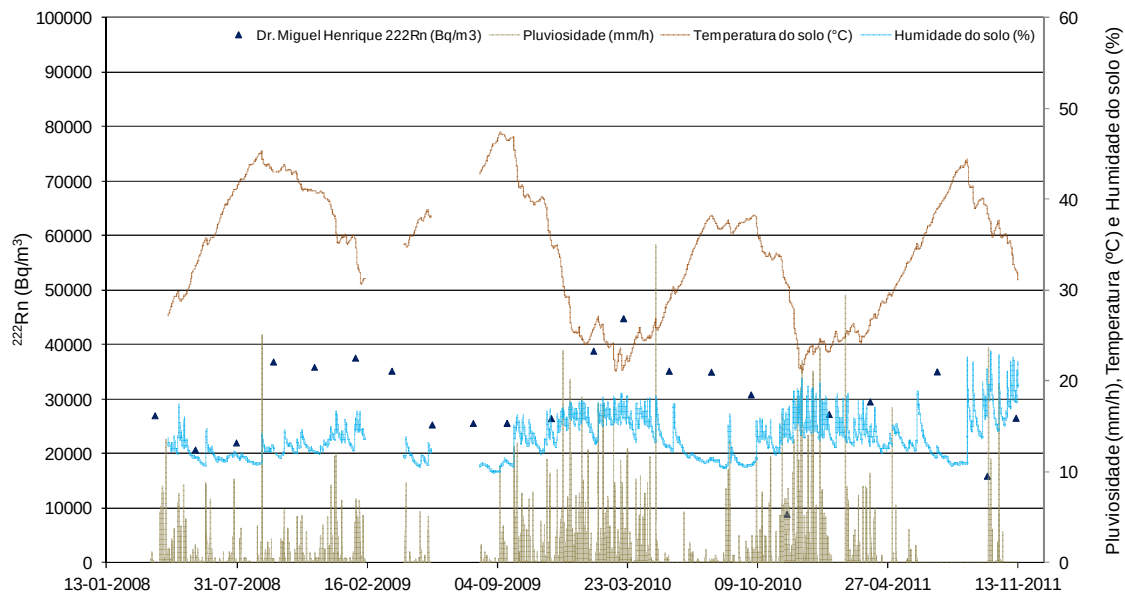


Figura 5.20 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Miguel Henrique, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

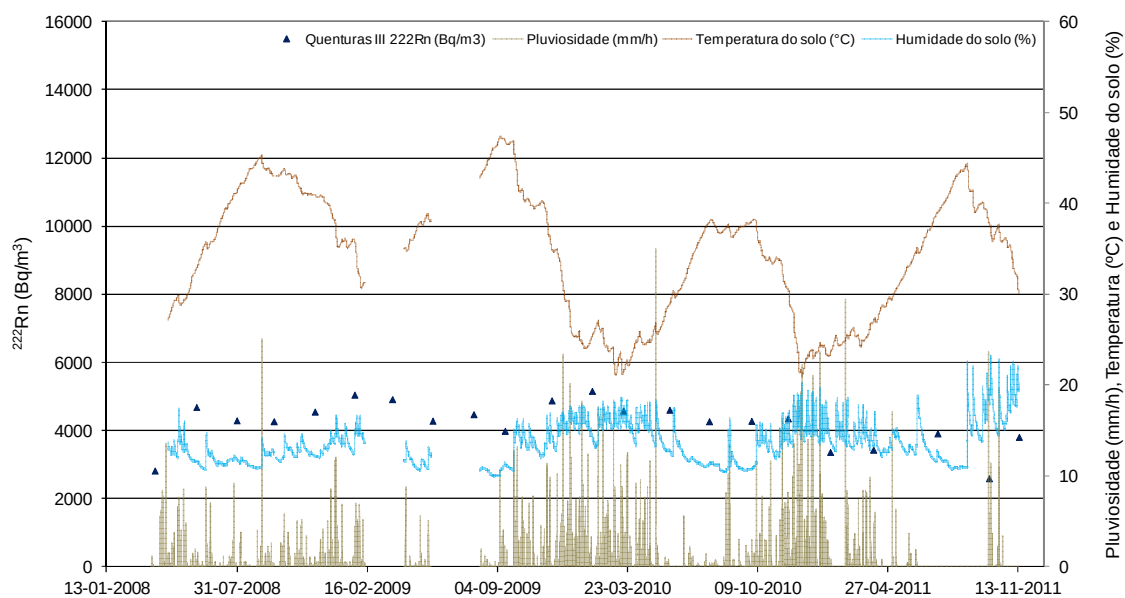


Figura 5.21 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Qenturas III, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

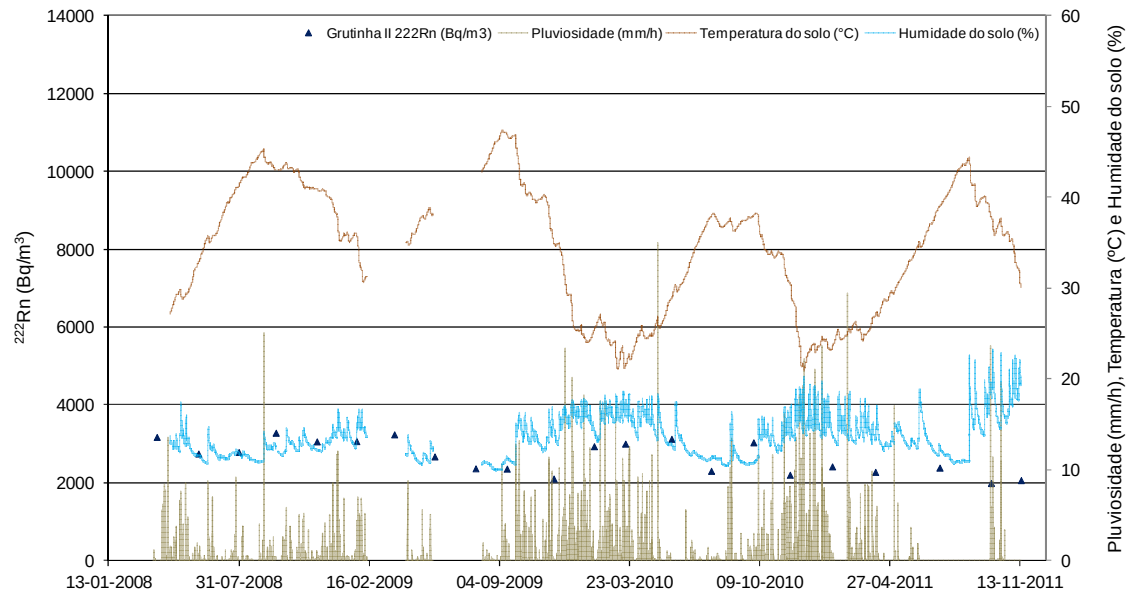


Figura 5.22 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha II, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

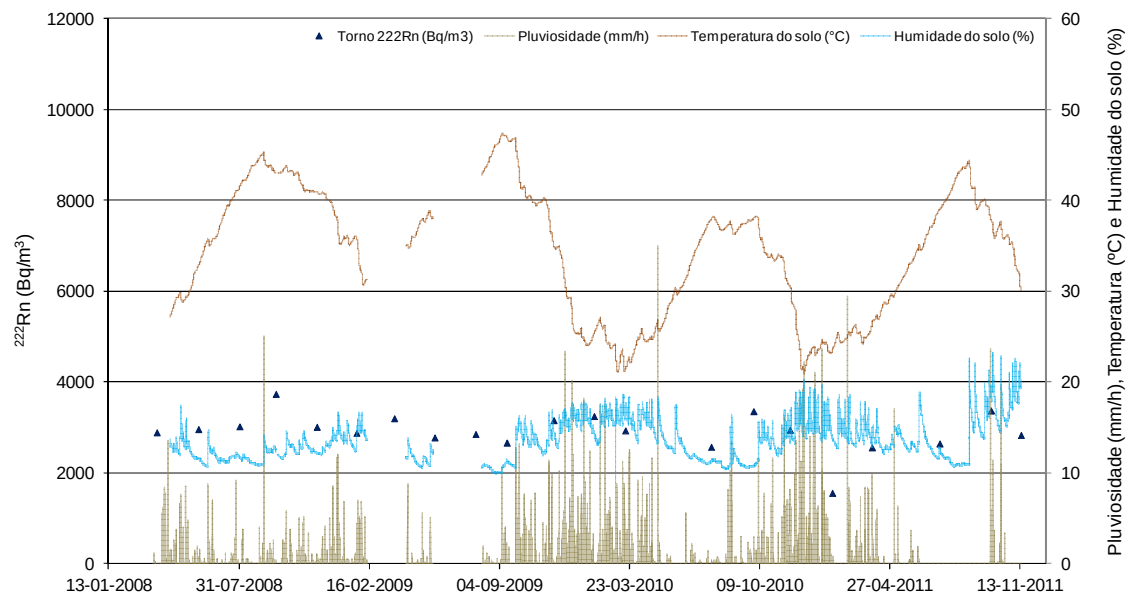


Figura 5.23 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Torno, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

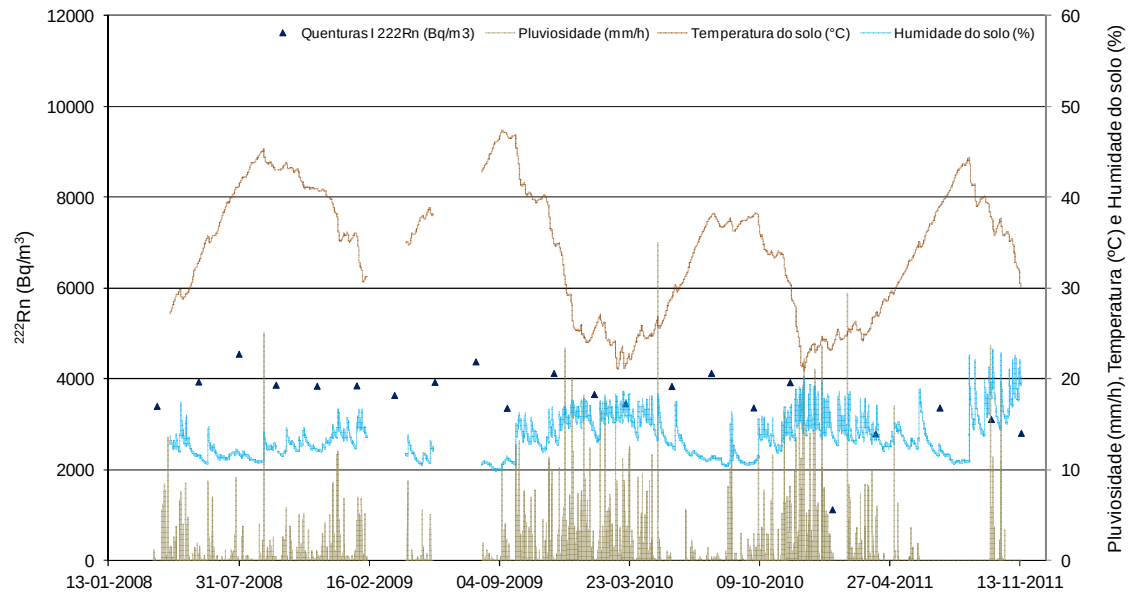


Figura 5.24 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

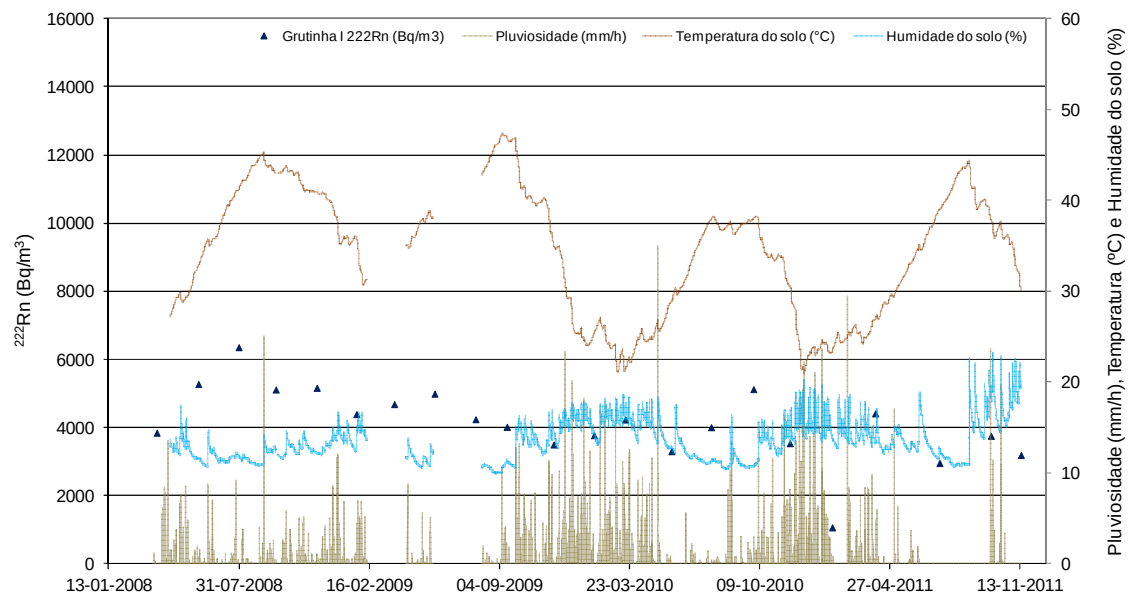


Figura 5.25 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

Relativamente às variações da temperatura nestas nascentes, os factores que parecem exercer alguma influência sobre esse parâmetro são também a temperatura do solo, a pluviosidade e a humidade do solo. De um modo geral, a temperatura do solo sugere uma relação inversa enquanto a pluviosidade e a humidade do solo parecem apresentar uma relação directa com a temperatura nas nascentes de água ortotermiais (Figuras 5.26 a 5.29), sugerindo assim um tempo de residência destas águas de alguns meses. No que se refere às nascentes termiais, as nascentes do Caldeirão, Água da Prata, Quenturas I e Grutinha I parecem apresentar, de um modo geral, uma relação directa com a temperatura do solo e uma relação inversa com a pluviosidade e humidade do solo (Figuras 5.30 a 5.33), sugerindo tempos de residência mais reduzidos, enquanto que as nascentes Quenturas III, Grutinha II e Torno sugerem um comportamento semelhante às nascentes ortotermiais (Figuras 5.34 a 5.36), pelo que apresentam, à semelhança destas tempos de residência também de alguns meses.

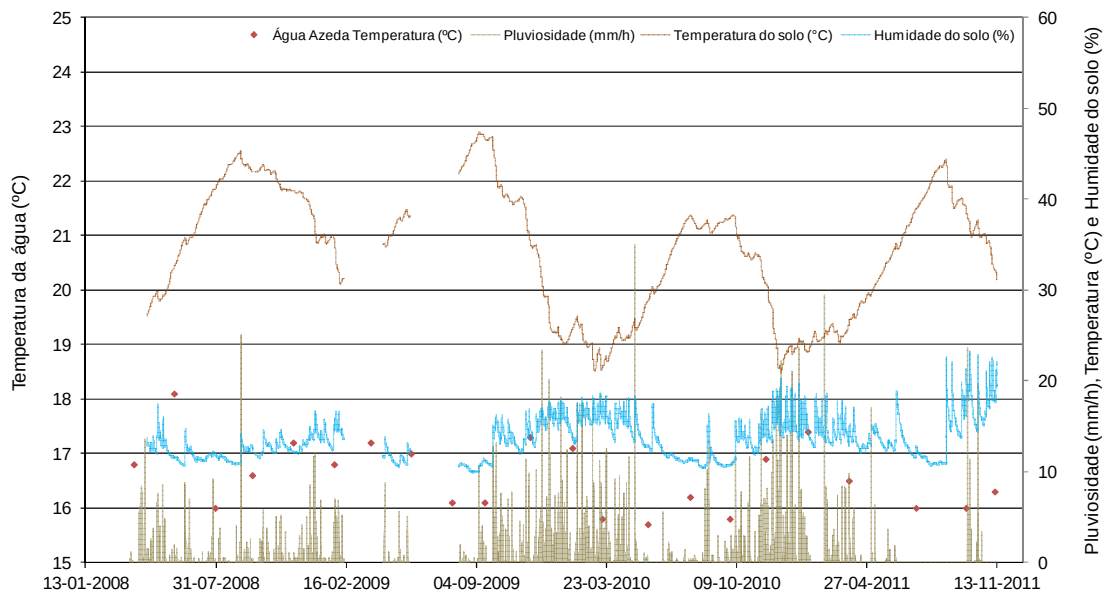


Figura 5.26 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

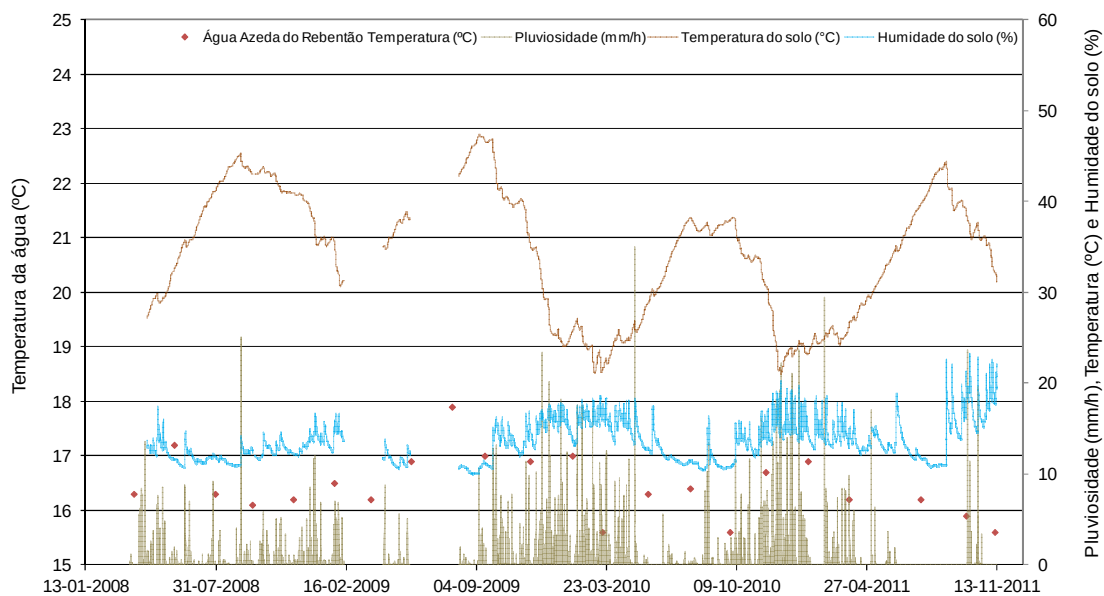


Figura 5.27 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda do Rebentão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

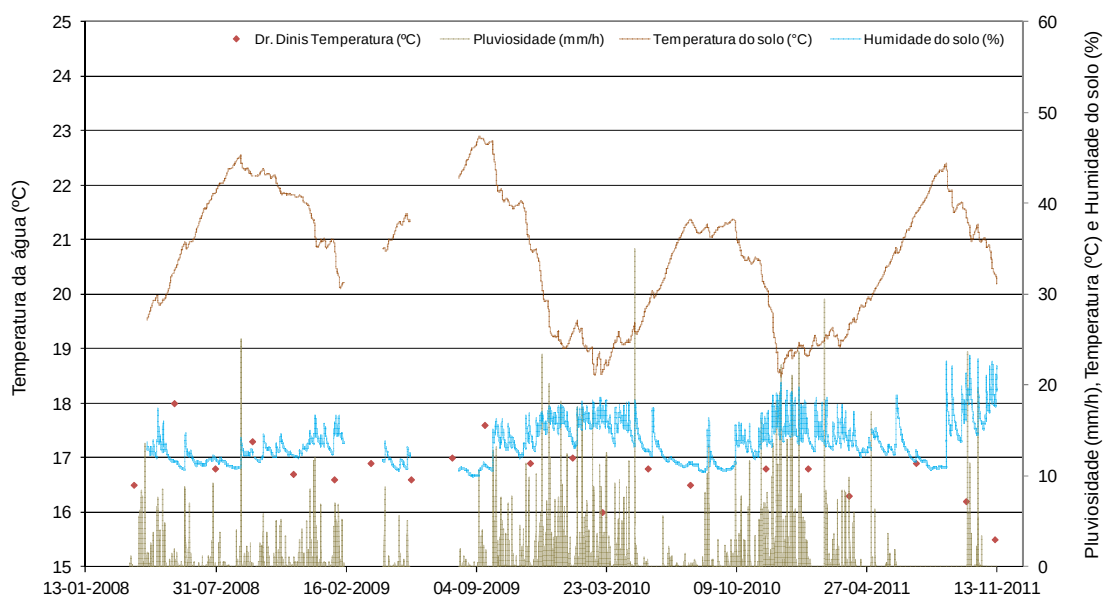


Figura 5.28 – Variação temporal da temperatura na nascente Dr. Dinis, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

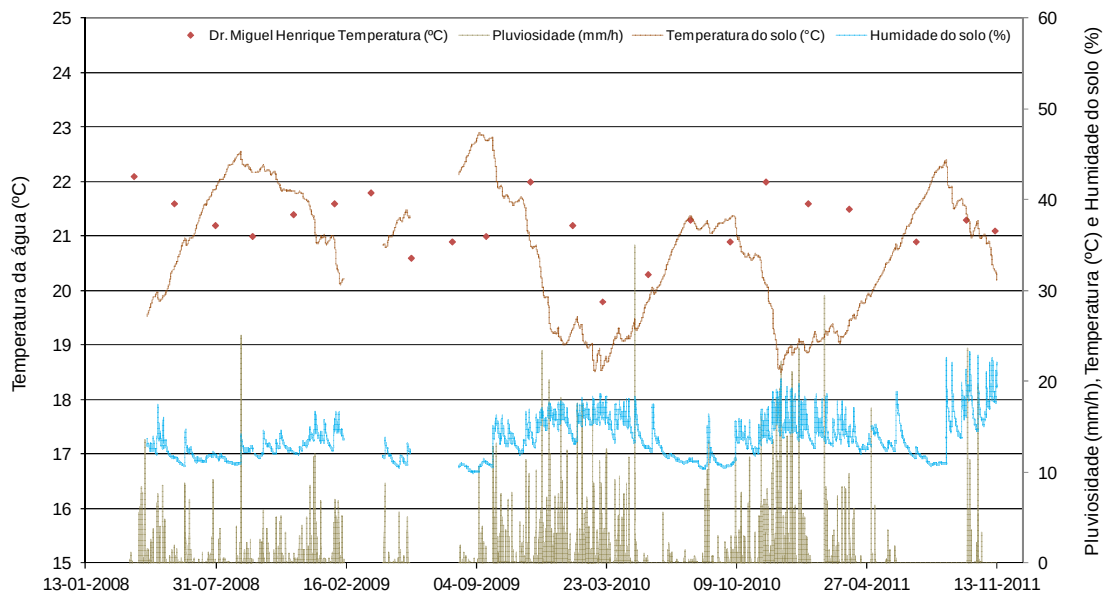


Figura 5.29 – Variação temporal da temperatura na nascente Dr. Miguel Henrique, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

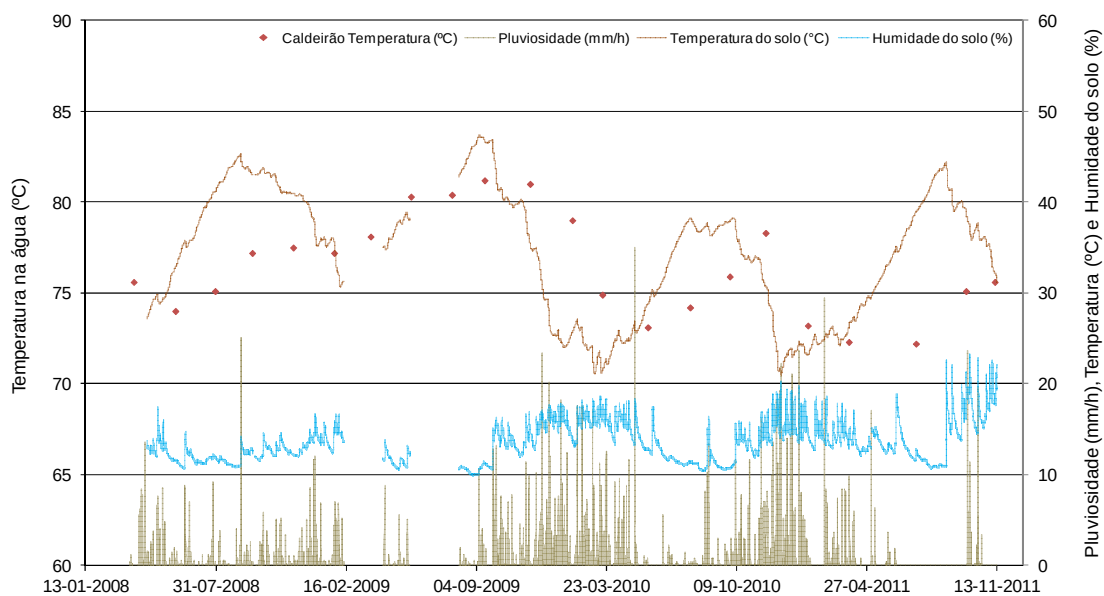


Figura 5.30 – Variação temporal da temperatura na nascente do Caldeirão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

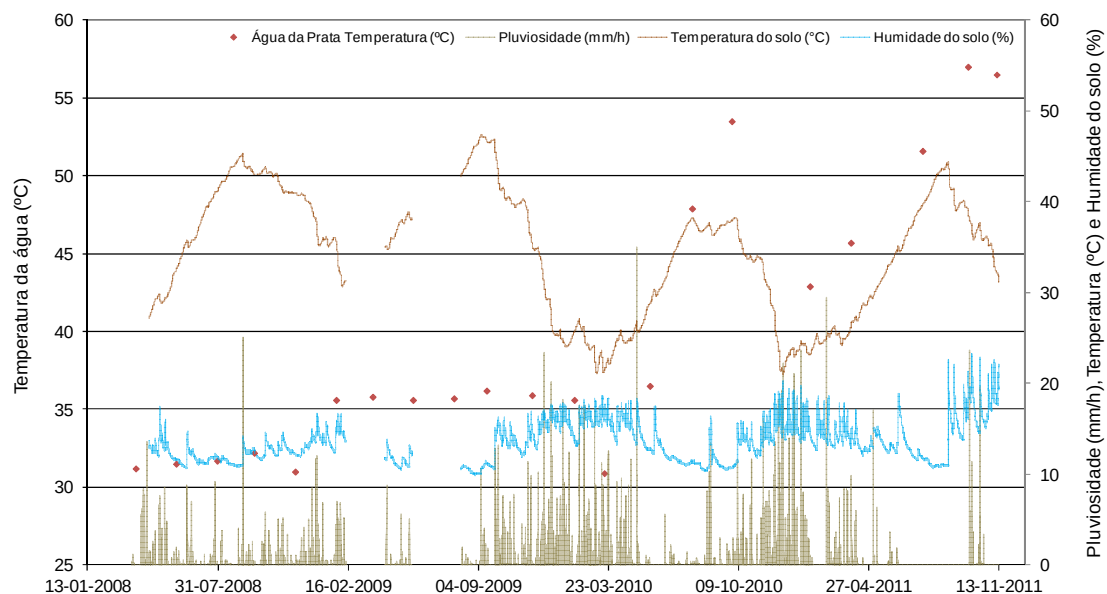


Figura 5.31 – Variação temporal da temperatura na nascente Água da Prata, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

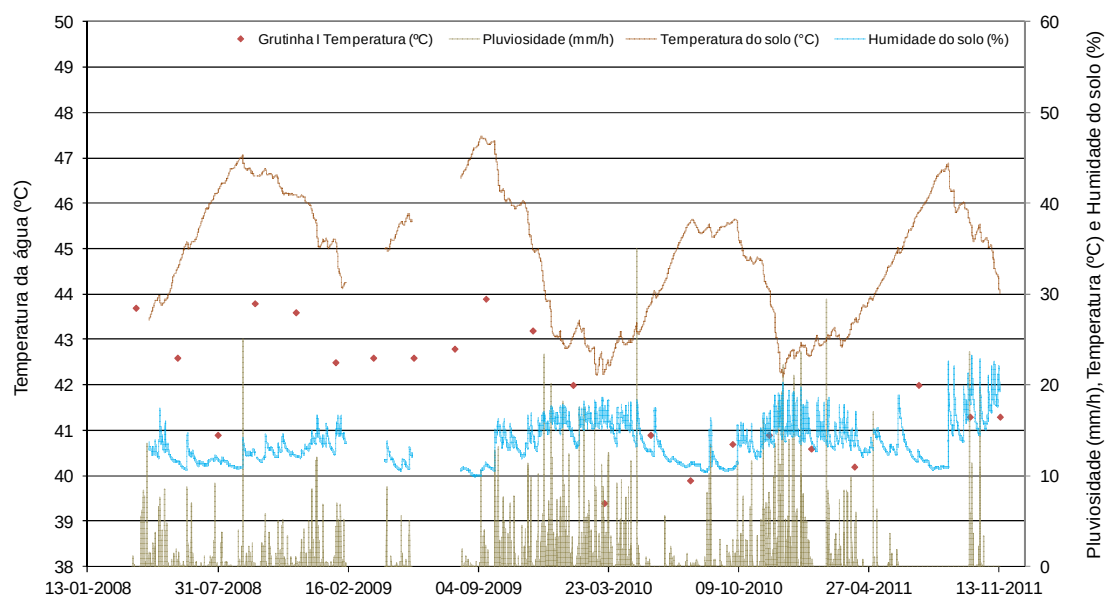


Figura 5.32 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

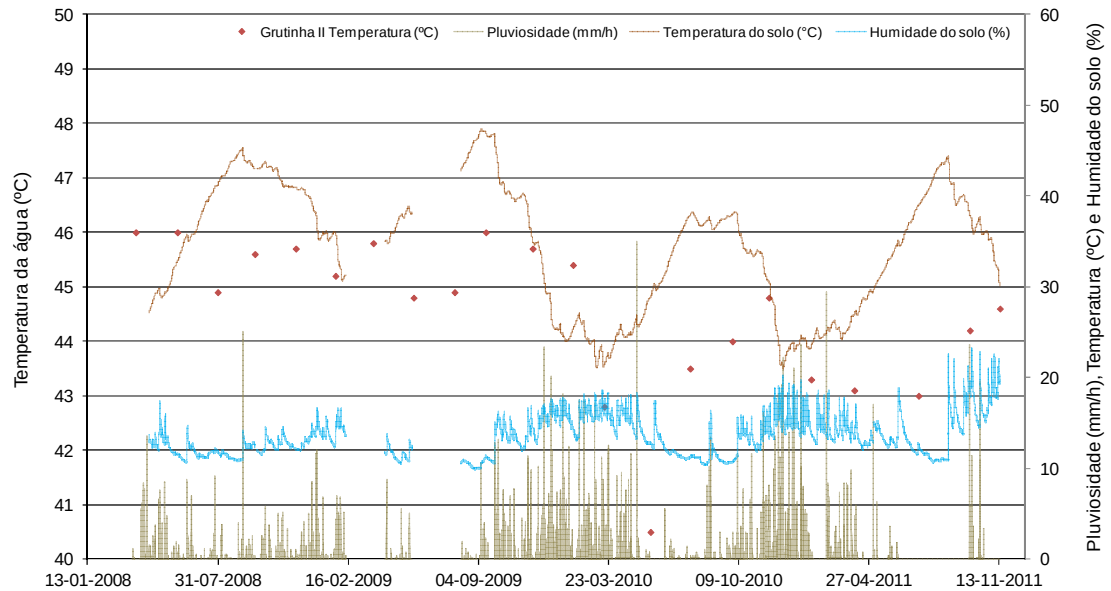


Figura 5.33 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha II, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

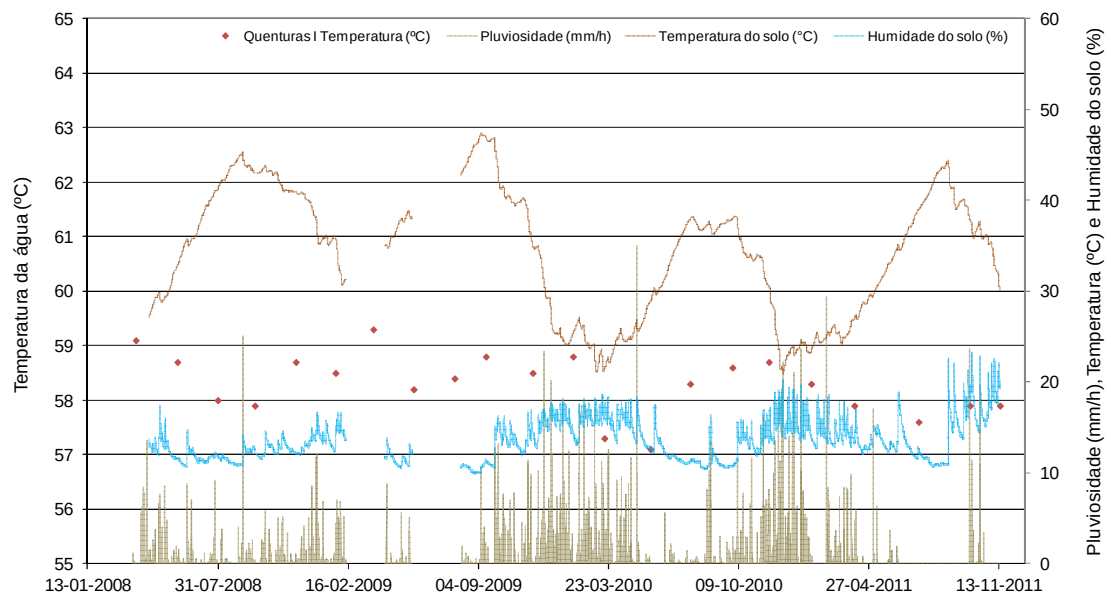


Figura 5.34 – Variação temporal da temperatura na nascente Quenturas I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

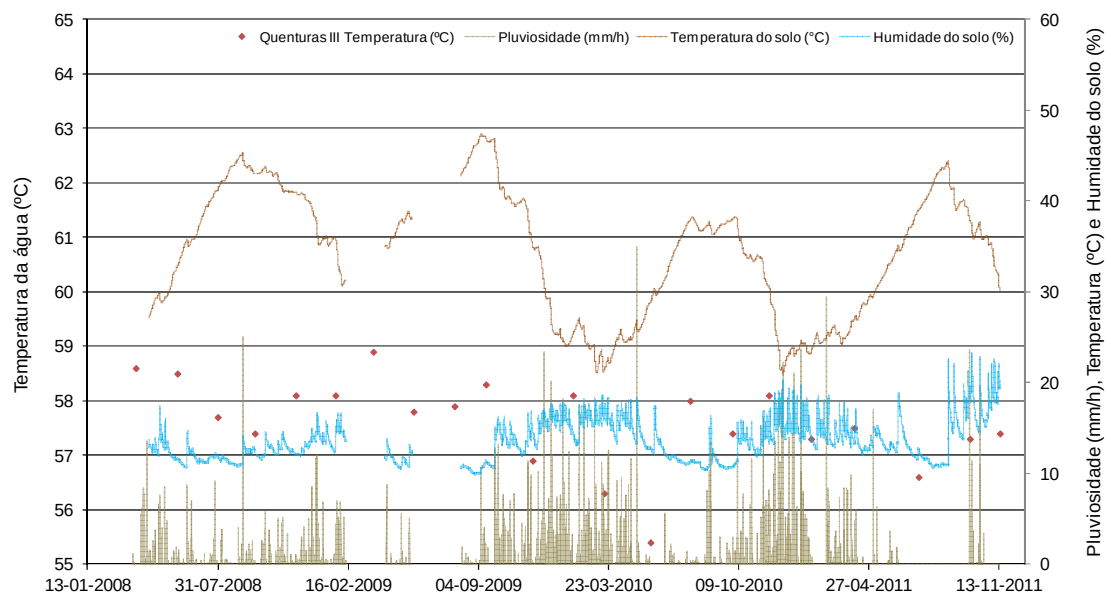


Figura 5.35 – Variação temporal da temperatura na nascente Quenturas III, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

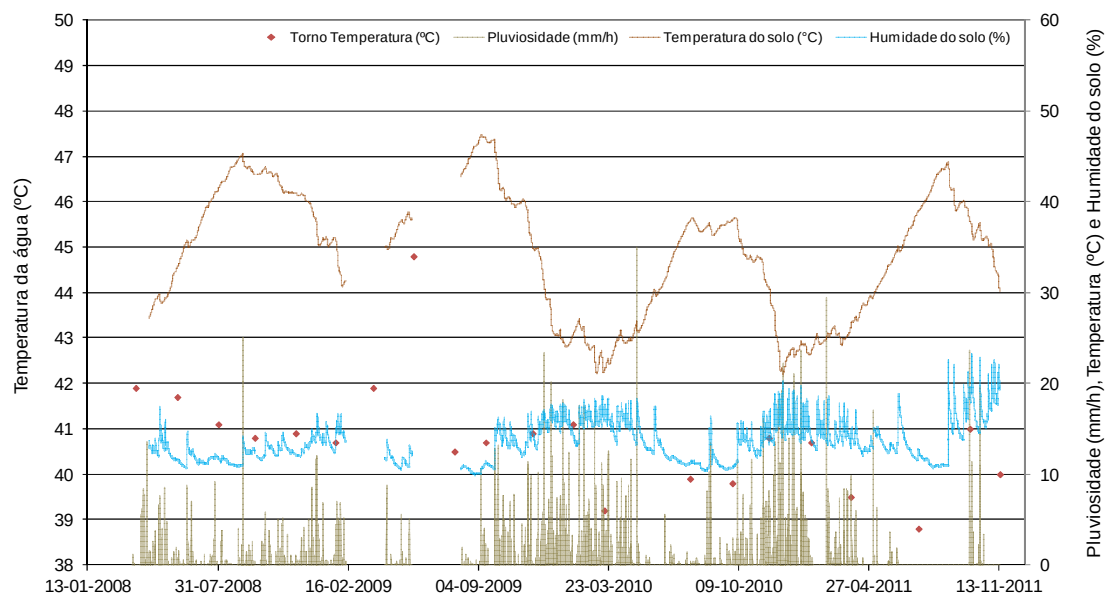


Figura 5.36 – Variação temporal da temperatura na nascente do Torno, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

5.5. Discussão

5.5.1. Caracterização das Nascentes Amostradas em Termos de Radão e Temperatura

A concentração média de radão nas nascentes amostradas (Tabela 5.2) varia entre um valor médio mínimo de 1189 Bq/m^3 na nascente Água da Prata e um valor médio máximo de $29\,765 \text{ Bq/m}^3$ na nascente Dr. Miguel Henrique. Em termos absolutos o valor mínimo detectado encontra-se abaixo do limite de detecção do equipamento e foi medido na nascente Água da Prata e o valor máximo corresponde a um valor de concentração de radão de $44\,834 \text{ Bq/m}^3$ e foi medido na nascente Dr. Miguel Henrique. No que se refere à temperatura média na água das nascentes em análise, esta varia entre um valor médio mínimo de $16,5 \text{ }^\circ\text{C}$ na nascente Água Azeda do Rebentão e um valor médio máximo de $76,2 \text{ }^\circ\text{C}$ na nascente do Caldeirão. Em termos absolutos o valor mínimo detectado foi de $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$ e foi medido na nascente Dr. Dinis e o valor máximo de $81,2 \text{ }^\circ\text{C}$ foi detectado na nascente do Caldeirão (Tabela 5.2).

As nascentes amostradas correspondem a nascentes em aquíferos de altitude, sendo classificadas de acordo com a sua temperatura de emergência em águas termais e águas ortotermais (Costa, 2006; Freire, 2006). De acordo com a classificação de Schoeller (1962 *in* Custódio e Llamas, 1983), as primeiras correspondem a águas cuja temperatura é $4 \text{ }^\circ\text{C}$ superior à temperatura média anual no ar e as segundas correspondem a águas que apresentam temperaturas compreendidas entre a temperatura média anual no ar e a temperatura média anual no ar mais $4 \text{ }^\circ\text{C}$. De acordo com Costa (2006) a temperatura média no ar no local de amostragem ronda os 16 a $17 \text{ }^\circ\text{C}$. As nascentes termais correspondem às nascentes: Caldeirão, Água da Prata, Quenturas I, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno e

as ortotermais correspondem às nascentes: Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis, Dr. Miguel Henrique e Quenturas II (Costa, 2006; Freire, 2006). A composição química da água das nascentes em termos de elementos maiores, menores e traço está sintetizada nas tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 – Elementos maiores presentes nas nascentes em estudo (Cruz *et al.*, 1999; Freire, 2006; Costa, 2006; Cruz *et al.*, 2010).

Nascentes	pH	SDT (mg/L)	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Alc. (mg/L)	CO ₂ L (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
Água Azeda	5,09	840,1	301	75,5	617,4	109,10	33,00	20,00	8,20	3,72	18,00	20,90	92,10
Água Azeda do Rebentão	4,95	697,3	306	61,0	469,0	103,60	34,00	18,00	11,00	3,29	33,00	19,50	74,40
Dr. Dinis	5,28	1353,0	308	64,0	1126,2	111,50	37,00	18,00	7,80	3,41	27,00	19,90	78,10
Caldeirão	6,16	416,0	515	210,5	81,0	165,40	85,00	14,00	8,90	3,18	7,50	36,90	256,80
Água Prata	5,33	619,0	365	130,5	364,2	114,90	45,00	20,00	11,00	3,06	41,00	19,90	159,20
Dr. Miguel Henrique	5,27	814,0	410	99,0	545,2	105,70	56,0	25,00	9,60	2,56	46,00	22,70	120,80
Quenturas I	6,21	953,0	1356	639,0	209,2	250,40	253,00	42,00	28,00	13,80	16,00	76,30	779,60
Quenturas II	7,76		157	59		107,5	27,5	9,9	2,82	0,37	3,1	18,9	
Quenturas III	6,24	939,8	1271	629,0	191,0	252,50	249,00	43,00	30,00	13,30	18,00	76,30	767,40
Grutinha I	6,00	1305,5	1552	709,0	549,2	184,70	304,00	35,00	34,00	14,60	16,00	90,10	865,00
Grutinha II	6,00	1250,1	1490	729,0	514,0	184,90	299,00	32,00	30,00	13,50	19,00	88,80	889,40
Torno	6,02	1117,3	1459	645,0	406,1	170,80	293,00	29,00	28,00	13,60	14,00	91,90	786,90

Tabela 5.4 – Elementos menores e traço presentes nas nascentes em estudo (Cruz *et al.*, 1999; Freire, 2006; Costa, 2006; Cruz *et al.*, 2010), n.d. – não determinado.

Nascentes	Al (mg/L)	As (mg/L)	B (mg/L)	Br (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Hg (mg/L)	Li (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Pb (mg/L)	Sr (mg/L)	Zn (mg/L)
Água Azeda	705	0,80	22	65	0,08	<0,5	1,1	4350	<0,2	5	565	1,3	0,83	23,9	26,9
Água Azeda do Rebentão	739	1,45	18	61	0,03	<0,5	0,8	4160	<0,2	6	511	2,2	0,20	21,9	22,9
Dr. Dinis	826	1,46	89	66	0,01	<0,5	<0,2	4940	<0,2	11	636	2,7	0,09	2,3	26,2
Caldeirão	129	52,80	1110	111	0,01	<0,5	1,8	1090	<0,2	40	790	0,9	1,05	23,9	11,0
Água da Prata	593	0,91	22	71	0,02	<0,5	0,2	2200	<0,2	12	867	7,3	0,19	25,3	10,0
Dr. Miguel Henrique	567	1,86	23	77	0,03	<0,5	<0,2	4210	<0,2	14	720	5,1	0,12	25,2	20,1
Quenturas I	15	18,60	1090	263	0,07	<0,5	7,6	1780	<0,2	178	446	28,8	0,35	70,2	6,9
Quenturas II	0,005	1,3	0,01	n.d.				0,018		0,001	0,001			0,006	0,004
Quenturas III	8	18,00	1050	269	0,01	<0,5	5,7	1790	<0,2	171	436	14,3	0,08	64,8	2,0
Grutinha I	84	64,50	547	294	0,07	<0,5	7,0	4770	<0,2	254	766	13,4	0,91	77,4	8,9
Grutinha II	114	68,50	576	292	0,06	<0,5	6,9	6740	<0,2	249	963	16,6	0,10	72,2	3,2
Torno	119	65,40	492	320	0,05	<0,5	6,8	7290	<0,2	254	1070	5,6	0,16	61,6	6,7

As fácies hidrogeoquímicas das águas do sistema aquífero Furnas-Povoação são predominantemente do tipo bicarbonatadas sódicas (Costa, 2006; Freire, 2006). De acordo com Cruz *et al.* (2010) a componente bicarbonatada pode resultar: (a) de processos biogeoquímicos no solo envolvendo a libertação de CO₂; (b) de processos de interação água-rocha (e.g. meteorização de silicatos) ou (c) de origem magmática.

Estes autores efectuaram ainda medições do CO_2 livre presente nestas nascentes, sendo possível verificar que a maioria das águas amostradas são gasocarbónicas e apenas as águas do Caldeirão, Quenturas I e Quenturas III apresentam valores de CO_2 livre inferiores a 250 mg/L, isto é, valores inferiores ao valor legislado como limite a partir do qual uma água deverá ser considerada como gasocarbónica (D.L. nº 156/98 Artº. 8). Estes autores não apresentam dados referentes à nascente Quenturas II, no entanto, Cruz *et al.* (1999) apresentam valores de CO_2 total para esta água que rondam os 54 a 60 mg/L.

A análise dos valores médios da concentração de radão e da temperatura em cada uma das nascentes amostradas (Figura 5.37) permitiu verificar que as nascentes ortotermais apresentam valores de concentração de radão superiores aos observados nas nascentes termais. Assim, as nascentes Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis, Dr. Miguel Henrique e Quenturas II, que têm temperaturas médias compreendidas entre 16,5 e 21,3 °C (Tabela 5.2), apresentam valores médios de concentração de radão que oscilam entre 6757 e 29 765 Bq/m³, enquanto que, as nascentes do Caldeirão, Água da Prata, Quenturas I, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno com temperaturas médias que variam entre 39 e 76,2 °C apresentam valores de concentração de radão compreendidos entre 1189 e 4386 Bq/m³. Um comportamento semelhante, isto é, valores de concentração de radão mais baixos associados a nascentes termais, foi observado em nascentes na Caldeira de Long Valley na Califórnia (Wollenberg *et al.*, 1985; Flexser *et al.*, 1987). Estas observações permitem salientar a importância da temperatura na solubilidade do radão na água evidenciando que incrementos da temperatura promovem uma diminuição da solubilidade do radão facilitando assim o escape deste gás. No que se refere à presença de CO_2 livre, a análise da figura 5.38 não permite observar uma relação evidente entre a concentração de radão e este parâmetro.

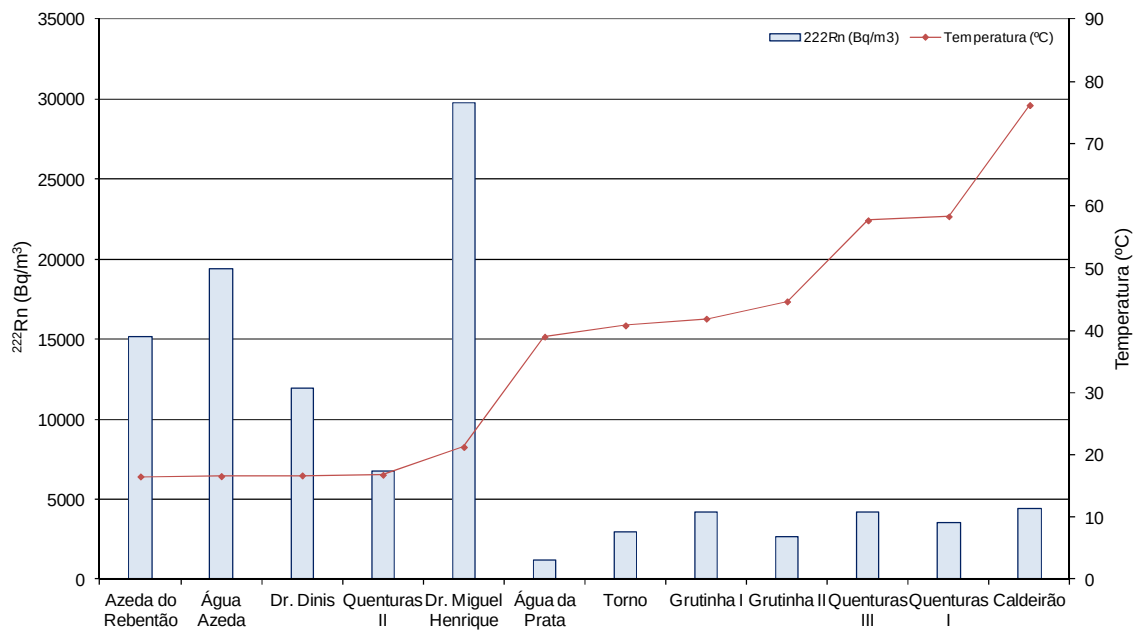


Figura 5.37 – Valores médios da temperatura e da concentração de ^{222}Rn nas nascentes em análise.

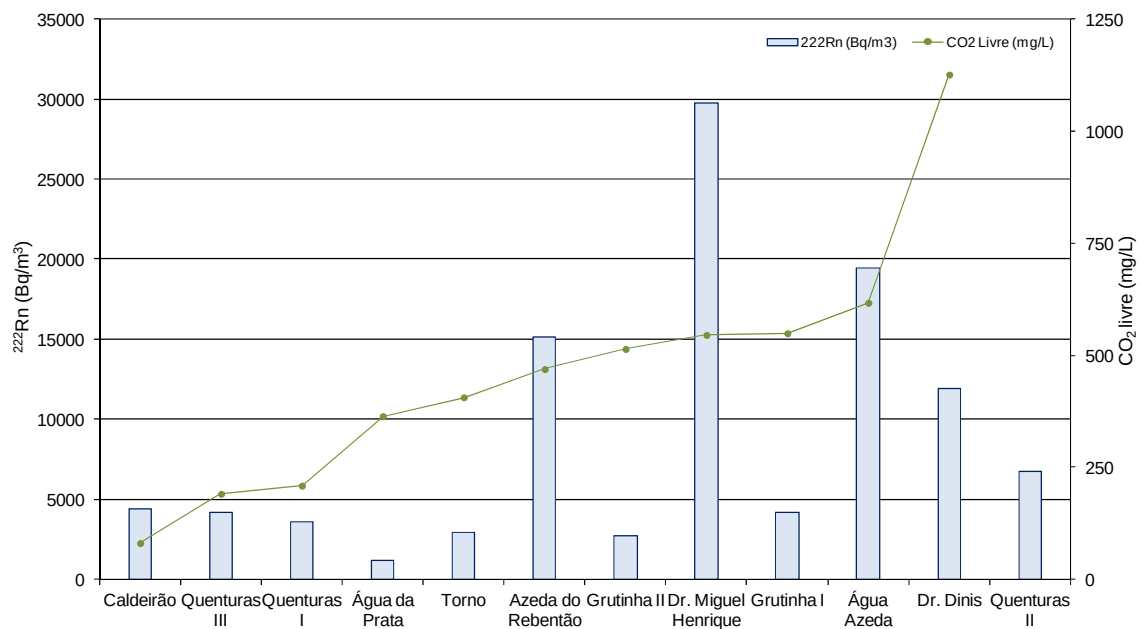


Figura 5.38 – Valores médios da concentração de ^{222}Rn e de CO₂ livre nas nascentes em análise. Não existem dados relativamente ao CO₂ livre para a nascente Quenturas II (Costa, 2006; Freire, 2006; Cruz *et al.*, 2010).

5.5.2. Variações Temporais de Radão e de Temperatura nas Nascentes Amostradas

O sistema aquífero Furnas-Povoação apresenta um conjunto diversificado de águas minerais cuja gama de temperaturas oscila entre 16 °C até valores próximos de 100 °C (Costa, 2006; Freire, 2006). De acordo com Cruz *et al.* (1999), a componente hidrotermal das águas minerais das Furnas está associada a um aquífero localizado a cerca de 100 a 200 m de profundidade, com uma temperatura estimada próxima dos 160 °C, sendo a fonte de calor proveniente de corpos intrusivos associados a este vulcão. A fumarola Caldeira Grande, com valores de pH que rondam os 7,7, deverá ser a que melhor representa, à superfície, as condições presentes neste aquífero (Ferreira e Oskarsson, 1999). Esta fumarola apresenta valores de temperatura à superfície próximos de 100 °C e, em termos de composição química da fracção gasosa apresenta, para além da presença de vapor de água, predominantemente CO_2 juvenil (Ferreira, 1994; Ferreira e Oskarsson, 1999; Ferreira, 2000; Ferreira *et al.*, 2005). Nesta fumarola foram registados valores de concentração de radão superiores a 100 000 Bq/m³ (P. Allard, comunicação pessoal, 2011).

As nascentes amostradas correspondem a águas ortotermais, apresentando, portanto, temperaturas médias baixas, que oscilam entre 16,5 e 21,3 °C, e águas termais, cujas temperaturas médias oscilam entre 39 e 76,2 °C, podendo reflectir diferentes graus de mistura entre águas frias de circulação menos profunda e águas provenientes do aquífero hidrotermal (Cruz *et al.*, 1999). As variações das concentrações de radão e de temperatura nas nascentes amostradas apresentam um padrão sazonal aparentemente relacionado com a flutuação da temperatura e da humidade do solo e da pluviosidade ao longo do ano.

Os parâmetros meteorológicos que deverão exercer uma influência sobre as variações sazonais da temperatura e da concentração de radão nas águas amostradas são a pluviosidade e a temperatura do ar. A temperatura do ar exerce influência na zona de recarga dos aquíferos, sendo a temperatura das águas

subterrâneas ligeiramente superior ao valor da temperatura do ar no mesmo local (2 a 3 °C) (Yamamoto, 1995). No entanto, se a recarga for efectuada em zonas de maior altitude, e se não ocorrer interferência do meio por onde esta água circula (e.g. mistura com águas termais), poderão ser medidas temperaturas inferiores às da temperatura do ar na zona de emergência (Yamamoto, 1995).

A temperatura do solo é utilizada, neste estudo, como indicador das variações da temperatura do ar, uma vez que a série temporal respeitante a esta última apresenta maior número de falhas durante o período de amostragem, não permitindo uma clara percepção da sua variação sazonal (Anexo VII). A temperatura do solo apresenta uma variação sazonal inversa com a pluviosidade e a humidade do solo (Figura 5.39). A humidade do solo, por seu lado, é utilizada como indicador da sazonalidade da pluviosidade, uma vez que, e como seria de esperar, este parâmetro apresenta uma relação directa com a pluviosidade e, consequentemente, inversa com a temperatura do solo.

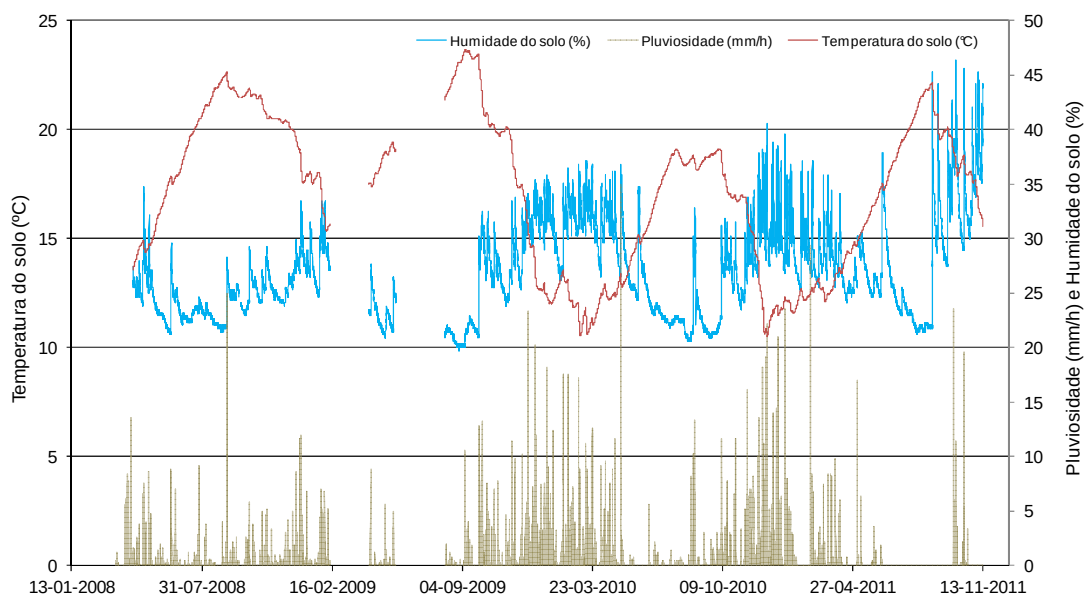


Figura 5.39 – Variação temporal da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo.

Os efeitos das variações destes parâmetros meteorológicos nem sempre se fazem sentir imediatamente ao nível da água na nascente, podendo apresentar algum

atraso na resposta de acordo com o tempo de residência da água subterrânea, ou seja, a magnitude do seu circuito no subsolo. As águas amostradas apresentam um tempo de residência de alguns meses, como sugerido pela discrepância entre as temperaturas máximas medidas no solo e na água. Esta diferença temporal é confirmada pelas variações de caudal nestas nascentes que apresentam uma relação inversa com a temperatura da água (Dados de caudal de Freire *et al.*, 2013 *in press*). Assim, nesta discussão, as variações da temperatura do solo e na água servem de base para a determinação aproximada de tempos de residência. As variações da temperatura e do caudal na nascente do Caldeirão constituem um exemplo das situações anteriormente descritas (Figuras 5.40 e 5.41).

No que se refere ao radão, e ao seu decaimento, importa salientar que este gás atinge o equilíbrio radioactivo após quatro a cinco tempos de semi-vida, isto é, o radão presente no aquífero atingirá o equilíbrio radioactivo em aproximadamente 20 dias (Hoehn *et al.*, 1992; Hoehn e Cirpka, 2006; Mullinger *et al.*, 2009).

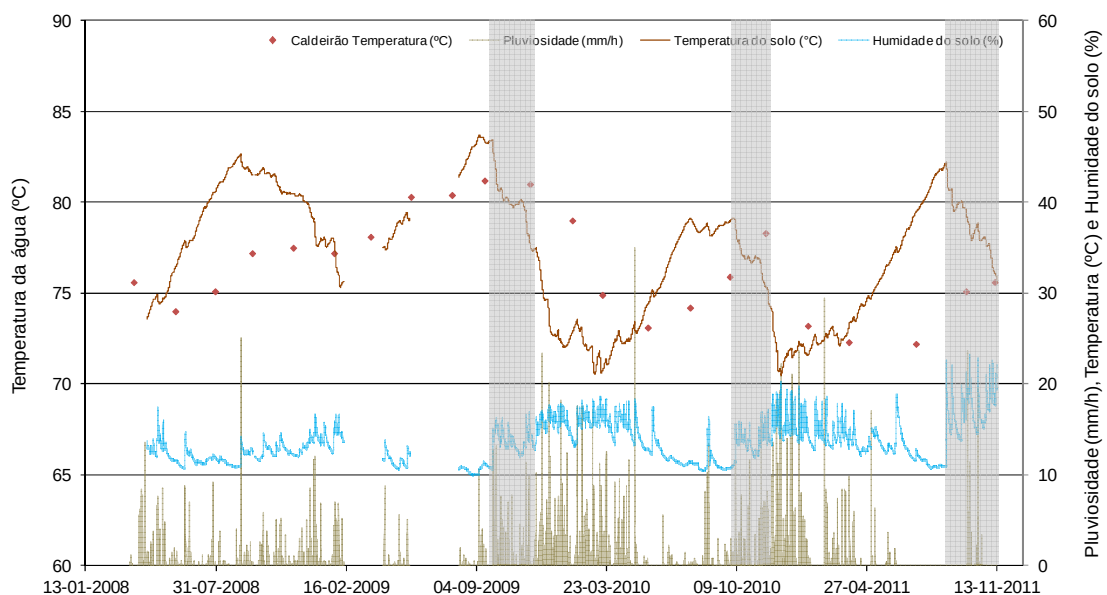


Figura 5.40 – Variação temporal da temperatura na nascente do Caldeirão, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores máximos de temperatura medidos no solo e na água.

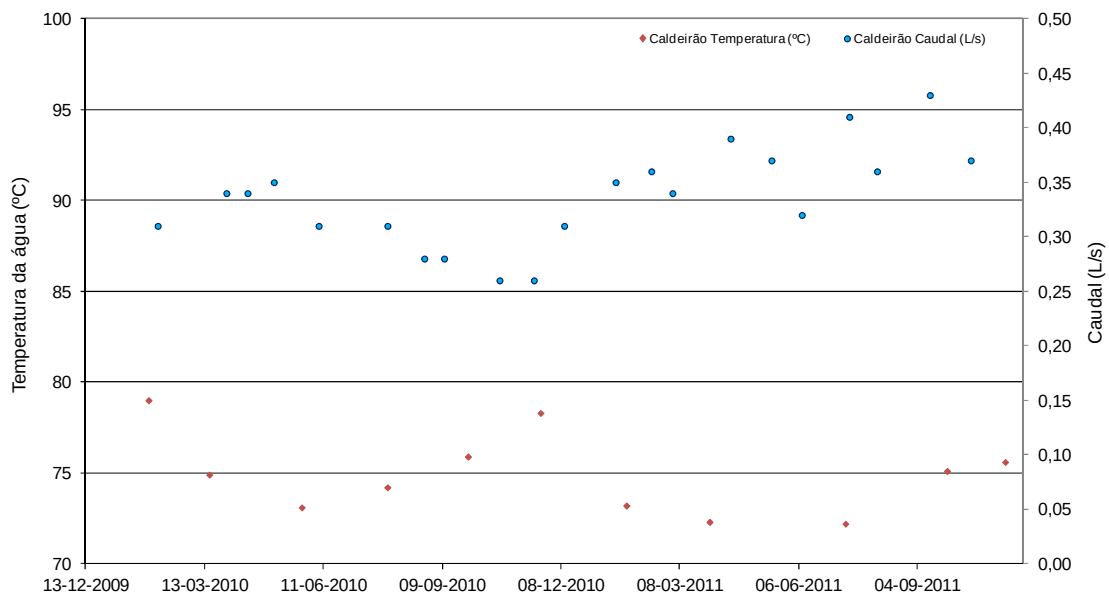


Figura 5.41 – Variação temporal da temperatura e do caudal da nascente do Caldeirão. Os dados referentes ao caudal desta nascente são de Freire *et al.* (2013 *in press*).

O estudo da variação temporal da concentração de radão e da temperatura da água nas nascentes ortotermais em análise, isto é, nas nascentes Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis e Dr. Miguel Henrique, em função da variação de parâmetros meteorológicos (*e.g.* Figuras 5.15 e 5.26), permite identificar, de um modo geral, uma aparente relação directa com a pluviosidade e a humidade do solo e inversa com a temperatura do solo. No entanto, tendo em consideração o tempo de residência destas águas, estimada em 2 a 4 meses, o que implica um atraso na resposta ao nível da água na nascente relativamente a variações dos parâmetros meteorológicos em estudo, as variações sazonais da concentração de radão e da temperatura nestas águas apresentam efectivamente, uma relação directa com a temperatura do solo, e inversa com a pluviosidade e humidade do solo, contrariamente ao inicialmente sugerido (Figura 5.42). Um tempo de residência semelhante, de aproximadamente 2 meses, foi descrito para algumas nascentes na ilha da Santa Maria (Cruz, 1992).

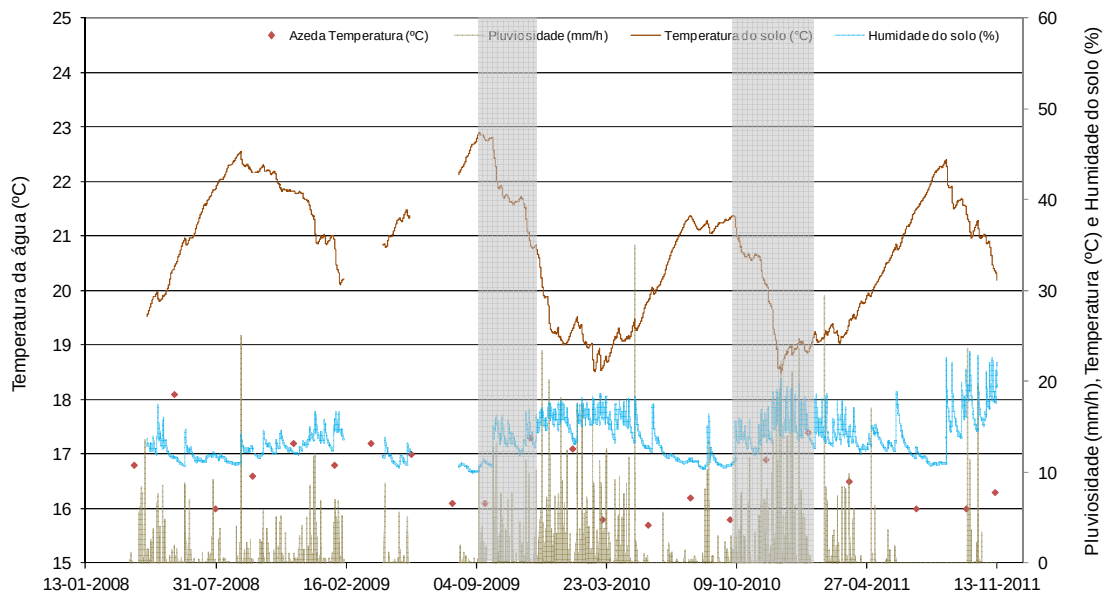


Figura 5.42 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores de temperatura medidos no solo e na água.

Estas nascentes apresentam valores pouco elevados de condutividade eléctrica, que oscilam entre 301 e 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabela 5.3), sugerindo uma reduzida interação água-rocha, associada a uma percolação pouco profunda, e valores de CO_2 livre elevados, entre 469 e 1126,2 mg/L (Tabela 5.3), o que sugere que o radão presente nestas águas poderá resultar predominantemente do transporte advectivo de zonas mais profundas, funcionando o CO_2 como gás de arraste, sendo posteriormente dissolvido. Assim, incrementos da pluviosidade e da humidade do solo, e diminuições da temperatura do solo, irão provocar uma diminuição da temperatura da água subterrânea e uma maior diluição da concentração do radão presente que, devido ao tempo de residência destas águas, apenas serão medidos na nascente alguns meses após a ocorrência da flutuação destes parâmetros meteorológicos.

Relativamente à nascente Quenturas II, esta ficou sem caudal durante um período de aproximadamente ano e meio, entre Janeiro de 2010 e Julho de 2011, impossibilitando a identificação de variações sazonais associadas aos parâmetros meteorológicos em análise. De acordo com informações obtidas junto da Câmara

Municipal da Povoação, a ausência de caudal deveu-se às obras efectuadas no Centro Termal das Furnas. Após este período, a água voltou a exsurgir, mas os valores de concentração de radão, inicialmente com uma média igual a 7964 Bq/m^3 , diminuíram, passando a apresentar uma média de 1524 Bq/m^3 (Figura 5.10).

A análise da variação temporal da concentração de radão e da temperatura nas nascentes termais em estudo, em função dos parâmetros pluviosidade, temperatura e humidade do solo, permitiu identificar dois comportamentos distintos. Nas nascentes do Caldeirão e Água da Prata, as variações da concentração de radão apontam para uma relação directa com a pluviosidade e a humidade do solo, e inversa com a temperatura do solo (Figuras 5.18 e 5.19). Relativamente às variações da temperatura da água nestas emergências (Figura 5.40), estas apontam para uma relação inversa com a pluviosidade e a humidade do solo, e directa com a temperatura do solo. Estas relações reflectem-se ao nível da nascente de acordo com o tempo de residência destas águas. Nas restantes nascentes termais, as variações da concentração de radão e da temperatura da água apresentam uma relação directa com a temperatura do solo, e inversa com a pluviosidade e humidade do solo, que se reflecte com um desfasamento temporal ao nível da nascente de acordo com o respectivo tempo de residência.

As nascentes do Caldeirão e Água da Prata apresentam valores de condutividade baixos, que oscilam entre 365 e $515 \mu\text{S/cm}$ (Tabela 5.3), sugerindo uma reduzida interação água-rocha, resultado do curto período de residência (1 a 2 meses), e valores de CO_2 livre que variam entre 81 e $364,2 \text{ mg/L}$ (Tabela 5.3). Deste modo, pelo facto de se tratar de águas termais, o radão e o CO_2 presentes nestas águas deverão resultar, essencialmente, de transporte convectivo de zonas mais profundas, sendo posteriormente dissolvidos. No período de amostragem, a nascente do Caldeirão apresenta uma amplitude térmica de aproximadamente 9°C e a nascente Água da Prata de 34°C (Tabela 5.2). Neste caso, o factor que parece determinante na variação da concentração de radão nestas águas é a variação da temperatura nas mesmas, pelo que o efeito da influência deste parâmetro sobre a solubilidade do radão na água deverá sobrepor-se ao efeito da diluição. Assim, incrementos da pluviosidade

e da humidade do solo, e diminuições da temperatura do solo, irão provocar uma diminuição da temperatura da água, favorecendo a solubilidade do radão e consequentemente um incremento da respectiva concentração. Deste modo, após períodos de reduzida pluviosidade e humidade do solo, e de incrementos da temperatura do solo, irá verificar-se um incremento da temperatura nestas águas e uma diminuição da concentração de radão.

As nascentes Quenturas I, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno correspondem a nascentes termais que apresentam valores de condutividade eléctrica mais elevados, que oscilam entre 1271 e 1552 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabela 5.3), sugerindo um maior grau de interacção água-rocha, resultado de uma percolação mais longa e de diferentes graus de mistura entre fluidos mais superficiais e mais profundos. Os valores de CO_2 livre nestas emergências variam entre 191 e 549,2 mg/L (Tabela 5.3). O radão presente nestas águas poderá resultar, por um lado, da mistura com águas termais existentes em profundidade, e que devem ser sido inicialmente mais enriquecidas em radão, como se pode confirmar pelos valores de radão superiores a 100 000 Bq/m³ medidos na Caldeira Grande (P. Allard, comunicação pessoal, 2011), e por outro, da interacção água-rocha, o que é compatível com os valores de condutividade eléctrica. No entanto, estas águas apresentam valores de concentração de radão inferiores aos das nascentes ortotermiais, resultado provável da diminuição da solubilidade do radão como consequência da presença de temperaturas mais elevadas, e da diluição resultante da mistura com águas frias mais superficiais.

Estas nascentes apresentam diferentes tempos de residência, como sugerido pelo desfasamento temporal entre as temperaturas máximas medidas no solo e na água. Neste contexto, as variações sazonais da concentração de radão e da temperatura da água aparentam ter uma relação contrastante com os parâmetros meteorológicos em análise que não corresponde à realidade.

As nascentes Grutinha I e Quenturas I deverão ser as que apresentam um tempo de residência mais curto, de aproximadamente um mês (e.g. Figura 5.43), evidenciando as variações sazonais da temperatura e da concentração de radão na

água uma relação directa com a temperatura do solo e inversa com a pluviosidade e humidade do solo. A nascente Grutinha II deverá apresentar um tempo de residência intermédio, de aproximadamente 2 a 3 meses, apresentando já algum atraso na resposta à variação dos parâmetros meteorológicos em análise (e.g. Figura 5.44). Finalmente, as nascentes do Torno e Quenturas III deverão ser as que apresentam um tempo de residência mais longo, de aproximadamente 3 a 4 meses, denotando um comportamento próximo das nascentes ortotermais (e.g. Figura 5.45).

Assim quando ocorre um incremento da pluviosidade e da humidade do solo e uma diminuição da temperatura do solo, verifica-se na água da nascente uma diminuição quer da temperatura, quer da concentração de radão presente devido a uma maior mistura da água superficial com as águas termais existentes em zonas mais profundas. No entanto, a resposta à variação dos parâmetros meteorológicos na água amostrada na nascente depende do tempo de residência destas águas.

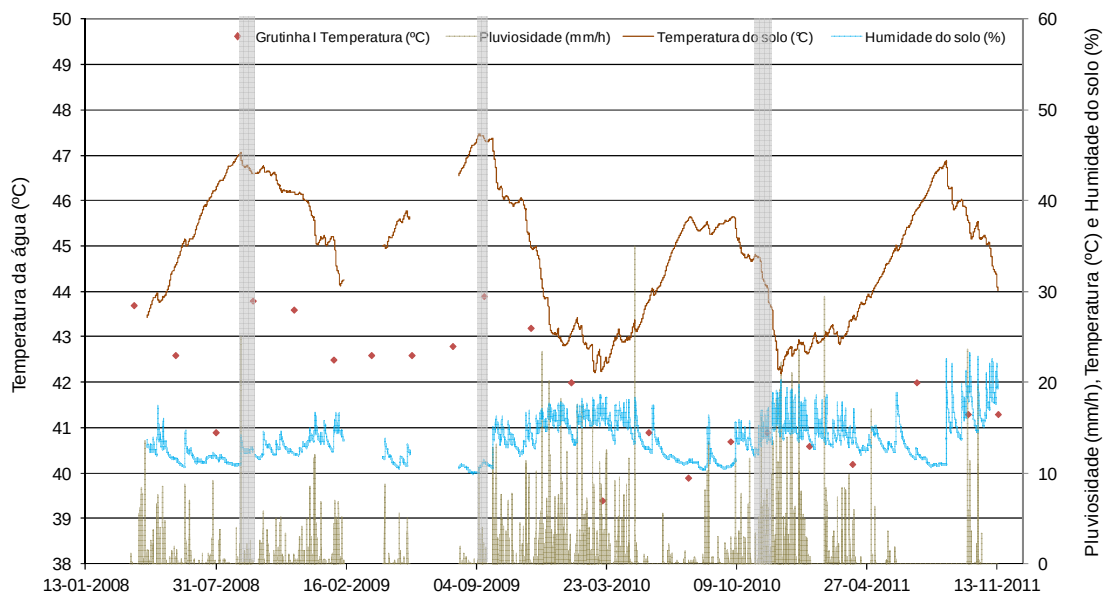


Figura 5.43 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha I, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores máximos de temperatura medidos no solo e na água.

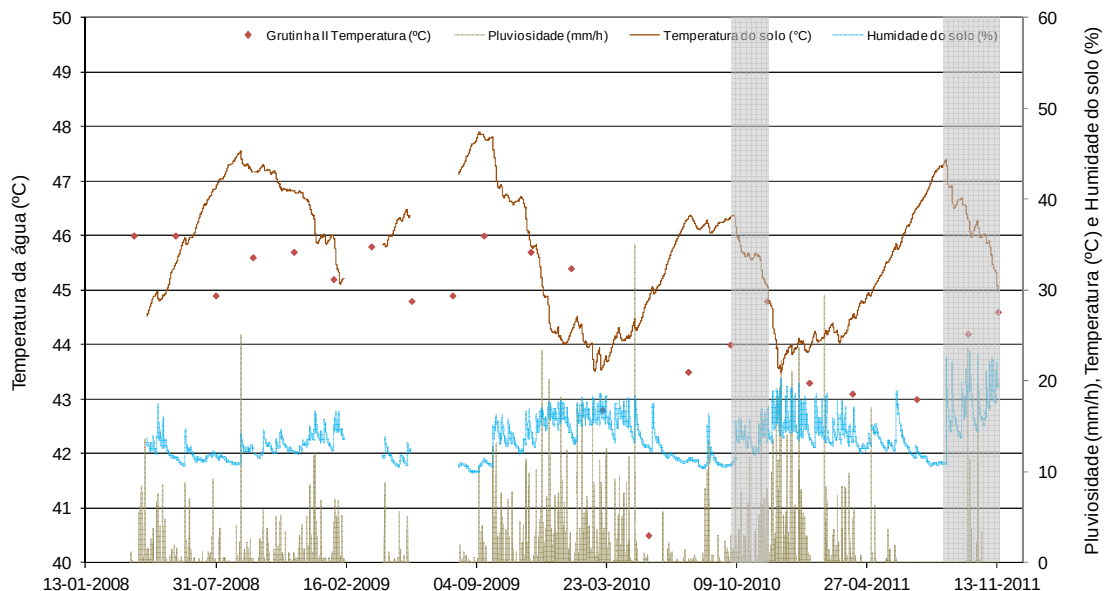


Figura 5.44 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha II, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores de temperatura medidos no solo e na água.

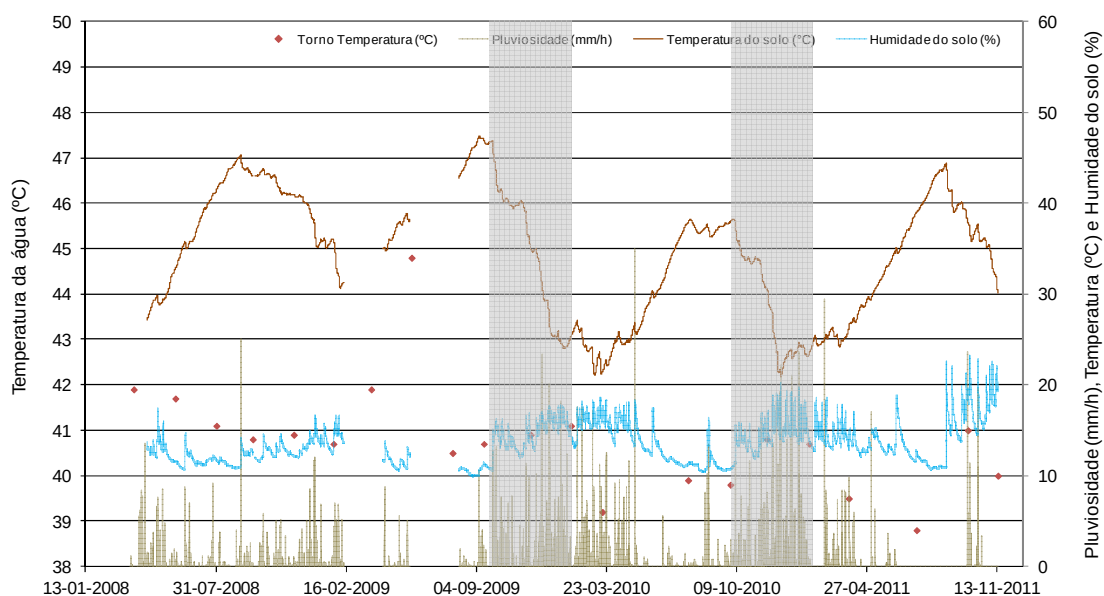


Figura 5.45 – Variação temporal da temperatura na nascente do Torno, da temperatura do solo, da pluviosidade e da humidade do solo. As zonas a sombreado cinza representam os atrasos na resposta tendo em consideração as discrepâncias entre os valores de temperatura medidos no solo e na água.

De um modo geral, a concentração de radão e a temperatura da água das nascentes em estudo apresentam uma relação directa com a temperatura do solo e inversa com a pluviosidade e a humidade do solo, sendo esta relação traduzida ao nível das medições efectuadas na água da nascente com atrasos que reflectem os tempos de residência da água. A excepção corresponde às nascentes Água da Prata e do Caldeirão, cuja concentração de radão apresenta uma relação directa com a pluviosidade e com a humidade do solo e inversa com a temperatura do solo. Relativamente à temperatura destas águas, esta apresenta uma relação inversa com a pluviosidade e com a humidade do solo e directa com a temperatura do solo. Estas relações reflectem-se, ao nível da nascente, de acordo com os tempos de residência destas águas.

5.5.3. Dados Obtidos e Actividade Sísmica

Devido ao reduzido número de amostragens efectuadas em cada nascente, isto é, entre 16 a 26 análises (Tabela 5.2), não foi possível aplicar a análise de regressão múltipla. Assim, recorreu-se aos dados obtidos, sem a aplicação de filtros, para tentar identificar anomalias associadas a fenómenos de profundidade. Para tal foi calculado a média (μ) e o desvio padrão (σ) e foram considerados valores anómalos, valores que se desviam do intervalo $\mu \pm 2\sigma$ (Planinic *et al.*, 2001; Miklavcic *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2009; Viveiros, 2010).

O período em análise corresponde ao intervalo entre 22 de Novembro de 2007 e 14 de Novembro de 2011, durante o qual as amostragens foram efectuadas com uma regularidade bimestral em todas as nascentes seleccionadas. Durante este período foram registados, no Vulcão das Furnas e área envolvente (Figura 2.14), cerca de 470 eventos sísmicos com magnitudes de duração (M_d) que oscilaram entre os 0,4 e os 2,7 (CVARG/CIVISA, dados não publicados). A variação temporal da concentração de radão nas nascentes em análise e das magnitudes dos eventos sísmicos não permite a identificação de uma relação evidente entre estas duas

variáveis (Figuras 5.46 a 5.57). O facto da amostragem ter sido efectuada com uma regularidade bimestral pode ter conduzido a que eventuais anomalias na concentração de radão associadas a eventos sísmicos não tenham sido detectadas. Os valores de baixa concentração de radão, verificados pontualmente em algumas nascentes, e projectados fora do intervalo $\mu \pm 2\sigma$ poderão resultar da perda deste gás durante a amostragem e/ou transporte da amostra. Por exemplo, no caso da nascente Dr. Miguel Henrique esse valor mais baixo ocorreu num período sem sismicidade (Figura 5.51). Por outro lado, a projecção gráfica dos valores acumulados da concentração de radão e da energia dos eventos sísmicos (Figuras 5.58 e 5.59) permite verificar uma variação relativamente estável da concentração de radão nas nascentes amostradas não evidenciando uma relação evidente com a sismicidade. A excepção corresponde à nascente Dr. Dinis (Figura 5.58 b)) na qual as variações de radão parecem diminuir em períodos de menor sismicidade. Assim, a ocorrência destes eventos sísmicos, de baixa magnitude ($< 2,7$), não parece ter promovido a libertação de radão através da abertura de novas fracturas e/ou não foi possível detectar nas amostragens efectuadas.

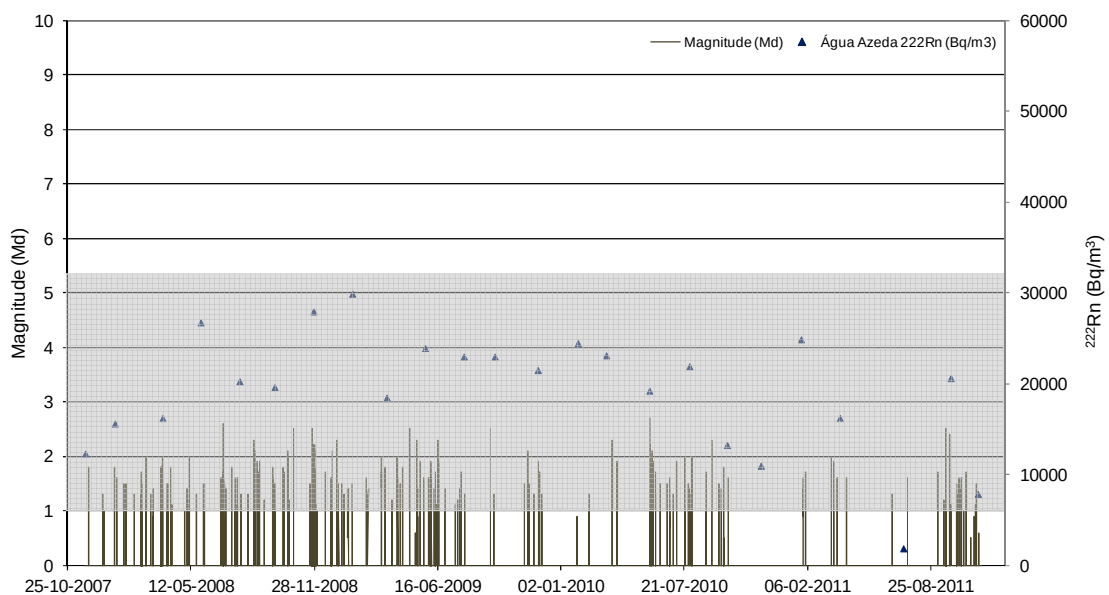


Figura 5.46 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

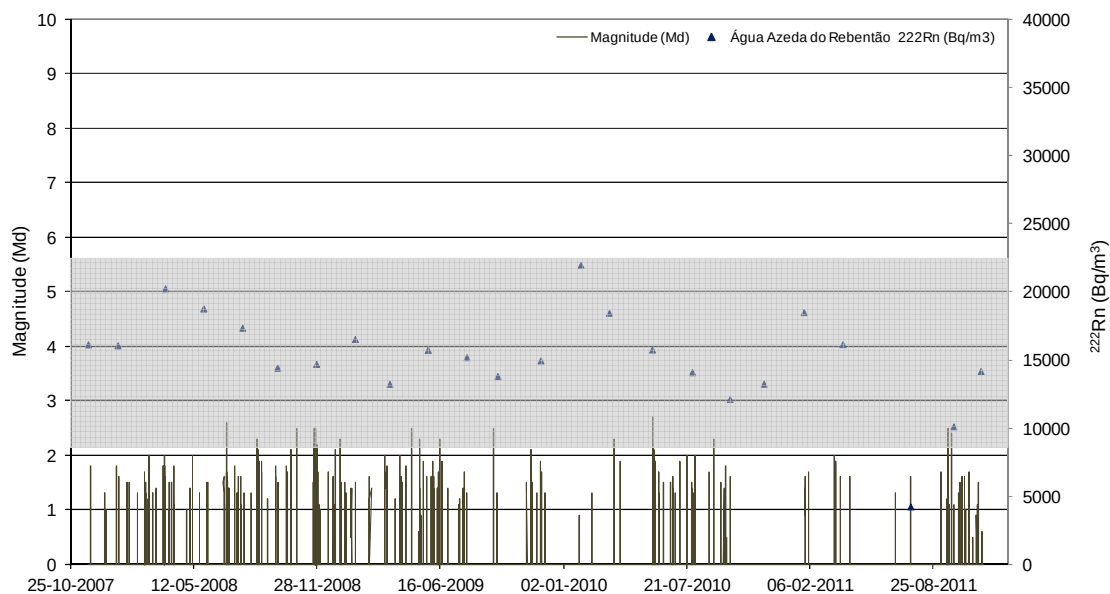


Figura 5.47 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda do Rebentão e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

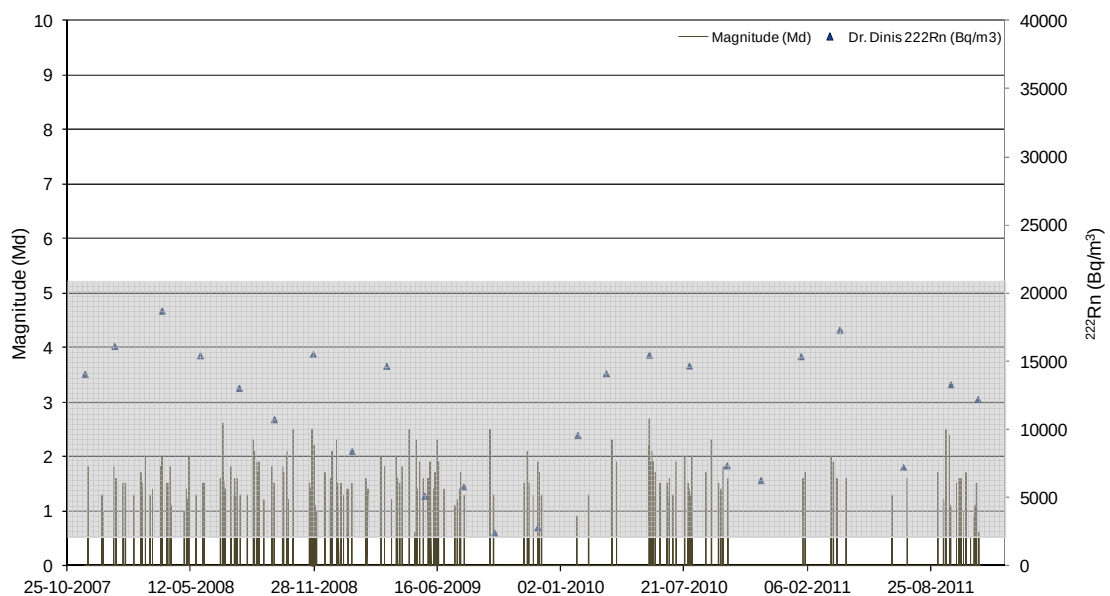


Figura 5.48 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Dinis e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

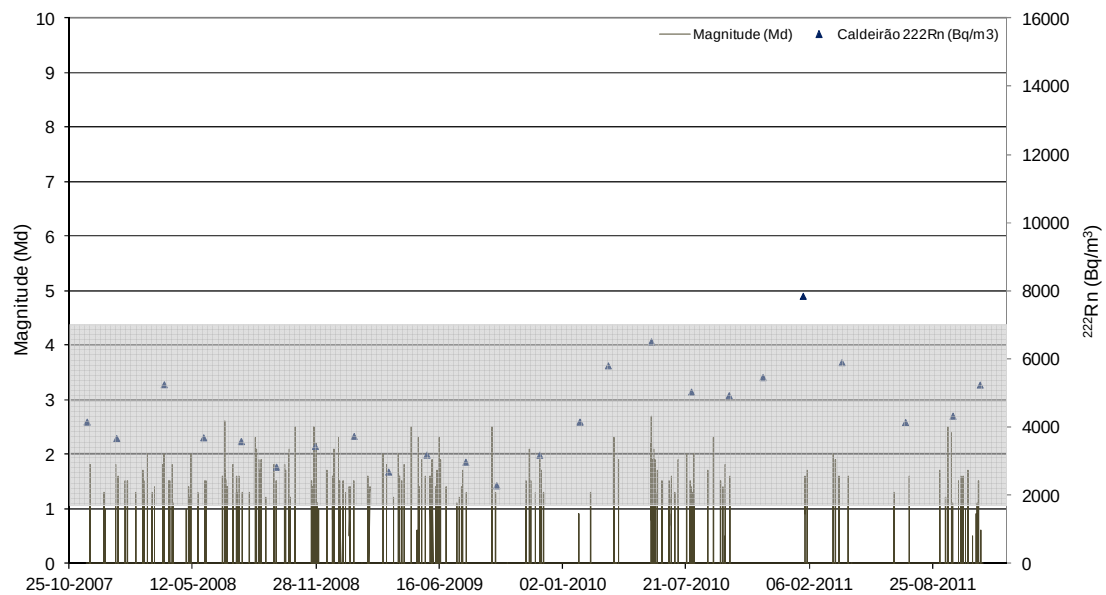


Figura 5.49 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Caldeirão e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

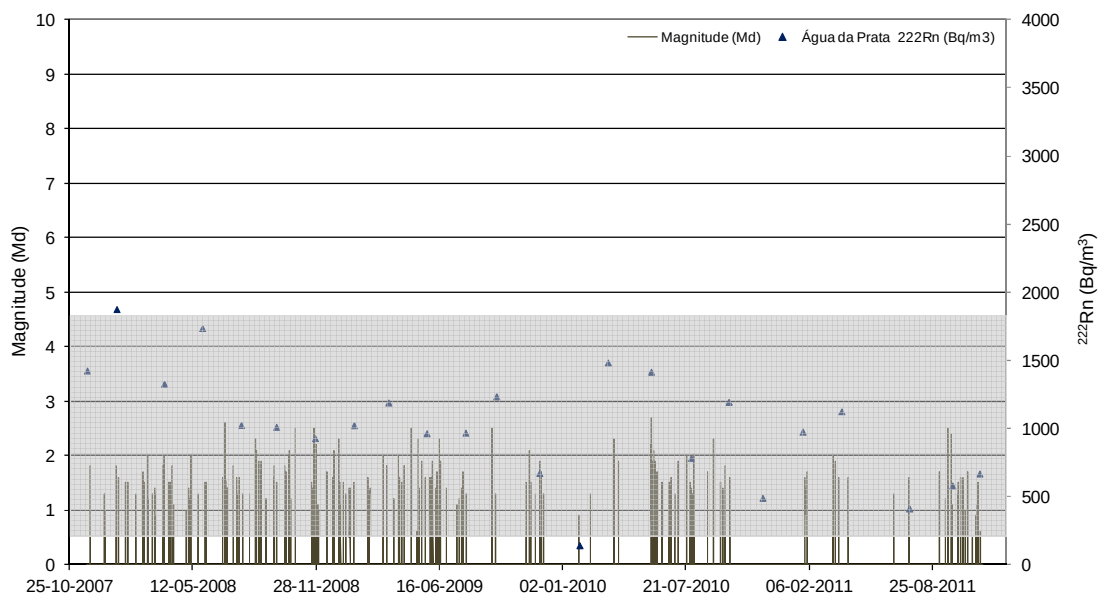


Figura 5.50 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água da Prata e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

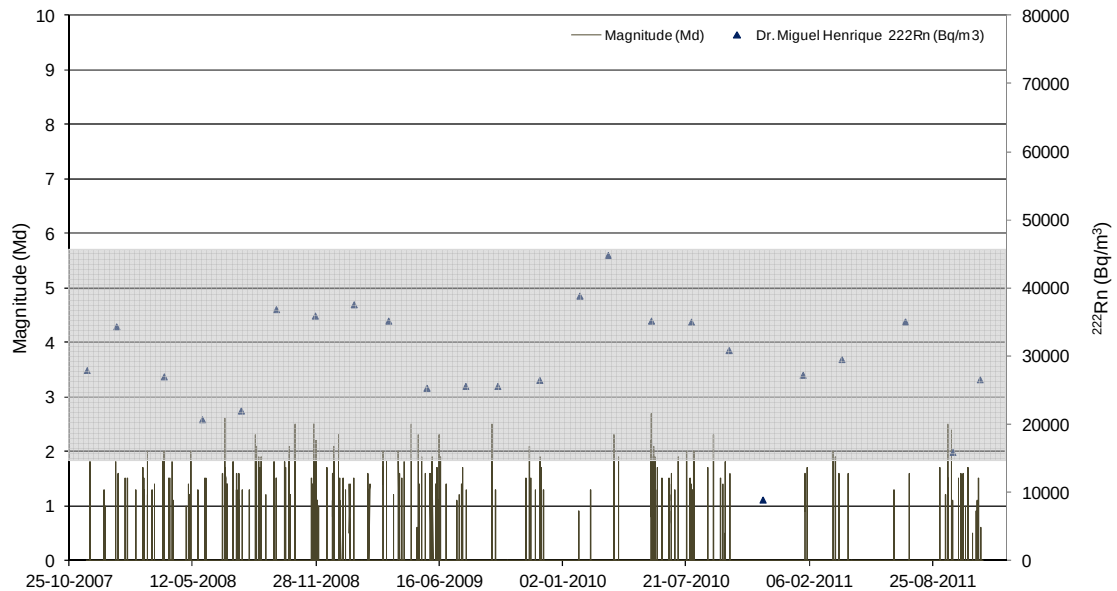


Figura 5.51 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Miguel Henrique e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

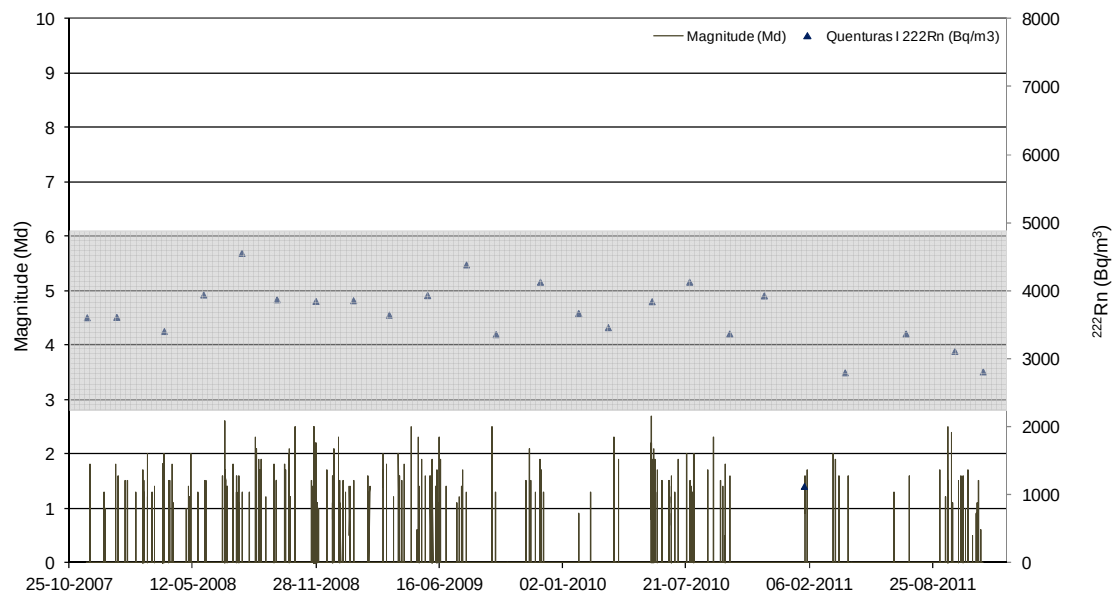


Figura 5.52 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas I e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

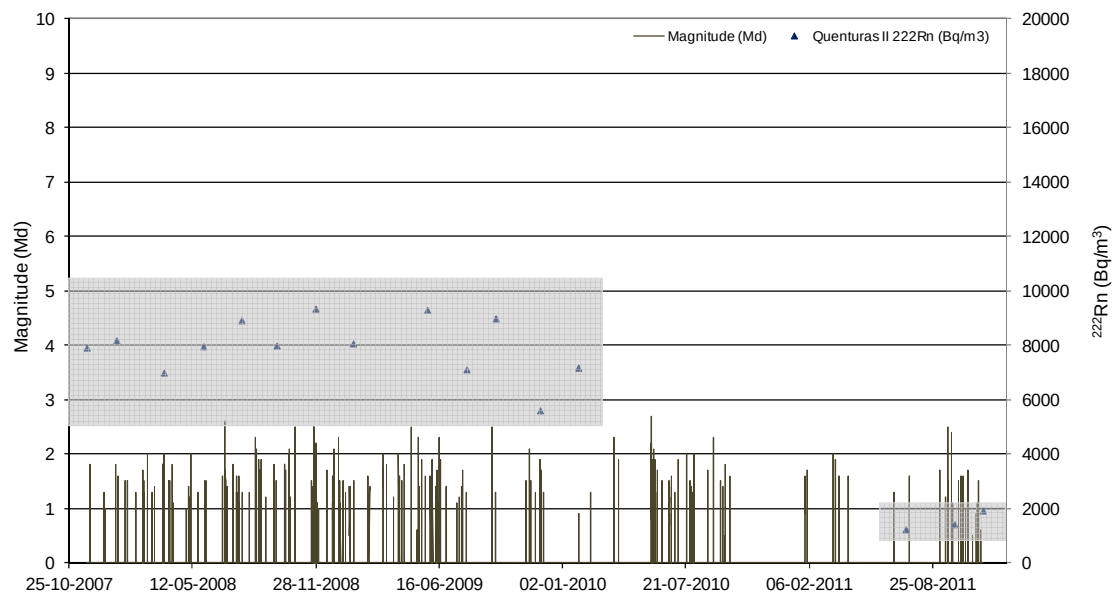


Figura 5.53 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas II e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. As zonas a sombreado cinza representam os intervalos da $\mu \pm 2\sigma$ para os dados antes e após a ausência de caudal desta nascente.

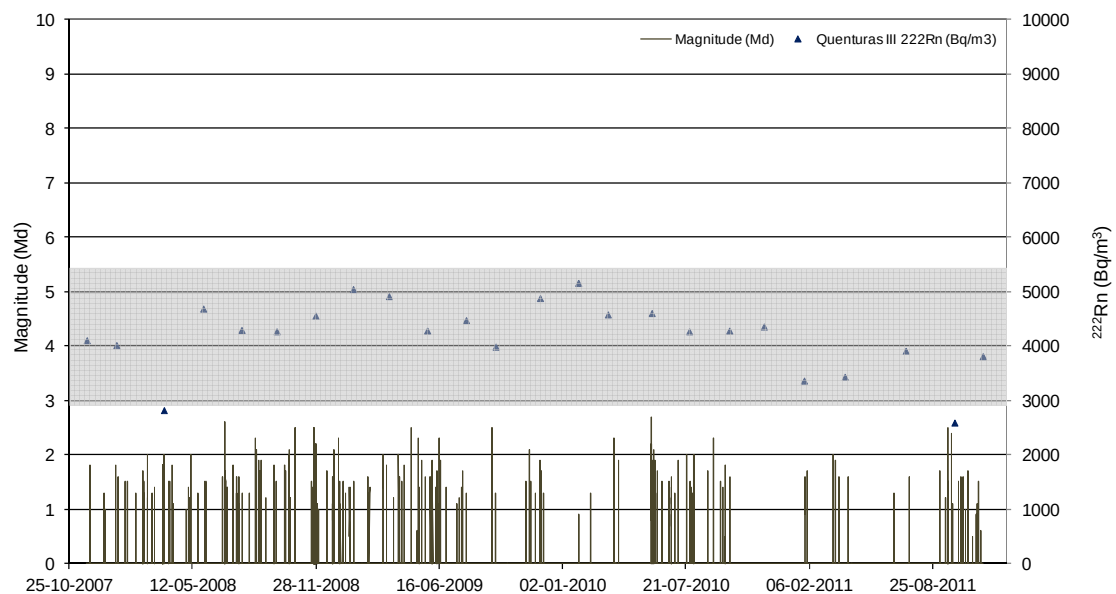


Figura 5.54 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas III e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

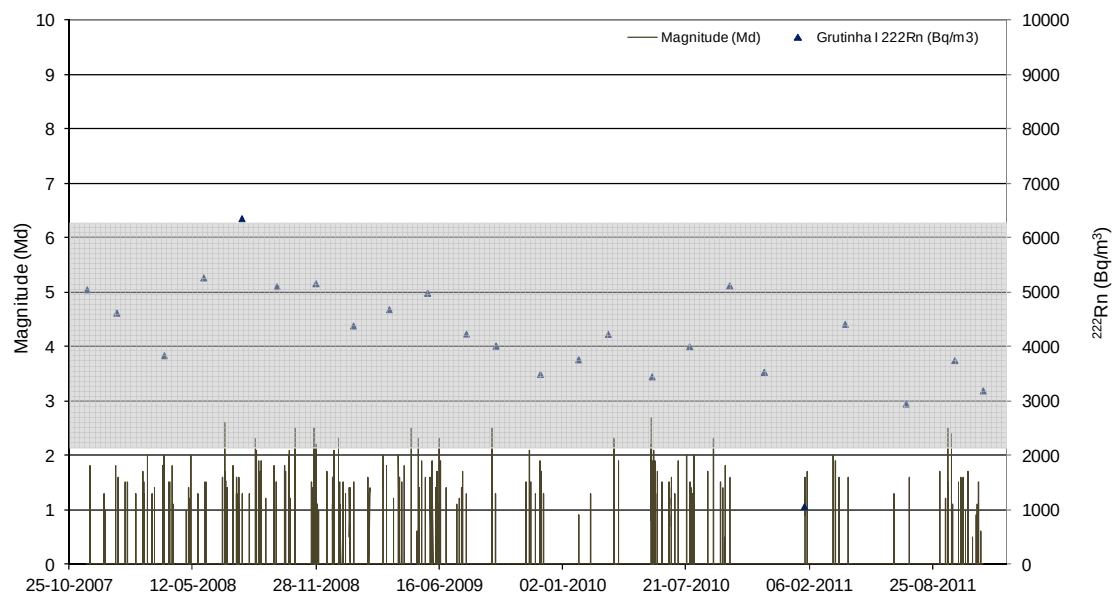


Figura 5.55 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha I e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

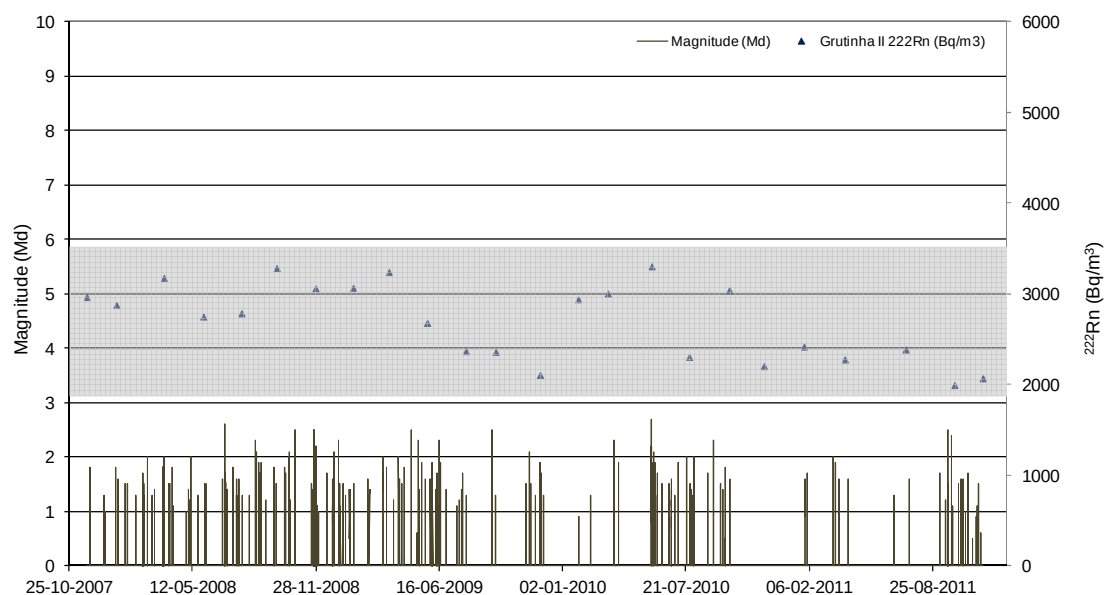


Figura 5.56 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha II e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

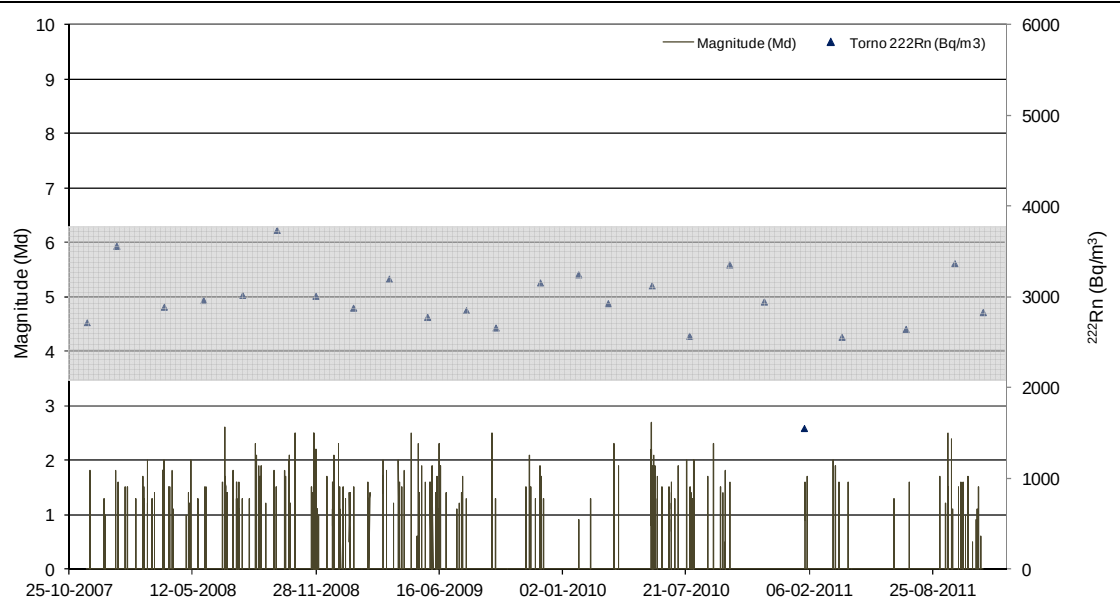


Figura 5.57 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Torno e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

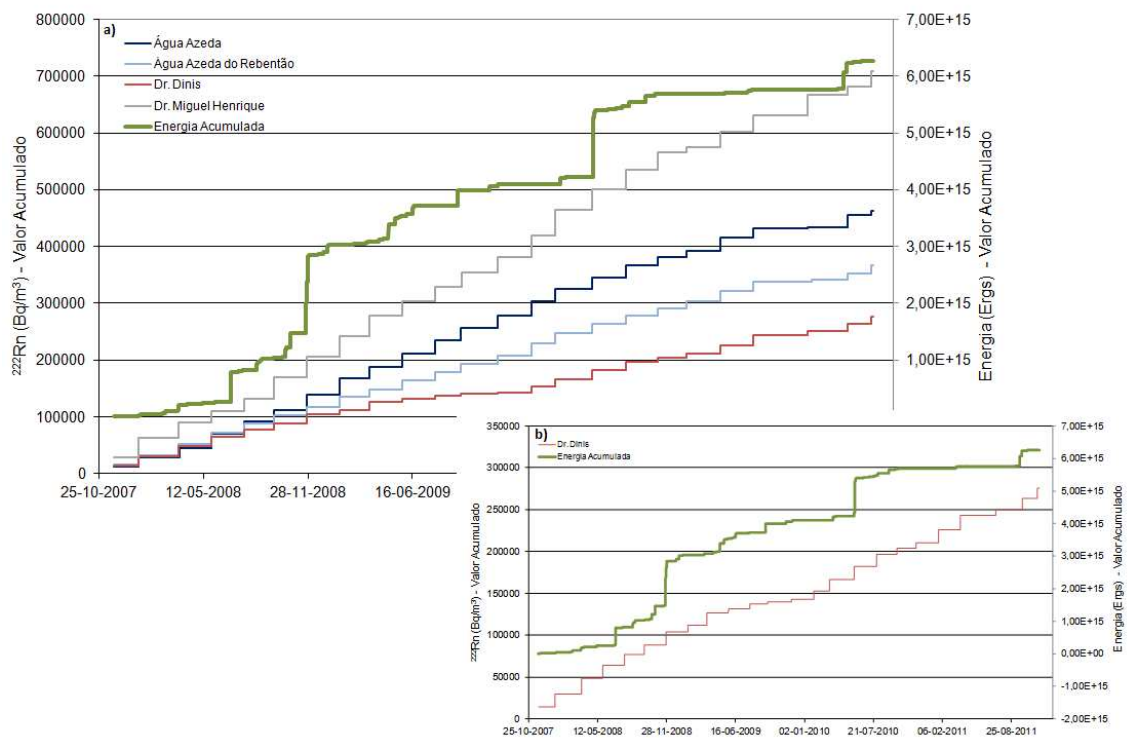


Figura 5.58 – Valores acumulados da energia dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas no período de amostragem e valores acumulados da concentração de ^{222}Rn nas nascentes: a) Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis e Dr. Miguel Henrique e b) na nascente Dr. Dinis, com ampliação da escala.

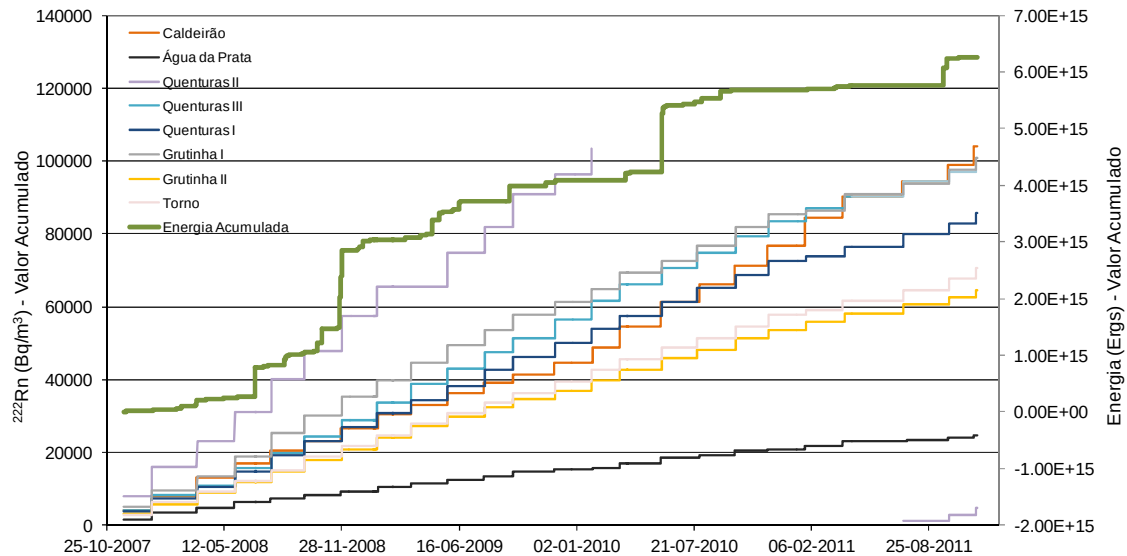


Figura 5.59 – Valores acumulados da energia dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas no período de amostragem e valores acumulados da concentração de ^{222}Rn nas nascentes do Caldeirão, Água da Prata, Quenturas I, Quenturas II, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno.

5.5.4. Saúde Pública

As nascentes amostradas apresentam valores de concentração de radão baixos, sendo os valores máximos de $44\,834\text{ Bq/m}^3$ medidos na nascente Dr. Miguel Henrique, não ultrapassando portanto os $100\,000\text{ Bq/m}^3$ propostos como limite para águas de abastecimento público pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2008). Uma vez que muitas destas águas são consumidas pela população das Furnas e pelos turistas que visitam esta freguesia, foi calculada a dose efectiva anual (Def) de radão, que corresponde ao somatório das doses efectivas equivalentes de todos os tecidos e órgãos, que potencialmente poderá ser ingerida nestas águas através da aplicação da equação 5.2 (Kozłowska *et al.*, 2010):

$$(5.2) \quad Def(mSv^* / ano) = 1000 \times Ac \times Wd \times V$$

Def - dose efectiva anual (mSv/ano),

Ac - concentração de radão na água (Bq/L),

wd - coeficiente de dose do radionuclídeo (Sv/Bq),

V - volume de água consumido anualmente (L/ano).

* *mSv* - milisievert

O coeficiente de dose corresponde à dose efectiva equivalente do radão, isto é, ao perigo potencial de danos para os tecidos ou órgãos, por unidade de água, que no caso do radão, corresponde a um valor de 0.35×10^{-8} Sv/Bq (Appleton, 2005; Kozłowska *et al.*, 2010 e referências nele citadas). Neste trabalho foi considerado o valor médio de concentração de radão obtido nas águas e um consumo anual de 730 L (2 L/dia) que corresponde ao consumo de água médio calculado pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2008). As doses efectivas anuais de radão calculadas para as nascentes em análise oscilaram entre 0,003 mSv/ano na nascente Água da Prata e 0,076 mSv/ano na nascente Dr. Miguel Henrique (Tabela 5.5). Apesar da Organização Mundial de Saúde não recomendar um limite para a dose efectiva anual no caso específico do radão, esta organização recomenda um valor inferior aos 0,1 mSv/ano para diversos radionuclídeos (WHO, 2008). Assim, e tendo em atenção os valores obtidos, o consumo destas águas não deverá representar perigo em termos de saúde pública uma vez que, por um lado, o seu consumo é esporádico não atingindo uma média de 2 L/dia e por outro, mesmo para a água de concentração de radão mais elevada (Dr. Miguel Henrique) e considerando um consumo de 2 L/dia, a dose efectiva anual de radão ingerida seria de 0,076 mSv/ano. Os valores da dose efectiva anual calculados correspondem à dose máxima passível de ser ingerida. No entanto, devido ao decaimento radioactivo deste gás, esses valores poderão ser inferiores de acordo com o período de tempo que decorrer entre a emergência da água na nascente e o seu consumo.

Tabela 5.5 – Dose efectiva anual de radão nas nascentes em análise.

Nascentes	Dose efectiva anual (mSv/ano)	Consumo médio anual (L/dia)
Água Azeda	0,050	2
Água Azeda do Rebentão	0,039	2
Dr. Dinis	0,031	2
Caldeirão	0,011	2
Água da Prata	0,003	2
Dr. Miguel Henrique	0,076	2
Quenturas I	0,009	2
Quenturas II	0,017	2
Quenturas III	0,011	2
Grutinha I	0,011	2
Grutinha II	0,007	2
Torno	0,008	2

5.5.5. Considerações Gerais

A análise dos dados de concentração de radão e da temperatura nas nascentes analisadas permitiu efectuar algumas observações nomeadamente:

- 1- As variações da concentração de radão e da temperatura nas nascentes em análise apresentam uma variação sazonal influenciada principalmente pelas variações da pluviosidade e da temperatura do ar. Neste estudo as variações da temperatura do ar são expressas pelos dados da temperatura do solo;
- 2- A concentração de radão e a temperatura da água das nascentes em estudo apresentam uma relação directa com a temperatura do solo e inversa com a pluviosidade e a humidade do solo, reflectindo-se esta relação, ao nível da nascente, de acordo com os tempos de residência destas águas. A excepção corresponde às nascentes Água da Prata e do Caldeirão cuja concentração de radão apresenta uma relação directa com a pluviosidade e com a humidade do solo e inversa com a temperatura do solo.

Relativamente à temperatura nestas águas, esta apresenta uma relação inversa com a pluviosidade e com a humidade do solo e directa com a temperatura do solo. À semelhança do descrito para as nascentes anteriores, estas relações reflectem-se, ao nível da nascente, de acordo com o tempo de residência destas águas;

- 3- As nascentes que apresentam valores de concentração de radão mais elevados correspondem a águas ortotermais enquanto que, as nascentes termais apresentam valores de concentração de radão mais baixos;
- 4- Os valores de concentração de radão nas nascentes amostradas são baixos, sendo os valores máximos obtidos ($44\,834\text{ Bq/m}^3$) inferiores ao limite de $100\,000\text{ Bq/m}^3$ recomendados pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2008);
- 5- As doses efectivas anuais calculadas para as nascentes em análise, considerando um consumo anual médio de 2 L/dia , oscilaram entre $0,003$ e $0,076\text{ mSv/ano}$ valores inferiores aos $0,1\text{ mSv/ano}$ recomendados pela Organização Mundial de Saúde para outros radionuclídeos (WHO, 2008).

A continuação da amostragem regular da concentração de radão nestas nascentes permitirá confirmar as relações observadas neste trabalho com os parâmetros meteorológicos identificados e a sua integração com outros dados hidrogeoquímicos permitirão uma melhor compreensão das variações obtidas. Por outro lado, um maior número de dados possibilitará a aplicação de metodologias estatísticas como, por exemplo, a análise de regressão múltipla que permitirá: a) identificar os parâmetros meteorológicos, com significância estatística, que influenciam as variações quer da concentração de radão, quer da temperatura destas nascentes; b) calcular o modelo de regressão explicativo das variações observadas e c) calcular os resíduos facilitando assim a interpretação de fenómenos de origem profunda.

6. CARTOGRAFIA DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E RISCO PARA A SAÚDE PÚBLICA

6.1. Nota Prévia

A concentração de radão no ar interior de edifícios varia quanto à sua distribuição espacial no edificado de uma dada região e é condicionada por diversos factores associados: (a) às características geológicas do local, como a presença de radão nos constituintes litológicos ou no solo sobre os quais a edificação foi construída, a existência de radão na água de abastecimento e a presença de falhas; (b) às características do próprio edifício como o tipo de construção e o tipo de material de construção e (c) aos hábitos dos ocupantes dos edifícios.

Neste capítulo pretende-se avaliar a qualidade do ar interior, relativamente à concentração de radão, do edificado das freguesias das Furnas e Ribeira Quente, assim como analisar a sua distribuição espacial. Pretende-se ainda verificar se são observadas variações sazonais das concentrações deste gás, pelo que foi efectuada uma campanha nos meses de Verão e outra nos meses de Inverno. Finalmente será efectuada uma análise da distribuição espacial da concentração de radão no solo e no ar interior dos edifícios.

6.2. Fontes de Radão nos Edifícios e Medidas de Mitigação

O radão, sendo um gás radioactivo, pode facilmente ser introduzido no organismo humano, quer através da sua inalação durante a respiração, quer através da ingestão de água onde se encontre dissolvido. A libertação de partículas α , resultantes do decaimento deste gás, ou dos restantes elementos desta cadeia radioactiva, podem representar perigo para a saúde, podendo provocar o desenvolvimento de doenças tais como o cancro do pulmão (Hasbrouck, 1983). Os efeitos provocados por este gás fazem-se sentir quando as pessoas estão expostas a elevadas concentrações de radão por períodos de tempo prolongados. Os níveis de concentração de radão no ar atmosférico são normalmente muito baixos (10 Bq/m^3). No entanto, em espaços fechados, como no interior de edifícios, a sua concentração pode aumentar substancialmente, quer pela presença de uma fonte de emissão deste gás, quer devido a uma deficiente ventilação deste espaço (Yu *et al.*, 2006).

As principais fontes de radão no ar interior de edifícios provêm do solo sobre o qual foram edificados, da água que os abastece e do tipo de material utilizado na sua construção (Hasbrouck, 1983; Singh *et al.*, 2005b; US EPA, 2009a; 2009b).

O radão existente nos poros do solo pode, por difusão, entrar facilmente no interior de edifícios. Este processo pode ser amplificado se ocorrerem diferenças de pressão entre o exterior e o interior do edifício provocando um efeito de sucção (Hasbrouck, 1983; Oliver e Khayrat, 2001). O radão presente no solo pode ser introduzido no interior de edifícios através de aberturas como fendas existentes no pavimento, das zonas de união do pavimento com a parede e através das canalizações (Wysocka *et al.*, 2005; Gao *et al.*, 2008). Uma vez que o solo é a principal fonte de entrada de radão nos edifícios, associado ao facto do radão ser 7,6 vezes mais denso que o ar ambiente, a concentração de radão no ar interior de

edifícios é normalmente superior nos pisos directamente em contacto com o solo, nomeadamente, em caves e no rés-do-chão (Voronov, 2004; Clouvas *et al.*, 2011).

O radão que se encontra dissolvido na água pode ser libertado para o ar interior através de actividades diárias que requerem a utilização de água como, por exemplo, lavar a loiça, lavar a roupa ou tomar banho (Hasbrouck, 1983; Vinson *et al.*, 2008). Estudos realizados nos Estados Unidos da América revelaram que durante um duche de 20 minutos a variação da concentração de radão no ar da casa de banho pode sofrer incrementos de 71 para 4420 Bq/m³ (Vinson *et al.*, 2008). As águas provenientes de rios ou de reservatórios apresentam normalmente concentrações de radão bastante baixas, não representando nenhum problema para os edifícios abastecidos por estas águas. No entanto, quando o abastecimento de água nos edifícios é proveniente de aquíferos ou de poços, esta pode conter concentrações elevadas de radão. Nos Estados Unidos da América estima-se que 5 % da concentração de radão no ar interior é resultante da libertação deste gás da água de consumo (Vinson *et al.*, 2008). Cerca de 90 % da concentração de radão existente na água pode ser transferida para o ar sendo este processo mais rápido se a água for aquecida (Hasbrouck, 1983; Voronov, 2004). De acordo com a Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos da América, por cada 148 000 Bq/m³ de radão dissolvidos na água, que corresponde ao limite recomendado neste país, cerca de 37 Bq/m³ passam para o ar interior (US EPA, 2010).

A terceira fonte de entrada de radão no interior de edifícios está associada ao tipo de material utilizado na construção, podendo ser uma fonte desprezível ou pode contribuir de forma significativa para o incremento da concentração de radão (Hasbrouck, 1983; Appleton, 2005). As rochas magmáticas ácidas tais como traquitos e granitos apresentam uma maior quantidade de ^{238}U produzindo, conseqüentemente, uma maior concentração de radão resultante do seu decaimento (Hasbrouck, 1983; Wiegand, 2001). Alguns estudos (*e.g.* Denman *et al.*, 2007; Gao *et al.*, 2008), demonstram a possibilidade de se medirem concentrações de radão mais elevadas nos pisos superiores do que no rés-do-chão em resultado quer do tipo de material de construção, quer da utilização de sistemas de aquecimento/ventilação.

Para além dos factores mencionados, a concentração de radão no interior de edifícios depende ainda dos hábitos dos seus ocupantes, da ventilação a que o edifício está sujeito e da quantidade de aerossóis presente no ar (Sahota *et al.*, 2005). De um modo geral, a concentração de radão no ar interior de edifícios apresenta valores mais baixos no Verão e mais elevados no Inverno, resultado do facto dos seus ocupantes manterem as janelas abertas no Verão e fechadas durante o Inverno, promovendo ou não uma ventilação eficaz destes espaços, respectivamente (Singh *et al.*, 2005c; Singh *et al.*, 2005d; Mehra *et al.*, 2011). No entanto, estudos realizados em Itália (Bohicchio *et al.*, 2005) reportam casos em que os valores de concentração de radão amostrados são superiores nos meses de Verão do que no Inverno. Estes autores atribuem este facto ao fecho destes edifícios no período de férias ou devido a um microclima particular associado a estes edifícios.

A concentração média mundial e europeia de radão no interior de edifícios é 40 Bq/m^3 (Tóth *et al.*, 1997; Catalano *et al.*, 2012). Contudo, diversas entidades internacionais recomendam diferentes limites a partir do qual se deve intervir em edifícios, tendo estes vindo a ser diminuídos por algumas delas (tabela 6.1). Em Portugal a legislação existente restringe-se a edifícios construídos em zonas graníticas, nomeadamente nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco. Esta legislação fixa os 400 Bq/m^3 como limite para a concentração de radão no ar interior de edifícios nestas regiões (D.L. nº 79/2006 Artº. 29). Na Região Autónoma dos Açores, a legislação regional restringe a obrigatoriedade de efectuar medições no ar interior de habitações e edifícios de serviços apenas em zonas onde seja provável a presença deste gás, de acordo com os instrumentos de ordenamento do território, e em zonas identificadas como de forte desgaseificação de sistemas vulcânicos. O limite máximo permitido é 150 Bq/m^3 (D.L.R. nº 16/2009/A Artº. 51).

Tabela 6.1 – Limites recomendados para a concentração de ^{222}Rn no interior de edifícios (Bq/m^3).

Organização	Edifícios existentes	Edifícios a construir
CEC - Comissão da Comunidade Europeia (1990)	400	200
US EPA - Agência para a Protecção Ambiental dos Estados Unidos (2009a; 2009b)	148	148
ICRP* - Comissão Internacional de Protecção Radiológica (1984)	400	200
ICRP* - Comissão Internacional de Protecção Radiológica (1993)	200 a 600	**
ICRP - Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação (2009)	300***	
WHO* - Organização Mundial de Saúde (1987)	200	200
WHO - Organização Mundial de Saúde (2009; 2010)	100****	
Legislação Portuguesa (2006)	400	400
Legislação Regional Açoriana (2009)	150	150

* *In* ECA, 1995.

** Em 1993 a ICRP considerou mais vantajoso substituir a definição de um limite de intervenção por um conjunto de recomendações de boas práticas para a construção de novos edifícios.

*** A ICRP (2009) recomenda que no caso de não ser possível baixar a média da concentração de radão no ar interior para 300 Bq/m^3 , este valor não deverá ultrapassar os 600 Bq/m^3 .

**** A Organização Mundial de Saúde recomenda que no caso de não ser possível baixar a média da concentração de radão no ar interior para 100 Bq/m^3 , este valor não deverá ultrapassar os 300 Bq/m^3 .

Quando a concentração de radão no ar interior de um edifício ultrapassa os níveis oficialmente recomendados deverão ser tomadas algumas medidas com o objectivo de se baixar a sua concentração, nomeadamente: identificar a fonte provável de entrada de radão no edifício, seleccionar a medida de mitigação adequada e avaliar se a redução do risco em termos de saúde justifica o custo da medida de mitigação (Hasbrouck, 1983). Por outro lado, em zonas como as freguesias das Furnas e Ribeira Quente, para as quais já existe informação sobre a importante desgaseificação difusa presente, quer para o radão (Silva, 2006), quer para o CO_2 (Baubron *et al.*, 1994a; Sousa, 2003; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010), esta informação deverá ser utilizada quer no ordenamento do parque habitacional destas freguesias, quer no

licenciamento de edifícios a construir que deverão incluir algumas medidas de mitigação.

Quando se pretende intervir num edifício de modo a diminuir a concentração de radão no ar interior podem ser adoptadas duas estratégias distintas: (1) aplicação de metodologias que reduzam a entrada deste gás no edifício ou (2) aplicação de metodologias que possibilitem uma ventilação mais eficaz do espaço interior (Paridaens *et al.*, 2005; Vázquez *et al.*, 2011). Na selecção da medida de mitigação mais eficaz a ser aplicada, um factor muito importante a ter em consideração é a fonte de entrada de radão no edifício.

Quando a entrada de radão num edifício é efectuada essencialmente através da água onde este gás se encontra dissolvido existem dois processos que poderão ser aplicados, nomeadamente: (a) a utilização de sistemas de arejamento desenhados para a sua remoção da água, processo este que consiste na injeção de bolhas de ar na água de modo a que o radão dissolvido passe para a atmosfera e (b) a utilização de unidades de tratamento de água de carbono activo; neste processo é utilizado um filtro que atrai e acumula o radão removendo-o da água (Hasbrouck, 1983; Vitaliano, 2003; US EPA 2010).

Quando a principal fonte de radão reside no tipo de material utilizado na construção do edifício, a diminuição da concentração deste gás no ar interior poderá passar pela utilização de material de isolamento eficaz e por uma ventilação eficiente (Hasbrouck, 1983).

Quando o problema reside na concentração de radão no solo, as medidas de mitigação devem ser aplicadas no piso em contacto directo com o solo, de modo a evitar que este gás passe para os pisos superiores. Assim, o tipo de construção do edifício, isto é, se possui cave, se assenta directamente no solo ou se possui caixa-de-ar, determinam o tipo de medida a aplicar. No caso do edifício possuir cave ou de assentar directamente sobre o solo, a solução pode passar por uma ventilação eficaz, instalação de um sistema de remoção do radão no solo por baixo do edifício,

aplicação de material de isolamento no pavimento e nas paredes ou, ainda, pela aplicação de um sistema de pressurização da habitação e de despressurização do solo. No caso de edifícios que possuem caixa-de-ar, para além das medidas anteriormente descritas, pode-se colocar uma membrana impermeável ao radão e se necessário um sistema de remoção do ar deste espaço (Hasbrouck, 1983; Paridaens *et al.*, 2005; Gao *et al.*, 2008; Jiránek e Rovenská, 2010; US EPA 2010). Em Inglaterra as medidas de mitigação do risco associado à presença de radão estão devidamente identificadas passando, no que diz respeito à construção de novos edifícios, pela colocação de uma membrana impermeável ao radão em zonas onde o nível de acção definido por lei (200 Bq/m^3) é ultrapassado em cerca de 3 % dos edifícios. Em zonas onde este nível de acção é ultrapassado em cerca de 10 % dos edifícios, para além da aplicação da membrana impermeável ao radão, estes edifícios devem possuir uma caixa-de-ar e um sistema de extracção do ar deste espaço (Coskeran *et al.*, 2009).

6.3. Metodologia de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados

6.3.1. Equipamento

A monitorização da qualidade do ar interior de edifícios foi efectuada com recurso a 10 detectores de radão *Ramon 2.2* da *GT-Analytic KEG* (Fotografia 6.1). Estes detectores permitem realizar medições em dois modos: (a) modo L, que corresponde a um período longo de amostragem que poderá ir até cinco anos e (b) modo S, que corresponde a um período curto de amostragem com uma duração de sete dias. Estes detectores apresentam um limite de detecção entre 1 e 9999 Bq/m³ com uma resolução de 1 Bq/m³ e a amostragem é efectuada por difusão (GT-Analytic KEG, 2003).



Fotografia 6.1 – Detector de ^{222}Rn utilizado na monitorização da qualidade do ar interior de edifícios.

Este equipamento corresponde a um detector de silício (material semi-condutor) que detecta partículas α . As medições são efectuadas em ciclos de uma hora e o valor disponibilizado no visor equivale à média da concentração de radão no ar interior de acordo com o modo de medição seleccionado. Este valor é também actualizado com uma frequência horária (GT-Analytic KEG, 2003).

6.3.2. Amostragem

A amostragem da concentração de radão no ar interior foi realizada em 93 edifícios da freguesia das Furnas e em 26 edifícios da freguesia da Ribeira Quente. A medição foi efectuada em modo S, num único período de sete dias. Os detectores foram instalados num compartimento do piso directamente em contacto com o solo, isto é, em caves ou no rés-do-chão e as medições foram efectuadas ao nível do chão. Em cada edifício foram efectuadas duas campanhas de amostragem, uma durante o Verão e a outra no Inverno. Neste estudo o Verão corresponde ao período compreendido entre os meses de Maio e Outubro e o Inverno corresponde aos meses compreendidos entre Novembro e Abril, tendo em consideração os resultados da análise espectral descritos no capítulo 4. Para cada edifício foi preenchido um questionário sobre as características do edifício, contendo aspectos como o tipo de material de construção e de revestimento das paredes e do chão, a ventilação e a presença de caixas-de-ar e de caves (Anexo VIII). A selecção dos edifícios foi efectuada de modo a cobrir toda a área de cada freguesia.

6.3.3. Recolha e Análise Estatística dos Dados

Como o período de amostragem se restringe a sete dias, os dados de concentração de radão no ar interior foram registados no final deste período no

questionário referente ao edifício em análise. A estatística descritiva dos dados foi efectuada em *Excel* e a projecção espacial dos dados foi realizada através da utilização do programa ArcGIS versão 10.

6.4. Apresentação dos Resultados

6.4.1. Freguesia das Furnas

A campanha de Verão foi realizada entre os meses de Junho e Outubro de 2009 e a campanha de Inverno decorreu entre os meses de Novembro de 2009 e Março de 2010. As excepções correspondem aos pontos de amostragem 92 e 93 em que a amostragem de Verão foi realizada em Junho de 2011 e Julho de 2010, respectivamente. Não foi possível efectuar estas amostragens no período inicialmente previsto, no primeiro caso por motivo de obras no edifício e no segundo por indisponibilidade dos proprietários. Relativamente à campanha de Inverno, não foi possível repetir a amostragem em quatro edifícios. Em três deles, sendo casas de férias, os proprietários não tiveram disponibilidade para possibilitar a entrada nos mesmos e no quarto edifício o motivo deveu-se à mudança de residência dos habitantes.

Os edifícios da freguesia das Furnas amostrados correspondem na sua maioria a habitações próprias; 73,1 %. Foram ainda efectuadas medições em edifícios públicos e de comércio (24,7 %) e em algumas habitações alugadas (2,2 %). No que se refere às habitações, 92,8 % correspondem a residências permanentes e apenas 7,2 % correspondem a residências de férias.

Estes edifícios são na sua maioria, 59,1 %, construídos com blocos de betão furado e cimento e 28 % correspondem a edifícios reabilitados apresentando divisões construídas com blocos de betão furado e cimento e outras em pedra. Apenas 12,9 % dos edifícios correspondem a construções mais antigas sendo inteiramente construídos em pedra. Grande parte do edificado foi construído ou reconstruído nos últimos 20 anos (61,3 %), pelo que a maior parte destes edifícios apresenta um estado de conservação que varia entre o bom (41,9 %) e o muito bom (49,5 %) e o número de

pisos varia entre 1 e 4. Apenas 12,9 % destes edifícios apresentam caixa-de-ar e 9,7 % têm cave.

As amostragens foram realizadas em 95,7 % dos edifícios em compartimentos do rés-do-chão e em 4,3 % em caves. Os locais de amostragem correspondem na sua maioria (67,7 %) a salas de estar, salas de jantar, corredores e quartos de cama. As restantes amostragens foram realizadas em compartimentos diversos como, por exemplo, escritórios, armazéns, etc. Os compartimentos têm paredes construídas em blocos de betão furado e cimento (66,7 %), em pedra (20,4 %), e nalguns casos em ambos os tipos. Na maior parte dos casos (89,2 %) as paredes apresentam-se rebocadas e revestidas por tinta e nos restantes são utilizados mosaicos, madeira ou pedra-de-lavoura. Relativamente ao chão, este é normalmente revestido de mosaico (78,3 %), madeira (4,3 %) ou simplesmente em cimento (5,4 %). Outros materiais utilizados correspondem a cortiça, soalho flutuante ou pedra-de-lavoura. Foram observadas fendas no chão em apenas 20,4 % dos compartimentos amostrados e 96,8 % apresentam ventilação directa para o exterior essencialmente através da presença de portas e janelas (61,3 %), de janelas apenas (20,4 %) e de portas apenas (10,8 %). Em alguns compartimentos foi ainda verificada a presença de lareiras ou chaminés e o número de pontos de ventilação directos para o exterior variou entre 0 e 21.

Os valores de concentração de radão no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas, na campanha de Verão, oscilaram entre os 14 Bq/m³ e os 5400 Bq/m³ apresentando uma média de 192 Bq/m³. Na campanha de Inverno, oscilaram entre os 21 Bq/m³ e os 7406 Bq/m³ apresentando uma média de 315 Bq/m³. A representação gráfica da concentração de radão em cada edifício amostrado, nas duas campanhas realizadas, pode ser observada nas figuras 6.1 e 6.2. A estatística descritiva dos dados obtidos nas duas campanhas realizadas está sintetizada na tabela 6.2.

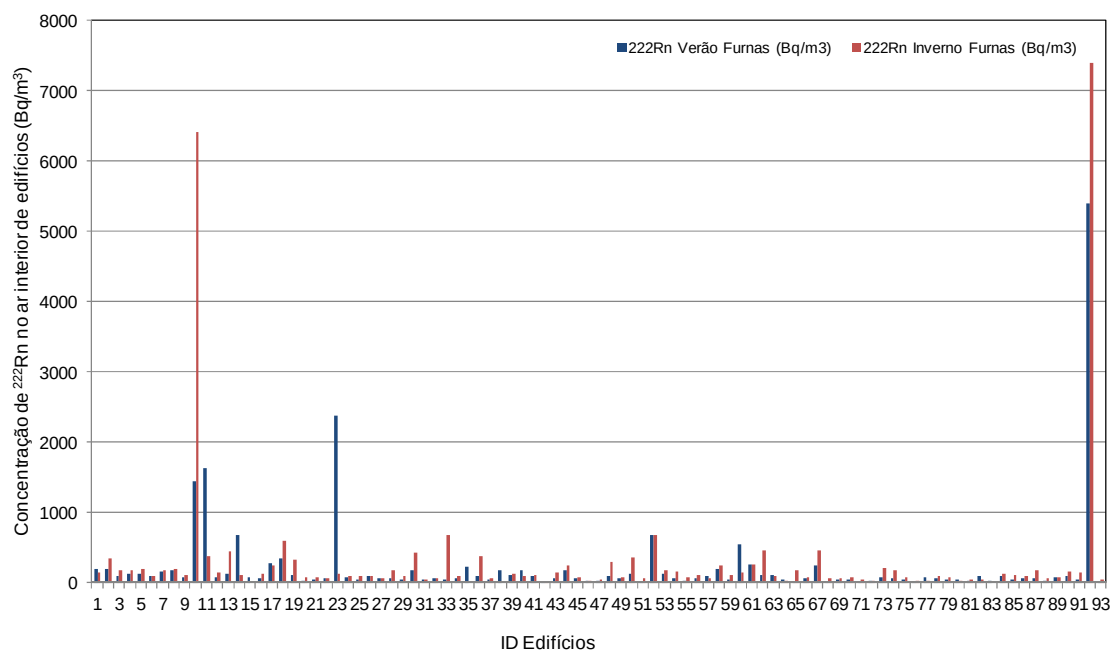


Figura 6.1 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas.

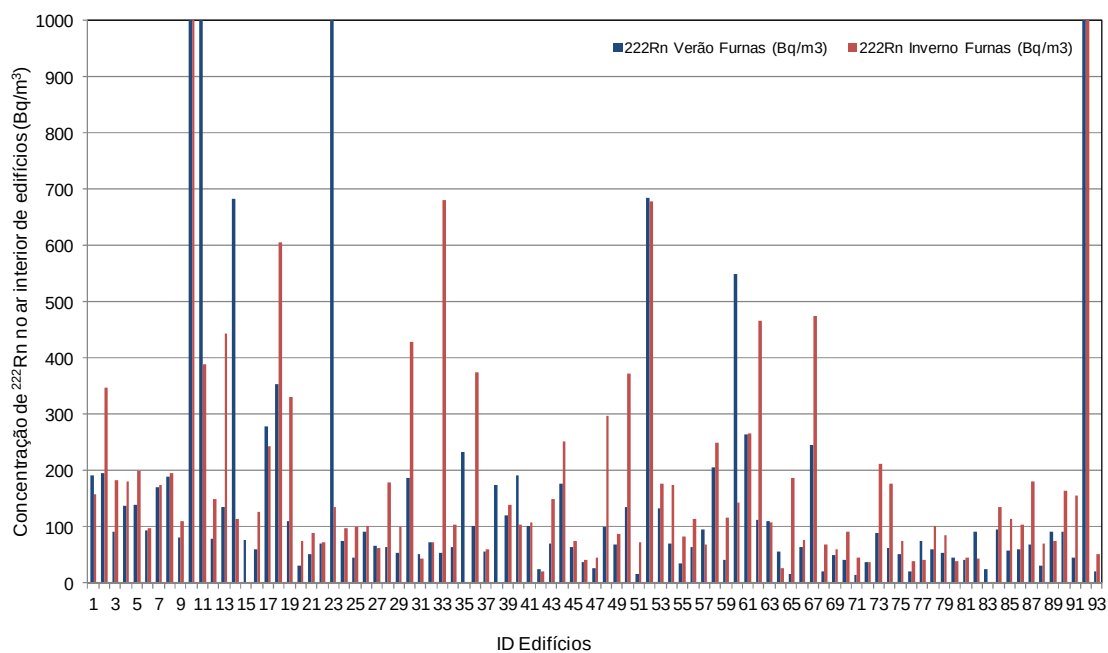


Figura 6.2 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas, com ampliação da escala.

Tabela 6.2 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas nas duas campanhas realizadas.

Freguesia das Furnas	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
Campanha de Verão	192	637	75	14	5400	93
Campanha de Inverno	315	1018	115	21	7406	89

6.4.2. Freguesia da Ribeira Quente

Nesta freguesia a campanha de Verão foi realizada entre os meses de Junho e Setembro de 2010 e a campanha de Inverno decorreu nos meses de Janeiro e Fevereiro de 2011. Relativamente à campanha de Inverno não foi possível repetir a amostragem em dois dos edifícios, num caso porque não foi possível contactar a proprietária e no outro porque o estabelecimento comercial estava encerrado.

Os edifícios amostrados correspondem na sua maioria, à semelhança do observado na freguesia das Furnas, a habitações próprias, 65,4 %. Foram ainda efectuadas medições em edifícios públicos e de comércio (30,8 %) e em algumas habitações alugadas (3,8 %). No que se refere às habitações, correspondem todas a residências permanentes.

Estes edifícios são na sua maioria, 65,4 %, construídos com blocos de betão furado e cimento e 23,1 % correspondem a edifícios reabilitados apresentando divisões construídas com blocos de betão furado e cimento e outras em pedra. Apenas 11,5 % dos edifícios correspondem a construções mais antigas sendo inteiramente construídos em pedra. Nos últimos 20 anos, foi construído ou reconstruído cerca de 50 % do edificado, apresentando portanto um estado de conservação que varia maioritariamente entre o bom (27 %) e o muito bom (53,8 %). Apenas 3,8 % destes edifícios apresentam caixa-de-ar, 19,2 % têm cave e o número de pisos varia entre 1 e 3.

As amostragens foram realizadas em 84,6 % dos edifícios em compartimentos do rés-do-chão e em 15,4 % em caves. Os locais de amostragem correspondem na sua maioria (53,8 %) a salas de estar, salas de jantar e quartos de cama. As restantes amostragens foram realizadas em compartimentos diversos como, por exemplo, armazéns, salas de aula etc. Os compartimentos têm paredes construídas em blocos de betão furado e cimento (69,2 %), em pedra (7,7 %), nalguns casos em ambos os tipos descritos anteriormente (19,2 %) e em pedra e barro (3,9 %). Na maior parte dos casos as paredes apresentam-se rebocadas e revestidas por tinta (65,4 %), nos restantes são utilizados mosaicos e cal. Relativamente ao chão este é normalmente revestido por mosaico (88,5 %), por mosaico e madeira (3,8 %) ou simplesmente por cimento (7,7 %). Foram observadas fendas no chão em apenas 15,4 % dos compartimentos amostrados e 96,2 % apresentam ventilação directa para o exterior, essencialmente através da presença de portas e janelas (57,8 %), de janelas apenas (19,2 %) e de portas apenas (19,2 %). Apenas 3,8 % dos compartimentos não apresentam contacto directo para o exterior.

Os valores de concentração de radão no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente, na campanha de Verão, oscilaram entre os 22 Bq/m³ e os 408 Bq/m³ apresentando uma média de 96 Bq/m³. Na campanha de Inverno, oscilaram entre os 30 Bq/m³ e os 809 Bq/m³ apresentando uma média de 160 Bq/m³. A representação gráfica da concentração de radão em cada edifício amostrado nas duas campanhas realizadas pode ser observada na figura 6.3. A estatística descritiva dos dados obtidos para as duas campanhas realizadas está sintetizada na tabela 6.3.

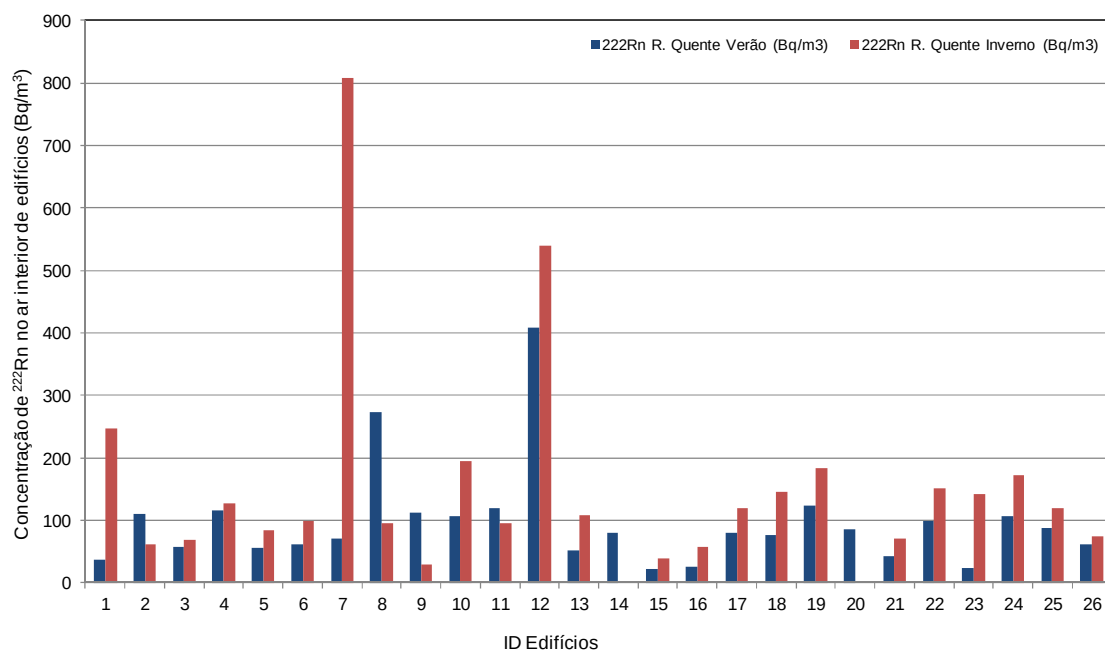


Figura 6.3 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente.

Tabela 6.3 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente nas duas campanhas realizadas.

Freguesia da Ribeira Quente	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
Campanha de Verão	96	80	81	22	408	26
Campanha de Inverno	160	171	114	30	809	24

6.5. Discussão

6.5.1. Freguesia das Furnas

A monitorização da concentração de radão no ar interior de edifícios na freguesia das Furnas permitiu verificar, que os valores registados são superiores nos meses de Inverno do que nos meses de Verão, apresentando uma média de 192 Bq/m^3 para os meses de Verão e 315 Bq/m^3 para os meses de Inverno (Tabela 6.2). Um comportamento semelhante foi anteriormente observado por Baxter *et al.* (1999) num estudo realizado em 23 habitações desta freguesia. Os valores médios registados são, para as duas campanhas, superiores ao limite de 100 Bq/m^3 recomendado pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2009; 2010) e de 150 Bq/m^3 recomendado na legislação regional (D.L.R. nº16/2009/A Artº. 51).

Cerca de 23 % dos edifícios amostrados na campanha de Verão apresentam uma concentração de radão superior a 150 Bq/m^3 (Figura 6.4), enquanto que, na campanha de Inverno esta percentagem sobe para 40 % (Figura 6.4). Este facto pode estar associado, por um lado, a variações dos parâmetros meteorológicos que condicionam a libertação do radão do solo, como discutido no capítulo 4, e por outro, aos hábitos dos residentes.

Tal como referido anteriormente, a maioria dos edifícios apresenta, no compartimento amostrado, pontos de ventilação (portas e janelas) directos para o exterior (96,8 %). Durante a campanha de Verão, em 20,5 % das amostragens, estes pontos foram mantidos abertos, em 69,3 % estiveram temporariamente abertos, em 9,1 % foram raramente abertos e apenas em 1,1 % estiveram sempre fechados. Na amostragem de Inverno estes pontos de ventilação em 1,1 % das amostragens foram mantidos abertos, em 71,9 % estiveram temporariamente abertos, em 8 % foram raramente abertos e em 27 % das amostragens estiveram sempre fechados. Assim,

verifica-se que no decurso das amostragens um maior número de edifícios teve os compartimentos com os pontos de ventilação existentes abertos ou temporariamente abertos nos meses de Verão. Consequentemente nestes meses estes edifícios estiveram sujeitos a uma ventilação mais eficaz, em virtude dos residentes abrirem as portas e janelas com maior frequência, contribuindo para a diminuição da concentração de radão no ar interior destes edifícios.

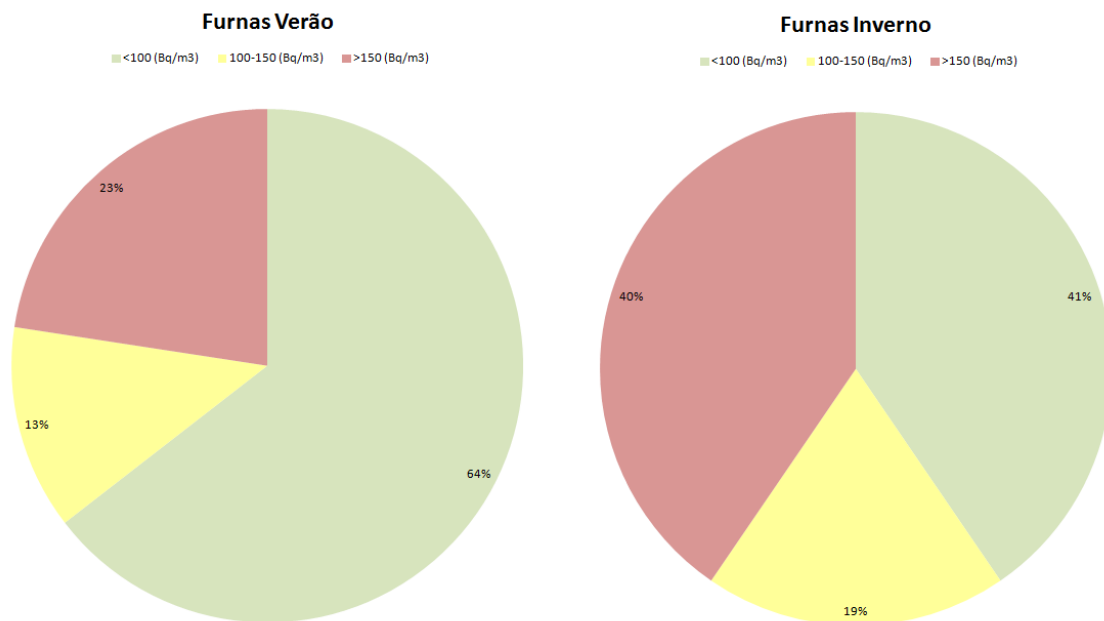


Figura 6.4 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas, nas campanhas de Verão (à esquerda) e Inverno (à direita).

Tendo em atenção que a concentração de radão no ar interior de edifícios apresenta uma variação sazonal foi calculada a média anual da concentração deste gás (C) para cada edifício, de acordo com a equação 6.1 (Bossew e Lettner, 2007):

$$(6.1) \quad C = Q \times C_{\text{Verão}} + (1 - Q) \times C_{\text{Inverno}}$$

Q - fracção do ano correspondente aos meses de Verão,

$C_{\text{Verão}}$ - concentração de radão no ar interior do edifício na amostragem de Verão (Bq/m^3),

CInverno - concentração de radão no ar interior do edifício na amostragem de Inverno (Bq/m^3).

Como referido anteriormente, nesta análise o período de Verão corresponde ao período compreendido entre os meses de Maio a Outubro (6 meses). Os valores das médias anuais calculadas para cada edifício oscilaram entre 23 Bq/m^3 e 6403 Bq/m^3 e apresentam um valor médio de 271 Bq/m^3 que, tal como verificado para a média das campanhas realizadas, corresponde a um valor superior ao limite definido na legislação regional. Cerca de 33 % dos edifícios amostrados apresentam valores médios anuais de concentração de radão no ar interior superior a 150 Bq/m^3 e 50 % apresentam valores superiores a 100 Bq/m^3 (Figura 6.5). A média dos valores anuais de concentração de radão obtidos apresenta valores próximos da média anual de 245 Bq/m^3 calculada por Baxter *et al.* (1999) nesta mesma na freguesia.

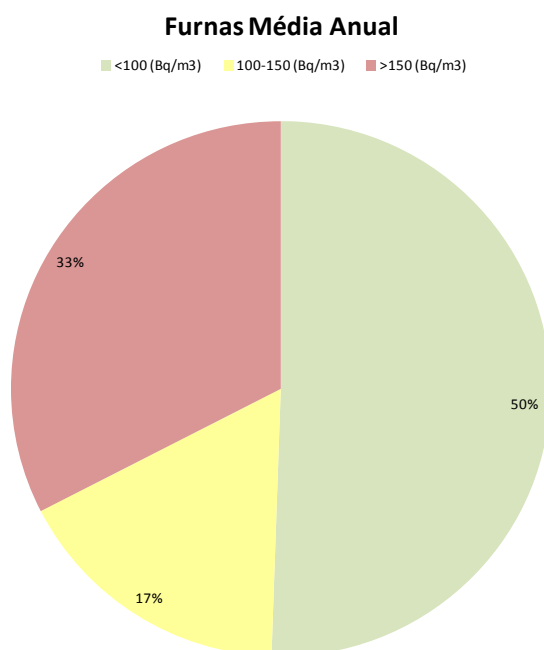


Figura 6.5 – Média anual da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas.

Tendo em consideração as médias anuais obtidas foi calculada a dose efectiva anual (*Def*) de radão a que os residentes poderão estar sujeitos em cada edifício através da aplicação da equação 6.2 (Jiránek e Rovenská, 2010):

$$(6.2) \quad Def(mSv/ano) = hp \times C \times T$$

hp - factor de conversão ($\text{mSv m}^3/\text{Bq h}$),

C - Média anual da concentração de radão no ar interior (Bq/m^3),

T - Tempo de exposição (h/ano).

O factor de conversão é $2,4 \times 10^{-6} \text{ mSv m}^3/\text{Bq h}$ de acordo com a Recomendação 65 da Comissão Internacional de Protecção Radiológica (ICRP, 1994 *in* Jiránek e Rovenská, 2010). Neste trabalho foi considerado um tempo de exposição anual de 7000 h/ano, que corresponde ao tempo de exposição médio calculado pela Comissão Internacional de Protecção Radiológica (ICRP, 1994 *in* Jiránek e Rovenská, 2010). As doses efectivas anuais de radão no ar interior calculadas para os edifícios amostrados oscilaram entre 0,4 mSv/ano e 107,6 mSv/ano e apresentam uma média de 4,6 mSv/ano. Quer a Comissão Internacional de Protecção Radiológica, quer a Organização Mundial de Saúde recomendam que a dose efectiva anual não ultrapasse 10 mSv/ano e que para valores superiores deverão ser adoptadas medidas de mitigação (ICRP, 2009; WHO, 2009; 2010). No cálculo do limite da dose efectiva anual a Comissão Internacional de Protecção Radiológica considera uma concentração de radão no ar interior de 600 Bq/m^3 (ICRP, 2007; 2009). Assim, e tendo em atenção os valores obtidos, cerca de 6 % dos edifícios amostrados apresentam valores acima do recomendado (Figura 6.6).

A cartografia da distribuição espacial da concentração de radão no solo (Capítulo 3) constitui um importante indicador do potencial para determinado edifício apresentar valores de concentração deste gás no ar interior superiores ao limite recomendado. Quando se projecta a distribuição espacial das médias anuais da concentração de radão no ar interior de edifícios desta freguesia sobre a concentração deste gás no solo verifica-se que, mesmo em zonas de concentração no solo inferiores a 8000 Bq/m^3 , a concentração no ar interior pode ser superior a 150 Bq/m^3 (Figura 6.7). Por outro lado, valores de concentração de radão no ar interior inferiores a 150 Bq/m^3 estão maioritariamente associados a zonas de concentração de radão no solo inferiores a 8000 Bq/m^3 .

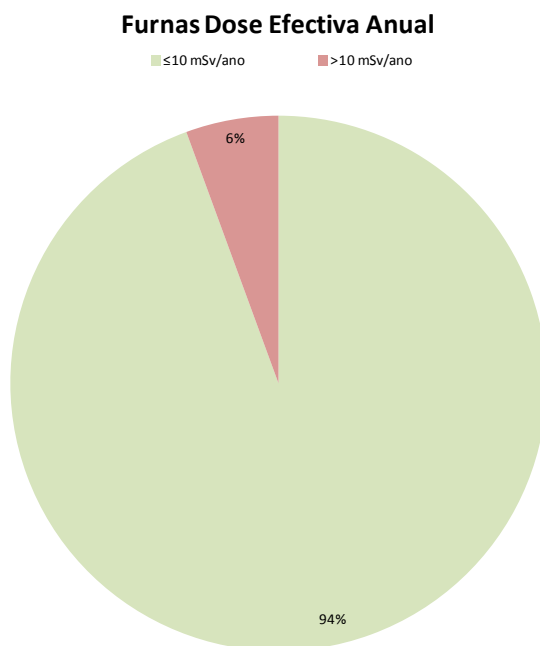


Figura 6.6 – Dose efectiva anual calculada com base na média anual da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas.

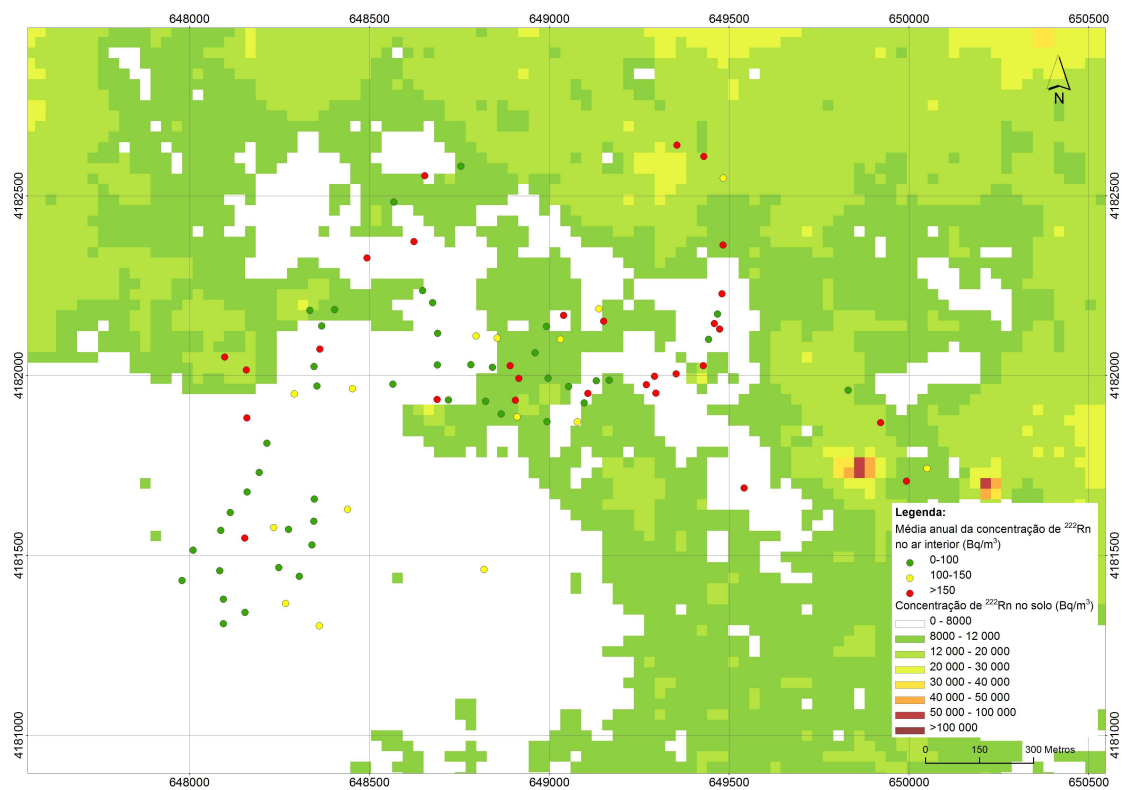


Figura 6.7 – Distribuição espacial da concentração média anual de ^{222}Rn no ar interior de edifícios e no solo na freguesia das Furnas.

Uma análise da distribuição espacial dos valores registados nas campanhas efectuadas permite verificar que na campanha realizada no Verão (Figura 6.8), o número de edifícios que apresentam concentrações de radão no ar interior superiores a 150 Bq/m³ localizados em zonas onde a concentração de radão no solo é inferior a 8000 Bq/m³ diminui quando comparado com a campanha realizada nos meses de Inverno (Figura 6.9).

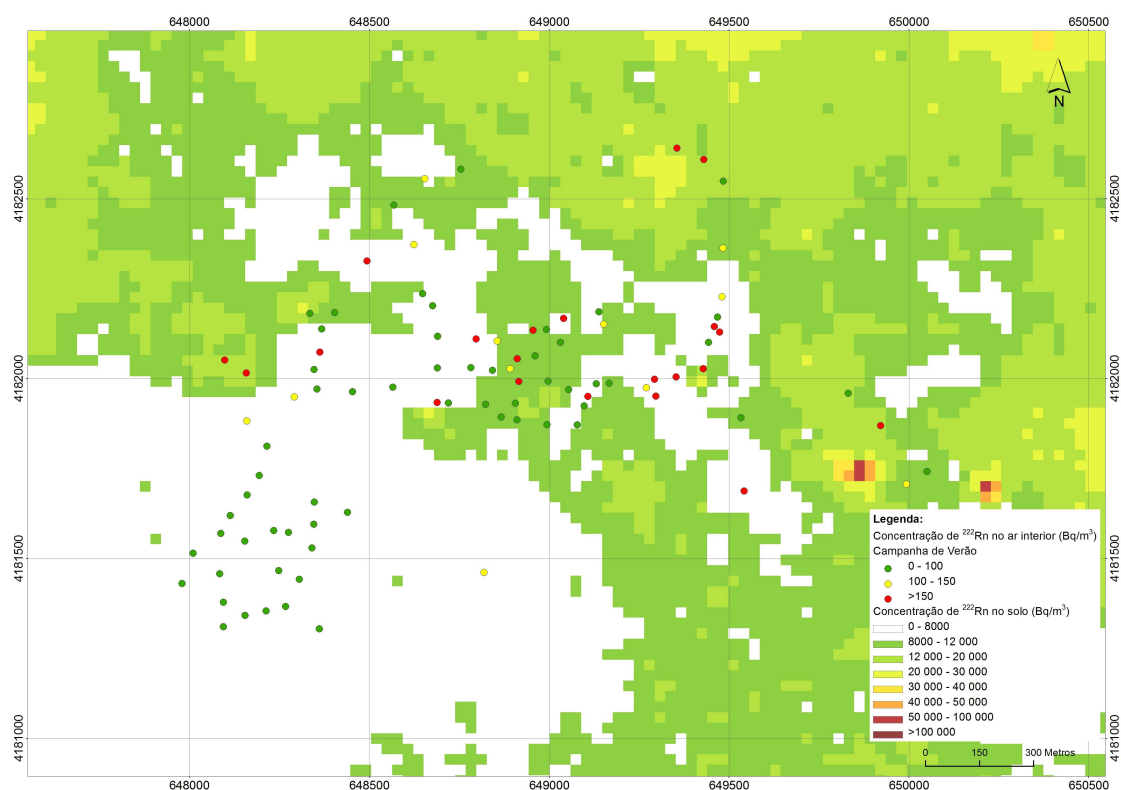


Figura 6.8 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Verão, e no solo na freguesia das Furnas.

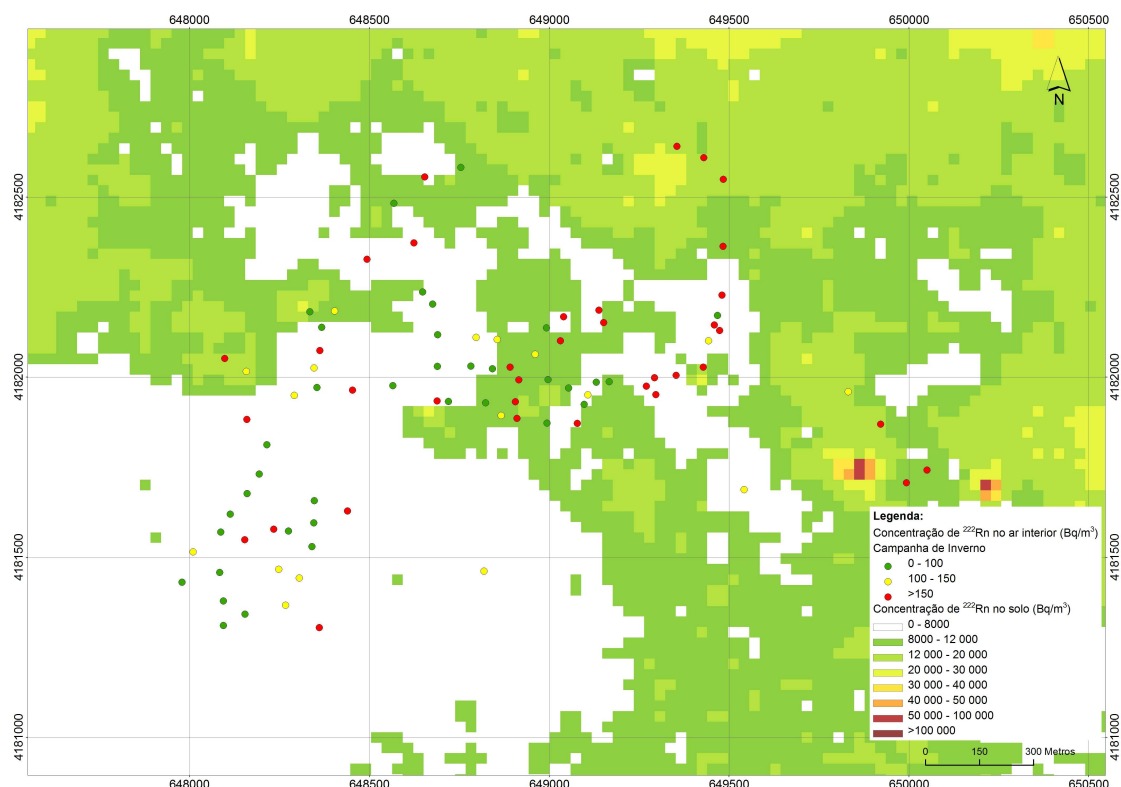


Figura 6.9 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Inverno, e no solo na freguesia das Furnas.

6.5.2. Freguesia da Ribeira Quente

A monitorização da concentração de radão no ar interior de edifícios na freguesia da Ribeira Quente permitiu verificar, à semelhança do descrito para a freguesia das Furnas, que os valores registados são superiores nos meses de Inverno do que nos meses de Verão, apresentando uma média de 96 Bq/m^3 para os meses de Verão e 160 Bq/m^3 para os meses de Inverno (Tabela 6.3). Os valores médios registados nos meses de Inverno são superiores ao limite de 100 Bq/m^3 recomendado pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2009; 2010) e de 150 Bq/m^3 recomendado na legislação regional (D.L.R. nº16/2009/A Artº. 51).

Cerca de 8 % dos edifícios amostrados na campanha de Verão apresentam uma concentração de radão superior a 150 Bq/m³ e na campanha de Inverno esta percentagem sobe para 29 % (Figura 6.10). Este facto deverá estar associado aos mesmos factores anteriormente descritos para os edifícios amostrados na freguesia das Furnas, ou seja, deverá resultar de variações dos parâmetros meteorológicos e dos hábitos dos residentes.

A maioria dos edifícios apresenta, no compartimento amostrado, pontos de ventilação (portas e janelas) directos para o exterior (96,2 %). Durante a campanha de Verão em 16 % dos locais de amostragem, estes pontos foram mantidos abertos, em 76 % estiveram temporariamente abertos e em 8 % foram raramente abertos. Na amostragem de Inverno estes pontos de ventilação em 82,6 % dos locais de amostragem estiveram temporariamente abertos, em 4,3 % foram raramente abertos e em 13 % estiveram sempre fechados. Assim, à semelhança do descrito para a freguesia das Furnas, também para a freguesia da Ribeira Quente se verifica que a ventilação dos edifícios amostrados nos meses de Verão é mais eficiente do que no período invernal.

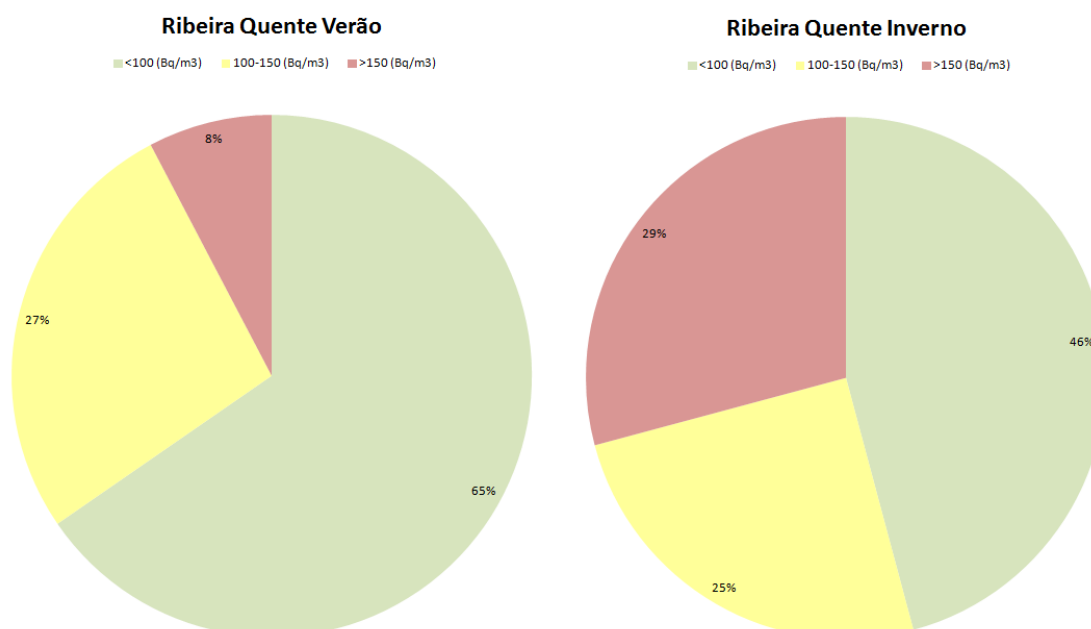


Figura 6.10 – Concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente, nas campanhas de Verão (à esquerda) e Inverno (à direita).

Uma vez que, neste caso, se verifica também uma variação sazonal da concentração de radão no ar interior de edifícios foi calculada a média anual da concentração deste gás para cada edifício de acordo com a equação 6.1, descrita anteriormente. Os valores das médias anuais calculadas oscilaram entre 31 Bq/m^3 e 474 Bq/m^3 e apresentam um valor médio de 129 Bq/m^3 que, corresponde a um valor superior ao limite definido pela Organização Mundial de Saúde, mas é inferior ao definido na legislação regional. Cerca de 21 % dos edifícios amostrados apresentam valores médios anuais de concentração de radão no ar interior superiores a 150 Bq/m^3 e 54 % apresentam valores superiores a 100 Bq/m^3 (Figura 6.11). Também neste caso foi calculada a dose efectiva anual de radão a que os residentes poderão estar sujeitos através da aplicação da equação 6.2, tendo em consideração as médias anuais obtidas de cada edifício. As doses efectivas anuais de radão no ar interior calculadas para os edifícios amostrados oscilaram entre $0,5 \text{ mSv/ano}$ e 8 mSv/ano e apresentam uma média de $2,2 \text{ mSv/ano}$, não ultrapassando portanto o limite da dose efectiva anual recomendado de 10 mSv/ano (ICRP, 2009; WHO, 2009; 2010).

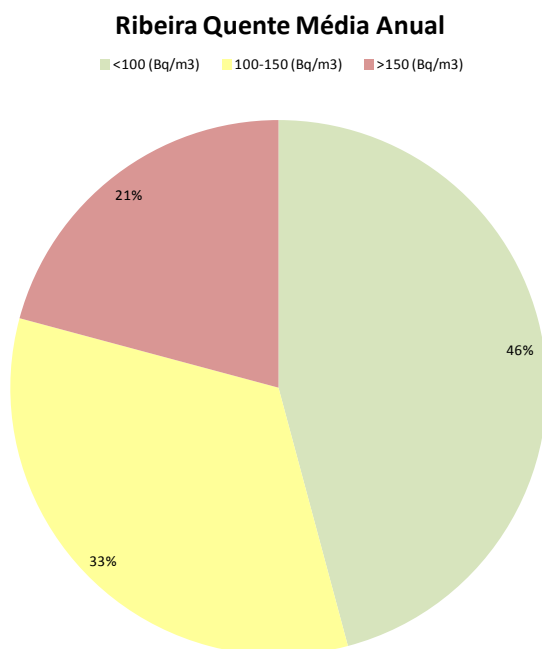


Figura 6.11 – Média anual da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios da freguesia da Ribeira Quente.

Na freguesia da Ribeira Quente a realização da cartografia de radão no solo permitiu verificar que parte dos edifícios estão localizados em áreas de importante desgaseificação difusa deste gás potenciando a sua entrada em edifícios. À semelhança do observado na freguesia das Furnas, quando se projecta a distribuição espacial das médias anuais da concentração de radão no ar interior de edifícios nesta freguesia sobre a concentração deste gás no solo, verifica-se que mesmo em zonas de concentração de radão no solo inferiores a 8000 Bq/m^3 a concentração de radão no ar interior pode ser superior a 150 Bq/m^3 (Figura 6.12), enquanto que, os valores de concentração de radão no ar interior inferiores a 150 Bq/m^3 estão maioritariamente associados a zonas de concentração de radão no solo inferiores a 8000 Bq/m^3 .

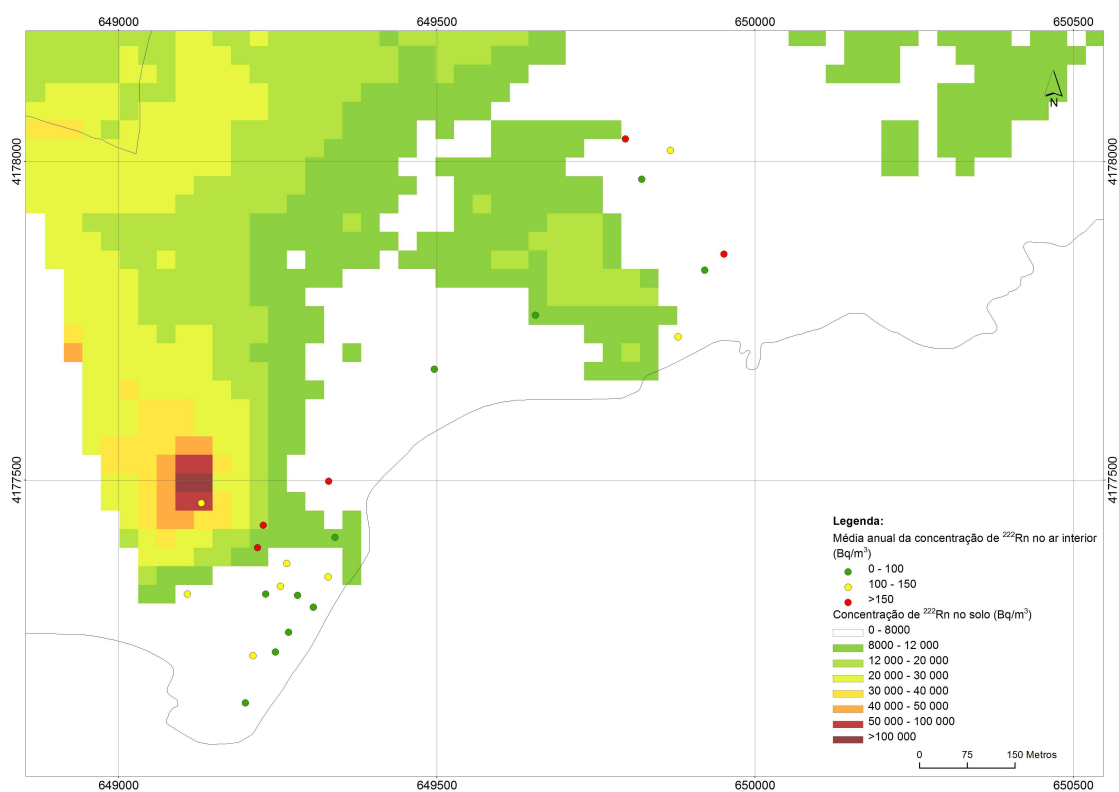


Figura 6.12 – Distribuição espacial da concentração média anual de ^{222}Rn no ar interior de edifícios e no solo na freguesia da Ribeira Quente.

Uma análise da distribuição espacial dos valores registados nas duas campanhas efectuadas permite verificar que na campanha realizada no Verão

(Figura 6.13), o número de edifícios com concentração de radão no ar interior superior a 150 Bq/m^3 localizados em zonas onde a concentração de radão no solo é inferior a 8000 Bq/m^3 diminui quando comparado com a campanha realizada nos meses de Inverno (Figura 6.14), como consequência de uma ventilação mais eficiente.

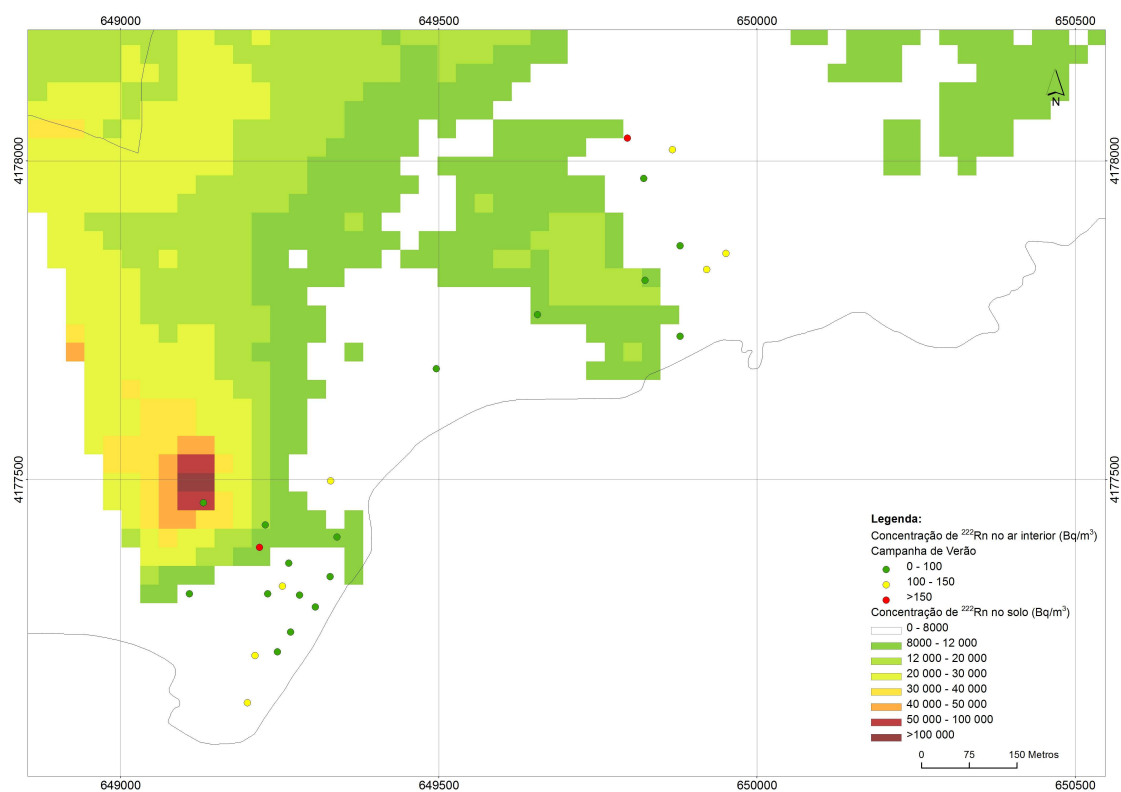


Figura 6.13 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Verão, e no solo na freguesia da Ribeira Quente.

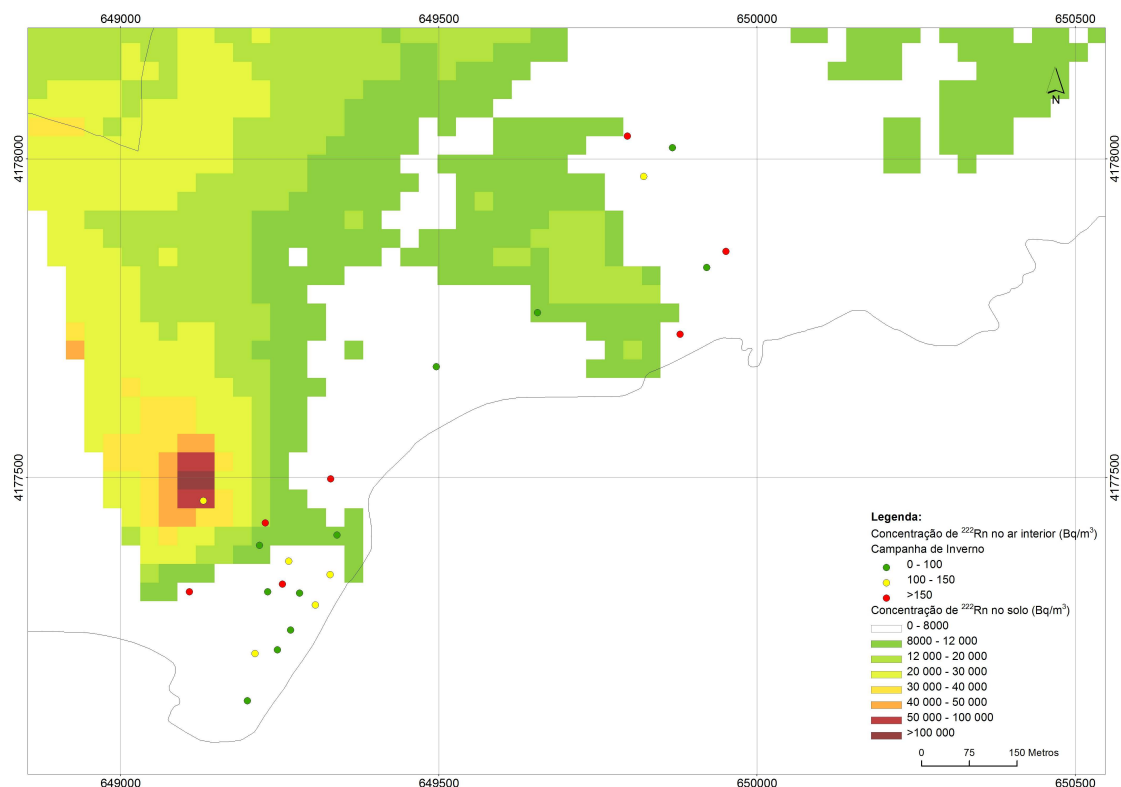


Figura 6.14 – Distribuição espacial da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios, na campanha de Inverno, e no solo na freguesia da Ribeira Quente.

6.5.3. Risco para a Saúde Pública

A cartografia da concentração de radão no solo evidenciou a presença de zonas de desgaseificação anómalas localizadas nas freguesias das Furnas e Ribeira Quente e a monitorização da concentração deste gás no ar interior de edifícios destas freguesias comprovou a sua presença, em alguns casos, em concentrações superiores à legislada. Neste trabalho, à semelhança da metodologia aplicada por Viveiros (2010) para a exposição ao CO_2 , será efectuada a avaliação do risco a concentrações anómalas de radão no ar, no que se refere à exposição humana, através da integração da cartografia da susceptibilidade e da vulnerabilidade.

Considerando o perigo como a probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor numa determinada área num certo intervalo de tempo (Fournier d'Albe, 1979; De La Cruz-Reyna, 1996; Corominas *et al.*, 2003) e a susceptibilidade como a predisposição de uma área ser afectada por um determinado fenómeno independentemente da componente tempo (Corominas *et al.*, 2003), a avaliação do risco será efectuada tendo em consideração o conceito de susceptibilidade uma vez que não existe informação sobre a variação temporal da cartografia de radão no solo no Vulcão das Furnas.

A análise da concentração de radão no ar interior de edifícios permitiu verificar que alguns dos edifícios que apresentam valores superiores aos recomendados se encontram em áreas em que a concentração deste gás no solo é inferior ao ruído de fundo definido para o Vulcão das Furnas. Por este motivo, para efeitos de análise da susceptibilidade, foram utilizadas classes que têm em consideração não só os valores registados no ar interior em edifícios das freguesias amostradas, mas também os valores de radão no ar interior recomendados pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2009; 2010). Assim, para a elaboração da cartografia da susceptibilidade de radão no solo para as freguesias das Furnas e Ribeira Quente (Figuras 6.15 e 6.16), foram aplicadas as seguintes classes de susceptibilidade:

- (a) Áreas de susceptibilidade reduzida: áreas de concentração de radão no solo inferior a 1000 Bq/m^3 . Este valor corresponde à concentração de radão no solo para a qual todas as médias anuais da concentração deste gás no ar interior dos edifícios amostrados são inferiores a 100 Bq/m^3 ;
- (b) Áreas de susceptibilidade moderada: áreas de concentração de radão no solo compreendidas entre 1000 e 2500 Bq/m^3 . Este valor (2500 Bq/m^3) corresponde à concentração de radão no solo abaixo da qual todas as médias anuais da concentração deste gás no ar interior dos edifícios amostrados são inferiores a 300 Bq/m^3 ;
- (c) Áreas de susceptibilidade elevada: áreas de concentração de radão no solo superiores a 2500 Bq/m^3 .

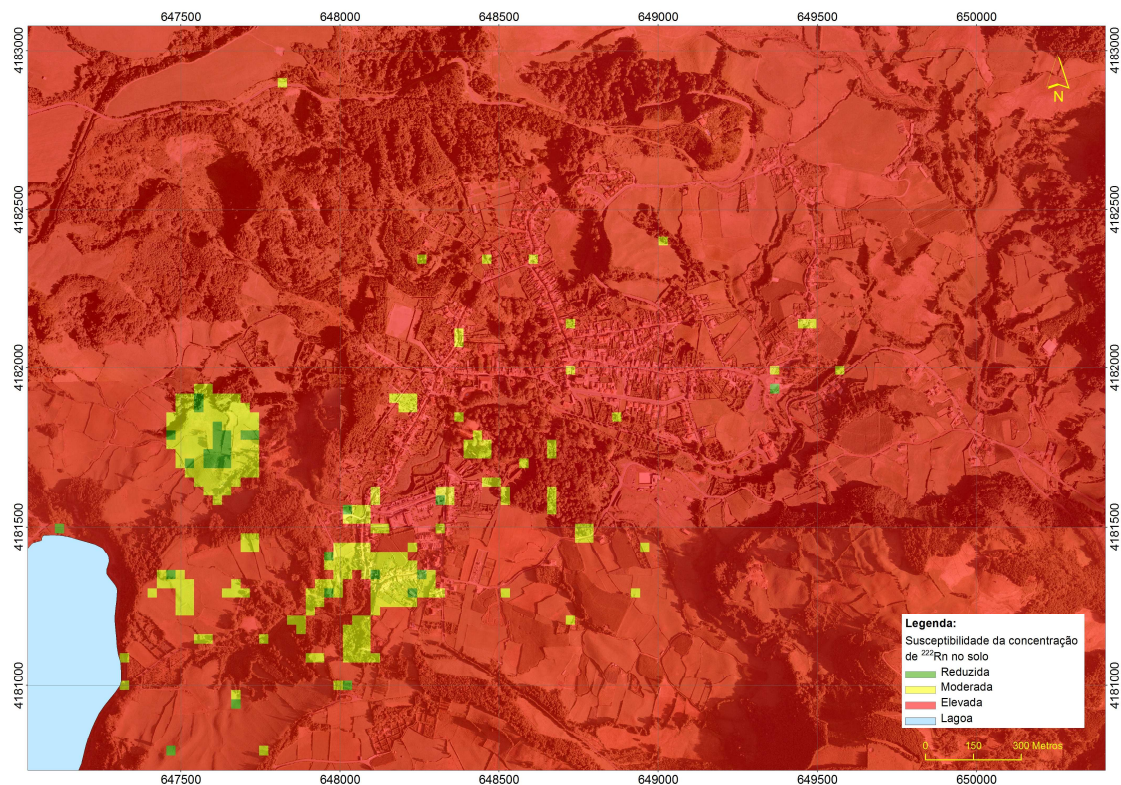


Figura 6.15 – Cartografia da susceptibilidade de ^{222}Rn no solo para a freguesia das Furnas.

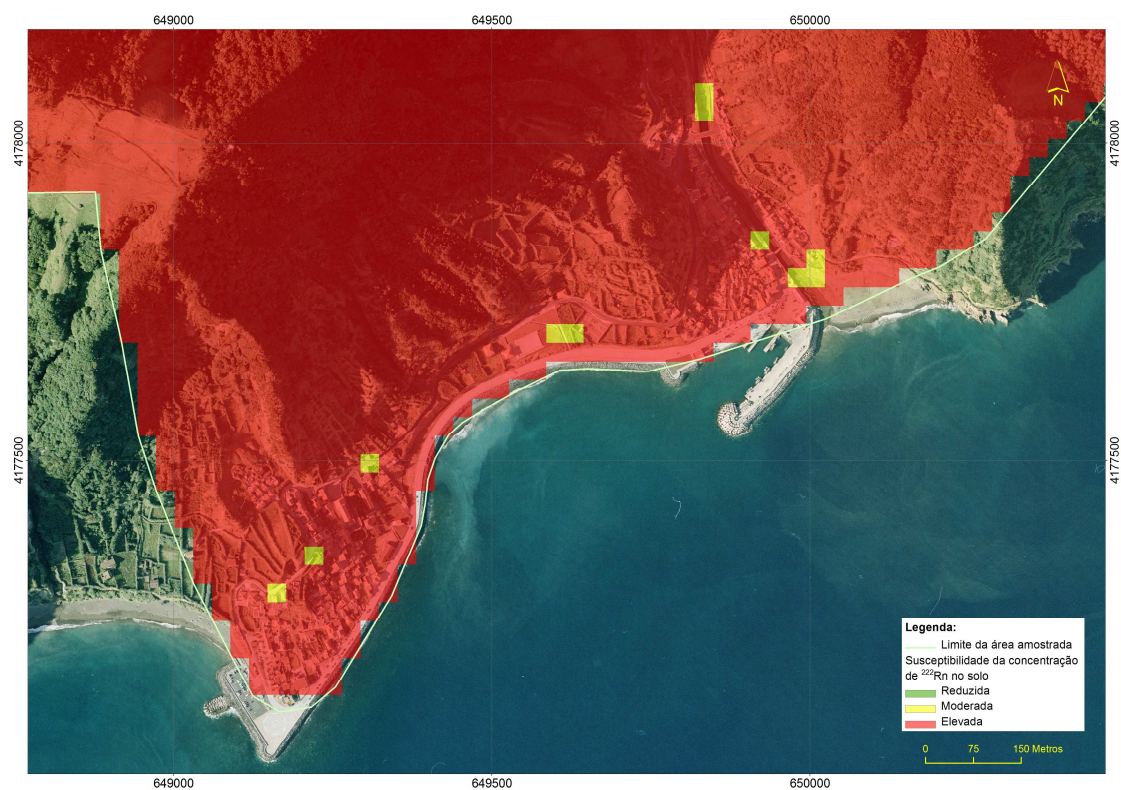


Figura 6.16 – Cartografia da susceptibilidade de ^{222}Rn no solo para a freguesia da Ribeira Quente.

A vulnerabilidade é definida como a proporção do valor passível de ser afectado e/ou destruído por um determinado fenómeno (Fournier d'Albe, 1979; De La Cruz-Reyna, 1996). Sendo o fenómeno em estudo um gás, os elementos passíveis de serem afectados correspondem, neste caso, a animais e pessoas. A análise da vulnerabilidade irá incidir apenas sobre a exposição humana a concentrações anómalas de radão no ar e serão aplicadas as classes de vulnerabilidades definidas por Viveiros (2010). Na definição destas classes de vulnerabilidade Viveiros (2010) teve em consideração a exposição humana em ambientes exteriores e interiores e as características dos edifícios, nomeadamente a presença de caves e caixas-de-ar. Assim, foram consideradas as seguintes classes de vulnerabilidade:

- (a) Vulnerabilidade reduzida: ambiente exterior;
- (b) Vulnerabilidade moderada: ar interior em edifícios com caixa-de-ar;
- (c) Vulnerabilidade elevada: ar interior em edifícios sem caixa-de-ar;
- (d) Vulnerabilidade muito elevada: ar interior em edifícios com cave.

A informação utilizada relativamente à presença de caves ou de caixas-de-ar nos edifícios das freguesias das Furnas e Ribeira Quente corresponde à compilada em trabalhos anteriores (Resendes, 2004; Viveiros, 2010 e referências nele citadas). Não existe informação prévia relativamente à presença de caixas-de-ar nos edifícios da freguesia da Ribeira Quente e no presente trabalho em apenas um dos edifícios amostrados foi identificada a presença desta estrutura. Dos 444 edifícios desta freguesia, 441 fazem parte desta análise uma vez que os restantes estão localizados fora da área de estudo da cartografia de radão no solo. A cartografia da vulnerabilidade à exposição a concentrações anómalas de radão no ar pode ser observada nas figuras 6.17 e 6.18.

6. CARTOGRAFIA DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS
E RISCO PARA A SAÚDE PÚBLICA

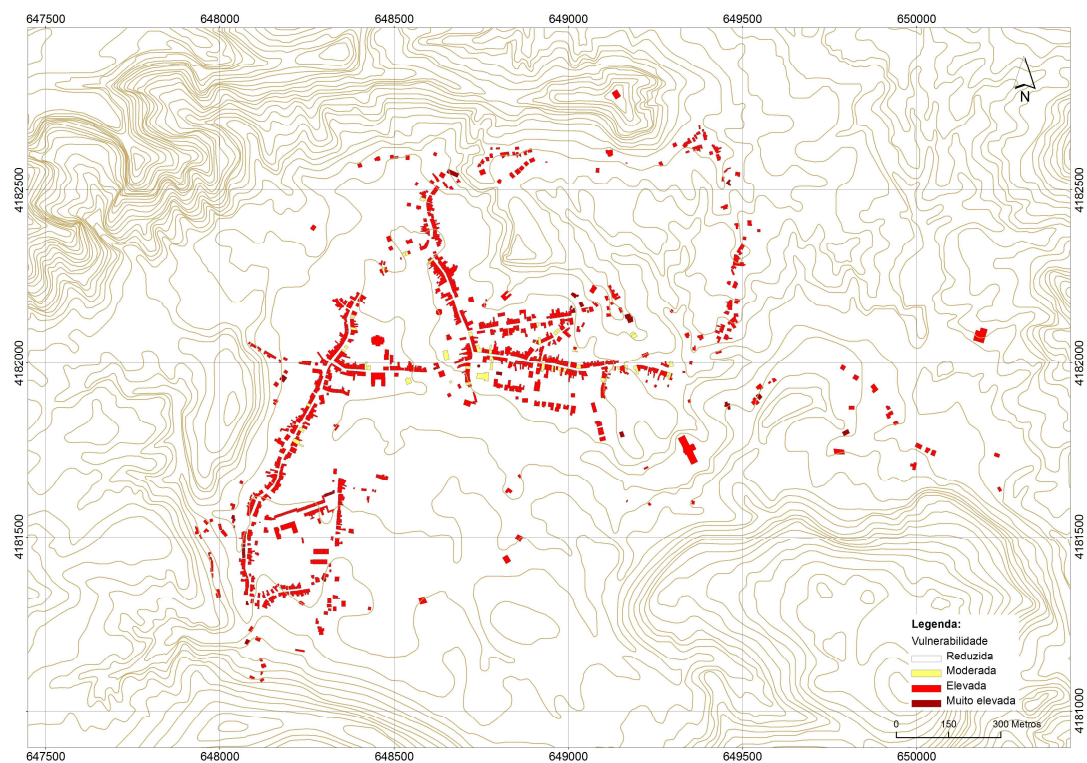


Figura 6.17 – Cartografia da vulnerabilidade no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia das Furnas (modificado de Viveiros, 2010).

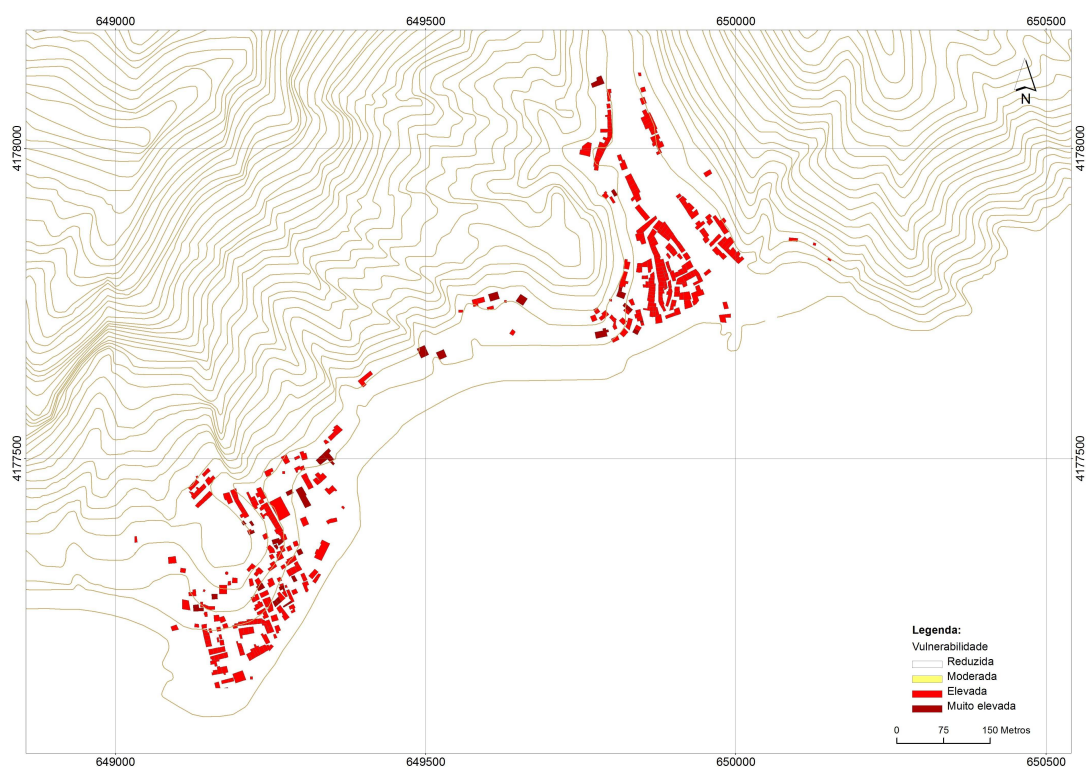


Figura 6.18 – Cartografia da vulnerabilidade no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia da Ribeira Quente (modificado de Viveiros, 2010).

O risco corresponde à possibilidade de uma perda (e.g. vidas, propriedades, capacidade produtiva) (Fournier d'Albe, 1979) e traduz-se pela equação 6.3 (modificado de Fournier d'Albe, 1979; De La Cruz-Reyna, 1996):

$$(6.3) \quad \text{Risco} = \frac{\text{Valor} \times \text{Vulnerabilidade} \times \text{Perigo (Susceptibilidade)}}{\text{Capacidade de resposta}}$$

O valor corresponde ao número de vidas humanas em causa, ao valor monetário ou estratégico e à capacidade produtiva e a capacidade de resposta corresponde à redução da vulnerabilidade através da aplicação de medidas de mitigação (Fournier d'Albe, 1979; De La Cruz-Reyna, 1996). Os restantes parâmetros foram definidos anteriormente. Assumindo uma distribuição uniforme do número de pessoas por edifício, uma vez que esta informação não está disponível, a avaliação do risco resulta da integração da cartografia da susceptibilidade e vulnerabilidade previamente elaboradas (Viveiros, 2010). Seguindo a metodologia aplicada por Viveiros (2010) foi atribuído um valor numérico entre 0 e 1 às diferentes classes de susceptibilidade e vulnerabilidade (Tabela 6.4) tendo sido definidas quatro classes de risco:

- (a) Risco reduzido: $< 0,16$;
- (b) Risco moderado: $\geq 0,16$ a $< 0,32$;
- (c) Risco elevado: $\geq 0,32$ a $< 0,64$;
- (d) Risco muito elevado: $\geq 0,64$.

Tabela 6.4 – Classes de risco à exposição de radão definidas pela integração dos valores de susceptibilidade e vulnerabilidade.

Vulnerabilidade	Reduzida	Moderada	Elevada	Muito Elevada
Susceptibilidade	(0,2)	(0,4)	(0,8)	(1)
Reduzida (0,2)	0,04	0,08	0,16	0,20
Moderada (0,4)	0,08	0,16	0,32	0,40
Elevada (0,8)	0,16	0,32	0,64	0,80

A cartografia de risco, elaborada para as freguesias das Furnas e Ribeira Quente, no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de radão no ar pode ser observada nas figuras 6.19 e 6.20. Cerca de 84,4 % e 2,7 % dos edifícios da freguesia das Furnas apresentam um risco elevado e muito elevado, repectivamente, no que respeita a concentração de radão no ar. Relativamente à freguesia da Ribeira Quente a percentagem de edifícios com risco elevado corresponde a 92,1 % e 7,3 % correspondem a risco muito elevado.

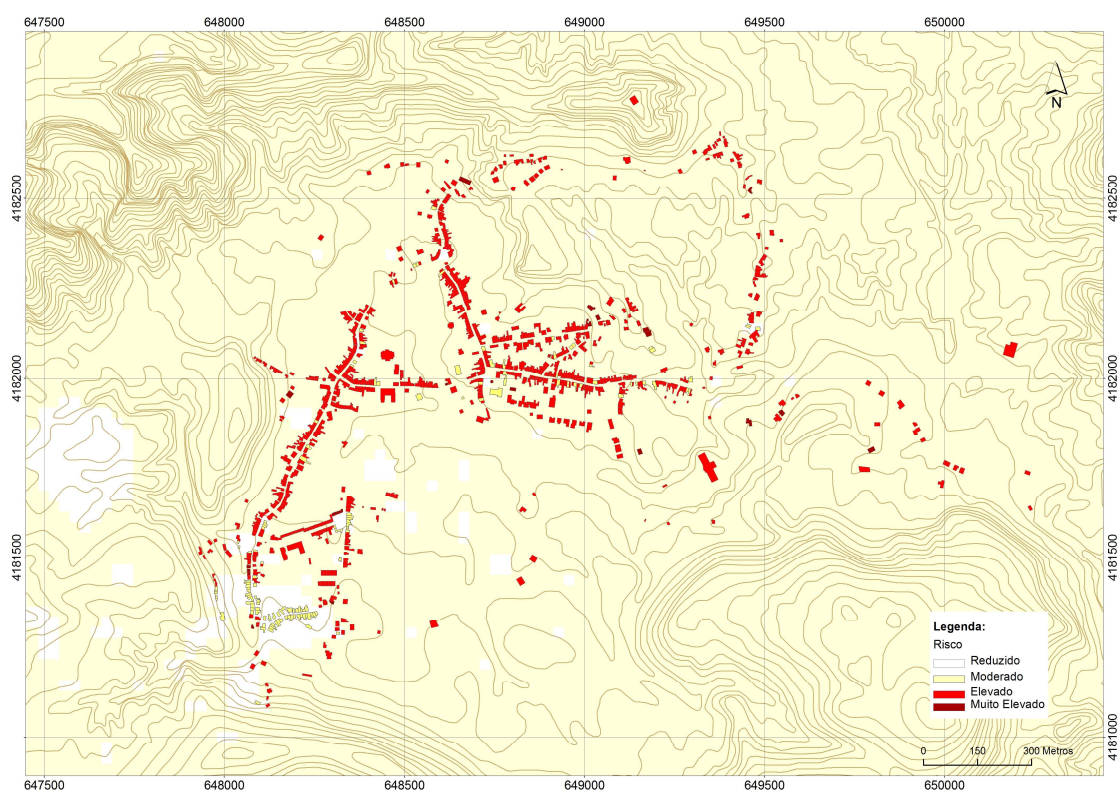


Figura 6.19 – Cartografia do risco no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia das Furnas.

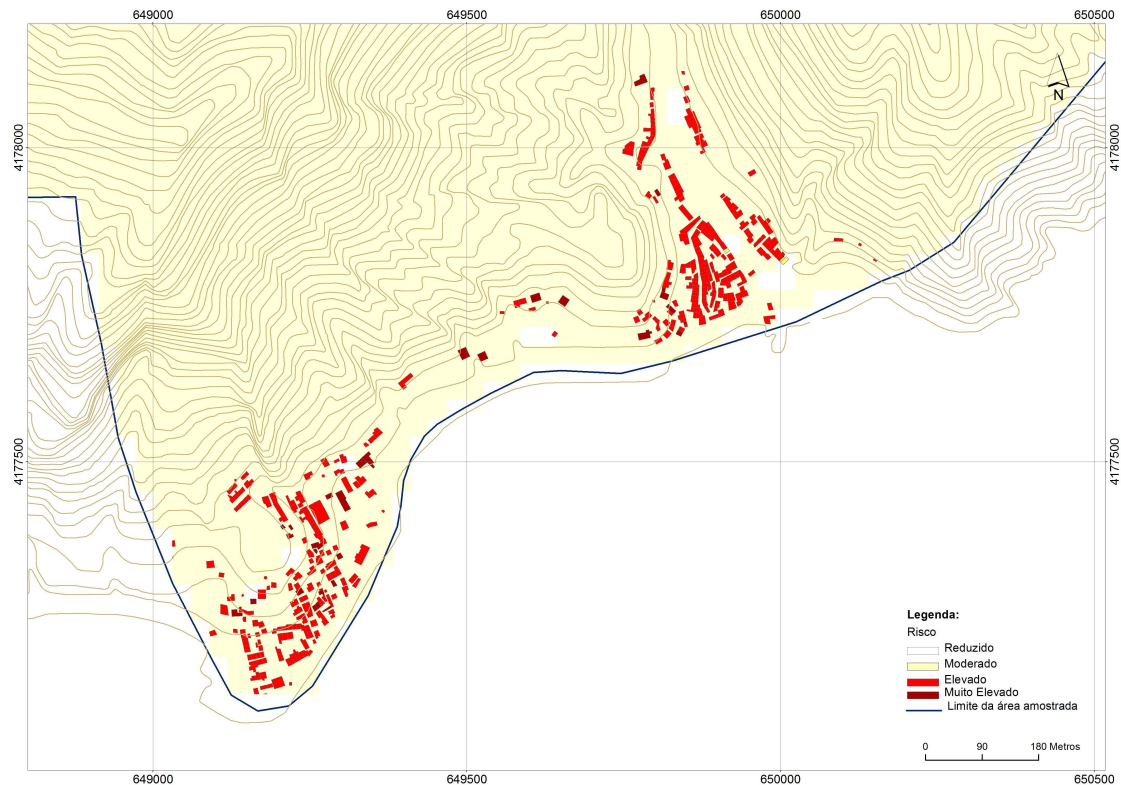


Figura 6.20 – Cartografia do risco no que se refere à exposição humana a concentrações anómalas de ^{222}Rn no ar na freguesia da Ribeira Quente.

As freguesias das Furnas e Ribeira Quente apresentam uma importante área com susceptibilidade elevada. Por outro lado, é necessário considerar a cartografia da vulnerabilidade obtida para os edifícios destas freguesias, na sua maioria elevada ou muito elevada e implementar medidas para a redução da vulnerabilidade destes edifícios e de edifícios a construir no futuro. Tais medidas podem passar pela recomendação de construção de caixas-de-ar, uma vez que estas promovem a ventilação deste espaço e, consequentemente, uma diminuição da concentração de radão que entra directamente do solo para o interior do edifício e a construção de caves deve ser evitada, uma vez que estas aumentam a área de contacto directo com o solo facilitando a entrada de radão no edifício.

A cartografia do risco a concentrações anómalas de radão no ar identifica na freguesia das Furnas cerca de 12,9 % e na freguesia da Ribeira Quente apenas 0,6 % edifícios com risco moderado, apresentando os restantes risco elevado ou muito

elevado. O cruzamento da informação obtida na cartografia de risco com a obtida aquando da realização da monitorização da concentração de radão no ar interior de edifícios, permite verificar que nos edifícios amostrados, para as classes de risco identificadas como elevada e muito elevada, os valores de concentração de radão no ar interior são em alguns casos superiores ao limite legislado, enquanto que noutros apresentam valores inferiores. Esta divergência entre a classe de risco calculada e os valores efectivamente obtidos pode resultar das condições de ventilação destes espaços. Neste trabalho, no cálculo da vulnerabilidade apenas se teve em consideração a presença ou ausência de caves e caixa-de-ar, não tendo sido considerado o factor ventilação uma vez que, por um lado, não existia informação disponível sobre esta variável e por outro, esta é uma variável que não é constante ao longo do tempo dependendo não só das características dos edifícios como, por exemplo, o número de janelas presentes, mas também dos hábitos dos ocupantes, isto é, se mantêm as janelas abertas ou fechadas e durante quanto tempo, sendo este segundo factor de difícil contabilização.

6.5.4. Considerações Gerais

A presença de radão no ar interior de edifícios está associada, tal como referido anteriormente, a três fontes de entrada deste gás: o solo, a água e o material de construção. Os materiais utilizados na construção dos edifícios nas duas freguesias são bastante homogéneos, correspondendo na sua maioria a blocos de betão furado e cimento, sendo apenas 12,9 % dos edifícios amostrados na freguesia das Furnas e 11,5 % dos edifícios da freguesia da Ribeira Quente de construção mais antiga, construídos exclusivamente em pedra. Também o abastecimento de água é comum sendo efectuado através da rede de abastecimento público. Assim, assumindo que a contribuição de radão destas duas fontes de entrada é constante para todos os edifícios, as diferenças encontradas deverão resultar essencialmente da fonte de radão restante, o solo.

Parte do parque habitacional das freguesias das Furnas e Ribeira Quente está localizado em zonas de importante desgaseificação difusa de radão potenciando deste modo a entrada deste gás no interior de edifícios. A percentagem de edifícios localizados em zonas de concentração de radão no solo superiores a 1000 Bq/m^3 é de aproximadamente 97 % na freguesia das Furnas e cerca de 99 % na freguesia da Ribeira Quente. Para zonas de concentração de radão no solo superiores a 2500 Bq/m^3 , a percentagem de edifícios é aproximadamente 85 % na freguesia das Furnas e na freguesia da Ribeira Quente, cerca de 95 %.

As características associadas ao tipo de construção como, por exemplo, a presença de caves ou de caixas-de-ar, são críticas no que diz respeito à vulnerabilidade. A presença de caves aumenta a área do edifício em contacto directo com o solo facilitando a entrada do radão. Dos edifícios amostrados nas freguesias das Furnas e Ribeira Quente, 9,7 % e 19,2 %, respectivamente, apresentam este compartimento. Tradicionalmente o tipo de construção realizado nos Açores não inclui a presença de caves, no entanto, esta tendência tem vindo a ser alterada. A presença de caixas-de-ar promove uma ventilação da zona directamente em contacto com o solo, diminuindo assim a entrada deste gás nas zonas habitáveis do edifício. Estas estão presentes em cerca de 12,9 % e 3,8 % dos edifícios amostrados nas freguesias das Furnas e Ribeira Quente, respectivamente. A presença de caixas-de-ar está tradicionalmente associada a edifícios de construção antiga com o chão revestido por soalho de madeira, como forma de evitar a entrada de humidade nestes edifícios. No entanto, na maioria dos edifícios que foram reconstruídos os proprietários optaram pela remoção destas caixas-de-ar. Assim, as alterações no tipo de construção têm vindo a ser efectuadas no sentido de aumentar a vulnerabilidade dos edifícios.

A realização das campanhas de monitorização da concentração de radão no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas e da Ribeira Quente permitiu verificar que:

- 1- Os valores de concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados ultrapassam frequentemente os valores recomendados na legislação regional (150 Bq/m^3);

- 2- Os valores de concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados apresentam variação sazonal, sendo superiores nas campanhas efectuadas nos meses de Inverno do que nos meses de Verão;
- 3- Edifícios localizados em zonas de concentração de radão no solo inferiores ao nível de base definido para este vulcão (8000 Bq/m^3) podem apresentar valores de concentração deste gás no ar interior superiores ao limite recomendado pela legislação regional (150 Bq/m^3);
- 4- Os valores de concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados variam também em função dos hábitos dos residentes, essencialmente no que se refere à abertura e fecho de portas e janelas;
- 5- Na freguesia das Furnas, cerca de 6 % dos edifícios amostrados apresentam concentrações de radão no ar interior capazes de originar doses efectivas anuais superiores aos limites estabelecidos (10 mSv/ano).

Os valores de concentração de radão amostrados no ar interior dos edifícios das freguesias das Furnas e da Ribeira Quente ultrapassam, em alguns casos, os limites recomendados quer pela legislação regional, quer por organizações internacionais (ICRP; WHO) e salientam, uma vez mais, a importância deste tipo de estudo em regiões vulcânicas quiescentes. Mesmo em zonas onde a concentração de radão no solo apresenta valores relativamente baixos, este gás pode-se acumular no interior de edifícios em concentrações superiores às recomendadas, dependendo de determinadas condições associadas a variações dos parâmetros meteorológicos e aos hábitos dos residentes.

7. MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DA CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS

7.1. Nota Prévia

A concentração de radão no ar interior de edifícios varia espacialmente nos edifícios de uma determinada região, tal como verificado no capítulo anterior. No entanto, num mesmo edifício podem ocorrer variações ao longo do tempo dependentes de variações de diversos factores entre os quais, de parâmetros meteorológicos.

Neste capítulo pretende-se compreender quais as variáveis externas que podem influenciar a concentração de radão no ar interior de edifícios e o modo como o fazem. Para tal foram seleccionados três edifícios da freguesia das Furnas onde foram efectuados ensaios de monitorização contínua da concentração de radão e de CO_2 no ar interior. As séries temporais obtidas foram tratadas estatisticamente através da aplicação da análise de regressão múltipla e da análise espectral.

7.2. Factores Externos que Influenciam a Concentração de ^{222}Rn no Ar Interior

A concentração de radão no ar interior de edifícios apresenta, normalmente, uma variação sazonal. Esta variação depende essencialmente dos hábitos dos ocupantes, nomeadamente no que diz respeito à ventilação dos edifícios e das variações dos parâmetros meteorológicos que influenciam o transporte deste gás no solo e a ventilação nos edifícios (Hasbrouck, 1983; Singh *et al.*, 2005b; Bossew e Lettner, 2007).

Estudos realizados em escolas na Grécia (Clouvas *et al.*, 2011) permitiram verificar oscilações de concentração de radão no ar interior entre 104 Bq/m³ e 866 Bq/m³ em períodos em que esta escola estava em funcionamento e encerrada, respectivamente, colocando claramente em evidência a importância de uma ventilação eficiente. A concentração de radão no ar interior de edifícios é normalmente superior nos meses de Inverno do que no Verão em resultado da tendência, por parte dos ocupantes, de manterem as janelas fechadas no Inverno e abertas no Verão (Bossew e Lettner, 2007; Rao e Sengupta, 2010).

De entre os parâmetros meteorológicos que exercem maior influência na concentração de radão no ar interior salientam-se as diferenças de temperatura e de pressão barométrica entre o interior e o exterior do edifício, a precipitação e a velocidade do vento (Rowe *et al.*, 2002; Riley *et al.*, 1996; Kitto, 2005).

A diferença de temperatura entre o interior e o exterior dos edifícios é a principal responsável pelas oscilações diárias na concentração de radão nestes espaços. Os valores de concentração deste gás atingem, normalmente, níveis mais elevados durante a noite, período durante o qual o ar interior do edifício está mais quente que o ar exterior, logo menos denso, dando origem a uma diminuição da pressão barométrica. Assim, o geogás, e consequentemente o radão, que se encontra

no solo é introduzido mais facilmente no interior do edifício através dos compartimentos directamente em contacto com o solo (Kitto, 2005; Groves-Kirkby *et al.*, 2006).

Por outro lado, o ar atmosférico desloca-se no sentido de repor o geogás que foi introduzido no edifício (Spencer, 1992). Mesmo que o ar atmosférico apenas se desloque no solo durante 2 ou 3 dias é tempo suficiente para que a sua concentração em radão sofra um incremento considerável.

A ocorrência de precipitação também pode influenciar a concentração de radão no ar interior uma vez que a água ao ocupar os espaços existentes no solo vai provocar alterações tanto na quantidade de radão que é emanada, como na permeabilidade do solo, conduzindo assim a diferenças de pressão entre a área à volta dos edifícios e a zona existente por baixo destes (Nazaroff e Sextro, 1989; Rowe *et al.*, 2002). Estudos realizados nas Furnas (Baxter *et al.*, 1999) revelaram um comportamento sazonal na concentração de radão no ar interior de edifícios, tendo os incrementos da concentração deste gás, durante o período invernal, sido associados a incrementos da pluviosidade.

A velocidade do vento pode influenciar a concentração de radão no ar interior de dois modos distintos: aumento da eficácia da ventilação e remoção do geogás existente no solo por baixo do edifício (Riley *et al.*, 1996). Nesta última situação o vento é introduzido nos espaços existentes no solo num dos lados do edifício, de acordo com a direcção do vento, produzindo um fluxo que remove o geogás existente no solo por baixo do edifício, saindo nos restantes lados. Deste modo a concentração de radão disponível no solo para ser introduzida no interior do edifício diminui drasticamente. Este efeito será mais eficaz quanto maior for a permeabilidade do solo (Riley *et al.*, 1996).

Para além da influência de factores meteorológicos outros factores externos como as marés terrestres, podem influenciar a concentração do radão no ar interior ao

afectarem a concentração de radão que é emanada do solo (Groves-Kirkby *et al.*, 2006).

7.3. Metodologias de Amostragem e Tratamento Estatístico dos Dados

7.3.1. Configuração de Amostragem

A monitorização em contínuo do radão no ar interior de edifícios foi efectuada com recurso ao equipamento RAD7 descrito anteriormente no capítulo 3 (3.3.1.1). Este equipamento foi programado para funcionar em modo *Auto*, isto é, a concentração de radão no ar destes edifícios foi calculada com base no decaimento do ^{218}Po durante as primeiras três horas de amostragem, passando, após este período, a ser contabilizada com base no decaimento do ^{218}Po e do ^{214}Po .

No que diz respeito à monitorização contínua da concentração de CO_2 no ar interior, foram utilizados equipamentos da *Geotechnical Instruments*, nomeadamente o GA2000 e o *AnagasTM* CD 95 que efectuem a medição da concentração deste gás recorrendo a detectores de infravermelhos sendo o ar introduzido no detector através da utilização de uma bomba de aspiração. As características técnicas do equipamento GA2000 estão descritas no capítulo 3 (3.3.1.2). O detector *AnagasTM* CD 95 corresponde a um espectrómetro de infravermelhos que permite medir a concentração de CO_2 (%vol.) com uma resolução de 0,1 % e uma precisão de 2 % (Geotechnical Instruments, 1996). Num dos edifícios foi utilizada uma estação protótipo desenvolvida pela WestSystems[®]. Este equipamento para a medição da concentração de CO_2 no ar interior está descrito em Viveiros (2010) e consiste num detector de infravermelhos da *Dräger* (*Dräger Polytron IR CO₂*) em que a introdução do ar no detector é efectuada por difusão. Esta estação tem ainda acoplada sensores meteorológicos (pressão barométrica, humidade relativa do ar, temperatura do ar, direcção e velocidade do vento).

7.3.2. Locais de Amostragem

Os ensaios de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior de edifícios foram efectuados em três pontos de amostragem distintos. O local de amostragem 1 corresponde a um edifício habitacional localizado numa zona próxima do campo fumarólico da Ribeira dos Tambores. Esta habitação foi edificada numa zona que apresenta valores de concentração de radão no solo compreendidos entre 8000 e 12 000 Bq/m³, valores de concentração de CO₂ no solo que, com base em Sousa (2003), variam entre 6 e 15 %vol. e valores de temperatura do solo inferiores a 25 °C. A amostragem da concentração de radão e de CO₂ foi realizada na cave da habitação e decorreu entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005 (Fotografia 7.1). Esta cave apresenta uma das paredes exteriores em contacto total com o solo, passando a parcial em outras duas. A quarta parede exterior está em contacto com o ar atmosférico. A ventilação da cave é efectuada através da presença de seis janelas e uma porta. Por baixo desta cave existe ainda uma caixa-de-ar.



Fotografia 7.1 – Instalação dos detectores de ^{222}Rn e de CO₂ no ponto de amostragem 1.

A metodologia aplicada encontra-se descrita em Silva (2006) e resume-se a amostragens cíclicas de 59 minutos, em que para a medição da concentração de CO_2 , o ar ambiente é aspirado durante cerca de 30 segundos no final de cada ciclo. Como neste ponto de amostragem a ventilação desempenha um papel muito importante nas variações dos gases amostrados, optou-se pela realização de um teste, que decorreu entre as 19:15 do dia 7 e as 22:00 do dia 9 de Dezembro, abrangendo um período de aproximadamente 51 horas durante o qual a cave foi mantida completamente fechada.

O local de amostragem 2 corresponde a um edifício de comércio localizado nas imediações do campo fumarólico da Freguesia das Furnas. O terreno de implantação apresenta uma concentração de radão no solo inferior a 8000 Bq/m^3 , de CO_2 compreendida entre 1,5 e 6 %Vol. e valores de temperatura entre 30 e 35 °C. A selecção deste edifício para a amostragem realizada foi consequência dos resultados obtidos aquando da realização da cartografia de radão no ar interior de edifícios (Capítulo 6), associado ao facto da proprietária do espaço se queixar de dores de cabeça. A amostragem da concentração de radão e de CO_2 decorreu no período de uma semana entre os dias 17 e 24 de Novembro de 2011 e foi efectuada a aproximadamente 5 cm do chão (Fotografia 7.2).



Fotografia 7.2 – Instalação dos detectores de ^{222}Rn e de CO_2 no ponto de amostragem 2.

As amostragens destes gases foram realizadas em ciclos de 30 minutos. As medições de radão foram efectuadas em modo *Auto* sendo a aspiração efectuada em cada ciclo de modo contínuo durante os primeiros 5 minutos com um fluxo correspondente de 0,5 L/min. No restante tempo a aspiração foi feita apenas no primeiro minuto em cada cinco com um fluxo correspondente de 0,5 L/min. A contagem decorreu ao longo dos 30 minutos e o valor final corresponde à média dos decaimentos de partículas α por segundo por metro cúbico de ar amostrado. No que se refere à amostragem do CO_2 , o ar ambiente foi aspirado durante cerca de 30 segundos no final de cada ciclo com um fluxo aproximado de 0,4 L/min.

O local de amostragem 3 corresponde a um pequeno edifício pertencente à Universidade dos Açores (UAç), localizado no parque de estacionamento situado junto ao campo fumarólico da Freguesia das Furnas (Fotografia 7.3). Esta zona caracteriza-se por apresentar no solo valores de concentração de radão inferiores a 8000 Bq/m³, valores de concentração de CO_2 compreendidos entre 6 e 15 %vol. e temperaturas que oscilam entre 25 e 30 °C. A selecção deste local de amostragem está relacionada com três aspectos principais: (a) acesso fácil ao equipamento e possível sempre que necessário, (b) controlo total sobre as condições de ventilação deste espaço e (c) presença de uma estação protótipo para medição da concentração de CO_2 no ar interior e de sensores meteorológicos.

A amostragem da concentração de radão neste espaço teve início a 1 de Abril de 2008 e continua a decorrer actualmente. Neste trabalho serão analisados e discutidos os dados obtidos no período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 31 de Dezembro de 2011. Este edifício apresenta um compartimento térreo com um volume aproximado de 8 m³ e um poço com um volume de aproximadamente 2 m³. A amostragem de concentração de radão foi efectuada junto ao chão da base do poço a uma profundidade de 2,10 m (Fotografia 7.3 c)).



Fotografia 7.3 – Ponto de amostragem 3: a) aspecto exterior do edifício, b) equipamento utilizado para a medição de ^{222}Rn e c) poço onde foi efectuada a amostragem.

Em virtude da elevada humidade presente neste local foi necessário utilizar um redutor activo de humidade (*drystick 144''*) a fim de prolongar a eficiência do dessecante, passando este a ser substituído aproximadamente de 6 em 6 meses e não de semana a semana. A amostragem decorreu em ciclos de 60 minutos em modo *Auto*. Neste ponto de amostragem a bomba do detector não está em funcionamento, uma vez que, está a ser utilizada a bomba do *drystick*. Esta bomba aspira o ar ambiente continuamente com um fluxo de 0,2 L/min. A contagem decorreu ao longo dos 60 minutos e o valor final corresponde à média dos decaimentos de partículas α por segundo por metro cúbico de ar amostrado referente a cada ciclo de amostragem.

Os três edifícios seleccionados para a realização destes ensaios de monitorização contínua apresentam um tipo de construção semelhante, tendo como principais materiais empregues blocos de betão furado e cimento. No local de amostragem 2 o pavimento encontrava-se revestido de azulejo, sendo de cimento nos restantes.

7.3.3. Recolha e Análise Estatística dos Dados

No ponto de amostragem 1 e de acordo com a capacidade de armazenamento dos equipamentos, os dados foram recolhidos uma vez por mês, no caso do radão, e duas vezes por mês, no caso do CO_2 . A correcção relativamente à humidade no interior do detector e a validação dos dados de radão obtidos foram efectuadas com recurso ao *software* Capture Versão 4.8.1 fornecido pela DurrIDGE Company, procedendo-se do mesmo modo para os outros pontos de amostragem. A aquisição de dados da concentração dos gases amostrados foi acompanhada da aquisição, em simultâneo, de dados de pressão barométrica no interior da habitação através do sensor integrado no detector de CO_2 e do registo de variações da ventilação deste espaço. A este conjunto de informação foi adicionada a informação ambiental fornecida pela estação GFUR1.

No ponto de amostragem 2, como o período de amostragem se restringiu a uma semana, os dados de concentração de radão e de CO_2 foram recolhidos no final deste período. Também neste ponto de amostragem foi medida a pressão barométrica no interior deste edifício através do sensor integrado no detector de CO_2 e foram ainda registadas as variações de ventilação. A este conjunto de informação foi adicionada a informação ambiental fornecida pela estação GFUR3.

No ponto de amostragem 3, os dados de concentração de radão no ar interior deste edifício foram recolhidos uma vez por mês. Durante este período de monitorização a estação protótipo de medição de CO_2 apresentou muitas falhas na aquisição de dados que inviabilizaram a inclusão dos resultados neste estudo. Em alternativa foram utilizados os dados obtidos pelos sensores meteorológicos da estação GFUR3 localizada a aproximadamente 80 m deste edifício. Neste ponto de amostragem a ventilação processa-se apenas durante a manutenção ou recolha de dados da estação de radão. Para estas intervenções o equipamento é desligado, registando-se uma interrupção na aquisição de dados, sendo de novo ligado imediatamente antes da porta voltar a ser encerrada. Após o reinício do equipamento

os valores de radão registados revelam normalmente uma diminuição em resultado da ventilação provocada, sendo o tempo médio de recuperação para valores próximos dos anteriores de cerca de 3 horas.

De modo a compreender a influência estatística destes factores externos na variação da concentração de radão no ar interior destes edifícios foi aplicada a análise de regressão múltipla às séries de dados obtidas, através da utilização do método *Stepwise* e do *software SPSS* descritos no capítulo 4 (4.3.3). Nesta análise a concentração de radão no ar interior foi considerada a variável dependente e os parâmetros meteorológicos em análise, a concentração de CO_2 no ar interior e a ventilação, foram considerados as variáveis independentes, de acordo com a equação 4.1, descrita no ponto 4.3.3 do capítulo 4.

Como a aplicação de modelos de regressão múltipla a séries de dados requer que a população em análise apresente uma distribuição normal, foi necessário recorrer à transformação logarítmica dos dados obtidos de modo a que a sua distribuição se aproxime da normalidade (Figura 7.1).

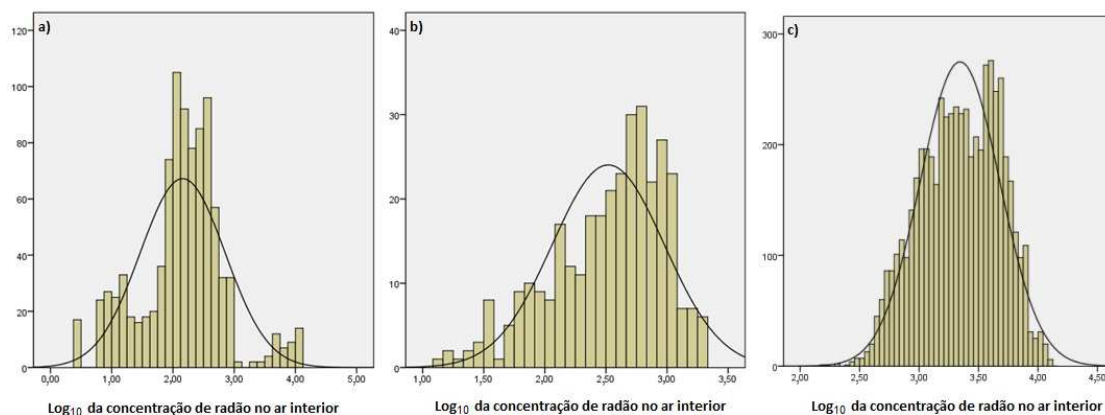


Figura 7.1 – Histogramas dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior de edifícios: a) no local 1 - habitação, b) no local 2 – edifício comercial e c) no local 3 – edifício pertencente à Universidade dos Açores para o período de 11 de Agosto de 2010 a 31 de Março de 2011.

Tal como descrito no capítulo 4, também nestes modelos de regressão múltipla foram incluídas as variáveis independentes com significância de acordo com o teste *t* de *student* ($P < 0,01$) e que fomentam um aumento do R^2 ajustado superior a 1 %.

Relativamente à existência de multicolinearidade entre variáveis, foram excluídas as variáveis com um VIF superior a 10 (Freund e Wilson, 1998) e foi tido ainda em consideração a existência de variáveis independentes cujo comportamento se traduz por uma função quadrática. Aos modelos foi também aplicado o teste F de Snedcor de modo a validar todas as variáveis introduzidas no modelo como um todo (Draper e Smith, 1981; Freund e Wilson, 1998).

O modelo aplicado corresponde ao que, reunindo todos os requisitos anteriormente descritos, apresente maior poder explicativo para as oscilações da variável dependente em cada ponto de amostragem. No que se refere ao ponto de amostragem 3, o modelo foi aplicado ao período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 31 de Março de 2011, uma vez que, apesar de não existirem dados de concentração de CO_2 pelas razões apontadas anteriormente, trata-se do período mais prolongado de tempo durante o qual foi possível obter dados de todas as variáveis meteorológicas amostradas e com o mínimo de problemas relativamente à humidade no detector de radão.

Às séries temporais obtidas foi aplicada a análise espectral através da utilização do *software Tsoft* descrito no capítulo 4 (4.3.3). Também no presente capítulo esta análise foi aplicada com o intuito de identificar variações cíclicas diárias das séries de dados obtidos, de detectar variações sazonais e de identificar relações de amplitude, atraso entre variáveis e coeficientes de correlação entre diferentes frequências (Van Camp e Vauterin, 2005; Viveiros, 2010; Vauterin e Van Camp, 2011).

O espectro das séries temporais foi calculado com base na FFT, tendo sido seleccionado um intervalo de incremento de 3600 segundos e a janela com a função *hanning* que permite forçar os pontos das extremidades para zero. As amplitudes foram projectadas em gráficos lineares em ciclos por dia (cpd). Para a realização desta análise foram seleccionados períodos com o mínimo de interrupções na sequência de dados. Quando apenas existia interrupção de uma hora de dados, esta foi interpolada pelo cálculo da média entre o valor anterior e o posterior da respectiva série de dados. Nos casos em que se verificou duas ou mais horas de interrupção de dados, foram

retiradas as 24 horas associadas a esse dia, à semelhança do descrito no capítulo 4. O espectrograma das séries temporais foi calculado utilizando a aplicação *Moving Window Spectrum*, sendo o número de pontos a transformar de 512 e o número de pontos entre transformações de 128.

Nos casos em que o espectro permitiu identificar a presença de variações cíclicas diárias nas séries temporais da concentração de radão, foi aplicada a *Transfer function*, com blocos de tamanho 256, entre a concentração de radão e os parâmetros meteorológicos que apresentaram variações cíclicas, de modo a tentar compreender os processos responsáveis por estas variações.

7.4. Apresentação dos Resultados

7.4.1. Local 1 - Habitação

O ensaio de monitorização da concentração de radão e de CO_2 no ar interior no ponto de amostragem 1, foi efectuado entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005 (Silva, 2006). A representação gráfica da variação temporal da concentração de radão e da concentração de CO_2 pode ser observada nas figuras 7.2 e 7.3.

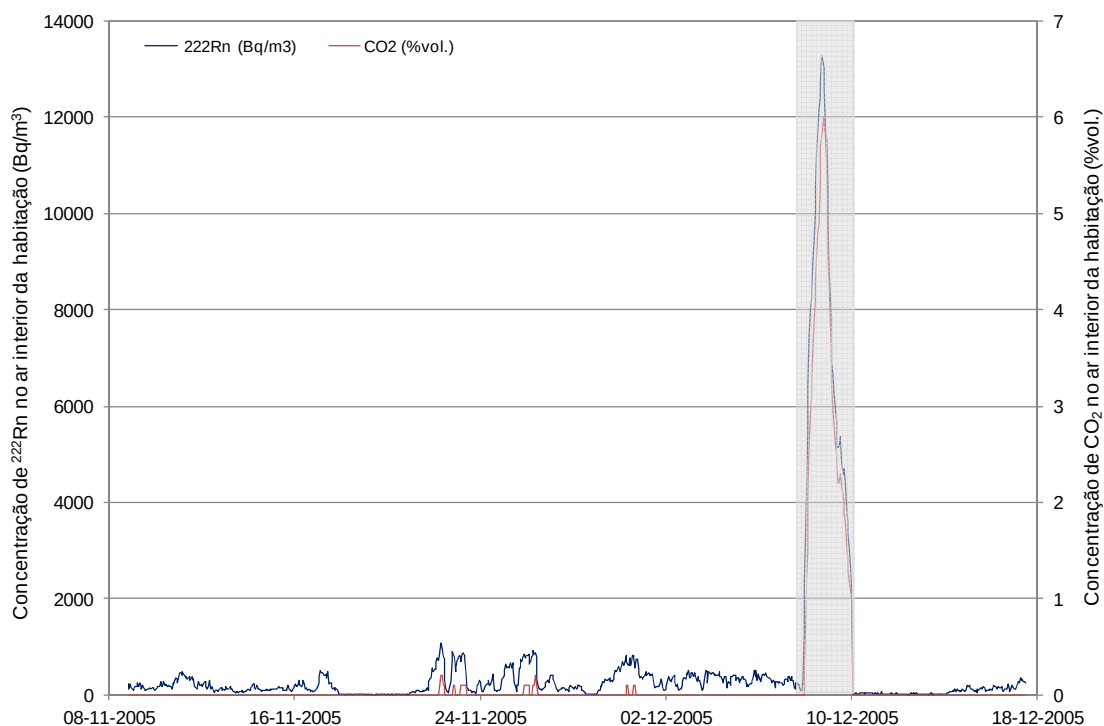


Figura 7.2 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior da habitação. A zona a sombreado cinza corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.

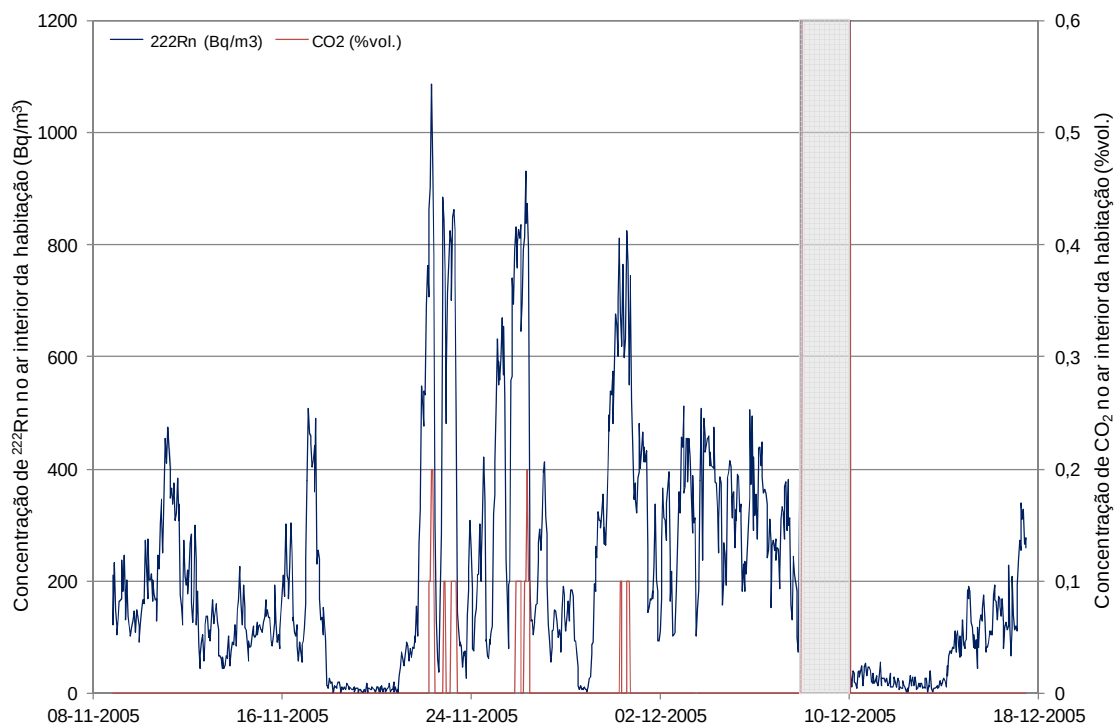


Figura 7.3 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior da habitação, com ampliação da escala. A zona a sombreado cinza corresponde ao período do teste dos dias 7 a 9 de Dezembro.

A estatística descritiva dos dados de concentração de radão e de CO_2 no ar interior, da pressão barométrica no interior da habitação, assim como dos dados dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR1 para o período em estudo estão sintetizados na tabela 7.1. Os valores máximos de concentração de radão detectados são superiores aos máximos detectados por Baxter *et al.* (1999) em outro edifício desta freguesia. De modo a tentar perceber a influência exercida pelos parâmetros em análise nas variações da concentração de radão no ar interior, Silva (2006) efectuou a análise comparativa entre as variações temporais da concentração deste gás relativamente às oscilações de cada variável analisada, traduzida pelos vários gráficos que constam no Anexo IX. A esta análise foi adicionado o parâmetro diferencial de pressão que corresponde à diferença entre a pressão barométrica no interior da habitação, medida pelo detector de concentração de CO_2 , e a pressão barométrica no exterior, medida pela estação GFUR1.

Da comparação efectuada os factores que parecem exercer influência sobre a concentração de radão no ar interior desta habitação são: a velocidade do vento, a ventilação e o diferencial de pressão barométrica entre o interior e o exterior do edifício. A velocidade do vento (Figura 7.4), em particular entre 14 de Novembro e 4 de Dezembro, e a ventilação (Figura 7.5) apresentam uma relação inversa, enquanto o diferencial de pressão (Figura 7.6), entre 15 de Novembro e 15 de Dezembro, aparenta ter uma relação directa com a concentração de radão no ar interior desta habitação.

Tabela 7.1 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior e da pressão barométrica no interior do edifício obtidos no ponto de amostragem 1 e dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR1.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
^{222}Rn no ar interior (Bq/m^3)	600,0	1812,0	161,0	0,0	13273,0	943
CO_2 no ar interior (%vol.)	0,2	0,8	0,0	0,0	6,0	942
Pressão no interior do edifício (hPa)	1003,0	8,0	1003,0	988,0	1021,0	942
Humidade relativa do ar (%)	98,1	0,3	98,1	88,4	98,1	928
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	15,7	3,6	15,2	5,6	25,5	928
Pressão barométrica (hPa) (GFUR1)	1001,0	7,0	1000,0	987,0	1015,0	928
Pluviosidade (mm/h)	0,1	0,5	0,0	0,0	8,6	904
Humidade do solo (%)	13,7	1,2	13,2	12,3	17,1	928
Velocidade do vento (m/s)	0,4	0,6	0,0	0,0	4,0	943

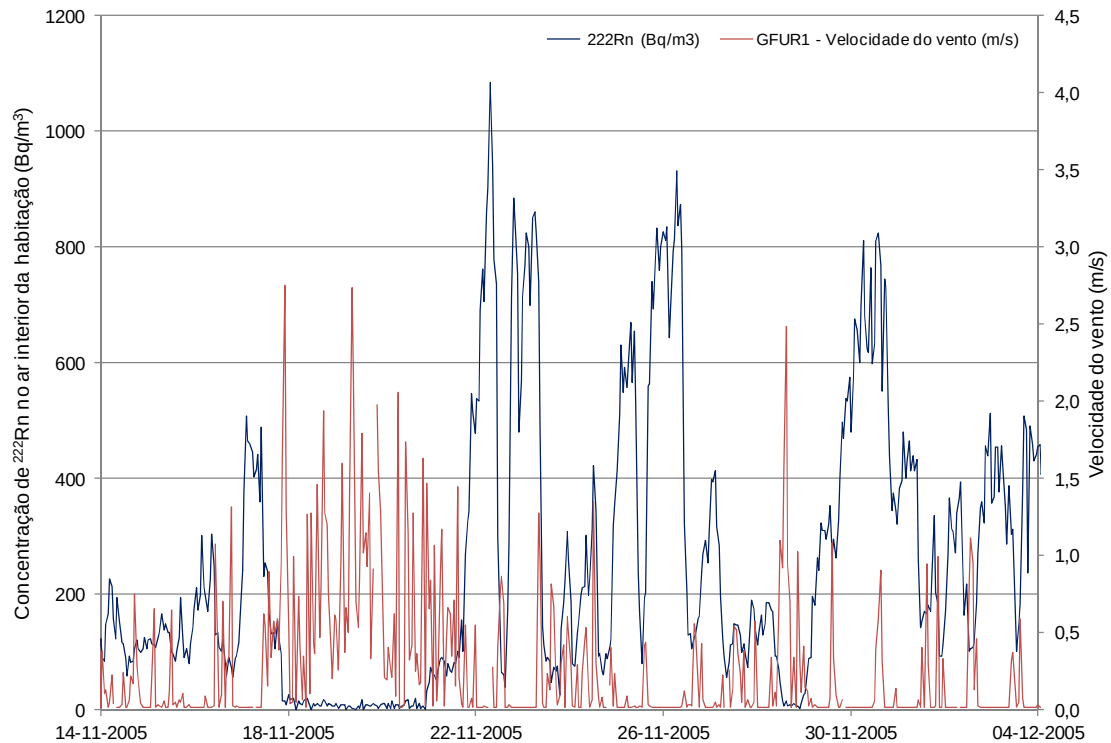


Figura 7.4 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação e da velocidade do vento na estação GFUR1 para o período compreendido entre 14 de Novembro e 4 de Dezembro de 2005.

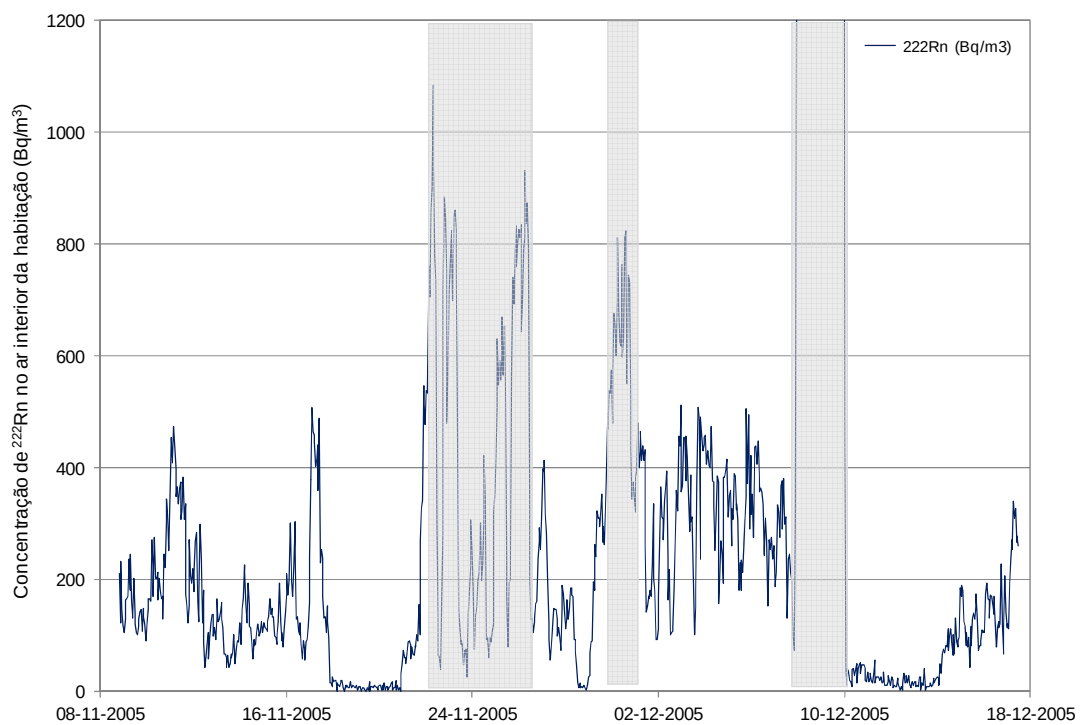


Figura 7.5 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e os períodos em que a ventilação deste espaço foi reduzida ou nula, representados pelo sombreado cinza.

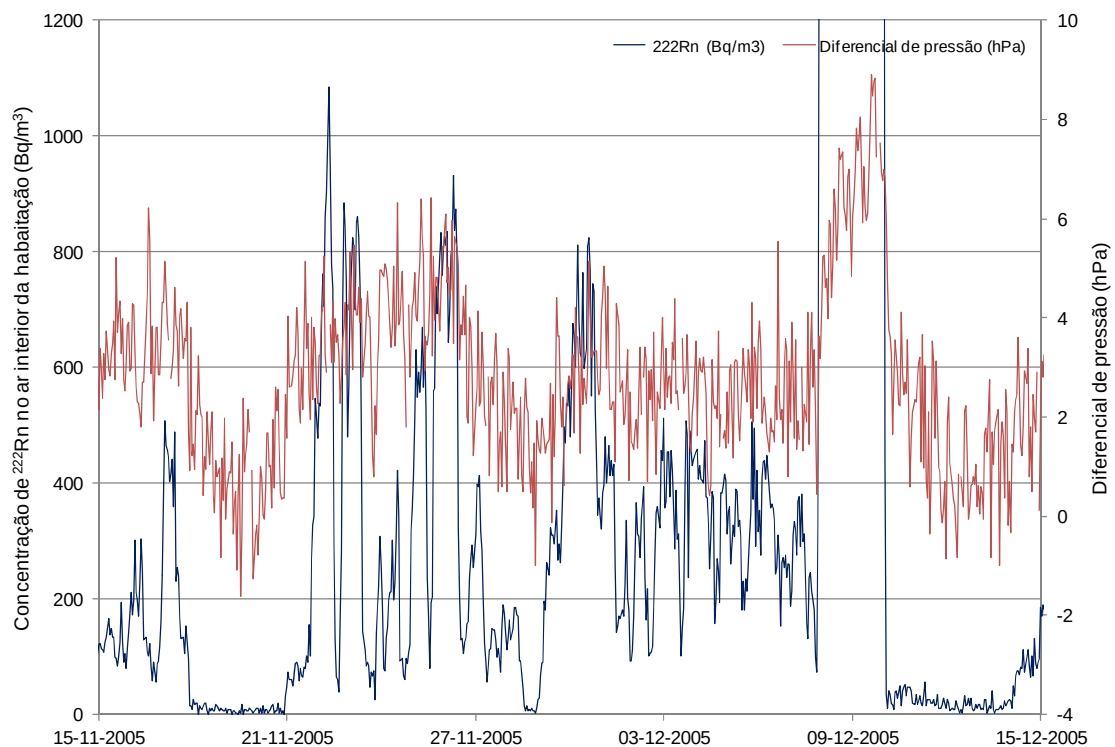


Figura 7.6 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e do diferencial de pressão entre o interior e o exterior deste edifício, para o período compreendido entre 15 de Novembro e 15 de Dezembro de 2005.

De modo a tentar confirmar estas relações foram calculados os coeficientes de correlação de *Pearson* entre as diversas variáveis em estudo. Os valores da concentração de radão foram transformados em logaritmos. Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Coeficientes de correlação de *Pearson* das variáveis analisadas durante o período em estudo.

Local de amostragem	Variáveis	$\text{Log}_{10} \text{ } ^{222}\text{Rn}$ no ar interior	CO_2 no ar interior	Pressão barométrica no edifício	Ventilação	Humidade relativa do ar	Temperatura do ar
1	$\text{Log}_{10} \text{ } ^{222}\text{Rn}$ no ar interior	1,000	0,546	0,327	-0,636	-0,024	0,031
	CO_2 no ar interior	0,546	1,000	0,104	-0,597	0,011	0,246
	Pressão barométrica no edifício	0,327	0,104	1,000	-0,026	-0,086	-0,125
	Ventilação	-0,636	-0,597	-0,260	1,000	-0,027	-0,145
	Humidade relativa do ar	-0,024	0,011	-0,086	-0,027	1,000	-0,058
	Temperatura do ar	0,031	0,246	-0,125	-0,145	-0,058	1,000
	Pressão barométrica (GFUR1)	0,218	0,019	0,982	0,074	-0,076	-0,152
	Diferencial de pressão	0,628	0,415	0,583	-0,44	-0,083	0,054
	Pluviosidade	-0,098	0,131	-0,122	0,011	0,008	-0,116
	Humidade do solo	-0,246	-0,179	-0,332	-0,171	0,005	-0,253
	Velocidade do vento	-0,228	0,259	-0,219	-0,056	0,003	0,331
	Variáveis	Pressão barométrica (GFUR1)	Diferencial de pressão	Pluviosidade	Humidade do solo	Velocidade do vento	
	$\text{Log}_{10} \text{ } ^{222}\text{Rn}$ no ar interior	0,218	0,628	-0,098	-0,246	-0,228	
	CO_2 no ar interior	0,019	0,415	0,131	-0,179	0,259	
	Pressão no edifício	0,982	0,583	-0,122	-0,332	-0,219	
	Ventilação	0,074	-0,440	0,011	-0,171	-0,056	
	Humidade relativa do ar	-0,076	-0,083	0,008	0,005	0,003	
	Temperatura do ar	-0,152	0,054	-0,116	-0,253	0,331	
	Pressão barométrica (GFUR1)	1,000	0,417	-0,115	-0,358	-0,238	
	Diferencial de pressão	0,417	1,000	-0,089	-0,059	-0,032	
	Pluviosidade	-0,115	-0,089	1,000	0,000	0,149	
	Humidade do solo	-0,358	-0,059	0,000	1,000	0,046	
	Velocidade do vento	-0,238	-0,032	0,149	0,046	1,000	

A análise de regressão múltipla aplicada aos dados da concentração de radão log-transformados permitiu verificar que no modelo proposto, isto é, no modelo com maior poder explicativo, as variáveis com significância estatística são a ventilação, o diferencial de pressão, a humidade do solo, a velocidade do vento e a concentração de CO_2 (Tabela 7.3). No que se refere aos coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 7.2), estes estão em concordância com os resultados obtidos pela regressão. Uma vez que a variável pressão barométrica é aplicada em três modos diferentes (pressão interior, exterior e diferencial), para a construção do modelo de regressão múltipla considerou-se o que apresenta maior coeficiente de correlação/poder explicativo, que no caso presente é a pressão diferencial. De acordo com o R^2 ajustado do modelo proposto, estas variáveis explicam 71 % do total das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior desta habitação. A ventilação, a humidade do solo e a velocidade do vento exercem uma influência negativa, enquanto que, o diferencial de pressão e a concentração de CO_2 influenciam positivamente as variações deste gás, de acordo com o sinal do coeficiente β .

Tabela 7.3 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem 1 – Habitação.

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	4,84	0,19		25,86	0,00		
Ventilação	-0,53	0,03	-0,45	-18,82	0,00	0,400	1,95
Diferencial de pressão	0,14	0,01	0,34	16,68	0,00	0,151	1,32
Humidade do solo	-0,16	0,01	-0,26	-13,44	0,00	0,093	1,21
Velocidade do vento	-0,33	0,02	-0,27	-14,41	0,00	0,054	1,32
CO ₂ no ar interior	0,14	0,02	0,16	6,29	0,00	0,012	2,05

Variável dependente: Log₁₀ da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação

Número total de observações: 919

Somatório do R^2 Ajustado: 0,710

Teste F: 451,44

0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A análise espectral foi aplicada à série temporal da concentração de radão para o período compreendido entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005. O espectro resultante não permitiu identificar variações cíclicas diárias (Figura 7.7). Para este conjunto de dados não foi calculado o espectrograma, uma vez que o período temporal é demasiado curto para possibilitar a identificação de variações sazonais.

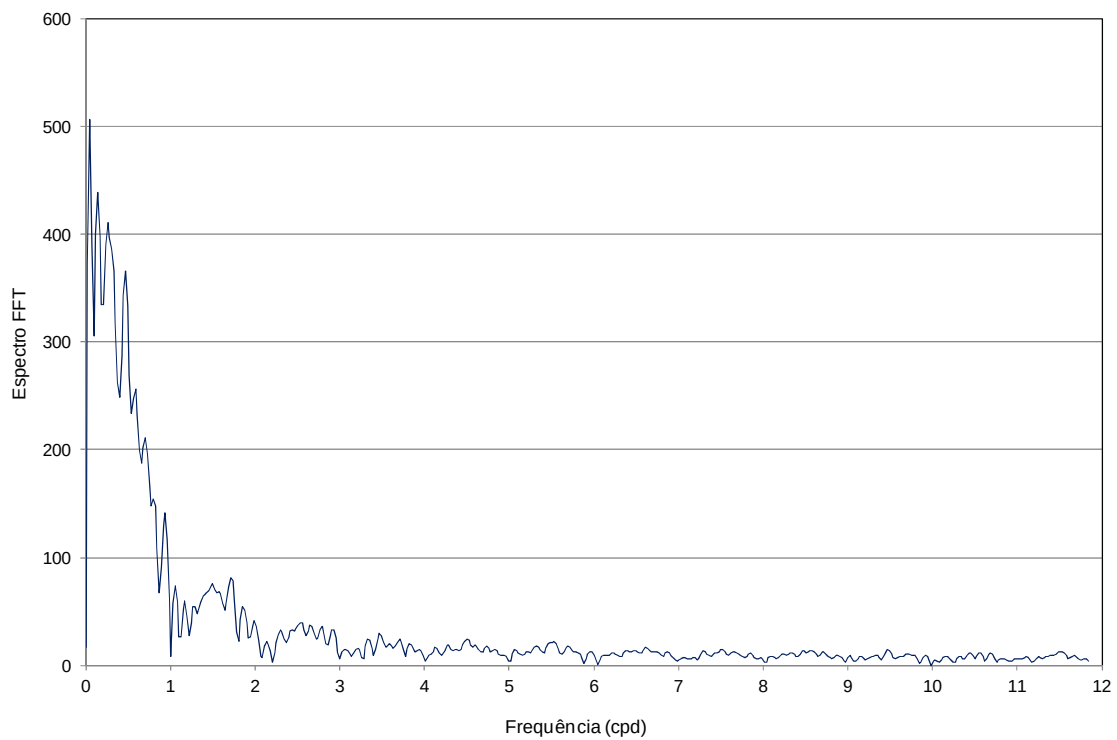


Figura 7.7 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no ponto de amostragem 1, para o período compreendido entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005.

7.4.2. Local 2 – Edifício Comercial

A monitorização contínua da concentração de radão e de CO_2 no ar interior do edifício comercial decorreu entre 17 e 24 de Novembro de 2011. A representação gráfica da variação temporal da concentração de radão e de CO_2 no ar interior deste edifício pode ser observada na figura 7.8.

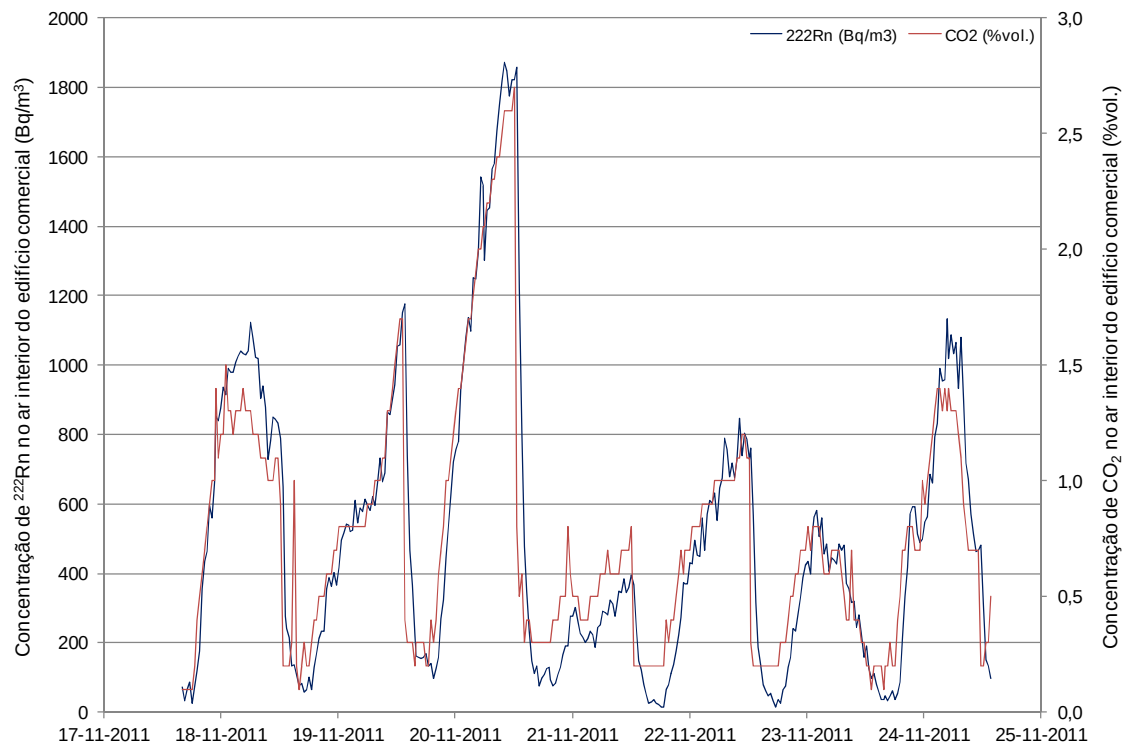


Figura 7.8 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior do edifício comercial.

Os resultados da estatística descritiva dos dados de concentração de radão e da concentração de CO_2 no ar interior, da pressão barométrica no interior do edifício comercial, assim como dos dados dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR3 para o período em estudo, estão sintetizados na tabela 7.4. Foram utilizados os dados da pluviosidade obtidos pela estação GFUR2, uma vez que durante o período em análise o pluviómetro da estação GFUR3 esteve avariado.

Para tentar compreender que parâmetros externos influenciam as variações de concentração de radão neste local de amostragem e, de que modo essa influência é exercida, foi efectuada uma análise comparativa das variações temporais da concentração deste gás relativamente às oscilações de cada variável analisada, cujos gráficos se apresentam no anexo Anexo IX. Nesta análise os factores que parecem exercer influência sobre a concentração de radão neste edifício são: a concentração de CO_2 , a ventilação, a pressão barométrica e a velocidade do vento. A concentração de CO_2 (Figura 7.8) apresenta uma relação directa enquanto que a ventilação (Figura 7.9), a pressão barométrica (Figura 7.10) e a velocidade do vento (Figura 7.11) aparentam ter uma relação inversa com a concentração de radão.

Tabela 7.4 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior e da pressão barométrica obtidos no ponto de amostragem 2, dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR3 e da pluviosidade obtida pela estação GFUR2.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
^{222}Rn no ar interior (Bq/m^3)	507,0	416,0	426,0	13,0	1873,0	332
CO_2 no ar interior (%vol.)	0,8	0,5	0,7	0,1	2,7	332
Pressão no interior do edifício (hPa)	1004,0	5,0	1003,0	997,0	1014,0	332
Humidade relativa do ar (%) ^(a)						0
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) ^(a)						0
Pressão barométrica (hPa) (GFUR3)	1002,0	5,0	1001,0	995,0	1010,0	166
Pluviosidade (mm/h) (GFUR2)	0,1	0,4	0,0	0,0	3,0	166
Humidade do solo (%)	16,8	0,5	16,9	15,7	17,9	166
Velocidade do vento (m/s)	0,5	0,6	0,2	0,0	3,0	166

^(a) Sem dados para o período em análise

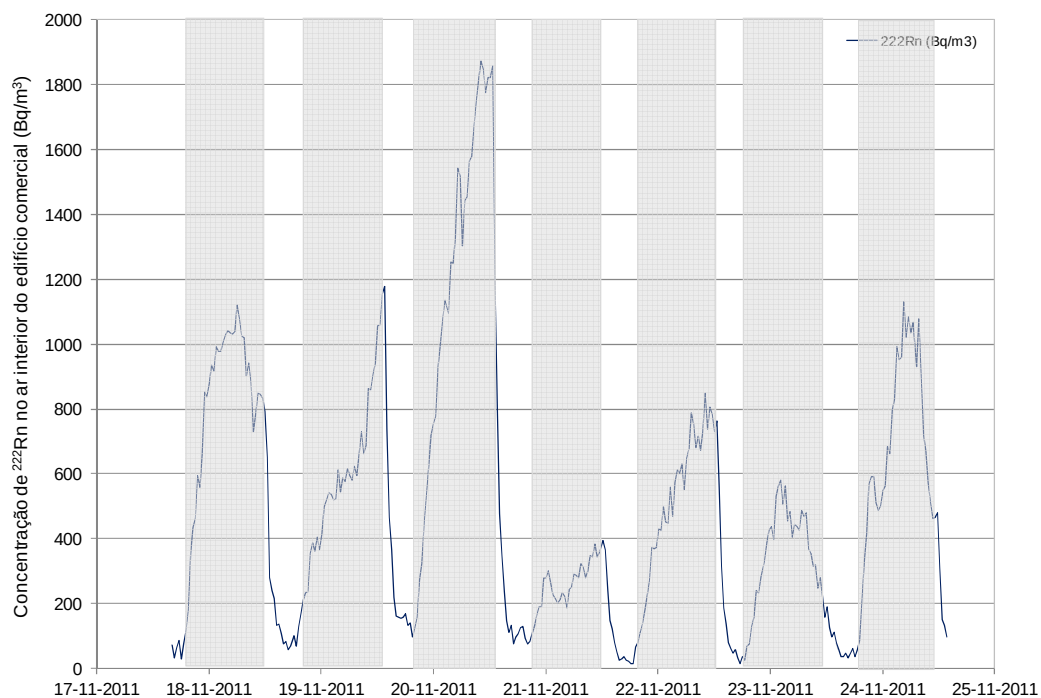


Figura 7.9 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e os períodos em que a ventilação deste espaço foi reduzida devido ao seu encerramento, representados pelo sombreado cinza.

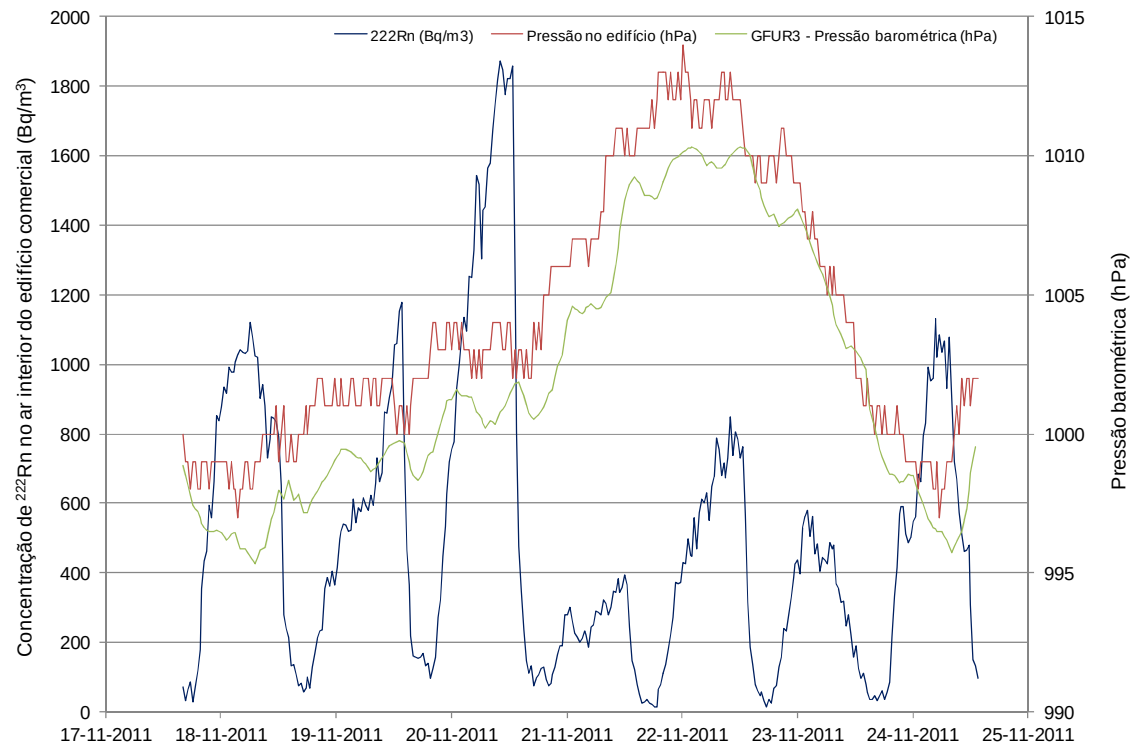


Figura 7.10 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da pressão barométrica no interior do edifício e em GFUR3.

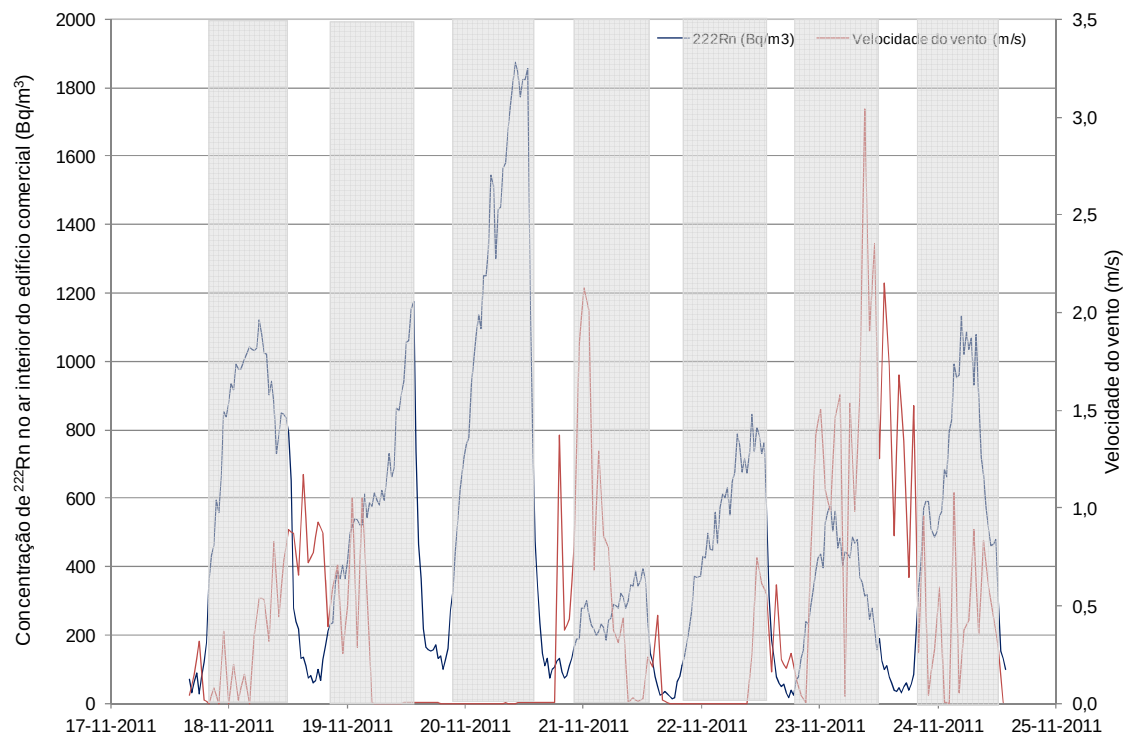


Figura 7.11 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da velocidade do vento.

De modo a tentar confirmar estas relações foram calculados os coeficientes de correlação de *Pearson* entre as diversas variáveis em estudo. Os valores da concentração de radão foram log-transformados. Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Coeficientes de correlação de *Pearson* das variáveis analisadas durante o período em estudo.

Local de amostragem	Variáveis	Log ₁₀ ^{222}Rn no ar interior	CO ₂ no ar interior	Pressão barométrica no edifício	Ventilação	Pressão barométrica (GFUR3)
2	Log ₁₀ ^{222}Rn no ar interior	1,000	0,800	-0,217	-0,627	-0,230
	CO ₂ no ar interior	0,800	1,000	-0,192	-0,539	-0,220
	Pressão barométrica no edifício	-0,217	-0,192	1,000	-0,048	0,963
	Ventilação	-0,627	-0,539	-0,048	1,000	0,020
	Humidade relativa do ar ^(b)					
	Temperatura do ar ^(a)					
	Pressão barométrica (GFUR3)	-0,230	-0,220	0,963	0,020	1,000
	Diferencial de pressão	0,055	0,112	0,104	-0,245	-0,170
	Pluviosidade (GFUR2)	-0,210	0,850	-0,043	0,021	-0,098
	Humidade do solo	-0,068	-0,036	0,085	-0,037	0,013
	Velocidade do vento	-0,179	-0,268	-0,072	-0,008	-0,001
	Variáveis	Diferencial de pressão	Pluviosidade (GFUR2)	Humidade do solo	Velocidade do vento	
	Log ₁₀ ^{222}Rn no ar interior	0,055	-0,210	0,068	-0,179	
	CO ₂ no ar interior	0,112	0,850	-0,036	-0,268	
	Pressão barométrica no edifício	0,104	-0,043	0,085	-0,072	
	Ventilação	-0,245	0,021	-0,037	-0,008	
	Humidade relativa do ar ^(b)					
	Temperatura do ar ^(a)					
	Pressão barométrica (GFUR3)	-0,170	-0,098	0,013	-0,001	
	Diferencial de pressão	1,000	0,203	0,263	-0,258	
	Pluviosidade (GFUR2)	0,203	1,000	0,012	0,008	
	Humidade do solo	0,263	0,012	1,000	-0,194	
	Velocidade do vento	-0,258	0,008	-0,194	1,000	

A aplicação da análise de regressão múltipla aos dados adquiridos permitiu verificar que, para o modelo proposto, as variáveis com significância estatística são a concentração de CO₂ no ar interior e a ventilação (Tabela 7.6). No que se refere aos coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 7.5), estes estão em concordância com os resultados obtidos pela regressão. De acordo com o R² ajustado do modelo proposto estas variáveis explicam 69 % do total das variações dos dados log-transformados da concentração de radão. A concentração de CO₂ exerce uma influência positiva, enquanto que, a ventilação exerce uma influência negativa sobre as variações deste gás.

Tabela 7.6 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem 2 – Edifício comercial.

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	2,17	0,05		46,18	0,00		
CO ₂ no ar interior	0,55	0,04	0,65	12,63	0,00	0,637	1,41
Ventilação	-0,29	0,05	-0,28	-5,38	0,00	0,053	1,41

Variável dependente: Log₁₀ da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial

Número total de observações: 166

Somatório do R^2 Ajustado: 0,690

Teste F: 184,45 0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

Devido ao reduzido período de aquisição de dados, neste ponto de amostragem não foi aplicada a análise espectral à série temporal de dados adquiridos.

7.4.3. Local 3 – Edifício Propriedade da Universidade dos Açores

Os dados em análise relativos ao ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores correspondem ao período de amostragem compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 31 de Dezembro de 2011. A representação gráfica da variação temporal da concentração de radão no ar interior deste edifício pode ser observada na figura 7.12.

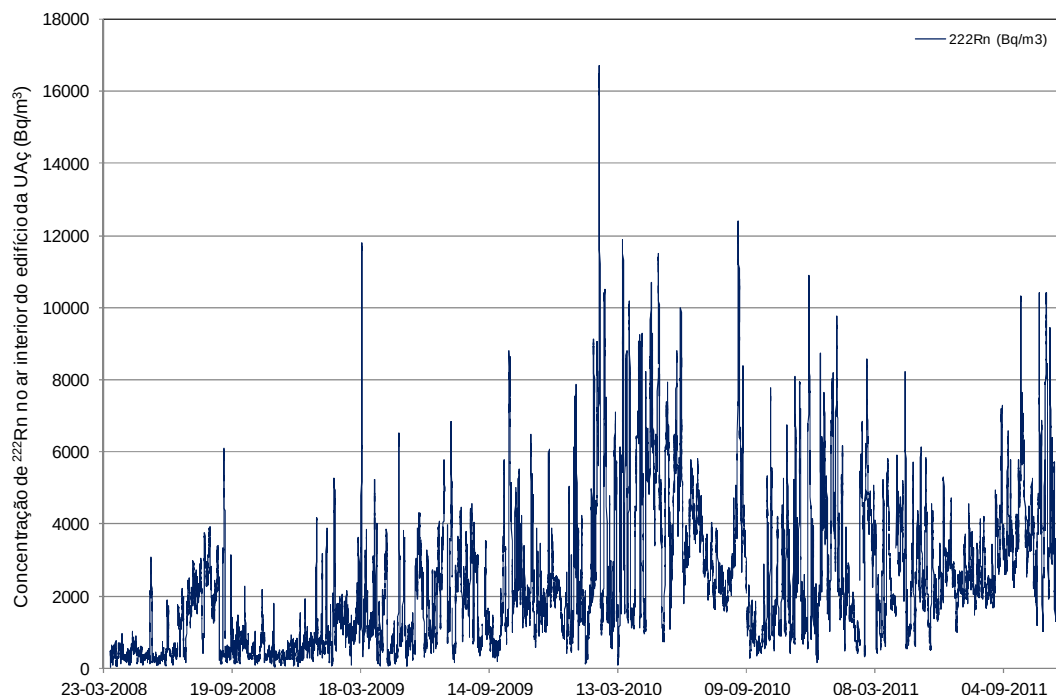


Figura 7.12 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores.

A estatística descritiva dos dados de concentração de radão, da pressão barométrica e da concentração de CO_2 no ar interior obtidos pela estação protótipo, assim como dos dados dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR3 para o período em estudo estão sintetizados na tabela 7.7.

Para tentar compreender que parâmetros externos influenciam as variações de concentração de radão neste local de amostragem e, de que modo essa influência é exercida, foi efectuada uma análise comparativa das variações temporais da concentração deste gás relativamente às oscilações de cada variável analisada, cujos gráficos se apresentam no anexo Anexo IX. Esta análise permitiu verificar que os factores que parecem exercer influência sobre a concentração de radão neste edifício são a concentração de CO_2 , a pluviosidade, a humidade do solo e a pressão barométrica. Para melhor evidenciar as relações existentes foram seleccionados determinados períodos de amostragem. A concentração de CO_2 no ar interior do edifício (Figura 7.13), a pluviosidade e a humidade do solo (Figura 7.14) apresentam

uma relação directa, enquanto a pressão barométrica (Figura 7.15) aparenta ter uma relação inversa com a concentração de radão no ar interior deste edifício.

Tabela 7.7 – Estatística descritiva dos dados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no ponto de amostragem 3, da pressão barométrica e da concentração de CO_2 no ar interior obtidos pela estação protótipo e dos parâmetros meteorológicos obtidos pela estação GFUR3.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Número total de dados
^{222}Rn no ar interior (Bq/m^3)	2400,0	1997,0	1930,0	27,0	16700,0	31876
CO_2 no ar interior (%vol.)	0,5	0,4	0,5	0,0	8,5	11319
Pressão no interior do edifício (hPa)	989,0	8,0	991	953,0	1005	17170
Humidade relativa do ar (%)	89,1	12,1	96,8	41,7	98,4	22904
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	18,3	5,2	17,9	2,0	35,9	21443
Pressão barométrica (hPa) (GFUR3)	998,0	8,0	1000,0	959,0	1017	29551
Pluviosidade (mm/h)	0,2	1,0	0,0	0,0	35,0	29012
Humidade do solo (%)	13,6	2,2	13,2	9,9	23,7	29187
Velocidade do vento (m/s)	0,4	0,5	0,1	0,0	4,6	29072

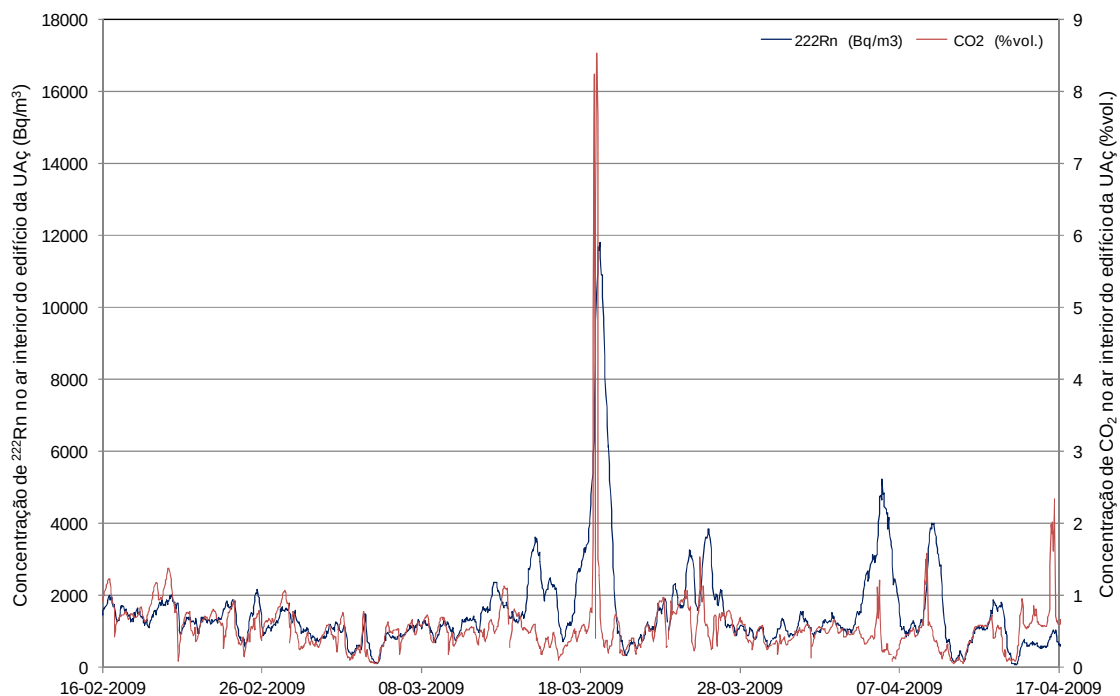


Figura 7.13 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e de CO_2 no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores para o período compreendido entre 6 de Fevereiro e 17 de Abril de 2009.

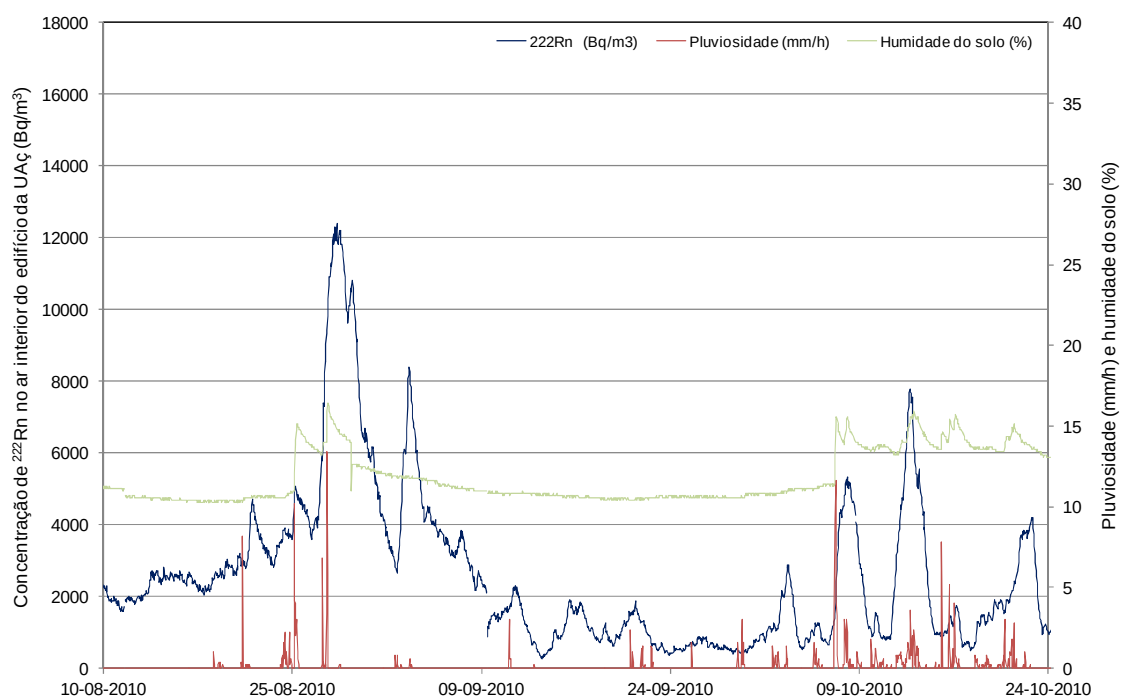


Figura 7.14 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores, da pluviosidade e da humidade do solo na estação GFUR3 para o período compreendido entre 10 de Agosto e 24 de Outubro de 2010.

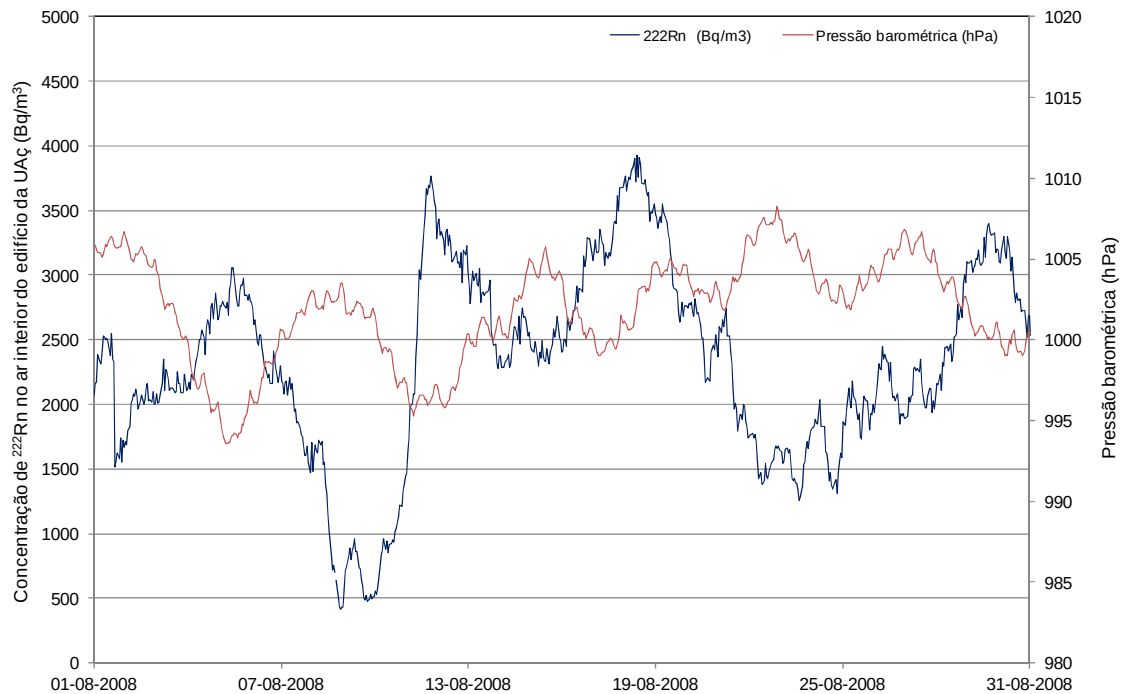


Figura 7.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da pressão barométrica na estação GFUR3 para o período compreendido entre 1 e 31 de Agosto de 2008.

De modo a tentar confirmar estas relações foram calculados os coeficientes de correlação de *Pearson* entre as diversas variáveis em estudo. Os valores da concentração de radão foram log-transformados. Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Coeficientes de correlação de *Pearson* das variáveis analisadas durante o período em estudo (11 de Agosto de 2010 a 31 de Março de 2011).

Local de amostragem	Variáveis	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$ no ar interior	Pressão no edifício	Ventilação	Humidade relativa do ar	Temperatura do ar
3	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$ no ar interior	1,000	-0,286	-0,030	0,094	0,055
	Pressão barométrica no edifício	-0,286	1,000	-0,071	-0,092	0,118
	Ventilação	-0,030	-0,071	1,000	-0,083	-0,019
	Humidade relativa do ar	0,094	-0,092	-0,083	1,000	-0,518
	Temperatura do ar	0,055	0,118	-0,019	-0,518	1,000
	Pressão barométrica (GFUR3)	-0,347	0,803	-0,043	-0,151	0,112
	Diferencial de pressão	0,103	0,298	-0,044	0,006	0,006
	Pluviosidade	0,107	-0,062	0,000	-0,111	-0,111
	Humidade do solo	0,430	-0,482	0,055	-0,560	-0,560
	Velocidade do vento	0,253	-0,194	0,034	0,214	0,214
	Variáveis	Pressão barométrica (GFUR3)	Diferencial de pressão	Pluviosidade	Humidade do solo	Velocidade do vento
	$\text{Log}_{10}^{222}\text{Rn}$ no ar interior	-0,347	0,103	0,107	0,430	0,253
	Pressão barométrica no edifício	0,803	0,298	-0,062	-0,482	-0,194
	Ventilação	-0,043	-0,044	0,000	0,055	0,034
	Humidade relativa do ar	-0,151	0,095	0,197	0,204	-0,127
	Temperatura do ar	0,112	0,006	-0,111	-0,560	0,214
	Pressão barométrica (GFUR3)	1,000	-0,330	-0,202	-0,517	-0,257
	Diferencial de pressão	-0,330	1,000	0,225	0,064	0,104
	Pluviosidade	-0,202	0,225	1,000	0,262	0,058
	Humidade do solo	-0,517	0,064	0,262	1,000	0,138
	Velocidade do vento	-0,257	0,104	0,058	0,138	1,000

A análise de regressão múltipla foi aplicada aos dados adquiridos para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 31 de Março de 2011. O período seleccionado para a construção do modelo corresponde ao período durante o qual: (a) foram registados dados de todos os parâmetros meteorológicos em análise, não atingindo a série de dados consecutivos a duração de um ano devido aos problemas de funcionamento dos sensores meteorológicos, e (b) foram identificados menos problemas de humidade no detector de radão. Esta análise permitiu verificar que, no modelo proposto, as variáveis com significância estatística são a humidade do solo, a temperatura do ar e a humidade relativa do ar (Tabela 7.9). No que se refere aos coeficientes de correlação de *Pearson* calculados (Tabela 7.8), estes estão em concordância com os resultados obtidos pela regressão apenas para a variável humidade do solo; as restantes variáveis que apresentam maior correlação com os dados de radão log-transformados são a pressão barométrica e a velocidade do vento.

De acordo com o R^2 ajustado do modelo proposto, estas variáveis explicam 35,7 % do total das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior deste edifício. A humidade do solo, a temperatura do ar e a humidade relativa do ar exercem uma influência positiva sobre as variações deste gás.

Tabela 7.9 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto para o local de amostragem 3 – Edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 31 de Março de 2011.

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	0,26	0,11		2,34	0,00		
Humidade do solo	0,13	0,00	0,70	30,50	0,00	0,184	1,48
Temperatura do ar	0,05	0,00	0,58	21,93	0,00	0,128	1,94
Humidade relativa do ar	0,01	0,00	0,25	11,20	0,00	0,045	1,39

Variável dependente: Log_{10} da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício da Universidade

Número total de observações: 1792

Somatório do R^2 Ajustado: 0,357

Teste F: 331,96

0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

A análise espectral foi aplicada à série temporal da concentração de radão no ar interior neste ponto de amostragem, para o período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 30 de Novembro de 2011. Este período corresponde ao que apresenta menos interrupções na aquisição de dados. Esta análise permitiu identificar variações cíclicas diárias associadas a um ciclo e a dois ciclos por dia (Figura 7.16). O espectrograma associado a este período de amostragem permitiu identificar variações cíclicas associadas a dois ciclos por dia, após o primeiro ano de amostragem (Figura 7.17), não permitindo, no entanto, a identificação das variações cíclicas associadas a um ciclo por dia no espectro. O espectrograma também não permitiu a identificação de variações sazonais.

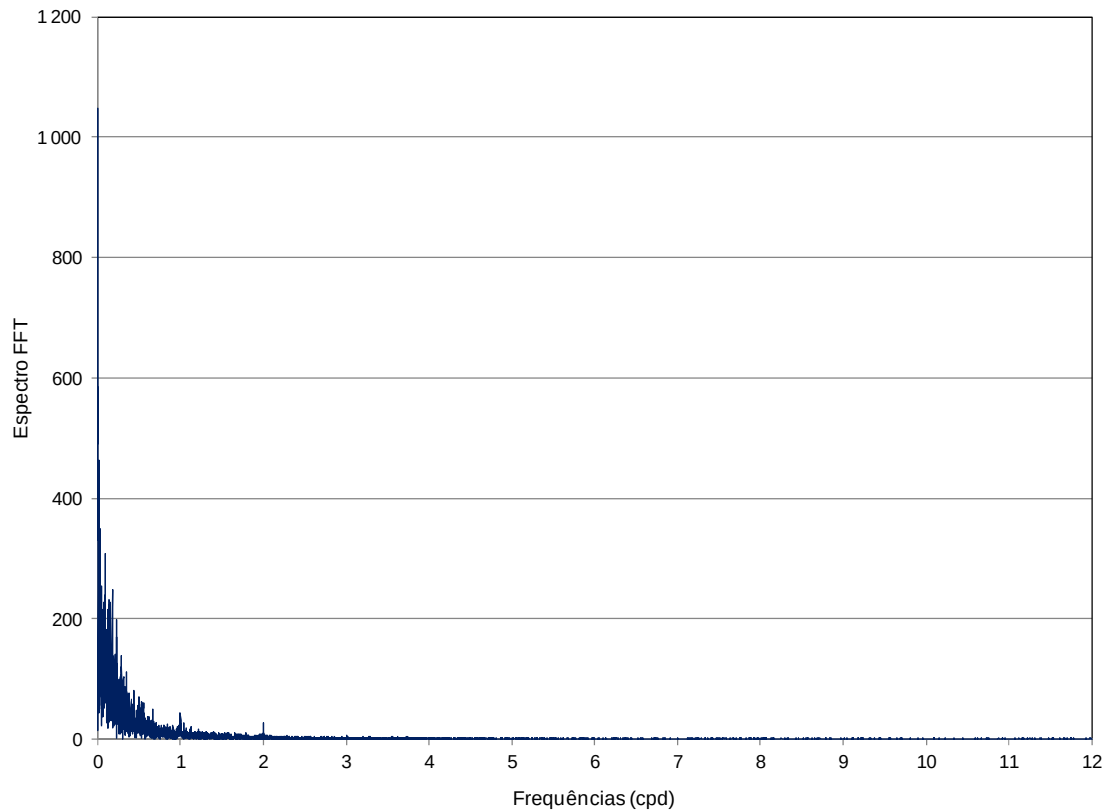


Figura 7.16 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 30 de Novembro de 2011.

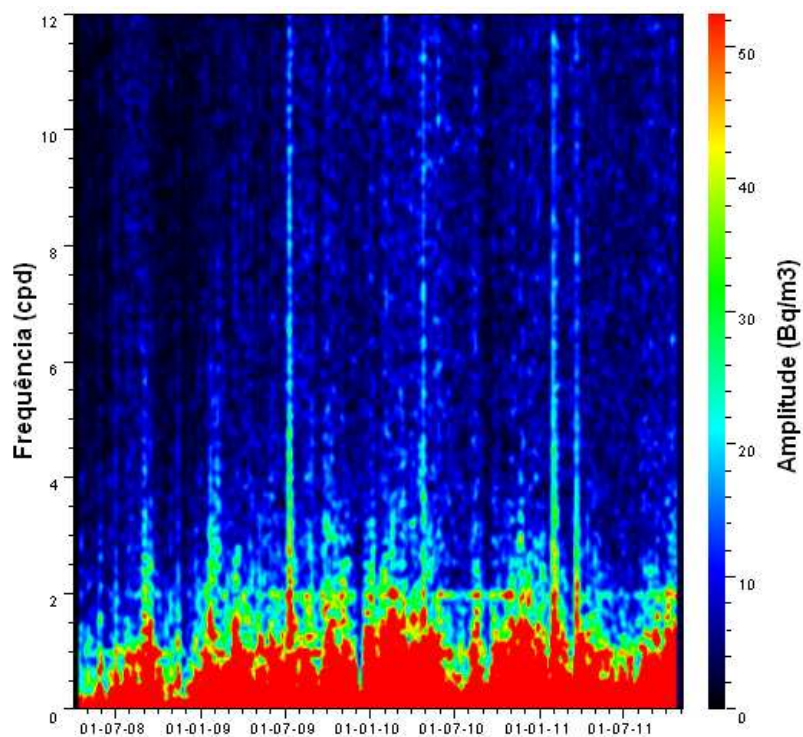


Figura 7.17 – Espectrograma da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 30 de Novembro de 2011.

Para correlacionar as variações cíclicas diárias identificadas com as variações cíclicas associadas aos parâmetros meteorológicos em análise foi necessário efectuar a análise espectral, em separado, para os períodos compreendidos entre: (a) 16 de Abril de 2008 e 12 de Fevereiro de 2009; (b) 7 de Agosto de 2009 e 15 de Março de 2010 e (c) 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011, uma vez que estes correspondem aos conjuntos de dados que apresentam menos interrupções horárias durante a aquisição dos parâmetros meteorológicos. Os espectros calculados para a concentração de radão não permitiram identificar variações cíclicas diárias para os dois primeiros períodos de amostragem (Figuras 7.18 e 7.19), no entanto, o espectro calculado para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011 permitiu verificar a existência de um comportamento cíclico das variações da concentração de radão associado a dois ciclos por dia (Figura 7.20). Os espectrogramas associados a estes períodos de amostragem permitiram confirmar as observações efectuadas nos espectros, não tendo sido identificadas variações sazonais (Figura 7.21 a), b) e c)).

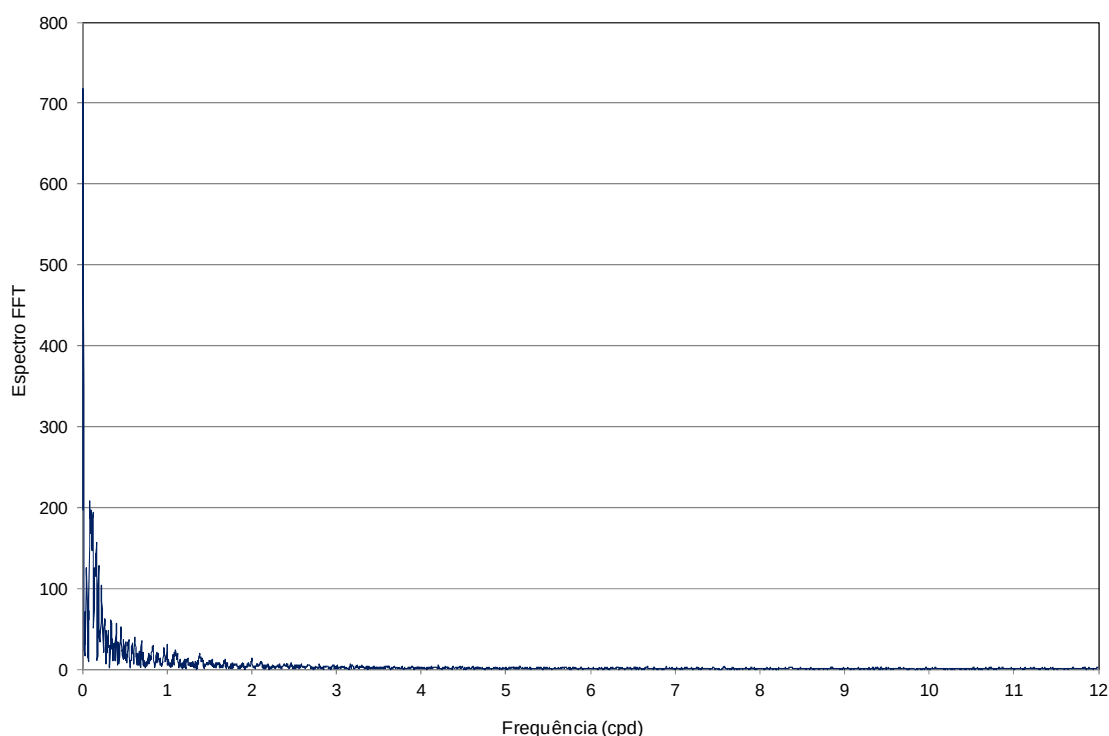


Figura 7.18 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 16 de Abril de 2008 e 12 de Fevereiro de 2009.

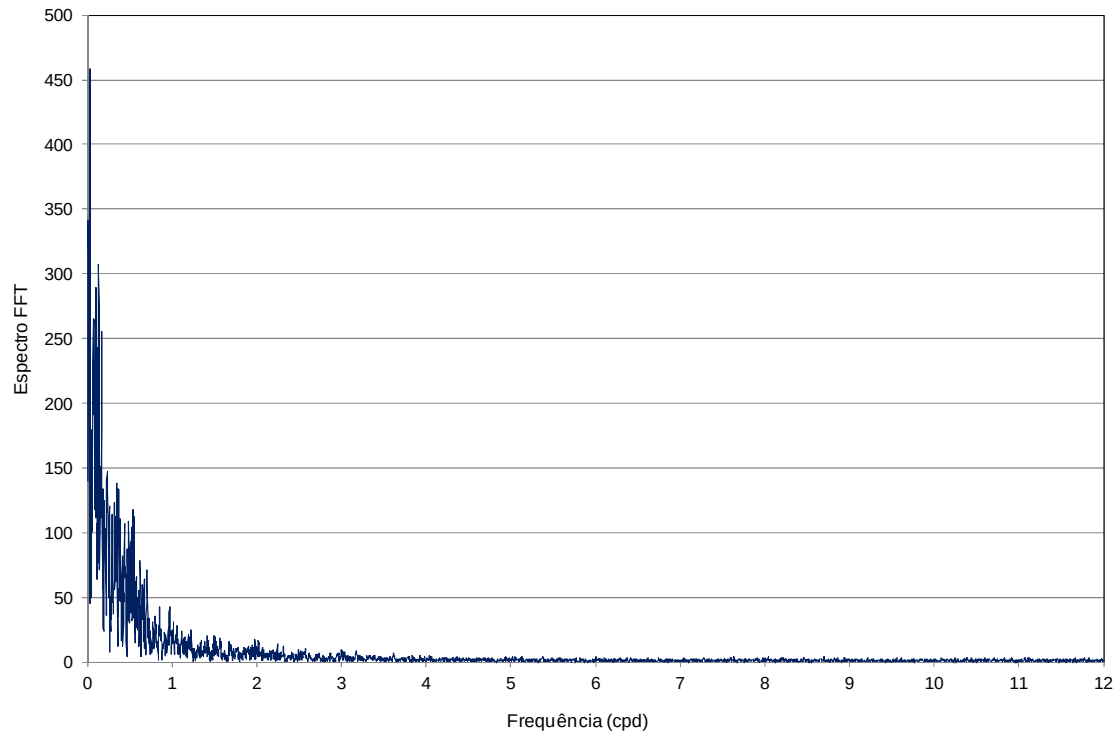


Figura 7.19 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 7 de Agosto de 2009 e 15 de Março de 2010.

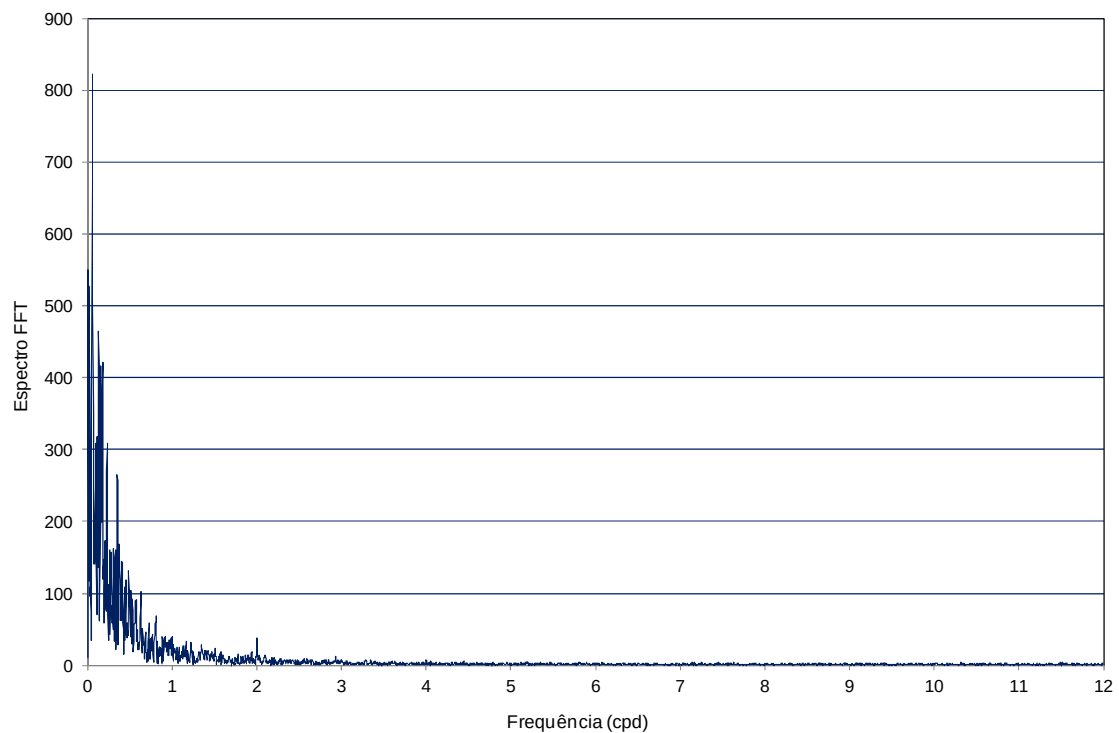


Figura 7.20 – Espectro de amplitudes da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

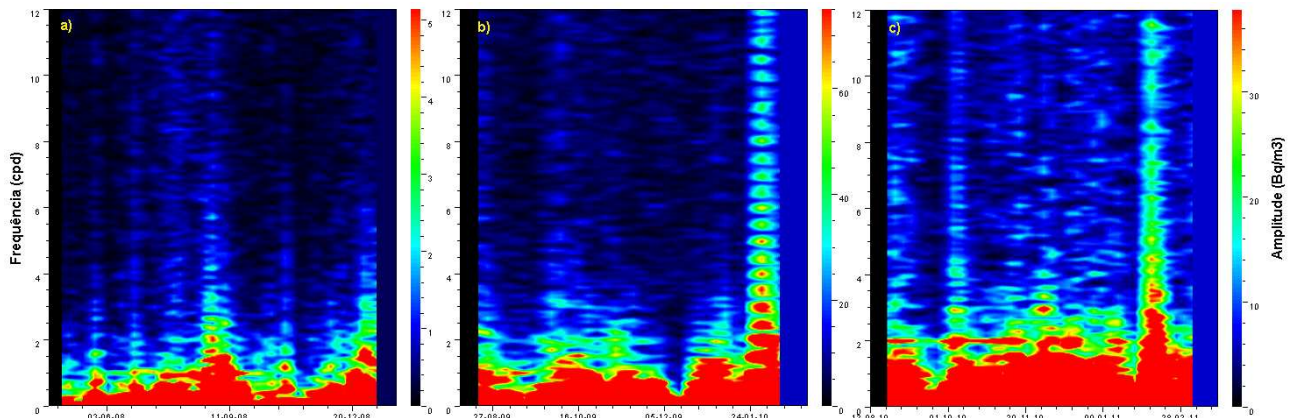


Figura 7.21 – Espectrogramas da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no edifício propriedade da Universidade dos Açores, para os períodos compreendidos entre: a) 16 de Abril de 2008 e 12 de Fevereiro de 2009; b) 7 de Agosto de 2009 e 15 de Março de 2010 e c) 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

Para o conjunto de dados correspondentes ao período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011, que evidenciam uma variação cíclica associada aos dois ciclos por dia, foram calculados os coeficientes de correlação e os atrasos entre as variações da concentração de radão no ar interior e os parâmetros meteorológicos em análise, através da aplicação da função “*Transfer*”, tendo sido considerados apenas os coeficientes de correlação superiores a 0,5 (os espectros destas variáveis encontram-se no Anexo X). Nesta análise a pressão barométrica, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar e a velocidade do vento (Tabela 7.10) surgem como os parâmetros meteorológicos com correlação superior a 0,5 com a concentração de radão no ar interior associada a dois ciclos por dia. A concentração de radão apresenta, para o período em análise, um atraso de aproximadamente 5 horas relativamente à pressão barométrica e à temperatura do ar, de 4 horas relativamente à velocidade do vento e de 2 horas no que diz respeito à humidade relativa do ar.

Nos três períodos analisados não foi possível correlacionar as frequências associadas a um ciclo por dia da concentração de radão no ar interior com as frequências dos parâmetros meteorológicos em análise, uma vez que, não foi possível identificar a presença deste ciclo nos espectros da concentração de radão, pelo que esse deverá resultar dos dados referentes aos períodos que não foram analisados.

Tabela 7.10 – Correlação e atraso entre a concentração de ^{222}Rn no ar interior e os parâmetros meteorológicos registados na estação GFUR3, para o período de amostragem compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

Concentração de ^{222}Rn no ar interior (Bq/m^3)	Correlação (r)	Atraso (h)
Outras Variáveis	2 cpd	
Pressão barométrica (hPa)	0,67	5
Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	0,64	5
Humidade relativa do ar (%)	0,59	2
Velocidade do vento (m/s)	0,51	4

Uma vez que a série temporal de dados, neste ponto de amostragem, se estende por um período superior a um ano (Abril de 2008 a Dezembro de 2011) foi efectuada a análise das baixas frequências com o objectivo de detectar comportamentos sazonais. A análise do espectro obtido (Figura 7.22) permitiu identificar variações periódicas associadas a 682, 341 e 62 dias.

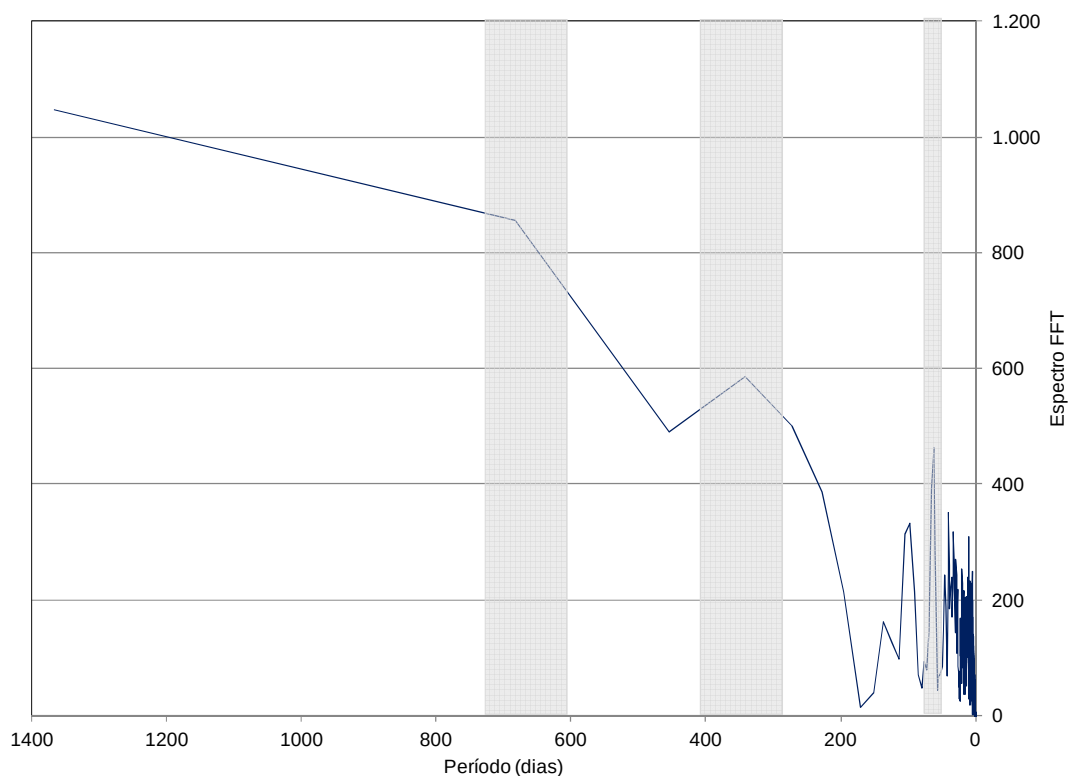


Figura 7.22 – Espectro de amplitudes de baixas frequências da concentração de ^{222}Rn no ar interior, no ponto de amostragem 3. A sombreado cinza estão assinalados os incrementos associados a 682, 341 e 62 dias.

7.5. Discussão

7.5.1. Análise de Regressão Múltipla

7.5.1.1. Modelos, Dados Previstos e Resíduos

A aplicação da análise de regressão múltipla às séries de dados de cada ponto de amostragem permitiu a construção de uma equação que corresponde ao modelo proposto para cada um destes pontos. As equações 7.1, 7.2 e 7.3 representam os modelos de regressão propostos. Esta análise permitiu ainda a representação gráfica das variações temporais dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior prevista por esses modelos e dos resíduos calculados pela diferença entre os dados log-transformados das concentrações de radão observados e dos previstos (figuras 7.23, 7.24 e 7.25). Os resíduos correspondem às variações, que não sendo explicadas pelo modelo, podem estar relacionadas com fenómenos de profundidade ou com parâmetros que não estão a ser analisados.

(7.1) Local 1

$$\text{Log}_{10}\left[^{222}\text{Rn}\right]_{\text{ar_interior}} = 4,84 - 0,53 \times \text{Vent} + 0,14 \times \text{Pbar}_{\text{dif}} - 0,16 \times H_{\text{solo}} - 0,33 \times V_{\text{vento}} + 0,14 \times \left[\text{CO}_2\right]_{\text{ar_interior}}$$

(7.2) Local 2

$$\text{Log}_{10}\left[^{222}\text{Rn}\right]_{\text{ar_interior}} = 2,17 + 0,55 \times \left[\text{CO}_2\right]_{\text{ar_interior}} - 0,29 \times \text{Vent}$$

(7.3) Local 3

$$\text{Log}_{10}\left[^{222}\text{Rn}\right]_{\text{ar_interior}} = 0,26 + 0,13 \times H_{\text{solo}} + 0,05 \times T_{\text{ar}} + 0,01 \times RH_{\text{ar}}$$

Em que:

V_{ent} - Ventilação

$P_{bar_{dif}}$ - Diferencial de Pressão barométrica

H_{solo} - Humidade do solo

V_{vento} - Velocidade do vento

$[CO_2]_{ar_interior}$ - Concentração de CO_2 no ar interior

T_{ar} - Temperatura do ar

RH_{ar} - Humidade relativa do ar

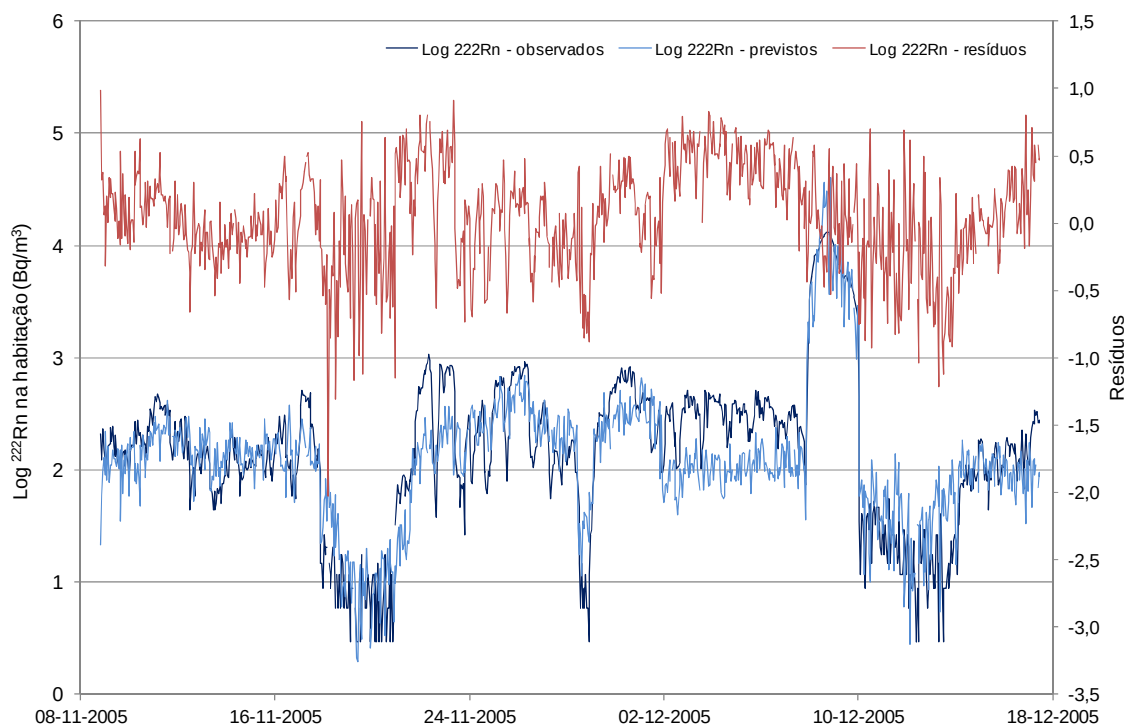


Figura 7.23 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior observados no local de amostragem 1, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 6.1 e dos respectivos resíduos calculados.

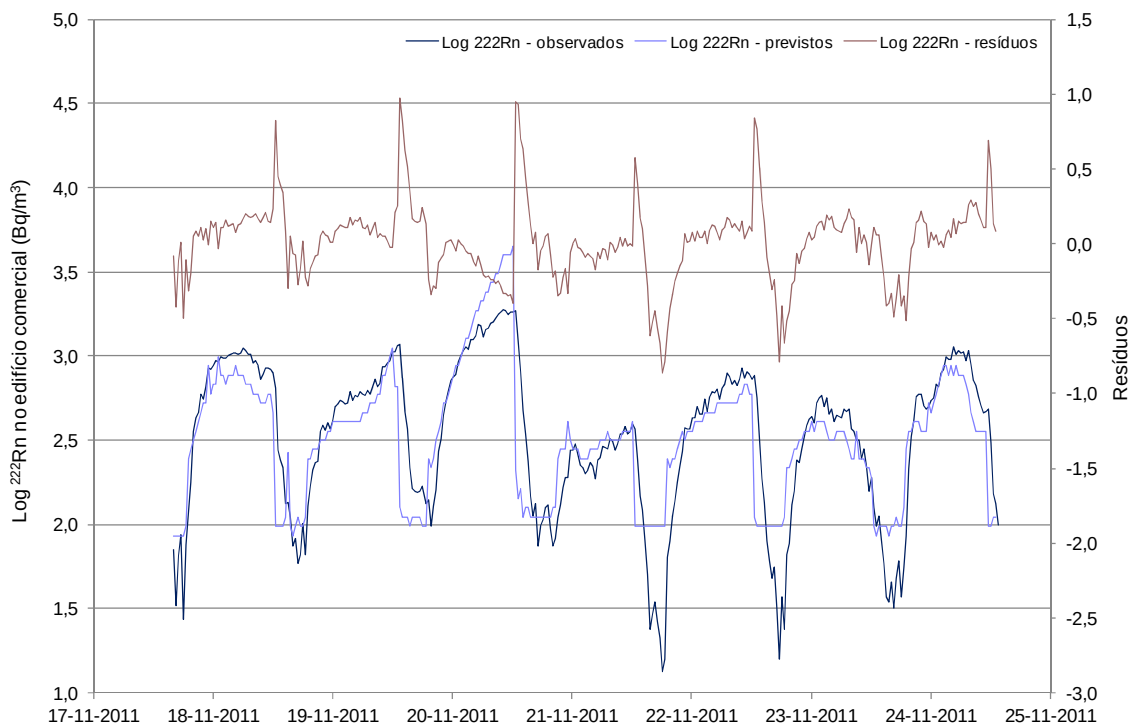


Figura 7.24 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior observados no local de amostragem 2, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 6.2 e dos respectivos resíduos calculados.

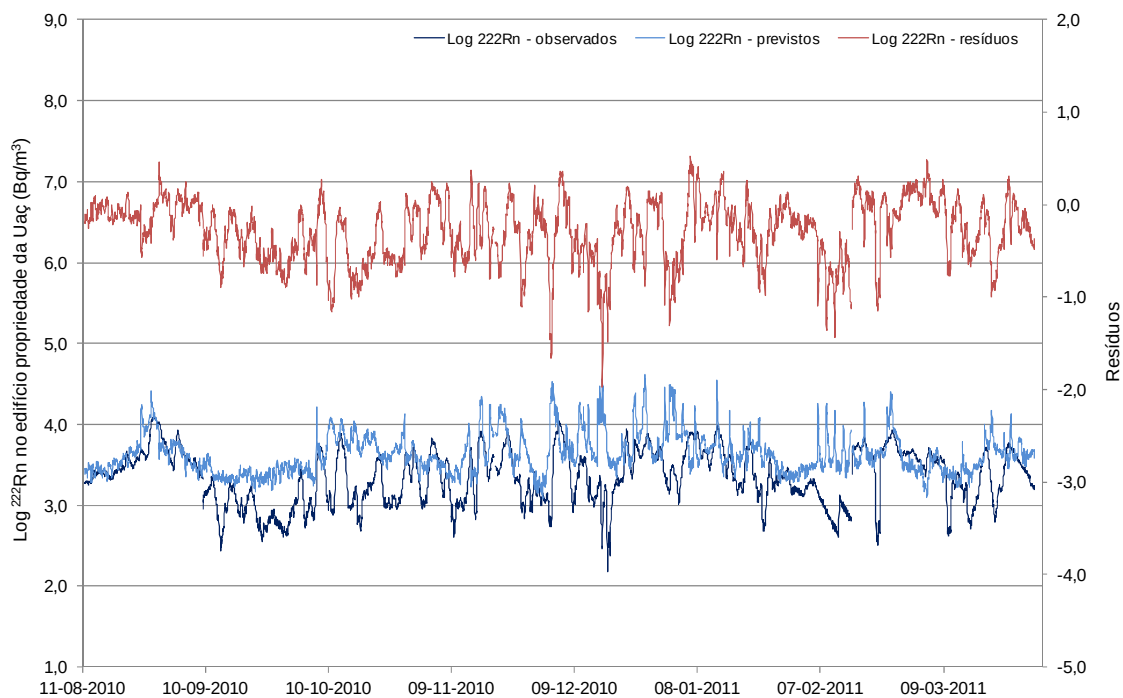


Figura 7.25 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior observados no local de amostragem 3, dos previstos pelo modelo de regressão da equação 6.3 e dos respectivos resíduos calculados para o período de amostragem compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 31 de Março de 2011.

7.5.1.2. Local 1 - Habitação

Durante a recolha e análise dos dados adquiridos neste ponto de amostragem, situado numa cave, foi possível verificar que sempre que ocorria uma diminuição da ventilação neste espaço, isto é, sempre que os residentes fechavam algumas janelas eram registados incrementos na concentração dos gases amostrados. Assim, optou-se pela realização de um teste, que decorreu entre os dias 7 e 9 de Dezembro de 2005, durante o qual todas as janelas e a porta da cave foram mantidas fechadas com o intuito de confirmar esta relação. Os valores de concentração de radão no ar interior oscilaram entre 0 e 13 273 Bq/m³ e apresentam um valor médio de 600 Bq/m³ (Tabela 7.1). Relativamente aos dados de concentração de CO₂ no ar interior deste edifício, estes oscilaram entre os 0 e os 6 %vol. e apresentam valores médios de 0,2 %vol.. Os valores de concentração de radão e de CO₂ mais elevados foram obtidos precisamente aquando da realização do teste do dia 7 a 9 de Dezembro (Figuras 7.2 e 7.3). A análise de regressão múltipla aplicada aos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior desta habitação permitiu verificar que a ventilação é precisamente a variável com maior poder explicativo no modelo seleccionado, explicando cerca de 40 % do total das variações dos dados de radão log-transformados. A ventilação exerce uma influência negativa sobre as variações dos dados log-transformados da concentração de radão. A velocidade do vento exerce também uma influência negativa sobre este conjunto de dados e explica cerca de 5,4 % do total das variações.

Em várias ocasiões, para além do teste realizado, as concentrações de radão no ar interior desta cave atingiram concentrações superiores a 800 Bq/m³. Estes incrementos na concentração de radão ocorreram entre 22 e 26 de Novembro e no dia 30 de Novembro e correspondem a períodos durante os quais a ventilação foi reduzida, devido ao fecho de algumas das janelas (Figuras 7.5 e 7.26). Por outro lado, mesmo em períodos em que a ventilação foi reduzida, isto é, apenas uma das janelas foi mantida aberta, um incremento da velocidade do vento parece suficiente para manter baixos os valores de concentração de radão no ar interior desta habitação (Figura 7.26, seta verde).

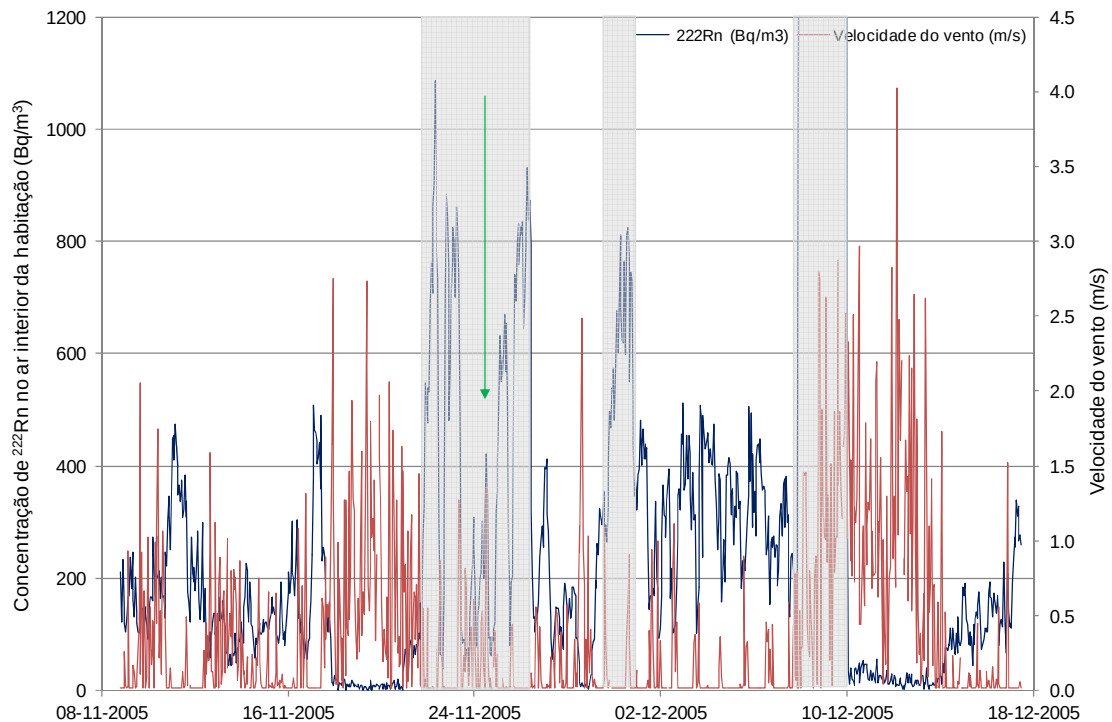


Figura 7.26 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, nível de referência recomendado na legislação regional, velocidade do vento e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.

Assim, a diminuição da concentração de radão no interior deste espaço é devida ao arejamento provocado pela abertura das janelas, em função dos hábitos dos residentes, podendo ser potenciada pela existência de vento.

7.5.1.3. Local 2 - Edifício Comercial

Durante a recolha e análise dos dados adquiridos no ar interior do edifício comercial foi possível verificar que as variações dos dois gases amostrados (^{222}Rn e CO_2) apresentam um comportamento bastante semelhante (Figura 7.8), ocorrendo incrementos na sua concentração sempre que se verificou uma diminuição da ventilação (Figura 7.9), isto é, sempre que o estabelecimento comercial foi encerrado. Os valores de concentração de radão no ar interior oscilaram entre 13 e 1873 Bq/m^3 e apresentam um valor médio de 507 Bq/m^3 (Tabela 7.4). Relativamente aos dados de

concentração de CO_2 , estes oscilaram entre os 0,1 e os 2,7 %vol. e apresentam valores médios de 0,8 %vol..

A análise de regressão múltipla aplicada aos dados log-transformados da concentração de radão permitiu confirmar a relação positiva existente entre as variações dos dois gases amostrados. A concentração de CO_2 é a variável com maior poder explicativo no modelo proposto, sendo responsável por 63,7 % do total das variações verificadas nos dados log-transformados da concentração de radão. Por outro lado, verifica-se que mesmo quando o estabelecimento se encontra encerrado, um incremento da velocidade do vento parece condicionar os incrementos da concentração de radão, isto é, os incrementos deste gás no período de encerramento não são tão significativos (Figura 7.27). Neste ponto de amostragem o número de casos válidos introduzidos no modelo de regressão múltipla é de apenas 166, pelo que um período mais alargado de amostragem poderia eventualmente permitir a identificação de outras variáveis independentes com significância estatística a incluir no modelo (e.g. pressão barométrica, velocidade do vento).

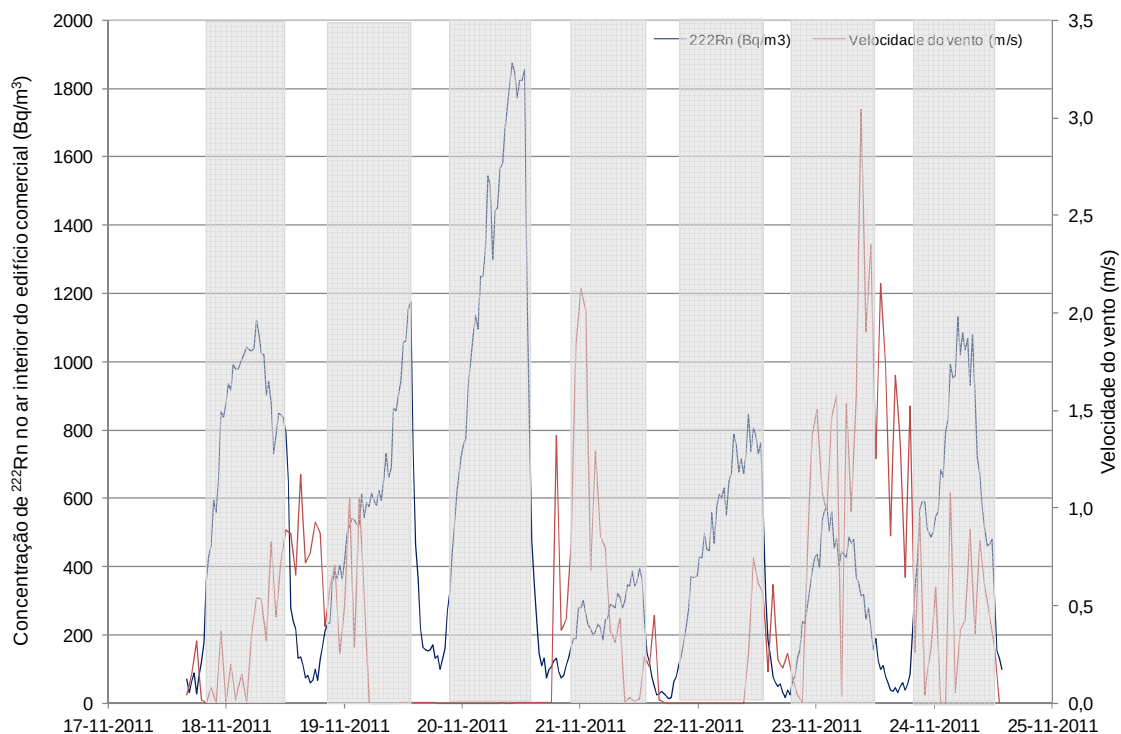


Figura 7.27 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial, velocidade do vento e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.

7.5.1.4. Local 3 - Edifício Propriedade da Universidade dos Açores

Uma vez que a ventilação desempenha um papel fundamental nas variações da concentração de radão no ar interior de edifícios, como se constatou nos pontos de amostragem anteriores, optou-se pela realização de um ensaio de amostragem num local onde fosse possível controlar a ventilação. O local escolhido foi o pequeno edifício da Universidade dos Açores que contém apenas como possibilidade de ventilação a porta de acesso ao seu interior. Esta porta apenas é aberta quando é necessário efectuar a manutenção/recolha de dados dos equipamentos de monitorização que ali se encontram. No caso da estação de radão esta é desligada sempre que é necessário proceder à recolha de dados. Apesar deste facto, no modelo de regressão efectuado para este local teve-se em consideração o tempo de recuperação da concentração de radão após cada período de ventilação efectiva deste espaço. Os valores de concentração de radão no ar interior oscilaram entre 27 e 16 700 Bq/m³ e apresentam um valor médio de 2400 Bq/m³ (Tabela 7.7). No que se refere aos dados de concentração de CO₂ no ar interior deste edifício, foram seleccionados os dados correspondentes aos períodos em que foi monitorizado o radão. Toda a informação e tratamento de dados, relativamente à série completa de concentração de CO₂, foi discutida em Viveiros (2010). Relativamente aos dados de concentração de CO₂ incluídos na análise do presente trabalho, estes oscilaram entre os 0 e os 8,5 %vol. e apresentam valores médios de 0,5 %vol..

A aplicação da análise de regressão múltipla permitiu verificar que a variável com maior poder explicativo (18,4 %) sobre as variações dos dados log-transformados da concentração de radão neste edifício é a humidade do solo. O modelo proposto (Figura 7.28) explica cerca de 35,7 % do total das variações dos dados de radão log-transformados e apresenta um coeficiente de correlação de *Pearson* com os dados observados de 0,363 para o período de construção do modelo. Para o restante período de amostragem o coeficiente de correlação de *Pearson* entre os dados observados e os previstos pelo modelo é de 0,465. O baixo poder explicativo deste modelo, quando comparado com os modelos propostos para os restantes edifícios em análise, pode ser resultado da não inclusão no modelo dos dados de concentração de

CO_2 , pelo facto do equipamento protótipo ter avariado a 27 de Março de 2010 e a sua reinstalação apenas ter sido possível em Janeiro de 2012.

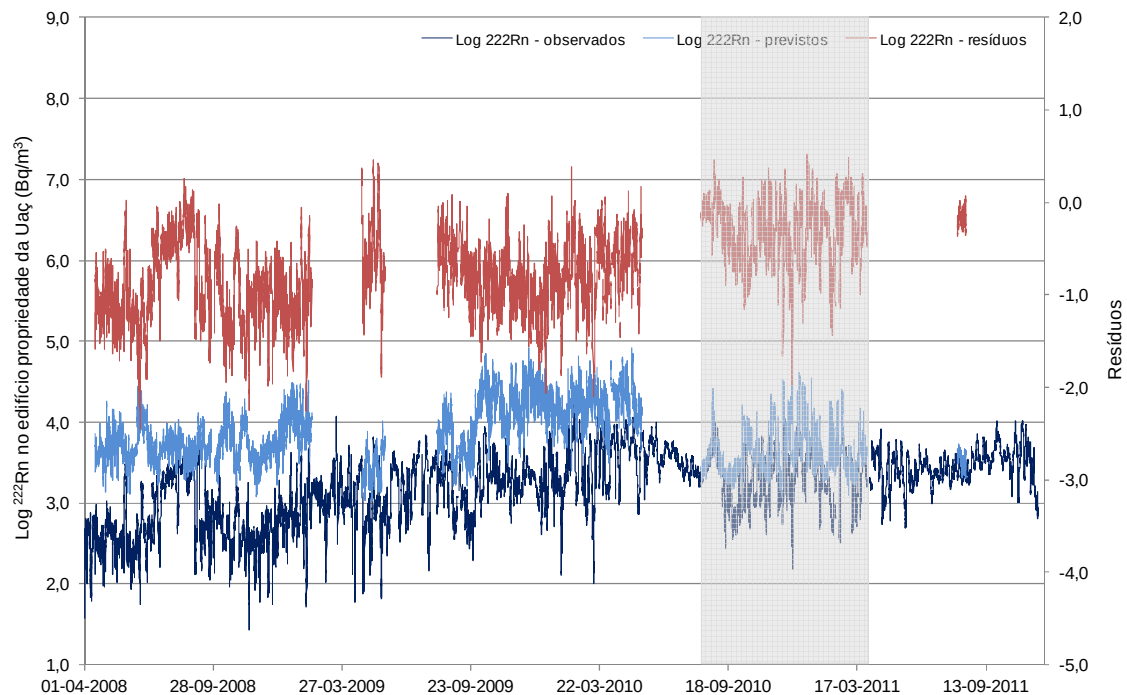


Figura 7.28 – Variação temporal dos dados log-transformados da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício da Universidade dos Açores, dos dados previstos no modelo proposto e dos resíduos calculados para o período de determinação do modelo, representado pelo sombreado cinza, e para o restante período de amostragem.

7.5.2. Análise Espectral

A análise espectral aplicada foi fortemente condicionada pelos reduzidos períodos de amostragem. A análise espectral aplicada aos dados do ponto de amostragem 1 não evidenciou comportamentos cíclicos destes dados. No que se refere aos dados adquiridos no ponto de amostragem 2, devido à série temporal corresponder apenas a uma semana de dados, não foi possível aplicar esta análise. Na série de dados do ponto de amostragem 3 foi possível verificar a existência de variações diárias e sazonais, tendo sido identificados incrementos quer na análise de altas frequências, quer na de baixas frequências (Tabela 7.11). As variações diárias da

concentração de radão no ar interior deste edifício estão associadas a um ciclo e a dois ciclos por dia. Variações cíclicas diárias de séries temporais da concentração de radão no ar interior de edifícios associadas à presença de um e/ou dois ciclos por dia foram anteriormente descritas, por exemplo, em estudos realizados em Nothamptonshire, no Reino Unido (Groves-Kirkby *et al.*, 2006) e na região de Coimbra, Portugal (Neves *et al.*, 2009).

Tabela 7.11 – Principais frequências identificadas na série temporal da concentração de radão no ar interior, no ponto de amostragem 3, e fenómenos com periodicidade semelhante: (a) Han e Han, 2002 e referências neles citadas b) Groves-Kirkby *et al.*, 2006; c) Schureman, 1976.

Ponto de amostragem	Periodicidade (dias)	Fenómeno com periodicidade semelhante
3	~ 682	Translação da Terra (múltiplo ~ 365 dias)
	~ 341	Translação da Terra (~ 365 dias)
	~ 64	Ciclo solar (múltiplo da rotação solar ~ 26 dias) ^{a)}
		Ciclo lunar (múltiplo da rotação lunar ~ 28 dias) ^{b)}
	1	Marés terrestres – Ciclo diário (~ 24 horas) ^{c)}
	0,5	Marés terrestres – Semi-ciclo diário (~ 12 horas) ^{c)}

Tal como referido anteriormente, apenas para o conjunto de dados correspondentes ao período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011, que evidencia uma variação cíclica associada aos dois ciclos por dia, foi possível calcular os coeficientes de correlação e os atrasos entre as variações da concentração de radão no ar interior e os parâmetros meteorológicos em análise. Neste conjunto de dados as variações da concentração de radão no ar interior, em períodos de maior estabilidade das condições meteorológicas, apresentam valores mínimos à noite, entre as 22:00 e as 23:00 horas, e de manhã, entre as 10:00 e as 11:00 horas, e valores máximos de madrugada, entre as 4:00 e as 5:00 horas e de tarde entre as 15:00 e as 16:00 horas. A análise aplicada correlaciona as frequências associadas a dois ciclos por dia às variações da pressão barométrica, temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento. A variável que apresenta maior correlação relativamente a este ciclo de frequências corresponde à pressão barométrica. Esta variável apresenta valores máximos ao final da manhã, entre as

10:00 e 11:00 horas, e ao final do dia, entre as 22:00 e 23:00 horas, e valores mínimos de madrugada, entre as 4:00 e as 5:00 horas, e de tarde, entre as 17:00 e as 18:00 horas. A concentração de radão apresenta uma relação inversa com a pressão barométrica e um atraso de 5 horas (Figura 7.29), o que está em concordância com os ciclos anteriormente descritos. As variações deste gás associadas a dois ciclos por dia apresentam ainda atrasos de 5, 4 e 2 horas relativamente às variáveis temperatura do ar, velocidade do vento e humidade relativa do ar.

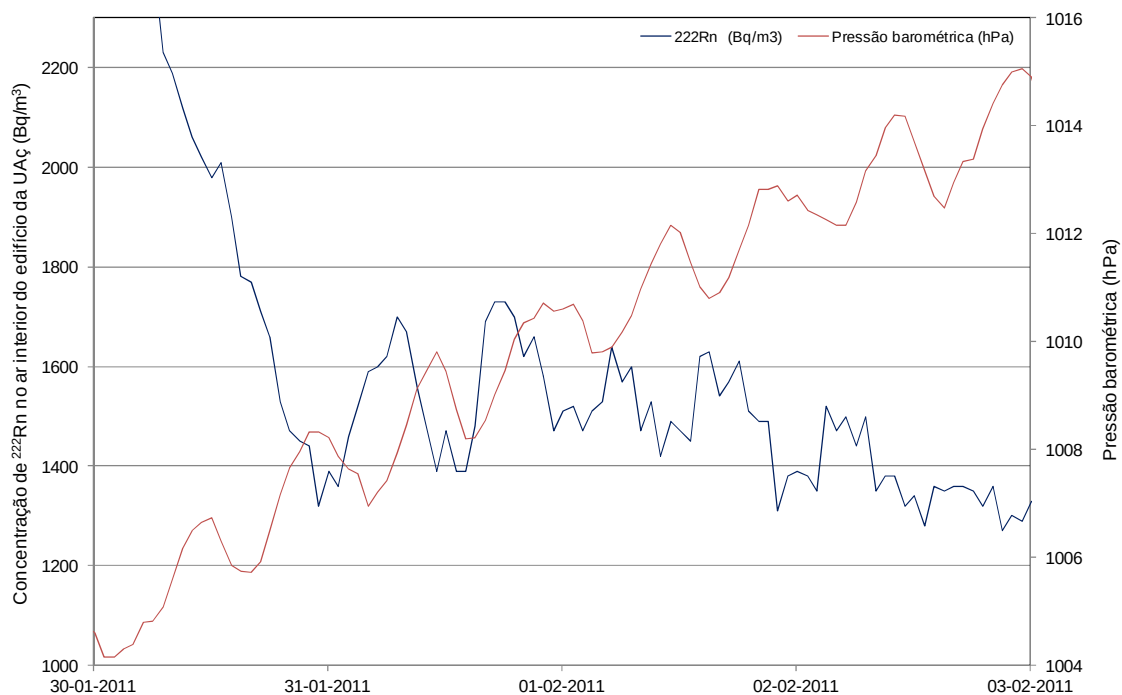


Figura 7.29 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da pressão barométrica, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 30 de Janeiro e 3 de Fevereiro de 2011.

As baixas frequências analisadas permitiram identificar ciclos bienais (~ 682 dias), anuais (~ 341 dias) e bimestrais (~ 64 dias). A discrepância observada entre os ciclos observados (~ 341 dias/ ~ 682) e os 365 dias correspondentes a um ano e os 730 dias correspondentes a dois anos, podem resultar do reduzido período de dados em análise, isto é, aproximadamente dois anos e meio, o que apenas permite a conclusão de dois ciclos anuais e de um ciclo bienal. Um período de amostragem que se prolonge por vários anos poderá provocar uma aproximação entre o número de dias obtidos no ciclo anual calculado e os 365 dias que completam um

ano. Uma situação semelhante foi descrita por Viveiros (2010) para séries temporais de fluxo de CO_2 no solo. Foi ainda identificado um ciclo de 64 dias que poderá estar associado ao movimento de rotação do Sol ou da Lua.

7.5.3. Dados Filtrados e Actividade Sísmica

Os resíduos calculados pela aplicação da análise de regressão múltipla, foram utilizados para tentar identificar anomalias associadas a actividade sísmica. Para tal foi calculado a média (μ) e o desvio padrão (σ) e foram considerados valores anómalos, os valores que se desviam do intervalo $\mu \pm 2\sigma$ (Planinic *et al.*, 2001; Miklavcic *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2009; Viveiros, 2010). No caso particular dos dados adquiridos no ponto de amostragem 3, foi ainda calculado o espectro dos resíduos, de modo a verificar se ainda persiste a presença de qualquer ciclo. Uma vez que, no espectro calculado não foram identificadas variações cíclicas diárias (Anexo XI), o modelo proposto pela aplicação da análise de regressão múltipla tem um poder explicativo relativamente baixo (35,7 %), quando comparado com os restantes pontos de amostragem (71 e 69 %), e não foi possível calcular os resíduos para o período total de amostragem devido a falha dos sensores meteorológicos optou-se, neste caso, por utilizar, para além dos resíduos calculados, os dados de concentração de radão obtidos no ar interior deste edifício.

Durante o período de amostragem no local de amostragem 1, habitação, compreendido entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005 foram registados, no Vulcão das Furnas e área envolvente, cerca de 109 eventos sísmicos com magnitudes de duração (Md) que oscilaram entre os 0,4 e os 2,2 (CVARG/CIVISA, dados não publicados). Este elevado número de sismos está associado à crise sísmica de 2005, que ocorreu na zona central da ilha de S. Miguel (Fogo/Congro). A variação temporal dos resíduos calculados e das magnitudes dos eventos sísmicos não permite a identificação de uma relação evidente entre estas duas variáveis (Figuras 7.30). O coeficiente de correlação de *Pearson* calculado entre estas duas variáveis é de 0,09.

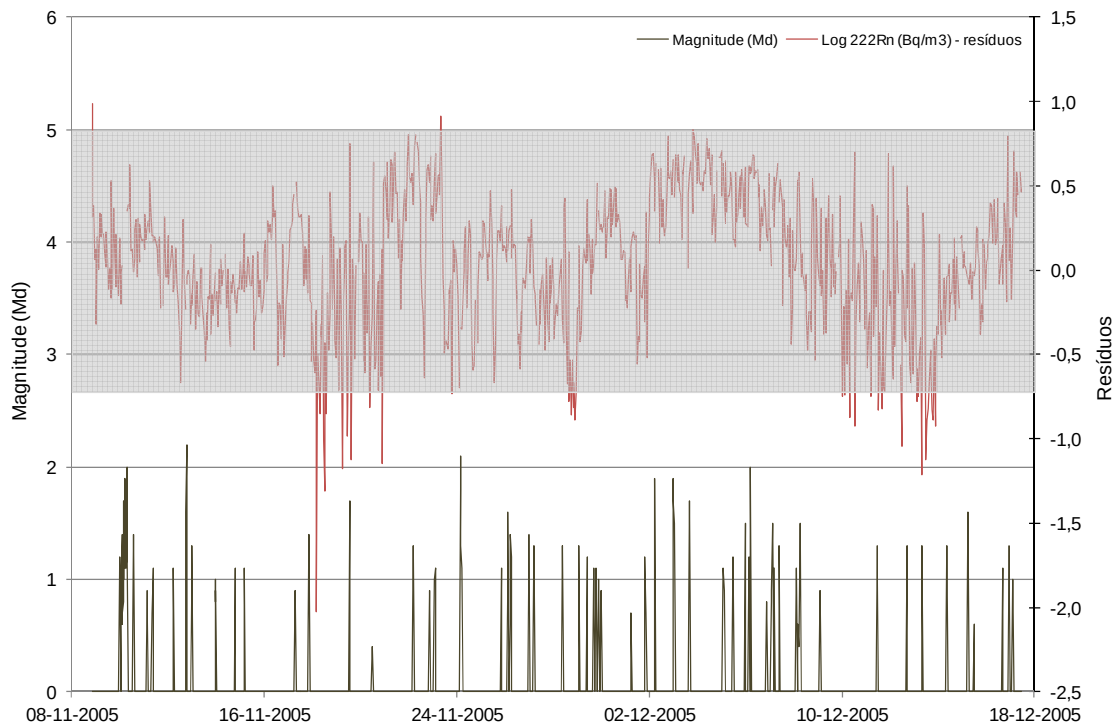


Figura 7.30 – Variação temporal dos resíduos dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 1 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

A amostragem no local 2, no edifício comercial, decorreu entre 17 e 24 de Novembro de 2011. Durante este período foram registados no Vulcão das Furnas e área envolvente 7 eventos sísmicos com magnitudes de duração (Md) que oscilaram entre os 0,7 e os 1,7 (CVARG/CIVISA, dados não publicados). A variação temporal dos resíduos calculados e das magnitudes dos eventos sísmicos não permite a identificação de uma relação evidente entre estas duas variáveis (Figuras 7.31). O coeficiente de correlação de *Pearson* calculado entre a magnitude dos eventos sísmicos e os resíduos é de 0,003.

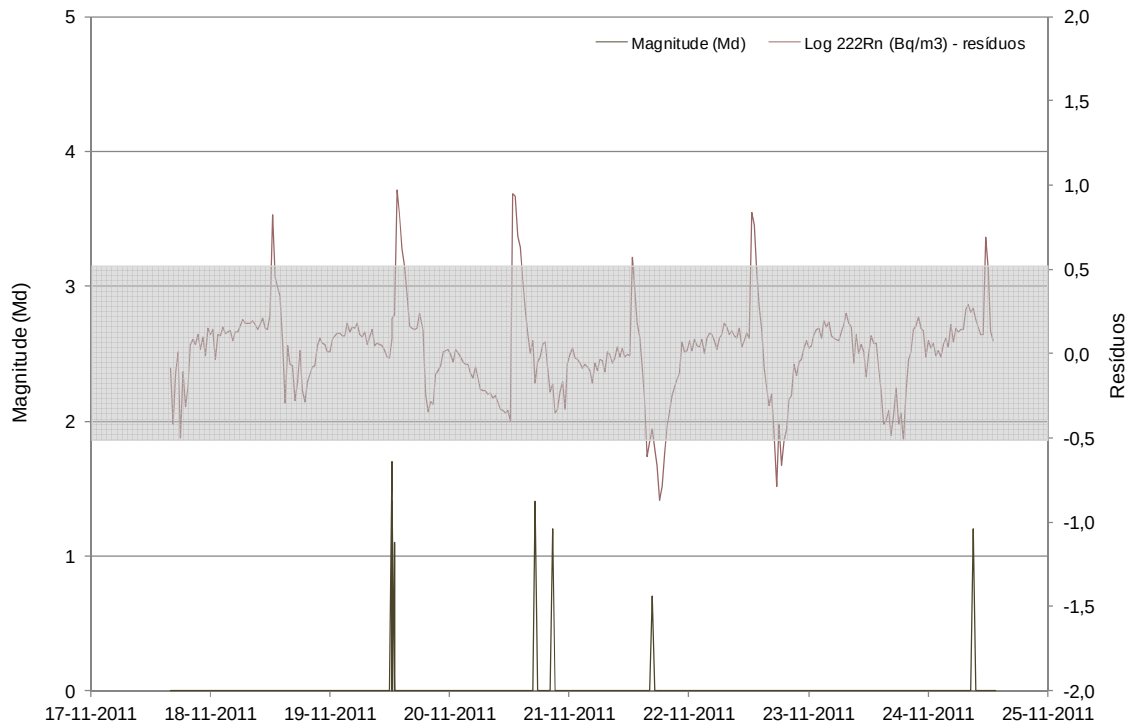


Figura 7.31 – Variação temporal dos resíduos dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 2 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

Relativamente à amostragem realizada no local 3, no edifício propriedade da Universidade, tal como já foi referido anteriormente, a análise da presença de anomalias associadas a actividade sísmica foi efectuada através da projecção gráfica da variação temporal quer dos resíduos calculados, quer dos dados de concentração de radão obtidos no ar interior. Durante o período em que decorreu a amostragem, isto é, no período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 31 de Dezembro de 2011 foram registados, no Vulcão das Furnas e área envolvente, cerca de 473 eventos sísmicos com magnitudes de duração (Md) que oscilaram entre os 0,4 e os 2,7 (CVARG/CIVISA, dados não publicados). A variação temporal dos resíduos calculados e das magnitudes dos eventos sísmicos não permite a identificação de uma relação evidente entre estas duas variáveis (Figura 7.32). O coeficiente de correlação de *Pearson* calculado entre a magnitude dos eventos sísmicos e os resíduos é de 0,05. Por seu lado, também não foi possível identificar uma relação evidente entre a variação temporal dos valores de concentração de radão obtidos e das magnitudes

dos eventos sísmicos (Figura 7.33). O coeficiente de correlação de *Pearson* calculado entre estas duas variáveis é de 0,027.

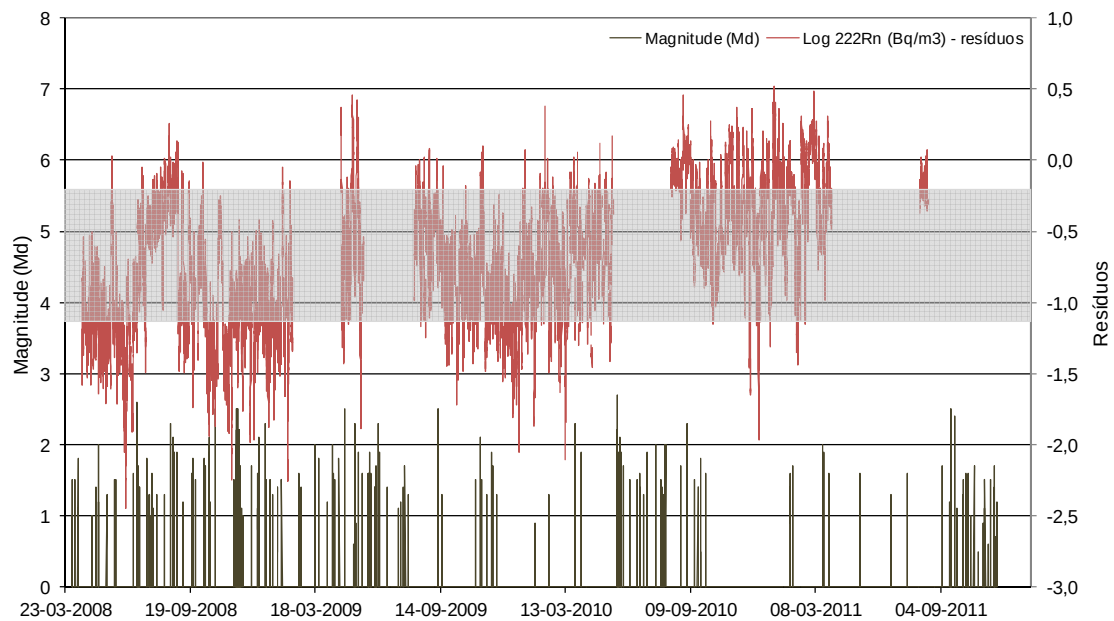


Figura 7.32 – Variação temporal dos resíduos dos dados log-transformados de concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

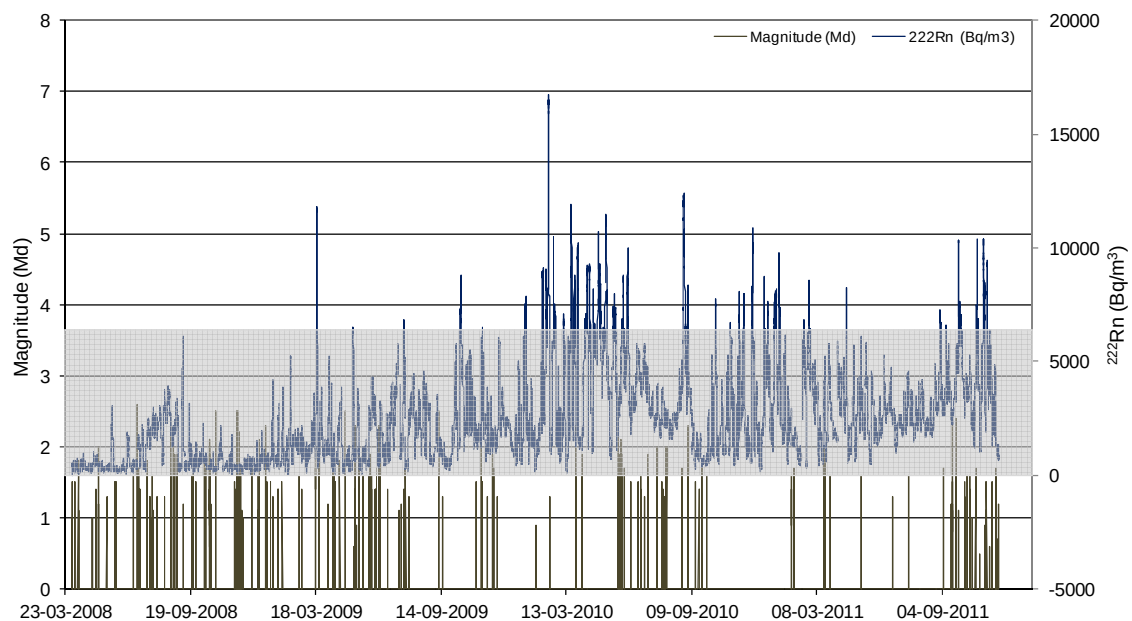


Figura 7.33 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior no local de amostragem 3 e da magnitude dos eventos sísmicos registados no Vulcão das Furnas para o período em estudo. A zona a sombreado cinza representa o intervalo da $\mu \pm 2\sigma$.

7.5.4. Saúde Pública

As variações dos parâmetros meteorológicos e a ventilação, tal como descrito anteriormente, exercem uma influência importante nas variações da concentração de gases no ar interior (e.g. ^{222}Rn e CO_2). Variações importantes destes parâmetros podem conduzir a variações também bastante consideráveis na concentração dos gases afectando a qualidade do ar interior. Efectivamente nos três pontos de amostragem, quer o limite de 150 Bq/m^3 expresso na legislação regional para o radão (D.L.R. nº16/2009/A Artº. 51), quer o valor recomendado de 0,5 %vol. para o CO_2 , como limite de exposição a este gás durante oito horas de trabalho (NIOSH, 2007), foram frequentemente ultrapassados.

No ponto de amostragem 1, isto é, na habitação, o valor máximo de concentração de CO_2 obtido foi de 6 %vol., valor bastante superior ao recomendado (Figura 7.34). Concentrações de CO_2 desta ordem provocam sintomas como: 300 % de aceleração da respiração, dores de cabeça, fraqueza muscular, depressão nervosa, vômitos, tonturas, ruído nos ouvidos e sonolência (Tabela 1.2). O valor máximo de concentração de radão registado foi de $13\,273 \text{ Bq/m}^3$ e foi obtido, tal como o valor máximo de CO_2 , aquando da realização do teste do dia 7 a 9 de Dezembro. No entanto, também em outros períodos de amostragem, as concentrações deste gás ultrapassaram o limite recomendado atingindo mesmo concentrações superiores a 800 Bq/m^3 (Figura 7.35). O valor médio da concentração deste gás obtido foi 600 Bq/m^3 , isto é, quatro vezes superior ao limite de 150 Bq/m^3 recomendado.

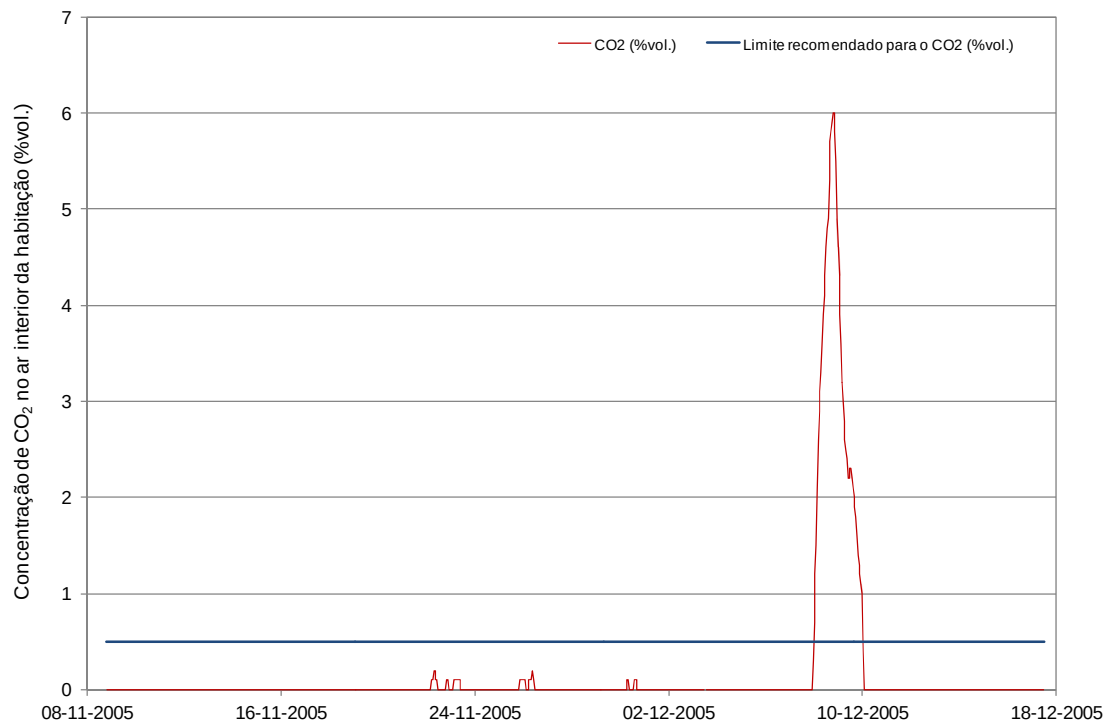


Figura 7.34 – Variação temporal da concentração de CO_2 no ar interior da habitação e nível de referência recomendado por diversas entidades internacionais (NIOSH/OSHA) (NIOSH, 2007).

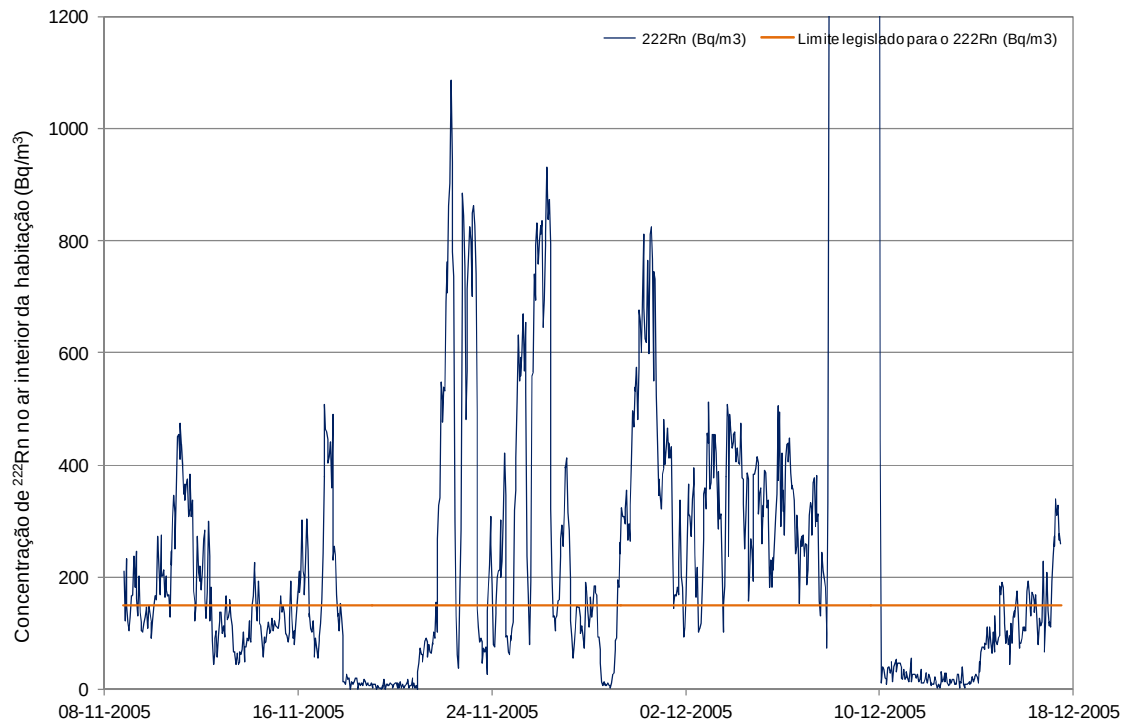


Figura 7.35 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e nível de referência recomendado na legislação regional.

No ponto de amostragem 2, isto é, no edifício comercial, os valores máximos registados para ambos os gases ultrapassaram também os limites legislados/recomendados. Relativamente aos dados de concentração de CO_2 , estes atingiram um valor máximo de 2,7 %vol. valor superior aos 0,5 %vol. recomendados (Figura 7.36). Valores de concentração deste gás compreendidos entre 0,5 e 3 %vol., para períodos de exposição de várias horas, podem provocar sintomas como: dificuldade em respirar, aumento do ritmo cardíaco e dores de cabeça (Tabela 1.2). No que ao radão diz respeito, o valor máximo obtido corresponde a 1873 Bq/m^3 (Figura 7.37). O valor médio da concentração deste gás obtido foi 507 Bq/m^3 , isto é, aproximadamente três vezes superior ao limite de 150 Bq/m^3 recomendado. Os períodos em que estes gases ultrapassaram os valores limites foram, de um modo geral, coincidentes com os períodos de encerramento deste espaço.

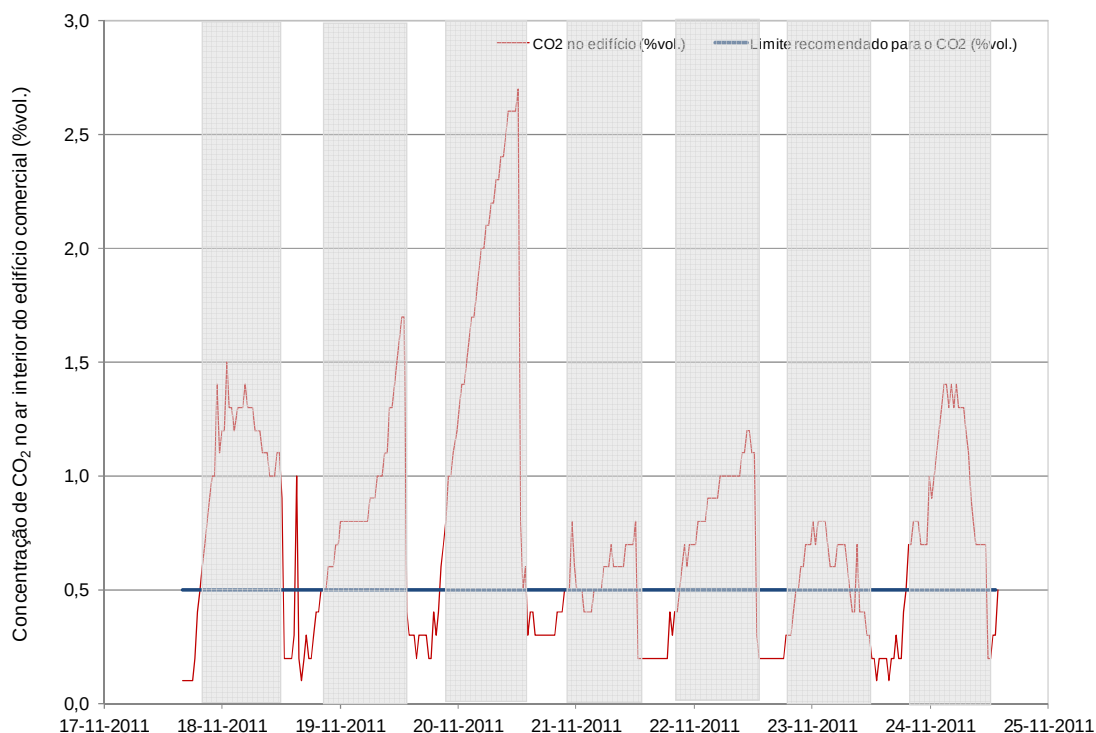


Figura 7.36 – Variação temporal da concentração de CO_2 no ar interior do edifício comercial, nível de referência recomendado por diversas entidades internacionais (NIOSH/OSHA) (NIOSH, 2007) e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.

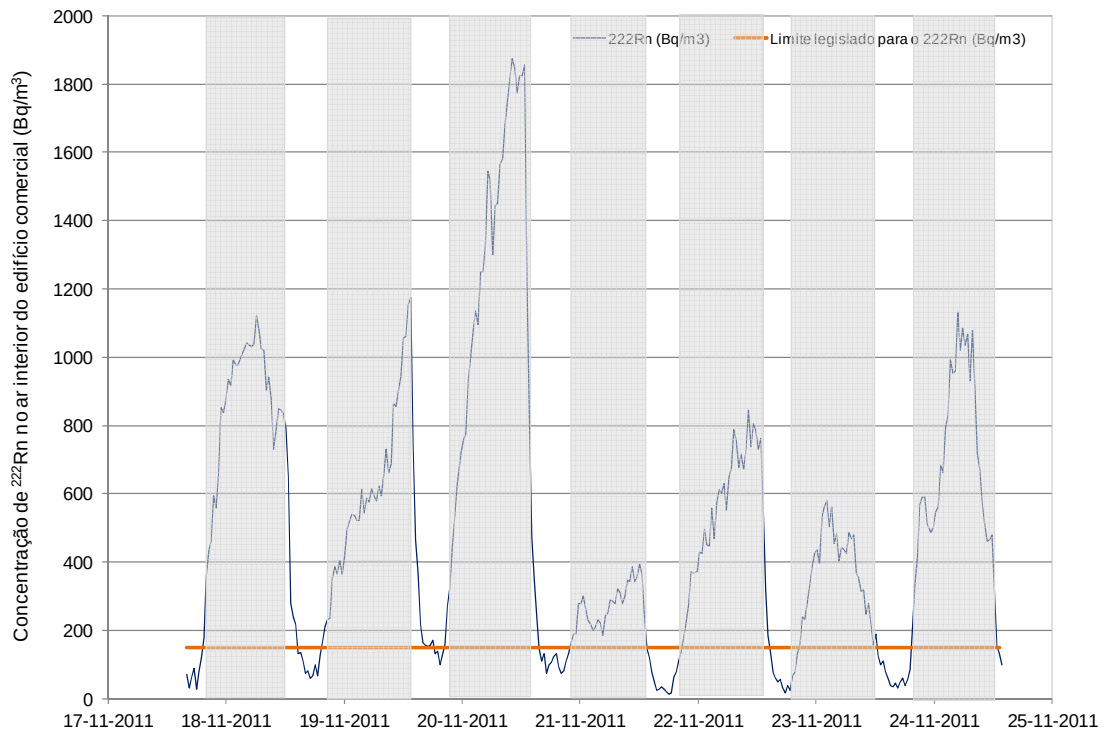


Figura 7.37 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial, nível de referência recomendado na legislação regional e períodos de redução da ventilação deste espaço assinalados a sombreado cinza.

O local de amostragem 3, edifício propriedade da Universidade dos Açores, é dos três locais amostrados o que apresenta os valores máximos mais elevados, quer no que se refere ao CO_2 , quer ao radão. O valor máximo de concentração de CO_2 obtido foi de 8,5 %vol., sendo bastante superior ao limite de exposição proposto para este gás (0,5 %vol.) considerando oito horas de exposição. Concentrações de CO_2 desta ordem provocam sintomas semelhantes aos descritos para o ponto de amostragem 1. No que se refere ao radão, a concentração deste gás atinge valores bastante superiores ao limite recomendado na legislação regional. O valor máximo registado de 16 700 Bq/m^3 é cerca de 111 vezes superior a este limite e o valor médio, 2400 Bq/m^3 , é aproximadamente 16 vezes superior, sendo mesmo os valores abaixo deste limite bastante raros para o período de amostragem (Figura 7.39).

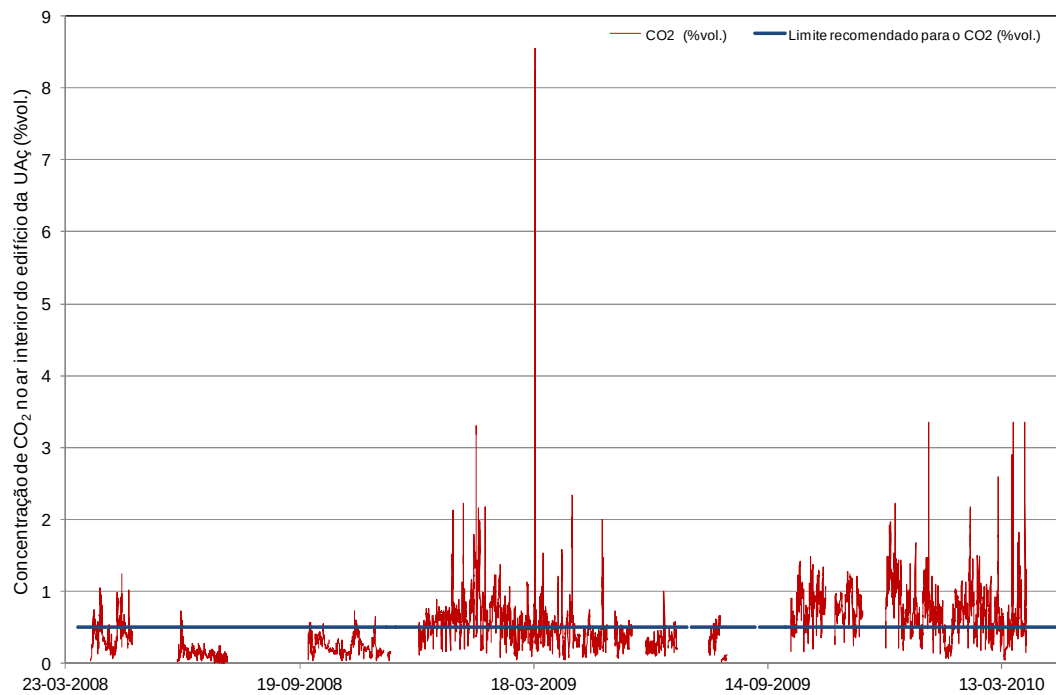


Figura 7.38 – Variação temporal da concentração de CO_2 no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e nível de referência recomendado por diversas entidades internacionais (NIOSH/OSHA) (NIOSH, 2007).

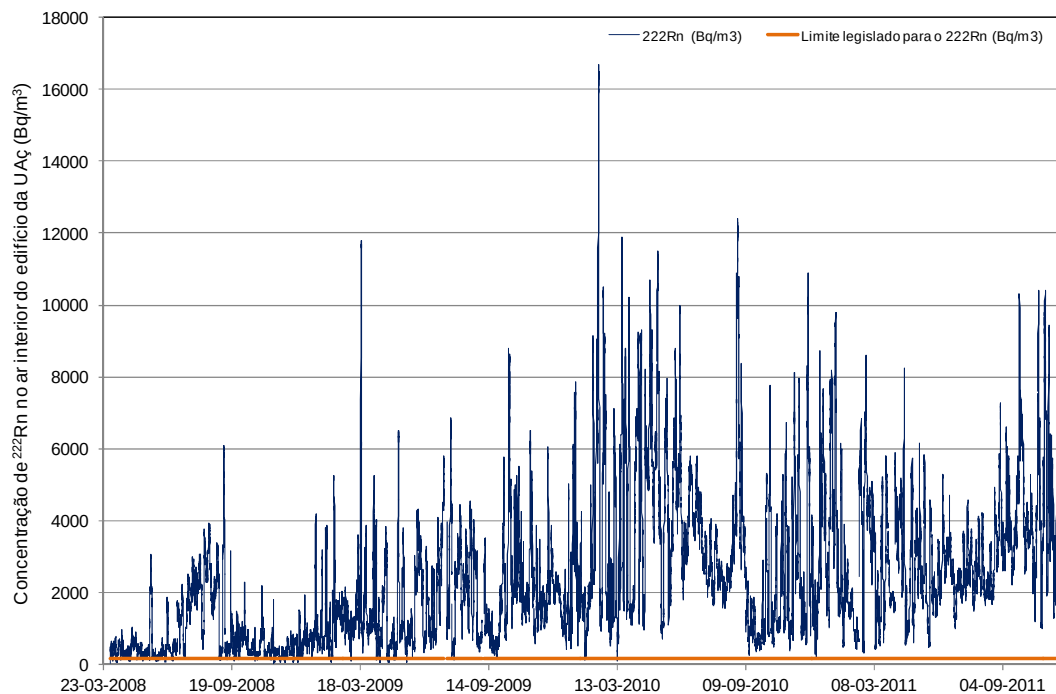


Figura 7.39 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e limite de referência recomendado na legislação regional.

Apesar do valor máximo de concentração de CO_2 no ar interior dos edifícios em estudo ultrapassar de modo significativo o limite de exposição recomendado, este não representa o valor máximo já detectado no ar interior de edifícios das Furnas. Trabalhos realizados por Viveiros (2003) e Viveiros *et al.* (2009) registaram valores máximos de concentração de CO_2 no ar interior de 20,8 %vol., isto é, valores considerados letais. Tendo em consideração a relação existente entre os dois gases em análise, o valor máximo da concentração de radão no ar interior de edifícios registado no presente estudo ($16\,700\text{ Bq/m}^3$) pode ser inferior aos valores máximos que eventualmente possam ocorrer em edifícios onde, por exemplo, se verifiquem valores de concentração de CO_2 tão elevados como o descrito anteriormente.

7.5.5. Considerações Gerais

Os ensaios de monitorização contínua da concentração de radão no ar interior dos três edifícios permitiram identificar quais as variáveis independentes que influenciam as variações dos dados log-transformados da concentração de radão. As variáveis identificadas são: a concentração de CO_2 no ar interior do edifício, a ventilação, o diferencial de pressão, a humidade do solo, a humidade relativa do ar, a temperatura do ar e a velocidade do vento.

A concentração de CO_2 no ar interior apresenta uma correlação positiva com as variações dos dados log-transformados da concentração de radão nos pontos de amostragem onde foi possível incluir esta variável na análise de regressão múltipla. Esta correlação deverá resultar do transporte do radão do solo para o interior deste edifício, funcionando o CO_2 como gás de arraste, à semelhança do descrito para o transporte do radão no solo (Baxter *et al.*, 1999; Guerra e Lombardi, 2001).

A ventilação exerce uma influência negativa nos valores de radão registados nos pontos de amostragem 1 e 2; no local 3 esta variável foi controlada. Esta

correlação tem sido evidenciada em diversos estudos. Clouvas *et al.* (2011) estudaram as variações da concentração de radão no ar interior de escolas na Grécia e verificaram que em períodos de encerramento ocorriam incrementos significativos da concentração deste gás como resultado da diminuição da ventilação. Um efeito semelhante foi descrito por Bossew e Lettner (2007) e Rao e Sengupta (2010) que associam valores de concentração de radão no ar interior mais elevados aos meses de Inverno como consequência de uma redução na ventilação, uma vez que, neste período, as janelas dos edifícios estão, normalmente, fechadas. Variações sazonais semelhantes foram descritas no capítulo 6 associadas a medições efectuadas em vários edifícios das freguesias das Furnas e da Ribeira Quente. A eficácia da ventilação depende essencialmente de dois factores, por um lado, do hábito dos residentes, isto é, se mantêm as janelas e as portas do edifício abertas, e por outro, da velocidade do vento. Como foi possível verificar nos conjuntos de dados adquiridos nos pontos de amostragem 1 e 2, uma ventilação eficaz consegue reduzir substancialmente as concentrações de radão no ar interior destes edifícios.

A velocidade do vento influencia negativamente a concentração de radão no ar interior da cave no ponto de amostragem 1 e o seu efeito pode ser resultado, por um lado, do aumento da eficiência da ventilação neste espaço e, por outro, da remoção do radão que está a ser libertado do solo para a caixa-de-ar, impedindo, assim, a sua entrada na cave (Riley *et al.*, 1996).

No que diz respeito ao diferencial de pressão barométrica entre o interior e o exterior do edifício, verifica-se que na cave da habitação a pressão barométrica no seu interior é superior à pressão barométrica exterior, medida na estação GFUR1 (Figura 7.40). Este facto não está relacionado com diferenças de pressão barométrica resultantes de diferenças de cota entre estes dois pontos uma vez que ambos estão localizados a uma altitude entre 190 e 200 m, podendo eventualmente estar antes relacionado com os diferentes equipamentos utilizados e/ou com as diferentes calibrações efectuadas. A diferença de pressão encontrada no interior e exterior do edifício é contrária ao expectável. De facto, o ar quente existente no interior de um edifício é menos denso do que o ar frio existente no seu exterior e, consequentemente,

a pressão barométrica no interior é também menor do que a no exterior, forçando, assim, a entrada deste gás no edifício (Groves-Kirkby *et al.* 2006). Face ao exposto, não é possível, com os dados disponíveis, confirmar se efectivamente a pressão no interior da cave é superior à pressão exterior. Em situações futuras importa monitorizar a pressão no interior e no exterior do edifício com equipamentos semelhantes, assim como monitorizar a temperatura do ar. Estando estes parâmetros relacionados, o diferencial de temperatura pode também ser responsável pelas variações verificadas, até porque na ausência de ventilação nesta cave nota-se uma subida da temperatura ambiente. No ensaio de monitorização efectuada em 2005 este parâmetro não foi medido. O diferencial de pressão entre o interior e o exterior deste edifício influencia de modo positivo a variação dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior desta cave explicando cerca de 15,1 % destas variações.

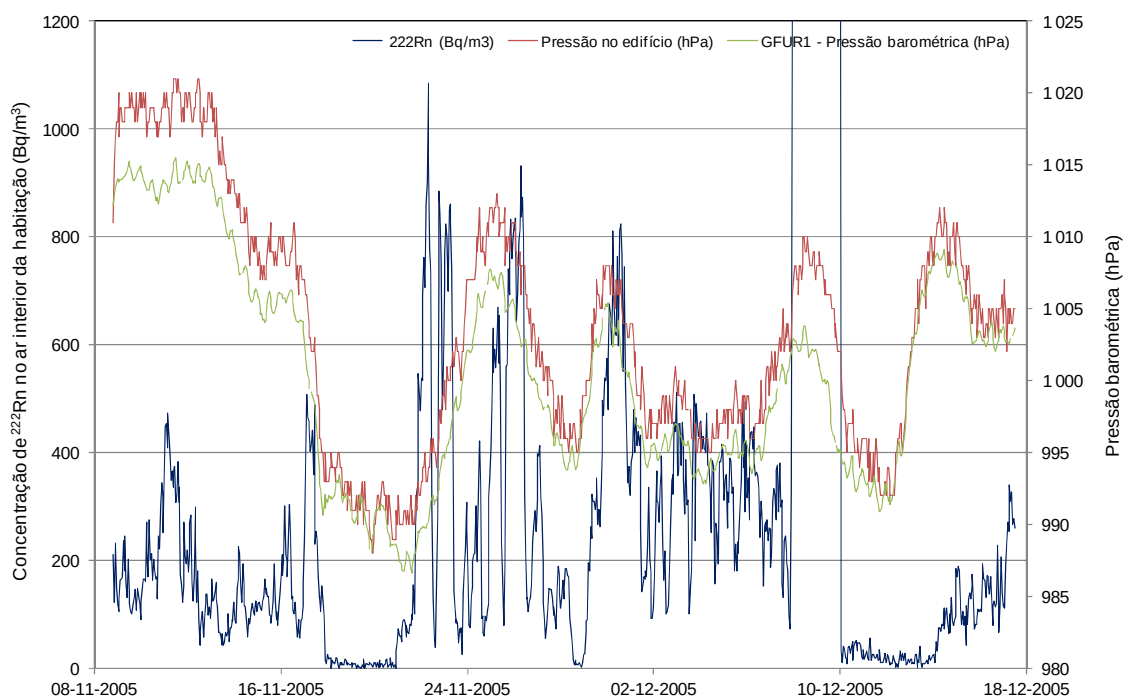


Figura 7.40 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala e pressão barométrica no interior e exterior da habitação (modificado de Silva, 2006).

A humidade do solo influencia de modo negativo a variação dos dados log-transformados no ar interior no ponto de amostragem 1 e de modo positivo no ponto de amostragem 3. Estas relações resultam do facto da variação da água

presente no solo poder influenciar, por um lado, a emissão do radão, e por outro, a permeabilidade do solo (Nazaroff e Sextro, 1989; Rowe *et al.*, 2002). Assim, um incremento da água existente no solo pode impermeabilizar os níveis superiores do solo impedindo a libertação do radão e conduzindo assim a um incremento deste gás em zonas mais profundas. O radão acumulado em profundidade pode assim migrar lateralmente e ser introduzido no interior de edifícios promovendo um incremento deste gás no ar interior. Por outro lado, um incremento da água presente no solo pode potenciar a dissolução deste gás e o seu transporte para zonas mais profundas provocando assim uma diminuição do radão presente na fracção gasosa do solo e consequentemente diminuindo a concentração de radão disponível para ser introduzida no ar interior de edifícios. As diferentes formas como a humidade do solo influencia as variações da concentração de radão podem ainda estar associadas às características dos edifícios onde decorre a amostragem. O ponto de amostragem 1 corresponde a uma cave que apresenta uma das paredes exteriores em contacto total com o solo, passando a parcial em outras duas e a quarta parede exterior está em contacto com o ar atmosférico, este tipo de estrutura poderá eventualmente potenciar o transporte de radão pela água impedindo a sua introdução neste espaço. Por seu lado, no ponto de amostragem 3, todas as paredes do poço estão em contacto directo com o solo, o que poderá facilitar a entrada de radão no mesmo, uma vez que, devido à presença de água em níveis mais superficiais este não se consegue libertar para o ar atmosférico.

A humidade relativa do ar apresenta uma relação directa, com 2 horas de atraso, com as variações da concentração de radão no ar interior no ponto de amostragem 3. Esta relação pode resultar do facto de níveis de humidade elevados no ar inibirem a emissão do radão do solo para a atmosfera promovendo assim o incremento das concentrações deste gás nos níveis mais superficiais do solo (García-Talavera *et al.*, 2001) e potenciando, assim, a entrada deste gás no interior do edifício.

A realização destes ensaios de monitorização da concentração de radão no ar interior de três edifícios da freguesia das Furnas permitiu verificar que:

- 1- Os valores de concentração de radão nos edifícios amostrados ultrapassam frequentemente os valores recomendados na legislação regional (150 Bq/m^3);
- 2- Os valores de concentração de CO_2 nos edifícios amostrados ultrapassam em algumas ocasiões os valores recomendados por entidades internacionais ($0,5 \text{ \%vol.}$);
- 3- Uma ventilação eficiente reduz consideravelmente os valores de concentração de radão e de CO_2 no ar interior destes edifícios;
- 4- O CO_2 pode funcionar como gás de arraste relativamente ao radão, promovendo o transporte deste gás para o interior de edifícios.

Os valores de concentração de radão e de CO_2 existentes no ar interior destes edifícios permitiram salientar a importância deste tipo de monitorização em regiões vulcânicas quiescentes, pois sendo a desgaseificação difusa um processo contínuo a população instalada nestas regiões está em permanente risco no que diz respeito à exposição aos gases libertados. A localização dos edifícios amostrados em zonas de concentração de radão no solo relativamente baixas ($< 12\,000 \text{ Bq/m}^3$), apesar da sua proximidade a campos fumarólicos, evidencia, por um lado, o carácter específico das variações espaciais associadas à desgaseificação difusa, podendo as concentrações deste gás variar significativamente em distâncias de apenas alguns metros, e por outro, mesmo em zonas de baixa concentração de radão no solo, a concentração deste gás no ar interior de edifícios pode ser significativa, dependendo em grande parte também das variações de parâmetros meteorológicos, das condições de ventilação existentes e do tipo de construção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O radão (^{222}Rn) é um gás nobre incolor, inodoro e radioactivo resultante do decaimento do urânio (^{238}U). Sendo o único elemento gasoso desta série radioactiva é o que possui maior mobilidade, pelo que pode ser libertado das rochas para outros meios líquidos ou gasosos, como para a água, para espaços intersticiais em rochas ou em solos, ou para o ar atmosférico (Hasbrouck, 1983; Spencer, 1992). Em regiões vulcânicas, os estudos de desgaseificação difusa de radão no solo podem fornecer importantes informações sobre fenómenos que ocorrem em profundidade, nomeadamente no que concerne a identificação de falhas ocultas, a prospecção geotérmica e a monitorização sismovulcânica. Dado o seu potencial cancerígeno, a acumulação deste gás em concentrações elevadas no ar interior de edifícios pode ter consequências graves em termos de saúde para os seus ocupantes, levando em casos extremos ao desenvolvimento de doenças do foro oncológico tais como o cancro do pulmão.

O Vulcão das Furnas é um dos vulcões centrais activos da ilha de S. Miguel e corresponde a um aparelho de composição essencialmente traquítica (Guest *et al.*, 1999). A desgaseificação neste aparelho vulcânico é significativa não se resumindo à existência de campos fumarólicos e de nascentes termais e frias gasocarbónicas, contemplando também uma importante área de desgaseificação difusa através dos solos. O trabalho realizado enquadra-se no âmbito do estudo da desgaseificação difusa de radão neste vulcão e incidiu sobre a análise de variações espaciais e temporais deste gás no solo, variações da concentração de radão em nascentes e avaliação do impacto, em termos de saúde pública, da sua presença no ar interior de edifícios das freguesias das Furnas e Ribeira Quente.

A aquisição de dados no Vulcão das Furnas para a realização da cartografia da concentração de radão, de dióxido de carbono (CO_2) e da temperatura do solo decorreu ao longo de várias campanhas realizadas nos meses de Verão de 2005

(Silva, 2006) e entre 2007 e 2010. A área amostrada estendeu-se desde o interior até ao bordo da caldeira do vulcão, incluindo, no flanco S, a área da freguesia da Ribeira Quente. Os valores de concentração de radão no solo oscilaram entre 0 e 387 527 Bq/m³. A aplicação da análise estatística através da representação gráfica (GSA) aos dados de radão log-transformados permitiu reconhecer a presença de 3 populações, possibilitando a identificação do ruído de fundo do Vulcão das Furnas (8000 Bq/m³), assim como, a definição das principais zonas de desgaseificação anómala de radão (> 20 000 Bq/m³). Os valores de concentração de CO₂ no solo oscilaram entre 0 e 100 %vol. e a aplicação da análise estatística através da representação gráfica (GSA) aos dados de CO₂ log-transformados permitiu também reconhecer a presença de 3 populações, possibilitando a identificação do ruído de fundo do Vulcão das Furnas (6 %vol.). A definição das principais zonas de desgaseificação anómala de CO₂ (> 15 %vol.) teve como limite valores letais da concentração deste gás. Os valores de temperatura oscilaram entre 16,5 e 100 °C. A aplicação da análise estatística através da representação gráfica (GSA) aos dados de temperatura log-transformados permitiu reconhecer a presença de 2 populações, possibilitando a identificação do valor de 25 °C como o ruído de fundo do Vulcão das Furnas. Adicionalmente, e apesar de terem sido definidas duas populações, a definição das principais zonas de anomalia térmica (> 30 °C) teve por base o valor máximo da temperatura do ar medido pelos sensores instalados nas estações permanentes GFUR1 e GFUR2 durante o período de amostragem.

A análise espacial dos dados de concentração de radão, de CO₂ e da temperatura do solo foi efectuada através da aplicação da simulação sequencial Gaussiana (sGs) que permitiu a elaboração de cartografia do tipo E e de cartas de probabilidade, assim como o cálculo da incerteza associada às 100 realizações efectuadas. Esta análise possibilitou a identificação de dez zonas anómalas principais na cartografia da concentração de radão no solo, de mais quatro zonas anómalas de concentração de CO₂ no solo a adicionar às anteriormente identificadas por Sousa (2003) e quatro zonas principais de anomalias térmicas. As principais zonas de desgaseificação anómala encontram-se associadas à presença de estruturas vulcano-tectónicas, surgindo em zonas de falhas, no bordo de caldeiras (interna e

externa) e em crateras, e aos campos fumarólicos. Os resultados obtidos permitem reconhecer a existência de zonas de desgaseificação anómalas comuns aos dois gases analisados, contudo, verificam-se também zonas de anomalias específicas de cada gás. No caso das zonas anómalas comuns, estas são atribuídas ao facto do CO₂ poder funcionar como gás de arraste em relação ao radão, podendo este transporte ser mais eficiente quando influenciado por fluxos convectivos resultantes da presença do reservatório hidrotermal. As zonas anómalas observadas apenas na cartografia de radão podem estar relacionadas com o facto deste gás poder ainda ser transportado por outro tipo de fluxo ascendente desprovido de CO₂ ou resultar de uma fonte de radão mais localizada. As zonas anómalas existentes apenas na cartografia de CO₂ podem ser resultado da dissolução e transporte do ²²⁶Ra/radão na água e das diferentes malhas de amostragem aplicadas. Com base nas zonas anómalas identificadas foram definidos alinhamentos de desgaseificação difusa com direcções NE-SW, NW-SE e E-W. Alguns dos alinhamentos identificados aproximam-se dos traçados em trabalhos realizados anteriormente que incidiram sobre a concentração e fluxo de CO₂ no solo (Sousa, 2003; Viveiros, 2010) e de alguns acidentes tectónicos cartografados por Gaspar *et al.* (1995). Por fim foram ainda identificadas três zonas com potencial interesse em termos de exploração geotérmica, uma vez que, anomalias de radão elevadas permitem identificar a presença de falhas activas e os furos geotérmicos mais produtivos estão normalmente associados a áreas de elevada concentração de radão (Balcázar *et al.*, 1990).

O ensaio de monitorização contínua da concentração de radão no solo compreendeu três fases distintas uma vez que não foi possível, por diversos motivos, efectuar o ensaio de monitorização no mesmo local como desejável. Numa primeira fase o equipamento RAD7 foi instalado no jardim do Centro Termal das Furnas (local 1), passando posteriormente para junto do campo fumarólico da Freguesia das Furnas (local 2) e numa terceira fase para as imediações do campo fumarólico da Lagoa das Furnas (local 3). Aos dados de radão obtidos nestes pontos de amostragem foi adicionada a informação dos dados dos parâmetros meteorológicos e do fluxo de CO₂ obtidos pelas estações GFUR1, GFUR3 e GFUR2, respectivamente. De modo a compreender e filtrar a influência destes factores externos na variação da

concentração de radão no solo foi aplicada a análise de regressão múltipla às séries temporais de dados obtidas, através da aplicação do método *Stepwise*. Para a aplicação desta análise foi necessário dividir os conjuntos de dados obtidos em três grupos de modo a tentar aproximar a sua distribuição da normal ou da log-normal. Às séries temporais de dados obtidas foi também aplicada a análise espectral, através da utilização do filtro FFT (*Fast Fourier Transform*).

A primeira fase, local de amostragem 1, decorreu entre 18 de Agosto de 2005 e 16 de Janeiro de 2006 e os valores de concentração de radão no solo obtidos oscilaram entre 0 e 39 200 Bq/m³. No modelo proposto para o grupo de dados A1 (< 8000 Bq/m³) as variáveis com significância estatística são a humidade do solo e a temperatura do solo explicando 15,8 % do total das variações dos dados log-transformados da concentração de radão. No modelo proposto para o grupo de dados B1 (8000 a 16 000 Bq/m³) as variáveis com significância estatística são a pressão barométrica, a temperatura do solo e a humidade do solo explicando 73,6 % das variações dos dados da concentração de radão. No modelo proposto para o grupo de dados C1 (> 16 000 Bq/m³) as variáveis com significância estatística são a humidade do solo, o fluxo de CO₂ e a temperatura do solo explicando 40,5 % do total das variações dos dados da concentração de radão.

A segunda fase, local de amostragem 2, decorreu entre 23 de Janeiro e 29 de Fevereiro de 2008 e os valores de concentração de radão no solo obtidos oscilaram entre 33 e 104 000 Bq/m³. A aplicação da análise de regressão múltipla aos dados obtidos neste local não teve como objectivo principal a construção de um modelo explicativo para a variação da concentração de radão, dado o curto período de amostragem, mas constituiu uma simples tentativa de reconhecer a influência de algum dos parâmetros em análise. Assim, no modelo proposto para o grupo de dados A2 (< 8000 Bq/m³) as variáveis com significância estatística são a temperatura do solo, a humidade do solo e a velocidade do vento explicando 61,5 % do total das variações dos dados log-transformados da concentração de radão. Não foi possível propor um modelo para o grupo de dados B2 (8000 a 16 000 Bq/m³) uma vez que não existiam casos válidos suficientes. No modelo proposto para o grupo de dados C2

(> 16 000 Bq/m³) as variáveis com significância estatística são a pressão barométrica e a temperatura do solo explicando 57,8 % do total das variações dos dados da concentração de radão.

Finalmente a terceira fase, local de amostragem 3, decorreu entre 20 de Janeiro de 2009 e 1 de Fevereiro de 2011 e os valores de concentração de radão no solo obtidos oscilaram entre 0 e 153 000 Bq/m³. No modelo proposto para o grupo de dados A3 (< 8000 Bq/m³) as variáveis com significância estatística são a temperatura do solo, a velocidade do vento, a humidade relativa do ar e o fluxo de CO₂ explicando 27 % do total das variações dos dados log-transformados da concentração de radão. No que se refere ao grupo de dados B3 (8000 a 50 000 Bq/m³) a análise de regressão múltipla não foi aplicada com o objectivo de criar um modelo, uma vez que este conjunto de dados não segue uma distribuição normal, mas como tentativa de reconhecer a influência de algum dos parâmetros em análise. Neste caso, as variáveis com significância estatística são a velocidade do vento e a humidade relativa do ar explicando 12 % das variações dos dados da concentração de radão. No modelo proposto para o grupo de dados C3 (> 50 000 Bq/m³) as variáveis com significância estatística são a humidade do solo, a temperatura do solo e o fluxo de CO₂. Estas variáveis são responsáveis por 50,4 % do total das variações dos dados da concentração de radão. Neste local de amostragem a análise espectral aplicada aos dados obtidos, no período compreendido entre 13 de Maio de 2009 e 20 de Novembro de 2010, permitiu verificar a existência de variações cíclicas diárias e sazonais, meses de Verão *versus* meses de Inverno. A análise das baixas frequências permitiu ainda o reconhecimento de variações associadas a ciclos de 340, 48 e 15 dias. O cálculo dos espectros para os meses de Verão e de Inverno, revelou a existência de variações cíclicas diárias associadas a um ciclo por dia, para os dados dos meses de Inverno (Novembro a Abril). A aplicação da função “*Transfer*” permitiu a identificação das variáveis temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento como sendo as que apresentam correlação superior a 0,5 com a concentração de radão no solo associado às variações de um ciclo por dia.

Nos três pontos de amostragem a concentração de radão foi influenciada por variações de parâmetros meteorológicos e do fluxo de CO₂. O fluxo de CO₂ surge como uma variável comum aos grupos de dados C dos três locais de amostragem. Relativamente aos parâmetros meteorológicos, o conjunto de variáveis que influencia a concentração de radão difere nos diversos pontos de amostragem e nos grupos de dados de um mesmo ponto de amostragem.

Os resíduos calculados, pela aplicação da análise de regressão múltipla, foram utilizados para tentar identificar anomalias associadas à magnitude dos eventos sísmicos que ocorreram no Vulcão das Furnas. A actividade sísmica pouco significativa registada ao nível deste vulcão, durante o período em estudo, não permitiu concluir sobre a existência de uma relação evidente entre estas duas variáveis.

O estudo da concentração de radão em nascentes do Vulcão das Furnas decorreu entre Dezembro de 2006 e Novembro de 2011. Entre Dezembro de 2006 e Novembro de 2007, as amostragens foram efectuadas pontualmente em algumas nascentes. Após este período, e até Novembro de 2011, as amostragens passaram a ser efectuadas com uma periodicidade bimestral. As nascentes em análise correspondem às águas: Água Azeda, Água Azeda do Rebentão, Dr. Dinis, Caldeirão, Água da Prata, Dr. Miguel Henrique, Quenturas I, Quenturas II, Quenturas III, Grutinha I, Grutinha II e Torno. Os valores de concentração de radão obtidos na análise laboratorial foram corrigidos relativamente ao decaimento radioactivo do radão e à humidade no interior do detector. A concentração média de radão nas nascentes amostradas variou entre um valor médio mínimo de 1189 Bq/m³ na nascente Água da Prata e um valor médio máximo de 29 765 Bq/m³ na nascente Dr. Miguel Henrique. No que se refere à temperatura média das nascentes em análise, esta variou entre um valor médio mínimo de 16,5 °C na nascente Água Azeda do Rebentão e um valor médio máximo de 76,2 °C na nascente do Caldeirão. A análise dos valores médios da concentração de radão e da temperatura em cada uma das nascentes amostradas demonstra que as nascentes ortotermiais apresentam valores de concentração de radão superiores aos das nascentes termiais. Esta relação resulta do facto de

incrementos da temperatura promoverem uma diminuição na solubilidade do radão na água facilitando assim o escape deste gás.

De modo a tentar compreender que factores externos influenciam as variações da concentração de radão e da temperatura nestas nascentes foram comparadas as variações temporais destas variáveis e dos parâmetros meteorológicos medidos pela estação GFUR3. As variações da concentração de radão e da temperatura nas nascentes amostradas parecem estar associadas às variações sazonais da pluviosidade, da humidade do solo e da temperatura do ar, expressa neste estudo pelos dados relativos à temperatura do solo. A variação temporal da concentração de radão nas nascentes em análise foi utilizada para tentar identificar anomalias associadas à magnitude dos eventos sísmicos que ocorreram no Vulcão das Furnas, no entanto, não foi detectada uma relação evidente entre estas duas variáveis em nenhuma das nascentes amostradas. As variações observadas na concentração deste gás parecem ser resultado apenas da influência das variações sazonais de parâmetros meteorológicos. O facto da amostragem ter sido efectuada com uma regularidade bimestral pode ter conduzido a que eventuais anomalias na concentração de radão associadas a eventos sísmicos não tenham sido detectadas. Os valores de concentração de radão na água são baixos não ultrapassando em nenhum caso os 100 000 Bq/m³ propostos como limite para as águas de abastecimento público pela Organização Mundial de Saúde. As doses efectivas anuais calculadas para as nascentes analisadas oscilaram entre os 0,003 mSv/ano na nascente da Água da Prata e 0,076 mSv/ano na nascente Dr. Miguel Henrique. Apesar da Organização Mundial de Saúde não indicar um limite específico no caso do radão, recomenda um valor inferior a 0,1 mSv/ano para diversos radionuclídeos.

O estudo da concentração de radão no ar interior de alguns edifícios das freguesias das Furnas e Ribeira Quente foi desenvolvido entre Junho de 2009 e Junho de 2011. Cada edifício foi amostrado duas vezes, uma vez no Verão e outra no Inverno. Verificou-se que os valores de concentração de radão medidos foram superiores nos meses de Inverno em relação aos de Verão. A média anual calculada da concentração de radão no ar interior de edifícios da freguesia das Furnas oscilou

entre 23 e 6403 Bq/m³ e a dose efectiva anual entre 0,4 e 107,6 mSv/ano. Cerca de 33 % dos edifícios amostrados apresentam valores médios anuais da concentração deste gás superiores ao limite recomendado na legislação regional (150 Bq/m³) e 6 % apresentam valores de dose efectiva anual superior ao limite recomendado pela Organização Mundial de Saúde e pela Comissão Internacional de Protecção Radiológica (10 mSv/ano). As diferentes percentagens obtidas resultam do facto da Comissão Internacional de Protecção Radiológica considerar uma concentração de radão no ar interior de 600 Bq/m³ no cálculo do limite da dose efectiva anual. No que se refere aos resultados obtidos em edifícios da freguesia da Ribeira Quente, a média anual calculada da concentração de radão no ar interior oscilou entre 31 e 474 Bq/m³ e a dose efectiva anual variou entre 0,5 e 8 mSv/ano. Dos edifícios amostrados 21 % apresentam valores médios anuais de concentração deste gás superiores ao limite recomendado na legislação regional (150 Bq/m³).

A avaliação do risco de radão no ar, no que diz respeito à exposição humana, foi efectuada através da integração da cartografia da susceptibilidade de radão no solo e da vulnerabilidade do edificado. A cartografia da susceptibilidade de radão no solo permitiu verificar que nas freguesias das Furnas e Ribeira Quente existe uma importante área com susceptibilidade elevada, sendo o solo a principal fonte de entrada deste gás nos edifícios. Por outro lado, os edifícios das freguesias das Furnas e da Ribeira Quente apresentam na sua maioria vulnerabilidade elevada ou muito elevada, devido à quase ausência de construções com caixa-de-ar e, nalguns casos, à presença de caves. Em resultado, na cartografia do risco de radão no ar são identificados na freguesia das Furnas cerca de 12,9 % e na freguesia da Ribeira Quente apenas 0,6 % edifícios com risco moderado, apresentando os restantes risco elevado ou muito elevado.

Os ensaios de monitorização da concentração de radão no ar interior de edifícios foram efectuados em três pontos de amostragem distintos: local 1, 2 e 3. Em cada um destes edifícios foi ainda medida a concentração de CO₂ no ar interior. Aos dados de radão e de CO₂ obtidos nestes pontos de amostragem foi adicionada a informação dos dados dos parâmetros meteorológicos obtidos pelas estações GFUR1

e GFUR3, da pressão barométrica no interior do edifício e da ventilação. De modo a compreender e filtrar a influência destes factores externos na variação da concentração de radão foi aplicada a análise de regressão múltipla aos dados log-transformados, através da aplicação do método *Stepwise*, e a análise espectral, através da utilização do filtro FFT (*Fast Fourier Transform*), às séries temporais de dados obtidas.

O local de amostragem 1 corresponde a uma habitação localizada próxima do campo fumarólico da Ribeira dos Tambores e a amostragem foi efectuada na cave, num período compreendido entre 8 de Novembro e 17 de Dezembro de 2005. Os valores de concentração de radão obtidos oscilaram entre 0 e 13 273 Bq/m³ e os de CO₂ variaram entre 0 e 6 %vol.. No modelo proposto as variáveis com significância estatística são a ventilação, o diferencial de pressão entre o interior e o exterior do edifício, a humidade do solo, a velocidade do vento e a concentração de CO₂ no ar interior, explicando 71 % das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior deste edifício.

O local 2 corresponde a um edifício comercial localizado próximo do campo fumarólico da Freguesia das Furnas e a amostragem foi efectuada num período compreendido entre os dias 17 e 24 de Novembro de 2011. Os valores de concentração de radão obtidos oscilaram entre 13 e 1873 Bq/m³ e os de CO₂ variaram entre 0,1 e 2,7 %vol.. No modelo de regressão proposto as variáveis com significância estatística são a concentração de CO₂ no ar interior do edifício e a ventilação explicando 69 % das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior deste edifício.

O local 3 corresponde a uma pequena construção para abrigo de equipamento de monitorização, pertencente à Universidade dos Açores. Este edifício está também localizado próximo do campo fumarólico da Freguesia das Furnas e a amostragem foi efectuada num poço existente no seu interior, no período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 31 de Dezembro de 2011. Os valores de concentração de radão obtidos oscilaram entre 27 e 16 700 Bq/m³ e os de CO₂ variaram entre 0 e 8,5 %vol..

O modelo de regressão foi aplicado ao período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 31 de Março de 2011, por se tratar do maior período de tempo com o registo de dados mais completo. No modelo proposto as variáveis com significância estatística são a humidade do solo, a temperatura do ar e a humidade relativa do ar explicando 35,7 % das variações dos dados log-transformados da concentração de radão no ar interior deste edifício. Apenas neste local de amostragem a análise espectral aplicada permitiu a identificação de variações cíclicas diárias e sazonais. A análise foi aplicada aos dados obtidos no período compreendido entre 1 de Abril de 2008 e 30 de Novembro de 2011 e permitiu a identificação de variações cíclicas diárias associadas a um e a dois ciclos por dia. No entanto, o espectrograma calculado para este período de amostragem apenas evidenciou variações cíclicas diárias associadas a dois ciclos por dia, após o primeiro ano de amostragem, não reflectindo a presença de variações sazonais nem de um ciclo por dia. A análise das baixas frequências, por seu lado, permitiu o reconhecimento de variações periódicas associadas a 682, 341, e 62 dias. Para correlacionar as variações cíclicas diárias identificadas com as variações cíclicas associadas aos parâmetros meteorológicos em análise foi necessário efectuar a análise espectral, em separado, para os períodos compreendidos entre (a) 16 de Abril de 2008 e 12 de Fevereiro de 2009; (b) 7 de Agosto de 2009 e 15 de Março de 2010 e (c) 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011, uma vez que estes correspondem aos conjuntos de dados que apresentam menos interrupções horárias durante a aquisição dos parâmetros meteorológicos. Apenas o espectro calculado para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011 permitiu identificar variações cíclicas diárias associadas a dois ciclos por dia. A aplicação da função “*Transfer*” permitiu a identificação das variáveis pressão barométrica, temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento como sendo as que apresentam correlação superior a 0,5 com a concentração de radão no ar interior deste edifício associado às variações de dois ciclos por dia.

Os resíduos calculados, pela aplicação da análise de regressão múltipla, para os edifícios correspondentes aos locais de amostragem 1, 2 e 3, e os dados da concentração de radão obtidos no local de amostragem 3 foram utilizados para tentar identificar anomalias associadas à magnitude dos eventos sísmicos que ocorreram no

Vulcão das Furnas, no entanto, não foi detectada uma relação evidente entre estas duas variáveis.

Tendo em conta as diferentes abordagens ao estudo da desgaseificação difusa do radão efectuadas neste trabalho e os resultados obtidos, é possível tecer as seguintes considerações:

- (a) Verifica-se que no Vulcão das Furnas existe uma significativa e contínua desgaseificação difusa de radão e de CO₂ através dos solos.
- (b) As principais zonas de desgaseificação anómala surgem associadas à presença de campos fumarólicos e a zonas de grande permeabilidade como a presença de falhas, de crateras e do bordo de caldeiras.
- (c) As principais zonas de anomalias térmicas surgem associadas à presença de campos fumarólicos.
- (d) As cartografias de radão, de CO₂ e de temperatura do solo apresentadas servem de situações de referência e podem ser utilizadas na monitorização sismovulcânica para comparações futuras.
- (e) A cartografia de concentração de radão no solo apresentada constitui uma ferramenta de base para a identificação de zonas com potencial interesse para exploração de recursos geotérmicos.
- (f) Os ensaios de monitorização contínua da concentração de radão no solo permitiram verificar que as variações temporais deste gás são influenciadas por diversos factores meteorológicos e por variações do fluxo de CO₂ no solo.
- (g) O conjunto de variáveis que exerce influência na variação temporal de radão no solo e o tipo de influência exercido diverge nos diferentes pontos

de amostragem, podendo mesmo apresentar diferenças nos grupos de dados definidos para o mesmo ponto de amostragem.

- (h) A variável temperatura do solo exerce uma influência contrária na concentração de radão no solo dependendo se os pontos de amostragem estão localizados em zonas com ou sem anomalia térmica.
- (i) Nos três pontos de monitorização contínua do radão no solo os dados obtidos foram divididos em três grupos, apresentando todos eles aspectos comuns: grupo A - corresponde aos valores de ruído de fundo do Vulcão das Furnas ($< 8000 \text{ Bq/m}^3$); grupo B - corresponde aos conjuntos de dados influenciados exclusivamente por variações dos parâmetros meteorológicos e grupo C - corresponde aos conjuntos de dados que são influenciados por variações dos parâmetros meteorológicos e por variações do fluxo de CO_2 .
- (j) As nascentes do Vulcão das Furnas analisadas no presente trabalho, constituem também fontes permanentes de emissão de radão.
- (k) As variações da concentração de radão e da temperatura nas nascentes amostradas são influenciadas pelos mesmos parâmetros meteorológicos, nomeadamente a temperatura do ar/solo, a pluviosidade e a humidade do solo.
- (l) As nascentes ortotermais apresentam valores de concentração de radão mais elevados do que as nascentes termiais.
- (m) Nas nascentes em análise os valores de concentração de radão e as doses efectivas anuais calculadas, apresentam valores inferiores aos limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde, pelo que o seu eventual consumo não representa perigo em termos de saúde pública.

- (n) A cartografia da concentração de radão e de CO₂ no solo coloca em evidência que parte do parque habitacional das freguesias das Furnas e da Ribeira Quente está implantado sobre ou junto a anomalias destes gases. Assim, estes gases podem ser introduzidos no interior de habitações, atinjindo concentrações prejudiciais para a saúde.
- (o) As variações temporais da concentração de radão no ar interior de edifícios são influenciadas por diversos factores meteorológicos, pelas condições de ventilação existentes e por variações da concentração de CO₂.
- (p) Os valores de concentração de radão no ar interior dos edifícios amostrados nas freguesias das Furnas e Ribeira Quente apresentam variação sazonal, sendo superiores nas campanhas efectuadas nos meses de Inverno do que nos meses de Verão. Esta variação sazonal traduz em grande parte a necessidade de reduzir a ventilação dos edifícios nos meses de Inverno, o que provoca um incremento da concentração de radão e, consequentemente, uma maior exposição a este gás por parte dos seus ocupantes nestes meses.
- (q) Edifícios localizados em zonas de concentração de radão no solo inferiores ao nível de base definido para o Vulcão das Furnas (8000 Bq/m³) podem apresentar valores de concentração deste gás no ar interior superiores ao limite recomendado pela legislação regional (150 Bq/m³). Assim, no que se refere a questões relacionadas com a saúde pública utilizou-se classes de susceptibilidade que têm em consideração não só os valores registados no ar interior em edifícios das freguesias amostradas, mas também os valores de concentração de radão no ar interior recomendados pela Organização Mundial de Saúde. Este tipo de metodologias constitui um contributo para a definição das áreas de risco de concentração de radão no arquipélago dos Açores.

- (r) O tipo de cartografia apresentada neste trabalho pode constituir uma ferramenta de apoio na tomada de decisão, por parte de entidades governamentais, no que diz respeito ao ordenamento do território.
- (s) A aplicação de medidas de mitigação aquando da construção de edifícios, como, por exemplo, a construção de caixas-de-ar e de pontos de ventilação suficientes para possibilitar um arejamento eficaz do piso térreo e a não construção de caves, permitirão uma diminuição da vulnerabilidade dos edifícios à entrada de gases do solo para o seu interior.

Importa, assim, continuar a desenvolver trabalhos relacionados com o estudo do radão quer no que diz respeito à monitorização sismovulcânica, quer no que se relaciona com questões de saúde pública. Deste modo, sugerem-se como trabalhos futuros:

- (a) Estender a realização da cartografia de anomalias de radão, de CO₂ e de anomalias térmicas a outras áreas do Vulcão das Furnas (flancos). Este trabalho irá permitir a identificação de outras zonas anómalas e uma melhor caracterização das anomalias identificadas junto do limite da área amostrada. Os alinhamentos de desgaseificação identificados podem ainda facultar importantes informações no que se refere à tectónica da zona, nomeadamente na identificação de falhas ocultas.
- (b) Aferir os resultados obtidos relativamente às taxas de exalação de radão calculadas para os diferentes materiais geológicos analisados. A análise de um maior número de amostras poderá confirmar/refinar os resultados obtidos e uma melhor compreensão das diferentes contribuições para os resultados obtidos na cartografia de radão no solo.
- (c) Estudar com maior detalhe algumas das anomalias de radão encontradas no sentido de esclarecer a natureza da sua presença, nomeadamente, se estão associadas a zonas de maior permeabilidade/fracturação ou se

resultam de zonas de maior exalação de radão dos materiais presentes no local.

- (d) Definir um plano de monitorização regular de alguns dos pontos de amostragem realizados na cartografia de radão no solo acompanhado, se possível, de medições de hélio e de CO₂. Este trabalho permitirá ter em consideração as variações sazonais resultantes da influência dos parâmetros meteorológicos e a identificação de possíveis anomalias associadas a uma reactivação do sistema vulcânico.
- (e) Definir um plano de monitorização contínua da concentração de radão no solo no Vulcão das Furnas que permita a transmissão de dados em contínuo para o centro de aquisição de dados do CVARG/CIVISA de modo a que estes possam ser integrados no plano de monitorização contínuo deste vulcão. Este plano terá que passar pela realização de ensaios de monitorização com equipamentos que permitam eliminar os problemas identificados durante a realização deste trabalho.
- (f) A monitorização regular da concentração de radão em nascentes do Vulcão das Furnas deverá passar a incluir medições do caudal de cada nascente de forma a que seja possível aferir os tempos de residência deduzidos e as relações estabelecidas com as variações sazonais de parâmetros meteorológicos, bem como avaliar a contribuição da interacção água/rocha na concentração de radão.
- (g) Seleccionar algumas nascentes como caso de estudo e aumentar a frequência das amostragens para tentar identificar anomalias associadas a fenómenos de profundidade, tais como, eventos sísmicos e reactivação do sistema vulcânico.
- (h) Prosseguir com a monitorização contínua da concentração de radão no ar interior do edifício pertencente à Universidade dos Açores introduzindo um

sistema de transmissão de dados em contínuo para o centro de aquisição de dados do CVARG/CIVISA. A aquisição de um conjunto mais alargado de dados permitirá confirmar as variações sazonais da concentração deste gás identificadas na análise espectral e compreender melhor a influência exercida quer pelos parâmetros meteorológicos, quer pela concentração de CO₂ no ar interior deste edifício, análise condicionada neste estudo pelas avarias identificadas nos sensores da estação GFUR3 e da estação protótipo de CO₂.

- (i) Dar continuidade à monitorização da concentração de radão no ar interior de edifícios. A aplicação deste tipo de estudo a outras áreas permitirá conhecer a dimensão deste problema em termos de saúde pública.
- (j) Desenvolver estudos no âmbito da análise da eficiência da aplicação de medidas de mitigação, dos benefícios traduzidos em termos de ganho de tempo de vida e do custo/benefício associado à implementação destas medidas.
- (k) Sensibilizar e esclarecer as diversas entidades governamentais e a população em geral para o risco associado a residir em zonas de importante desgaseificação difusa e para as medidas de mitigação que poderão ser implementadas.

Os estudos realizados devem ser complementados e integrados com dados provenientes de outras técnicas geoquímicas e de monitorização geofísica e geodésica no sentido de melhor compreender o comportamento específico de cada sistema vulcânico e de um melhor planeamento do ordenamento de território.

BIBLIOGRAFIA

- AIUPPA, A.; ALLARD, P.; D'ALESSANDRO, W.; GIAMMANCO, S.; PARELLO, F.; VALENZA M. (2004) – Magmatic gas leakage at Mount Etna (Sicily, Italy): Relationships with the volcano-tectonic structures, the hydrological pattern and the eruptive activity. *In* Bonaccorso *et al.* (Eds), *Mt. Etna: Volcano Laboratory, AGU Geophysical Monograph Series*, 143, 129-145.
- ALLARD, P. (1983) – The origin of hydrogen, carbon, sulphur, nitrogen and rare gases in volcanic exhalations: evidence from isotope geochemistry. *In* Tazieff, H. e Sabroux, J. (Eds), *Forecasting Volcanic Events*. ELSEVIER, 337-386.
- ALLARD, P.; DAJLEVIC, D.; DELARUE, C. (1989) – Origin of carbon dioxide emanation from the 1979 Dieng eruption, Indonesia: implications for the origin of the 1986 Nyos catastrophe. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, 195-206.
- ALLARD, P.; CARBONNELLE, J.; DAJLEVIC, D.; BRONEC, J.; MOREL, P.; ROBE, M. C.; MAURENAS, J. M.; FAIVRE-PIERRET, R.; MARTINS, D.; SABROUX, J. C.; ZETTWOOG P. (1991) – Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, Vol. 351.
- ALLARD, P. (1992) – Diffuse degassing of carbon dioxide through volcanic systems: observed facts and implications. *Bulletin of the Geological survey of Japan*, 279, 7-11.
- ALLARD, P.; HAMMOUYA, G.; PARELLO, F. (1998) – Dégazage Magmatique diffuse à la Soufrière de Guadeloupe, Antilles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre e des planètes*, 327, 315-318.
- AL-TAMIMI, M. H.; ABUMURAD, K. M. (2001) – Radon anomalies along faults in North of Jordan. *Radiation Measurements*, 34, 397-400.

- ANNUNZIATELLIS, A.; CIOTOLO, G.; LOMBARDI, S.; NOLASCO, F. (2003) – Short and long-term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area (central Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 77, 93-108.
- APPLETON, J. D. (2005) – Radon in air and water. In Selinus, O.; Alloway, B.; Centeno, J. A.; Finkelman, R. B.; Fuge, R.; Lindh, U e Smedley, P. (Eds), *Essencial of Medical Geology – Impacts of the Natural Environment on Public Health*. ELSEVIER, 227-262.
- ARMIENTA, M. A.; VARLEY, N.; RAMOS, E. (2002) – Radon and hydrogeochemical monitoring at Popocatépetl volcano, Mexico. *Geofísica Internacional*, Vol. 41, No. 3, 271-276.
- AUBERT, M.; BAUBRON, J. C. (1988) – Identification of a hidden thermal fissure in a volcanic terrain using the combination of hydrothermal convective indicators and soil-atmosphere analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35, 217-225.
- AUMENTO, F. (2002) – Radon tides on an active volcanic island: Terceira, Azores. *Geofísica Internacional*, Vol. 41, No. 4, 499-505.
- BALCÁZAR, M.; LÓPEZ, A.; CUAPIO, A. (1990) – Radon as a signal to locate geothermal energy sources. In Tommasino, L. (Ed.), *Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences*, 463-468.
- BARBERI, F.; CHELINI, W.; MARINELLI, G.; MARTINI, M. (1989) – The gas cloud of Lake Nyos (Cameroon, 1986): results of the Italian technical mission. In Le Guern, F.; Sigvaldason, G. (Ed.), *The Lake Nyos Event and Natural CO₂ Degassing*, I. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, 125-134.
- BAUBRON, J. C.; ALLARD, P.; TOUTAIN, J. P. (1990) – Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, 344, 51-53.
- BAUBRON, J. C.; ALLARD, P.; SABROUX, J. C.; TEDESCO, D.; TOUTAIN, J. P. (1991) – Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *Journal of the Geological Society*, London, 148, 571-576.

- BAUBRON, J. C.; BAXTER, P. J.; COUTINHO, R.; FERREIRA, T.; GASPAR, J. L.; ALLARD, P. (1994a) – Evaluation et zonage du risque lie aux emanations gazeuses diffuses a Furnas (São Miguel, Açores, Portugal). 1:2000 carte. BRGM, France.
- BAUBRON, J. C.; BAXTER, P. J.; COUTINHO, R.; ALLARD, P.; FERREIRA, T.; GASPAR, J. L. (1994b) – Methodology for the drawing up of the Furnas Gas Hazard Map. *In* Barberi, F.; Casale, R.; Fratta, m. (Eds). *The European laboratory Volcanoes. Workshop proceedings*, Catania, 262-267.
- BAUBRON, J. C.; RIGO, A.; TOUTAIN, J. P. (2002) – Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters*. 196, 69-81.
- BAXTER, P. J.; BAUBRON, J. C.; COUTINHO, R. (1999) – Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 95-106.
- BEAUBIEN, S. E.; CIOTOLI, G.; LOMBARDI, S. (2003) – Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123, 63-80.
- BIRCHALL, A.; MARSH, J. W. (2005) – Radon dosimetry and its implication for risk. *International Congress Series*, 1276, 81-84.
- BIRCHARD, G. F.; LIBBY, W. F. (1980) – Soil radon concentration changes preceding and following four magnitude 4.2 – 4.7 earthquakes on the San Jacinto Fault in Southern California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. B6, 3100-3106.
- BOCHICCHIO, F.; CAMPOS-VENUTI, G.; PIERMATTEI, S.; NUC CETELLI, C.; RISICA, S.; TOMMASINO, L.; TORRI, G.; MAGNONI, M.; AGNESOD, G.; SGO RBATI, G.; BONOMI, M.; MINACH, L.; TROTTI, F.; MALISAN, M.R.; MAGGIOLO, S.; GAIDOLFI, L.; GIANNARDI, C.; RONGONI, A.; LOMBARDI, M.; CHERUBINI, G.; D’OSTILIO, S.; CRISTOFARO, C.; PUGLIESE, M.; MARTUCCI, V.; CRISPINO, A.; CUZZOCREA, P.; SANTAMARIA, A. S.; CAPPAL, M. (2005) – Annual average and seasonal variations of

residential radon concentration for all the Italian Regions. *Radiation Measurements*, 40, 686-694.

BOICE Jr., J. D.; LUBIN, J. (1997) – Occupational and environmental radiation and cancer. *Cancer Causes and Control*, 8, 309-322.

BONOTTO, D. M.; PADRON-ARMADA, P. C. (2008) – Radon and progeny (^{214}Pb and ^{214}Bi) in urban water-supply systems of São Paulo State, Brazil. *Applied Geochemistry*, 23, 2829-2844.

BOOTH, B.; WALKER, G.P.L.; CROASDALE, R. (1978) – A quantitative study of five thousand years of volcanism on São Miguel, Azores. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 288, 271-319.

BOSSEW, P.; LETTNER, H. (2007) – Investigations on indoor radon in Austria, Part 1: Seasonality of indoor radon concentration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 98, 329-345.

BRUNO, N.; CALTABIANO, T.; GIAMMANCO, S.; ROMANO, R. (2001) – Degassing of SO_2 and CO_2 at Mount Etna (Sicily) as an indicator of pre-eruptive ascent and shallow emplacement of magma. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 110, 137-153.

BURTON, M.; NERI, M.; CONDARELLI, D. (2004) – High spatial resolution radon measurements reveal hidden faults on Mt. Etna. *Geophysical Research Letters*, 31, L07618.

CARDELLINI, C.; CHIODINI, G.; FRONDINI, F. (2003) – Application of stochastic simulation to CO_2 flux from soil. Mapping and quantification of gas release. *Journal of Geophysical Research*, 108 (B9), 2425.

CATALANO, R.; IMMÈ, G.; MANGANO, G.; MORELLI, D.; ROSSELLI TAZZER, A. (2012) – Indoor radon survey in Eastern Sicily. *Radiations Measurements*, 47, 105-110.

- CHAUDHURI, H.; DAS, N. K.; BHANDARI, R. K.; SEN, P.; SINHA, B. (2010) – Radon activity measurements around Bakrewars thermal springs. *Radiation Measurements*, 45, 143-146.
- CHIODINI, G.; CIONI, R.; GUIDI, M.; RACO, B.; MARINI, L. (1998) – Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13, 543-552.
- CHIRKOV, A. M.. (1975) – Radon as a possible criterion for predicting eruptions as observed at Karymsky Volcano. *Bulletin of Vulcanology*, 39, 126-131.
- CHOUBEY, V. M.; BARTARYA, S. K.; RAMOLA, R. C. (2000) – Radon in Himalayan springs: a geohydrological control. *Environmental Geology*, 39, 523-530.
- CHOUBEY, V. M.; BARTARYA, S. K.; SAINI, N. K.; RAMOLA, R. C. (2001) – Impact Of geohydrology and neotectonic activity on radon concentration in groundwater of intermontane Doon Valley, Outer Himalaya, India. *Environmental Geology*, 40, 257-266.
- CHRISTENSON, B. W.; MALMQVIST, L.; KRISTIANSSON, K.; FINLAYSON, J. B. (1988) – Soil gas trace metal transport – the geogas method applied to NZ epithermal and geothermal environments. *Proceedings of the 10th New Zealand Geothermal Workshop*, 155-160.
- CHYI, L. L.; CHOU, C.; YANG, F. T.; CHEN, C. (2001) – Continuous radon measurements in faults and earthquakes precursor pattern recognition. *Western Pacific Earth Sciences*, Vol. 1, No. 2, 227-246.
- CIGOLINI, C.; GERVINO, G.; BONETTI, R.; CONTE, F.; LAIOLO, M.; COPPOLA, D.; MANZONI, A. (2005) – Tracking precursors and degassing by radon monitoring during major eruptions at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy). *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L12308.
- CIGOLINI, C.; POGGI, P.; RIPEPE, M.; LAIOLO, M.; CIAMBERLINI, C.; DELLE DONE, D.; ULIVIERI, G.; COPPOLA, D.; LACANNA, G.; MARCHETTI, E.; PISCOPO, D.; GENCO, R. (2009) – Radon surveys and real-time monitoring at Stromboli Volcano: Influence of soil temperature, atmospheric pressure and tidal forces on ²²²Rn degassing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184, 381-388.

- CIOLINI, R.; MAZED, D. (2010) – Indoor radon concentration in geothermal areas of central Italy. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 712-716.
- CIOTOLI, G.; ETIOPE, G.; GUERRA, M.; LOMBARDI (1999) – The detection of concealed faults in the Ofanto Basin using the correlation between soil-gas fracture surveys. *Tectonophysics*, 301, 321-332.
- CIVISA (2012) – Carta de Sismicidade dos Açores, no período de 1997 a 2011.
- CLEMENTS, W.E.; WILKENING, M.H. (1974) – Atmospheric pressure effects on ^{222}Rn transport across the earth-air interface. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 79, No. 33, 5025-5029.
- CLOUVAS, A.; XANTHOS, S.; TAKOUDIS, G. (2011) – Indoor radon levels in Greek schools. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 881-885.
- COLE, P. D.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; GASPAR, J. L.; DUNCAN, A. M.; GUEST, J. E. (1995) – An historic subplinian/phreatomagmatic eruption: the 1630 AD eruption of Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69, 117-135.
- COLE, P. D.; GUEST, J. E.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; PACHECO, J. M.; GASPAR, J. L.; FERREIRA, T.; DUNCAN, A. M. (1999) – Styles of volcanism and volcanic hazards on Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 39-53.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC) (1990) - *Commission Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon (90/143/Euratom)*.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC) (2001) - *Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies (2001/928/Euratom)*.

- CONNOR, C.; HILL, B.; LAFEMINA, P.; NAVARRO, M.; CONWAY, M. (1996) – Soil ^{222}Rn pulse during the initial phase of the June-August 1995 eruption of Cerro Negro, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73, 119-127.
- COSKERAN, T.; DENMAN, A.; PHILLIPS, P.; TORNBERG, R. (2009) – A critical evaluation of the cost-effectiveness of radon protection methods in new homes in a radon Affected Area of England. *Environment International*, 35, 943-951.
- COROMINAS, J.; COPONS, R.; VILAPLANA, J. M.; ALTIMIR, J.; AMIGÓ, J. (2003) – Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30, 421-435.
- COSTA, A. (2006) – Atlas hidrogeológico das águas minerais dos Açores. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 118p.
- COUTINHO, R. M. S. (2000) – *Elementos para a Monitorização Sismovulcânica da Ilha do Faial (Açores): Caracterização Hidrogeológica e Avaliação de Anomalias de Rn Associadas a Fenómenos de Desgaseificação*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 343p.
- COX, M. E. (1980) – *Ground radon surveys for geothermal exploration in Hawaii*. A thesis submitted to the graduate division of the University of Hawaii in partial fulfillment of the requirements for the degree of the Master of Science in Geology and Geophysics, 205p.
- CROCKETT, R. G. M.; GILMORE, G. K.; PHILLIPS, P. S.; DENMAN, A. R.; GROVE-KIRKBY, C. J. (2006) – Radon anomalies preceding earthquakes which occurred in the UK, in summer and autumn 2002. *Science of the Total Environment*, 364, 138-148.
- CRUZ, J. V. (1992) – *Hidrogeologia da ilha de Santa Maria*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia Económica e Aplicada pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2 Vol., 486p.
- CRUZ, J. V.; COUTINHO, R.; CARVALHO, M. R.; OSKARSSON, N.; GISLASON, S. R. (1999) – Chemistry of waters from Furnas volcano, São Miguel, Azores: fluxes of volcanic

- carbon dioxide and leached material. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 151-167.
- CRUZ, J. V.; FREIRE, P.; COSTA, A. (2010) – Mineral waters characterization in the Azores archipelago (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190, 353-364.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983) – *Hidrologia subterránea*. Ed. Omega, 2 vol., Barcelona, 2359p.
- DAI, A.; DESSER, C. (1999) – Diurnal and semidiurnal variations in global surface wind and divergence fields. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. D24, 31109-31125.
- D'ALESSANDRO, W.; VITA, F. (2003) – Groundwater radon measurements in the Mt. Etna area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 65, 187-201.
- D'AMORE, F.; SABROUX, J.C.; ZETWOOG, P. (1978/79) – Determination of characteristics of steam reservoirs by radon-222 measurements in geothermal fluids. *PAGEOPH*, 117, 253-261.
- DAVID, M. (1977) – *Geostatistical ore reserve estimation*. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam, 364p.
- Decreto-Lei nº 156/1998 de 6 de Junho - Diário da República Nº 131 I Série A.
- Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril - Diário da República Nº 67 I Série A.
- Decreto Legislativo Regional nº 16/2009/A de 13 de Outubro - Diário da República Nº 198 1ª Série.
- DE LA CRUZ-REYNA, S. (1996) – Long-term probabilistic analysis of future explosive eruptions. In Scarpa, R. e Tilling, R. I. (Eds), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. SPRINGER, 599-629.
- DELMELLE, P.; STIX, J. (2000) – Volcanic gases. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 803-815.

- DENMAN, A. R.; GROVES-KIRKBY, N. P.; GROVES-KIRKBY, C. J.; CROCKETT, R.G.M.; PHILLIPS, P. S.; WOOLRIDGE, A. C. (2007) – Health implications of radon distribution in living rooms and bedrooms in U. K. dwellings – A case of study in Northamptonshire. *Environment International*, 33, 999-1011.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. (1998) – *GISLIB: Geostatistical software library and user's guide*. Applied Geostatistics Series, Oxford University Press, New York Oxford, 369p.
- DRAPER, N.; SMITH, H. (1981) – *Applied Regression Analysis*. 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., USA, 707p.
- DUNCAN, A. M.; QUEIROZ, G.; GUEST, J. E.; COLE P. D.; WALLENSTEIN, N.; PACHECO, J. M. (1999) – The Povoação Ingnimbrite, Furnas Vulcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 55-65.
- DURRIDGE COMPANY (2011a) – *RAD7 radon detector manual*. USA, 69p.
- DURRIDGE COMPANY (2011b) – *RAD7 RAD-H2O radon in water accessory – owner's manual*. USA, 29p.
- ETIOPE, G.; LOMBARDI, S. (1995) – Evidence for radon transport by carrier gas through faulted clays in Italy. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 193, No. 2, 291-300.
- ETIOPE, G.; LOMBARDI, S. (1996) – Laboratory simulation of geogás microbubble flow. *Environmental Geology*, 27, 226-232.
- ETIOPE, G. (1999) – Subsoil CO₂ and CH₄ and their advective transfer from faulted grassland to the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. D14, 16889-16894.
- ETIOPE, G.; MARTINELLI, G. (2002) – Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129, 185-204.

- EUROPEAN COLLABORATIVE ACTION (ECA) (1995) – Indoor air quality and its impact on man: Radon in indoor air. Report N° 15, European Commission, EUR 16123 EN.
- FALKENBACH, A.; KOVACS, J.; FRANKE, A.; JÖRGENS, K.; AMMER, K. (2005) – Radon therapy for the treatment of rheumatic diseases – review and meta-analysis of controlled clinical trials. *Rheumatol Int*, 25, 205-210.
- FERREIRA, T. (1994) – *Contribuição para o estudo das emissões gasosas associadas a processos de vulcanismo no arquipélago dos Açores*. Tese APCC, Universidade dos Açores, 183p.
- FERREIRA, T.; OSKARSSON, N. (1999) – Chemical and isotopic composition of fumarole discharge of Furnas caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 169-179.
- FERREIRA, T. (2000) – *Caracterização da actividade da ilha de São Miguel (Açores): vulcanismo basáltico recente e zonas de desgaseificação. Avaliação de riscos*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 248p.
- FERREIRA, T.; GASPAR, J. L.; VIVEIROS, F.; MARCOS, M.; FARIA, C.; SOUSA, F. (2005) – Monitoring of fumarole discharge and CO₂ soil degassing in the Azores: contribution to volcanic surveillance and public health risk assesment. *Annals of Geophysics*, Vol. 48, N.4/5, 787-796.
- FLEXSER, S.; WOLLENBERG, H. A.; SMITH, A. R. (1987) – Radon in ground water of the Long Valley Caldera, California. In Graves, B. (Ed.), *Radon in ground water*. Lewis Publishers, 131-149.
- FONT, L.; BAIXERAS, C.; MORENO, V.; BACH, J. (2008) – Soil radon levels across the Amer fault. *Radiation Measurements*, 43, S319-S323.
- FOURNIER d'ALBE, E. M. (1979) – Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of Geological Society of London*, 136, 321-326.

- FREIRE, P. (2006) – Águas minerais da ilha de São Miguel (Açores): Caracterização hidrogeológica e implicações para a monitorização vulcanológica. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 173p.
- FREIRE, P.; ANDRADE, C.; COUTINHO, R.; CRUZ, J.V. (2013 IN PRESS) - Spring geochemistry in an active volcanic environment (São Miguel, Azores): source and fluxes of inorganic solutes. *Science of the Total Environment*.
- FREUND, R.J.; WILSON, W.J. (1998) - *Regression analysis. Statistical modeling of a response variable*. Academic Press., USA 444p.
- FRUTUOSO, G. (1522-1591) – Livro quarto das Saudades da Terra. In Frutuoso, G. “*Saudades da Terra*”. 2ª Ed. Ponta Delgada, 1981, V. II.
- FU, C.-C.; YANG, T. F.; DU, J.; WALIA, V.; CHEN, Y.-G.; LIU, T.-K.; CHEN, C.-H. (2008) – Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan. *Radiation Measurements*, 43, S348-S352.
- GAO, G. W. W.; TANG, Y.H.; TAM, C. M.; GAO, X.F. (2008) – Anti-radon coating for mitigating indoor radon concentration. *Atmospheric Environment*, 42, 8634-8639.
- GARAVAGLIA, M.; BRAITENBERG, C.; ZADRO, M. (1998) – Radon monitoring in a cave of north-eastern Italy. *Phys. Chem. Earth*, Vol. 9-10, 949-952.
- GARCÍA-TALAVERA, M.; QUINTANA, B.; GARCÍA-DÍEZ, E.; FERNÁNDEZ, F. (2001) – Studies on radioactivity in aerosols as a function of meteorological variables in Salamanca (Spain). *Atmospheric Environment*, 35, 221-229.
- GARCIA-VINDAS, J. R.; MONNIN, M.M. (2005) – Radon concentration measurements in the presence of water and its consequences for Earth sciences studies. *Radiation Measurements*, 39, 319-322.

- GARZÓN, L.; GARZÓN, M. L. (2001) – Radioactivity as a significant energy source in prebiotic síntesis. *Origins of Life and Evolutions of the Biosphere*, 31. Kluwer Academic Publishers, 3-13.
- GASPAR, J. L.; FERREIRA, T.; QUEIROZ, G.; WALLENSTEIN, N.; PACHECO, J.; GUEST, J.; DUNCAN, A.; COLE, P. (1995). Evolução morfoestrutural do Vulcão das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores). *Universidade do Porto – Faculdade de Ciências Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Memória nº 4, 999-1003.
- GASPAR, J. L.; FERREIRA, T.; QUEIROZ, G.; BAUBRON, J. C.; BAXTER, P. (1998). High levels of CO₂ in the atmosphere of Furna do Enxofre lava cave (Graciosa Island, Azores): a case of public health risk. *EC Advanced Study Course 1998. Volcanic Hazard Assessment, Monitoring and Risk Mitigation*. European Commission, Environment and Climate Programme (abstract).
- GASPARINI, P.; MANTOVANI, M. S. M. (1978) – Radon anomalies and volcanic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3, 325-341.
- GAUTHIER, P.-J.; LE CLOAREC, M.-F.; CONDOMINES, M. (2000) – Degassing processes at Stromboli volcano inferred from short-lived disequilibria (²¹⁰Pb- ²¹⁰Bi- ²¹⁰Po) in volcanic gases. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102, 1-19.
- GEOTECHNICAL INSTRUMENTS (1996) – *AnagasTM CD 95 operating manual*. U.K., 23p.
- GEOTECHNICAL INSTRUMENTS (2009) – *GA2000 Range Gas Analysers Operating Manual*. U.K., 116p.
- GERLACH, T. (2011) – Volcanic versus Anthropogenic Carbon Dioxide. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 92, No. 24, 201-208.
- GIAMMANCO, S.; GURRIERI, S.; VALENZA, M. (1998) – Anomalous soil CO₂ degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna volcano (Sicily, Italy). *Bulletin of Volcanology*, 60, 252-259.
- GIAMMANCO, S.; SIMS, K. W. W.; NERI, M. (2007) – Measurements of ²²⁰Rn and ²²²Rn and CO₂ emissions in soil and fumarole gases on Mt. Etna volcano (Italy): Implications for gas

transport and shallow ground fracture. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8, Q10001.

GREEMAN, D. J.; ROSE, A. W. (1996) – Factors controlling the emanation of radon and thoron in soils of the eastern U.S.A.. *Chemical Geology*, 129, 1-14.

GROVES-KIRKBY, C. J.; DENMAN, A. R.; CROCKETT, R. G. M.; PHILLIPS P.S.; GILMORE, G. K. (2006) – Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK. *Science of the Total Environment*, 367, 191-202.

GT-ANALYTIC KEG (2003) – *Ramon 2.2 radon monitor manual*. Austria, 5p.

GUERRA, M.; LOMBARDI, S. (2001) – Soil-gas method for tracing neotectonic faults in clay basins: the Pisticci field (Southern Italy). *Tectonophysics*, 339, 511-522.

GUEST, J. E.; GASPAR, J. L.; COLE, P. D.; QUEIROZ, G.; DUNCAN, A. M.; WALLENSTEIN, N.; FERREIRA, T.; PACHECO, J.-M. (1999) – Volcanic geology of Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 1-29.

HAN, Y.; HAN, Y. (2002) – Time-variation of the near 5-month period of sunspot numbers. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 47, No. 23, 1969-1973.

HARRIS, F. J. (1978) – On the use of the windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 1, 51-83.

HASBROUCK, S. (1983) – *Radon in water and air*. Cooperative Extension Service, University of Maine, the Land and Water Resources Center, Maine Department of Human Services and Maine Medical Center Research Department. Versão on-line in: <http://inferno.asap.um.maine.edu/physics/radiation/radon.htm>.

HEILIGMANN, M.; STIX, J.; WILLIAMS-JONES, G.; LOLLAR, B. S.; GÁRZON V., G. (1997) – Distal degassing of radon and carbon dioxide on Galeras volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 267-283.

- HERNÁNDEZ, P.; PÉREZ, N.; SALAZAR, J.; REIMER, M.; NOTSU, K.; WAKITA, H. (2004) – Radon and helium in soil gases at Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131, 59-76.
- HIPÓLITO, A. (2009) – Geologia estrutural da ilha Graciosa: enquadramento no âmbito da junção tripla dos Açores. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 155p.
- HOEHN, E.; VON GUNTEN, H. R.; STAUFFER, F.; THEMISTOCLES, D. (1992) – Radon-222 as a groundwater tracer. *Environmental Science & Technology*, Vol. 26, No. 4, 734-738.
- HOEHN, E.; CIRPKA, A. O. (2006) – Assessing residence times of hyporheic ground water in two alluvial flood plains of the Southern Alps water temperature and tracers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 553-563.
- HOLLOWAY, J. R.; BLANK, J. G. (1994) – Application of experimental results to C-O-H species in natural melts. In: Carroll, M. R.; Holloway, J. R. (Ed.), *Volatiles in Magmas: Rev. Mineral*. Vol. 30, 187-230.
- HORVÁTH, Á.; BOHUS, L. S.; URBANI, F.; MARX, G.; PIRÓTH, A.; GREAVES, E. D. (2000) – Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. *Journal of Environmental Radioactivity*, 47, 127-133.
- IMMÈ, G.; LA DELFA, S.; LO NIGRO, S.; MORELLI, D.; PATANÈ, G. (2005) – Gas radon emission related to geodynamic activity on Mt. Etna. *Annals of Geophysics*, Vol. 48, No. 1, 65-71.
- IMMÈ, G.; LA DELFA, S.; LO NIGRO, S.; MORELLI, D.; PATANÈ, G. (2006a) – Soil radon concentration and volcanic activity of Mt. Etna before and after the 2002 eruption. *Radiation Measurements*, 41, 241-245.
- IMMÈ, G.; LA DELFA, S.; LO NIGRO, S.; MORELLI, D.; PATANÈ, G. (2006b) – Soil radon monitoring in the NE flank of Mt. Etna (Sicily). *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 624-629.

- INCEOZ, M.; BAYKARA, O.; AKSOY, E.; DOGRU, M. (2006) – Measurements of soil gas radon in active fault systems: A case study along the North and East anatolian fault systems in Turkey. *Radiation Measurements*, 41, 349-353.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP) (2007) – The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (extract from). In Valentin, J. (Eds), *Annals of the ICRP Publication 103*, Elsevier 35p.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP) (2009) – *Statement on Radon*. ICRP Ref 00/902/09, 2p.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. (1989) – *An introduction to applied geostatistic*. Oxford University Press, New York Oxford, 561p.
- JEAN-BAPTISTE, P.; ALLARD, P.; COUTINHO, R.; FOURRÉ, E.; FERREIRA, T.; QUEIROZ, Q.; GASPAR, J.L. (2009) – Helium isotopes in hydrothermal volcanic fluids of the Azores archipelago. *Earth and Planetary Science Letters*, 281, 70-80.
- JIRÁNEK, M.; ROVENSKÁ, K. (2010) – Limited applicability of cost-effectiveness and cost-benefit analyses for the optimization of radon remedial measures. *Journal of Hazardous Materials*, 182, 439-446.
- JONES, A. J. (1999) – Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33, 4535-4564.
- KATZ, B. G.; CATCHES, J. S.; BULLEN, T. D.; MICHEL, R. L. (1998) – Changes in the isotopic and chemical composition of ground water resulting from a recharge pulse from a sinking stream. *Journal of Hydrology*, 211, 178-207.
- KIES, A.; MAJERUS, J.; D'OREYE DE LANTREMANGE, N. (1999) – Underground radon gas concentrations related to earth tides. *Il Nuovo Cimento*, Vol. 22C, N. 3-4. Versão on-line in: http://www.ecgs.lu/html/publications/radon_gas.html.
- KING, C.-Y. (1980) – Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, 3065-3078.

- KING, C.-Y.; KING B.-S.; EVANS, W. C.; ZHANG, W. (1996) – Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, Vol. 11, 497-510.
- KITTO, M. E. (2005) – Interrelationship of indoor radon concentrations, soil-gas flux, and meteorological parameters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 264, No. 2, 381-385.
- KOZLOWSKA, B.; WALENCIK, A.; DORDA, J.; ZIPPER, W. (2010) – Radon in groundwater and dose estimation for inhabitants in Spas of the Sudety Mountain area, Poland. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 854-857.
- KRESL, M.; KLECKA M.; VANKOVÁ, V. (1993) – Radon in soils overlaying several tectonic zones of the south Bohemian Moldanubicum. *Jb. Geol. B.-A.*, 136, 799-808.
- KUMAR, A.; SING S.; MAHAJAN S.; BAJWA B. S.; KALIA R.; DHAR, S. (2009) – Earthquake precursory studies in Kangra valley of North West Himalayas, India, with special emphasis on radon emission. *Applied Radiation and Isotopes*, 67, 1904-1911.
- KUO, T.; FAN K.; KUOCHEN H.; HAN Y.; CHU H.; LEE, Y. (2006) – Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake. *Journal of Environmental Radioactivity*, 88, 101-106.
- KUO, T.; LIN, C.; FAN K.; CHANG, G.; LEWIS, C.; HAN Y.; WU Y.; CHEN W.; TSAI, C. (2009) – Radon anomalies precursory to the 2003 $M_w=6.8$ Chengkung and 2006 $M_w=6.1$ Taitung earthquakes in Taiwan. *Radiation Measurements*, 44, 295-299.
- KUO, T.; SU, C.; CHANG, G.; LIN, C.; CHENG W.; LIANG H.; LEWIS, C.; CHIANG, C. (2010) – Application of recurrent radon precursors for forecasting large earthquakes ($M_w > 6.0$) near Antung, Taiwan. *Radiation Measurements*, 45, 1049-1054.
- LABRECQUE, J. J.; CORDOVES, P. R.; ROSALES, P. A.; AUDEMARD, F.; ROMERO, G. (2001) – Monitoring of radon anomalies in the Tio Casanay and a thermal spring near the El Pilar fault shortly after the July 9, 1997 earthquake ($M_w=6.9$) in the state of Sucre (Venezuela). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 250, No. 2, 239-245.

- LABRECQUE, J. J.; CORDOVES, P. R. (2003) – Application of the relative uranium-series disequilibrium in soil to locate and/or confirm precisely active fault traces: a new technique. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 258, No. 1, 43-48.
- LA DELFA, S.; IMMÈ, G.; LO NIGRO, S.; MORELLI, D.; PATANÈ, G.; VIZZINI, F. (2007) – Radon measurements in the SE and NE flank of Mt. Etna (Italy). *Radiation Measurements*, 42, 1404-48.
- LAILOLO, M.; CIGOLONI, C.; COPPOLA, D.; PISCOPO, D. (2012) – Developments in real-time radon monitoring at Stromboli volcano. *Journal of Environmental Radioactivity*, 105, 21-29.
- LAURIER, D.; TIMARCHE, M.; MITTON, N.; VALENTY, M.; RICHARD, P.; POVEDA, S.; GELAS, J.-M.; QUESNE, B. (2004) – An update of cancer mortality among the French cohort of uranium miners: Extended follow-up and new source of data for causes of death. *European Journal of Epidemiology*, 19, 139-146.
- LÓPEZ, M. G.; SÁNCHEZ, A. M.; GÓMEZ ESCOBAR, V. (2004) – Application of ultra-low level liquid scintillation to the determination of ^{222}Rn in groundwater. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 261, No. 3, 631-636.
- LUBIN, J. H.; WANG, Z. Y.; BOICE JR., J. D.; XU, Z. Y.; BLOT W. J.; WANG, L. D.; KLEINERMAN, R. A. (2004) – Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *International Journal of Cancer*, 109, 132-137.
- MACHADO, F. (1959) – Submarine pits of the Azores plateau. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 2, No. 21, 109-116.
- MADEIRA, J.; RIBEIRO, A. (1990) – Geodynamic models for the Azores triple junction: a contribution from tectonics. *Tectonophysics*, 184, 405-415.
- MALMQVIST, L.; KRISTIANSSON, K. (1984) – Experimental evidence for an ascending microflow of geogas in the ground. *Earth and Planetary Science Letters*, 70, 407-416.

- MARCOS, M.; GASPAR, J. L.; FERREIRA, T.; VIVEIROS, F. (2003) – Cartografia da zona de desgaseificação difusa de CO₂ na área geotérmica do Pico Vermelho (ilha de S. Miguel, Açores). *Proceedings do 3º simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, Aveiro, 10 a 13 de Fevereiro, 28-33.
- MARCOS, M. (2006) – *Estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores, com base na análise de variações espaciais de CO₂ e temporais de ²²²Rn*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 147p.
- MARQUES, R. (2004) – *Contribuição para o conhecimento da instabilidade geomorfológica dos Açores: Estudo de movimentos de vertente associados a diferentes mecanismos desencadeantes*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 147p.
- MARQUES, R.; ZÊZERE, J.; TRIGO, R.; GASPAR, J. L.; TRIGO, I. (2008) – Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation. *Hydrological Processes*, 22, 478-494.
- MEHRA, R.; BADHAN, K.; KANSAL, S.; SONKAWADE, R. G. (2011) – Assessment of seasonal indoor radon concentration in dwellings of Western Haryana. *Radiation Measurements*, 46, 1803-1806.
- MIKLAVCIC, I.; RADOLIC, V.; VUKOVIC, B.; POJE, M.; VARGA, M.; STANIC, D.; PLANINIC, J. (2008) – Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor. *Applied Radiation and Isotopes*, 66, 1459-1466.
- MOORE, R. C. (1990) – Volcanic geology and eruption frequency, São Miguel, Azores. *Bulletin of Volcanology*, 52, 602-614.
- MORELLI, D.; DI MARTINO, S.; IMMÈ, G.; LA DELFA, S.; LO NIGRO, S.; PATANÈ, G. (2006) – Evidence of soil radon as a tracer of magma uprising in Mt. Etna. *Radiation Measurements*, 41, 721-725.

- MULLINGER, N. J.; PATES, J. M.; BINLEY, A. M.; CROOK, N. P. (2009) – Controls on the spatial and temporal variability of ^{222}Rn in riparian groundwater in a lowland Chalk catchment. *Journal of Hydrology*, 376, 58-69.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH) (2007) – *NIOSH pocket guide to chemical hazards*. United States Department of Health and Human Services, DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-149, 424p.
- NAZAROFF, W. W.; SEXTRO, R. G. (1989) – Technique for measuring the Indoor ^{222}Rn source potential of soil. *Environmental Science & Technology*, 23, 451-458.
- NERI, M.; BECHNCKE, B.; BURTON, M.; GALLI, G.; GIAMMANCO, S.; PECORA, E.; PRIVITERA, E.; REITANO, D. (2006) – Continuous soil radon monitoring during the July 2006 Etna eruption. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L24316.
- NERI, M.; GIAMMANCO, S.; FERRERA, E.; PATANÈ G. e ZANON, V. (2011) – Spatial distribution of soil radon as a tool to recognize active faulting on an active volcano: the example of Mt. Etna (Italy). *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 863-870.
- NEVES, L. J. P. E.; BARBOSA, S. M.; PEREIRA, A. J. S. C. (2009) – Indoor radon periodicities and their physical constraints: a study in the Coimbra region (Central Portugal). *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, 896-904.
- NISHIZAWA, S.; IGARASHI, G.; SANO, Y.; SHOTO, E.; TASAKA, S.; SASAKI, Y. (1998) – Radon, Cl^- and SO_4^{2-} anomalies in hot spring water associated with the 1995 earthquake swarm off the east coast of the Izu Peninsula, central Japan. *Applied Geochemistry*, Vol. 13, 89-94.
- OLIVER, M. A.; KHAYRAT, A. L. (2001) – A geostatistical investigation of the spatial variation of radon in soil. *Computers & Geosciences*, 27, 939-957.
- OSKARSSON, N.; PÁLSSON, K.; ÓLAFSSON, H.; FERREIRA, T. (1999) – Experimental monitoring of carbon dioxide by low power IR-sensors: soil degassing in the Furnas Volcanic Centre, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 181-193.

- PACHECO, J. (1995) – *Caracterização do depósito vulcânico Furnas-C e seu contributo para a análise do hazard associado à actividade do vulcão das Furnas*. Tese PCI, Universidade dos Açores, 128p.
- PAPASTEFANOU, C. (2010) – Variation of radon flux along active fault zones in association with earthquake occurrence. *Radiation Measurements*, 79, 25-37.
- PARIDAENS, J.; SAINT-GEORGES, L.; VANMARCKE, H. (2005) – Mitigation of a radon-rich Belgian dwelling using subslab depressurization. *Journal of Environmental Radioactivity*, 79, 25-37.
- PARKS, M. M.; CALIRO, S.; CHIODINI, G.; PYLE, D. M.; MATHER, T. A.; BERLO, K.; EDMONDS, M.; BIGGS, J.; NOMIKOU, P.; RAPTAKIS, C. (2013) – Distinguishing contributions to diffuse CO₂ emissions in volcanic areas from magmatic degassing and thermal decarbonation using soil gas ²²²Rn-δ¹³C systematics: Application to Santorini volcano, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 79, 25-37.
- PASQUIER-CARDIN, A.; ALLARD, P.; FERREIRA, T.; HATTE, C.; COUTINHO, R.; FONTUGNE, M.; JAUDON, M. (1999) – Magma-derived CO₂ emissions recorded in ¹⁴C and ¹³C content of plants growing in Furnas caldera, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 195-207.
- PEREIRA, A. J.; GODINHO, M. M.; NEVES, L. J. (2010) – On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 875-882.
- PESTANA, M. H.; GAGEIRO, J. N. (1998) – *Análise de dados para ciências sociais – A complementaridade do SPSS*. Edições Silabo, Lda. 478p.
- PINAULT, J.-L.; BAUBRON, J. C. (1997) – Signal processing of diurnal and semidiurnal variations in radon and atmospheric pressure: a new tool for accurate in situ measurements of soil gas velocity, pressure gradient, and tortuosity. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B8, 18101-18120.

- PLANINIC, J.; RADOLIC, V.; LAZANIN, Z. (2001) – Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 267-272.
- PLANINIC, J.; FAJ, D.; VUKOVIC, B.; FAJ, Z.; RADOLIC, V.; SUVELJAK, B. (2003) – Radon exposure and lung cancer. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 256, No. 2, 349-352.
- POMONIS, A.; SPENCE, R.; BAXTER, P. (1999) – Risk assessment of residential buildings for an eruption of Furnas Volcano, São Miguel, the Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 107-131.
- PRZYLIBSKI, T. A.; ZEBROWSKI, A. (1999) – Origin of radon in medicinal waters of Ladek Zdrój (Sudety Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, 46, 121-129.
- PRZYLIBSKI, T. A.; MROCZKOWSKI, K.; ZEBROWSKI, A.; FILBIER, P. (2001) – Radon-222 in medicinal groundwaters of Szczawno Zdrój (Sudety Mountains, SW Poland). *Environmental Geology*, 40 (4-5), 429-439.
- PRZYLIBSKI, T. A.; KOSZLOWSKA, B.; DORDA, J.; KIELCZAWA, B. (2002) – Radon-222 and ²²⁶Ra concentrations in mineralized groundwaters of Gorzanów (Kłodzko Basin, Sudeten Mountains, SW Poland). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 253, No. 1, 11-19.
- QUEIROZ, G.; GASPAR, J.L.; COLE, P.D.; GUEST, J.E.; WALLENSTEIN, N.; DUNCAN, A.M.; PACHECO, J. (1995) – Erupções vulcânicas no Vale das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores) na primeira metade do século XV. *Açoreana*, 8(1): 159-165.
- QUEIROZ, G. (1997) – *Vulcão das Sete Cidades (S. Miguel, Açores): História eruptiva e avaliação do Hazard*. Tese de doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 226p.
- QUINTINO, J. (1969) – Sistemas hidrotermais associados ao vulcanismo e sua prospecção com fins económicos. Aplicação à região das Furnas (S. Miguel, Açores). *Técnica*, 389, 449-472.

- RAMOLA, R. C.; CHOUBEY, V. M. (2003) – Measurement of radon exhalation rate from soil samples of Garhwal Himalaya, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 256, No. 2, 219-223.
- RAO, N. S.; SENGUPTA, D. (2010) – Seasonal levels of radon and thoron in the dwellings along southern coastal Orissa, Eastern India. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 28-32.
- REDDY, D. V.; NAGABHUSHANAM, P. (2011) – Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India. *Applied Geochemistry*, 26, 731-737.
- RILEY, W. J.; GADGIL A. J.; BONNEFOUS, Y. C.; NAZEROFF, W. W. (1996) – The effect of steady winds on radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 7, 1167-1176.
- REN, H. W.; LIU Y. M.; YANG, D. Y. (2012) – A preliminary study of post-seismic effects of radon following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake. *Radiation Measurements*, 47, 82-88.
- RESENDES, J. P. (2004) – Contribuição para o estudo dos riscos geológicos no Concelho da Povoação (S. Miguel, Açores) e suas implicações em termos de planeamento de emergência. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 149p.
- RICHON, P.; PERRIER F.; KOIRALA, B. P.; GIRAULT, F.; BHATTARAI, M.; SAPKOTA, S. N. (2011) – Temporal signatures of advective versus diffusive radon transport at a geothermal zone in Central Nepal. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 88-102.
- RINALDI, A. P.; VANDEMEULEBROUCK J.; TODESCO, M.; VIVEIROS, F. (2012) – Effects of atmospheric conditions on surface diffuse degassing. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, B11201, 1-14.
- ROWE, J.E.; KELLY M.; PRICE, L. E. (2002) – Weather system scale variation in radon-222 concentration of indoor air. *The Science of the Total Environment*, 284, 157-166.

-
- SAHOTA, H. S.; RANDHAWA, K. S.; SINGH, M.; SINGH, K. (2005) – Temperature variation of indoor and outdoor radon progeny. *Atmospheric Environment*, 39, 2991-2994.
- SAKODA, A.; ISHIMORI, Y.; HANAMOTO, K.; KATAOKA, T.; KAWABE A.; YAMAOKA, K. (2010) – Experimental and modelling studies of grain size and moisture content effects on radon emanation. *Radiation Measurements*, 45, 204-210.
- SAKODA, A.; ISHIMORI, Y.; YAMAOKA, K. (2011) – A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 1422-1435.
- SAVOVIC, S.; DJORDJEVICH, A.; TSE, P. W.; NIKEZIC, D. (2011) – Explicit finite difference solution of the diffusion equation describing the flow of radon through soil. *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 237-240.
- SCHOLZ, C. H.; SYKES, L. R.; AGGARWAL, Y. P. (1973) – Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, Vol. 181, No. 4102, 803-810.
- SCHRÖDER, C.; FRIEDRICH, K.; BUTZ, M.; KOPPISCH, D. e OTTEN, H. (2002) – Uranium mining in Germany: incidence of occupational diseases 1949-1999. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 75, 235-242.
- SCHUBERT, M.; BUERKIN, W.; PEÑA, P.; LOPEZ, A. E.; BALCÁZAR, M. (2006) – On-site determination of the radon concentration in water samples: Methodical background and results from laboratory studies and field-scale test. *Radiation Measurements*, 41, 492-497.
- SCHUMANN, R. R.; GUNDERSEN, L. C. S. (1996) – Geologic and climatic controls on the radon emanation coefficient. *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1, S439-S446.
- SCHUREMAN, R. R. (1976) – *Manual of harmonic analyses and prediction of tides*. U. S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Special publication No.98, Washington D. C.: U. S. Government Printing Office. 310p.

- SEARLE, R. (1980). Tectonic pattern of the Azores spreading centre and triple junction. *Earth and Planetary Science Letters*. 51, 415-434.
- SELVASEKARAPANDIAN, S.; SIVAKUMAR, R.; MANIKANDAN, N. M.; RAGJUNATH, V. M.; KANNAN, V.; RAJARAM, S. (2002) – A study on the radon concentration in water in Coonoor, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 252, No. 2, 345-347.
- SEMKOW, T. M. (1990) – Recoil-emanation theory applied to radon release from mineral grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 54, 425-440.
- SILVA, C. (2006) – *Estudo da desgaseificação difusa no Vulcão das Furnas (ilha de S. Miguel): o caso do ^{222}Rn* . Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 167p.
- SILVA, R.; HAVSKOV, J.; BEAN, C.; WALLENSTEIN, N. (2012) – Seismic swarms, fault plane solutions, and stress tensors for São Miguel Island central region (Azores). *Journal of Seismology*, Vol. 16, 389-407.
- SILVEIRA, D. (2002) – *Caracterização da Sismicidade Histórica da Ilha de S. Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: Contribuição para a avaliação do risco sísmico*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 149p.
- SINCLAIR, A. J. (1974) – Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration*, 3, 129-149
- SINGH, K.; SINGH, M.; SINGH, S.; SAHOTA, H. S.; PAPP, Z. (2005a) – Variation of radon (^{222}Rn) progeny concentrations in outdoor air as a function of time, temperature and relative humidity. *Radiation Measurements*, 39, 213-217.
- SINGH, S.; KUMAR, A.; SINGH, B. (2005b) – Passive integrating radon studies for environmental monitoring in Hamirpur district, Himachal Pradesh, India using solid state nuclear track detectors. *Radiation Measurements*, 39, 81-85.

- SINGH, S.; KUMAR, M.; MAHAJAN, R. K. (2005c) – The study of indoor radon in dwellings of Bathinda district, Punjab, India and its correlation with uranium and radon exhalation rate in soil. *Radiation Measurements*, 39, 535-542.
- SINGH, S.; MEHRA, R.; SINGH, K. (2005d) – Seasonal variation of indoor radon in dwellings of Malwa region, Punjab. *Atmospheric Environment*, 39, 7761-7767.
- SOUSA, F. (2003) – *Cartografia de anomalias geoquímicas associadas a processos de desgaseificação difusa no Vulcão das Furnas (S. Miguel, Açores): contribuição para a avaliação de riscos vulcânicos*. Tese de Mestrado no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 106p.
- SPENCER, J. E. (1992) – *Radon gas – A Geologic Hazard in Arizona*. Arizona Geological Survey, Down-to-Earth, Series 2, 17p.
- STEINITZ, G.; PIATIBRATOVA, O.; BARBOSA, S. M. (2007) – Radon daily signals in the Elat Granite, southern Arava, Israel. *Journal of Geophysical Research*, 112, B10211.
- STIX, J.; GAONAC'H, H. (2000) – Gas, plume and thermal monitoring. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 1141-1163.
- SUN, H.; FURBISH, D. J. (1995) – Moisture content effect on radon emanation in porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 18, 239-255.
- SWAKON, J. ; KOZAK, K.; PASZKOWSKI, M.; GRADZINSKI, R., LOSKIEWICZ, J.; MAZUR, J.; JANIĆ, M.; BOGACZ, J.; HORWACIK, T.; OLKO, P. (2005) – Radon concentration in soil gas around local disjunctive tectonic zones in the Krakow area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 78, 137-149.
- TALWANI, P.; MOORE, W. S.; CHIANG, J. (1980) – Radon anomalies and microearthquakes at Lake Jocassee, South Carolina. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. B6, 3079-3088.
- TAZIEFF, H. (1989) – Mechanisms of the Nyos carbon dioxide disaster and of so called phreatic steam eruptions. In Le Guern, F. e Sigvaldason, G. (Ed.), *The Lake Nyos Event and*

- Natural CO₂ Degassing, I. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, 109-116.
- THOMAS, D. M.; CUFF, K. E.; COX, M. E. (1986) – The association between ground gas radon variations and geologic activity in Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. B12, 12 186-12 198.
- TOLSTIKHIN, I. N.; KAMENSKY, I. L.; FORJAZ, V.; POLYAK, B. G.; KONONOV, V. I.; KUDRJAVTSEV, D. I. (1991) – Helium isotopes in the gases of São Miguel island (on the Azores Plateau origin). *Izvestiya Akad. Nauk SSSR. Ser. Geol.*, 9, 137-147.
- TÓTH, E.; DEAK, F.; GYURKÓCZA, C. S.; KASZTOVSZKY, Z. S.; KUCZI, R.; MARX, G.; NAGY, B.; OBSERSTEDT, S.; SAJÓ-BOHUS, L.; SÜKÖSD, C. S.; TOTH, G.; VAJDA, N. (1997) – Radon variations in a Hungarian village. *Environmental Geology*, 31 (1/2), 123-127.
- TOUTAIN, J.-P.; BAUBRON, J. C. (1999) – Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, 304, 1-27.
- TOUTAIN, J.-P.; BAUBRON, J. C.; FRANÇOIS, L. (2002) – Runoff control of soil degassing at an active volcano. The case of Piton de la Fournaise, Réunion Island. *Earth and Planetary Science Letters*, 197, 83-94.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR) (1993) – *Sources and effects of ionizing radiation*. Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA) (1999) – *National primary drinking water regulations; Radon-222*. Volume 64, Nº 211, 59245-59294. Versão on-line in: <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-WATER/1999/November/Day-02/>.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA) (2009a) - *A Citizen`s Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family From Radon*. EPA 402-K-09-001, 16p.

- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA) (2009b) – *Home buyer's and seller's guide to radon*. EPA 402/K-09/002, 40p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA) (2010) – *Consumer's guide to radon reduction*. EPA 402/K-10/005, 17p.
- VAN CAMP, M.; VAUTERIN, P. (2005) – Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers and Geosciences*, 31, 631-640.
- VAUTERIN, P.; VAN CAMP, M. (2011) – Tsoft Manual, version 2.1.6, release date 08-11-2011, Royal Observatory of Belgium, Bruxelles, 58p.
- VÁZQUEZ, B. F.; ADÁN, M. O.; PONCELA, L. S. Q.; FERNANDEZ C. S.; MERINO, I. F. (2011) – Experimental study of effectiveness of four mitigation solutions, based on underground depressurization, tested in prototype housing built in a high radon area in Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 378-385.
- VELOSO, B.; NOGUEIRA, J. R.; CARDOSO, M. F. (2012) – Lung cancer and indoor radon exposure in the north of Portugal – An ecological study. *Cancer Epidemiology*, 36, e26-e32.
- VIÑAS, R.; EFF-DARWICH, A.; SOLER, V.; MARTÍN-LUIS M. C.; QUESADA, M. L.; NUEZ, J. (2007) – LProcessing of radon time series in underground environments: Implications for volcanic surveillance in the island of Tenerife, Canary Islands, Spain. *Radiation Measurements*, 42, 101-115.
- VINSON, D. S.; CAMPBELL, T. R.; VENGOSH, A. (2008) – Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air. *Applied Geochemistry*, 23, 2676-2685.
- VITALIANO, D. F. (2003) – Costs and benefits of mitigating radon in drinking water. *Public Works Management & Policy*, Vol.7, No. 4; 291-303.
- VIVEIROS, F. (2003) – *Contribuição para o estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores no âmbito da monitorização sismovulcânica e da avaliação do risco: discriminação de factores que influenciam a variação de fluxo de CO₂*. Tese de Mestrado

no ramo de Geologia, especialidade Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 140p.

VIVEIROS, F.; FERREIRA, T.; VIEIRA, J. C.; SILVA, C.; GASPAR, J. L. (2008a) – Environmental influences on soil CO₂ degassing at Furnas and Fogo Volcanoes (São Miguel Island, Azores archipelago). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 883-893.

VIVEIROS, F.; FERREIRA, T.; SILVA, C.; CARDELLINI, C.; WALLENSTEIN, N.; HIPOLITO, A.; SILVA, R. (2008b) – Soil CO₂ degassing at Fogo-Congro volcanic systems (S. Miguel Island, Azores) – correlation with seismovolcanic activity and tectonic lineaments. IAVCEI 2008 *Understanding Volcanoes*, General Assembly, Reykjavik, 17- 22 Agosto, poster session 3-f P08.

VIVEIROS, F.; FERREIRA, T.; SILVA, C.; GASPAR, J. L. (2009) – Meteorological factors controlling soil gases and indoor CO₂ concentration: a permanent risk in degassing areas. *Science of the Total Environment*, 407, 1362-1372.

VIVEIROS, F. (2010) – *Soil CO₂ flux variation at Furnas Volcano (S. Miguel Island, Azores)*. Tese de doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 262p.

VIVEIROS, F.; CARDELLINI, C.; FERREIRA, T.; CALIRO, S.; CHIODINI, G.; SILVA, C. (2010) – Soil CO₂ emissions at Furnas Volcano, São Miguel Island, Azores archipelago: Volcano monitoring perspectives, geomorphologic studies, and land use planning application. *Journal of Geophysical Research*, 115, B12208, 1-17.

VIVEIROS, F.; CARDELLINI, C.; FERREIRA, T.; SILVA, C. (2012) – Contribution of CO₂ emitted to the atmosphere by diffuse degassing from volcanoes: The Furnas Volcano case study. *International Journal of Global Warming*, Vol. 4, Nos. 3-4, 287-304.

VOGT, P.R.; JUNG, W.Y. (2004). The Terceira Rift as hyper-slow, hotspot dominated oblique spreading axis: a comparison with other slow-spreading plate boundaries. *Earth and Planetary Science Letters*. 218, 77–90.

- VORONOV, A. N. (2004) – Radon-rich waters in Russia. *Environmental Geology*, 46, 630-634.
- WAKITA, H; NAKAMURA, Y.; NOTSU, K.; NOGUCHI, M.; ASADA, T. (1980) – Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkain earthquake (reports). *Science*, Vol. 207, 882-883.
- WAKITA, H; NAKAMURA, Y.; SANO, Y. (1988) – Short-term and intermediate-term geochemical precursors. *PAGEOPH*, Vol. 126, No. 2-4, 267-278.
- WALLENSTEIN, N. (1999) – *Estudo da história recente e do comportamento eruptivo do vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores)*. Tese de doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Universidade dos Açores, 266p.
- WIEGAND, J. (2001) – A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters. *Environmental Geology*, 40, 949-963.
- WILLIAMS-JONES, G.; RYMER, H. (2000) – Hazards of volcanic gases. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 997-1004.
- WILLIAMS-JONES, G.; STIX, J.; HEILIGMANM, M.; CHARLAND, A.; LOLLAR, B. S.; ARNER, N.; GARZÓN V., G.; BARQUERO, J.; FERNANDEZ, E. (2000) – A model of diffuse degassing at three subduction-related volcanoes. *Bull Volcanoll*, 62, 130-142.
- WOLLENBERG, H. A.; SMITH, A. R.; MOSIER, D. F.; FLEXSER, S.; CLARK, M. (1985) – Radon-222 in groundwater of the Long Valley Caldera, California. *PAGEOPH*, Vol. 122, 327-339.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2008) – *Guidelines for drinking-water quality: incorporating 1st and 2nd addende Volume 1 – Recommendations*. World Health Organization, 515p.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2009) – *WHO handbook on indoor radon, a public health perspective*. 3rd Edition. In Zeeb, H. e Shannoun, F. (Ed.), World Health Organization, 94p.

- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2010) – *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. World Health Organization, 454p.
- WYSOCKA, M.; KOTYRBA, A.; CHALUPNIK, S.; SKOWRONEK, J. (2005) – Geophysical methods in radon risk studies. *Journal of Environmental Radioactivity*, 82, 351-362.
- YAMAMOTO, S. (1995) – *Volcano body springs in Japan*. Kokon-Shoin Co. Ltd., 264p.
- YANG, T. F.; WALIA, V.; CHYI, L. L.; FU, C. C.; CHEN, C.-H.; LIU, T. K.; SONG, S. R.; LEE, C. Y.; LEE, M. (2005) – Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan. *Radiation Measurements*, 40, 496-502.
- YU, K. N.; LAU, B. M. F.; NIKEZIC, D. (2006) – Assessment of environmental radon hazard using human respiratory tract models. *Journal of Hazardous Materials*, 132, 98-110.
- ZBYSZEWSKY, G.; MOITINHO D'ALMEIDA F.; VEIGA FERREIRA, O.; TORRE DE ASSUNÇÃO, C. (1958) – *Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia explicativa da folha "B" da ilha de São Miguel (Açores)*. Serviços Geológicos de Portugal, 37p.

CATARINA PAULA PACHECO DA SILVA

**ESTUDO DA DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA DE ^{222}Rn : IMPLICAÇÕES
EM TERMOS DE MONITORIZAÇÃO SISMOVULCÂNICA, RECURSOS
GEOTÉRMICOS E SAÚDE PÚBLICA**

ANEXOS



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2013

ANEXO I

**VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS
PARA O PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 2005 E 2010 E
CAMPANHAS DE CARTOGRAFIA DE RADÃO REALIZADAS**

VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS PARA O PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE
2005 E 2010 E CAMPANHAS DE CARTOGRAFIA DE RADÃO REALIZADAS

1. Parâmetros meteorológicos obtidos pelos sensores da estação GFUR2

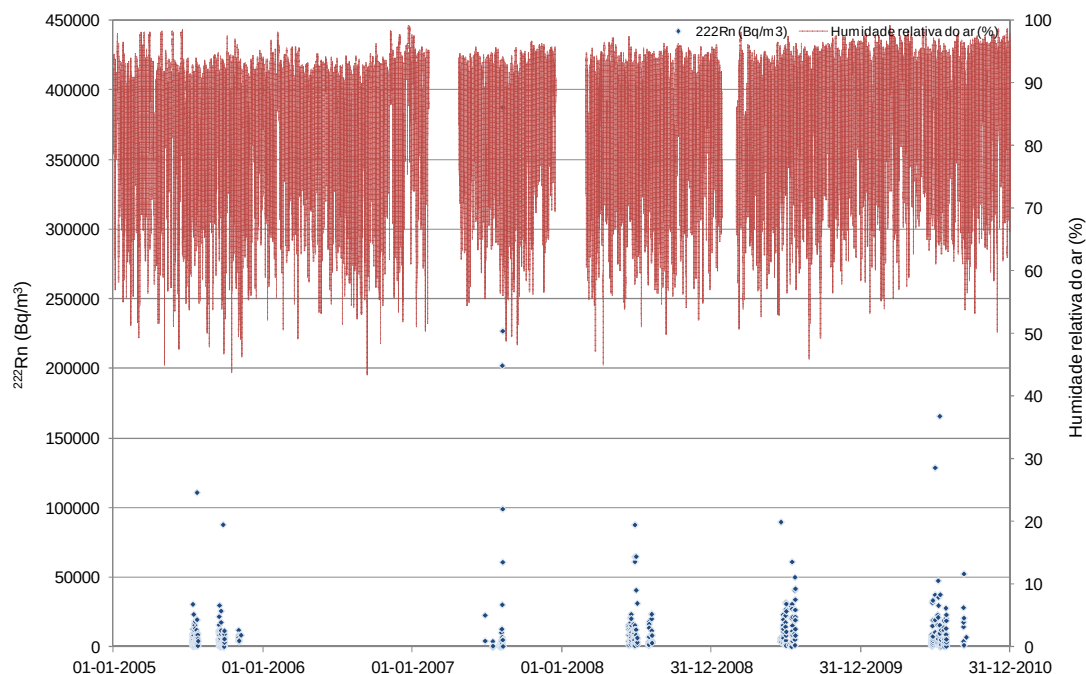


Figura I.41 – Variação temporal da humidade relativa do ar no período compreendido entre 2005 e 2010 e campanhas de cartografia de ^{222}Rn realizadas.

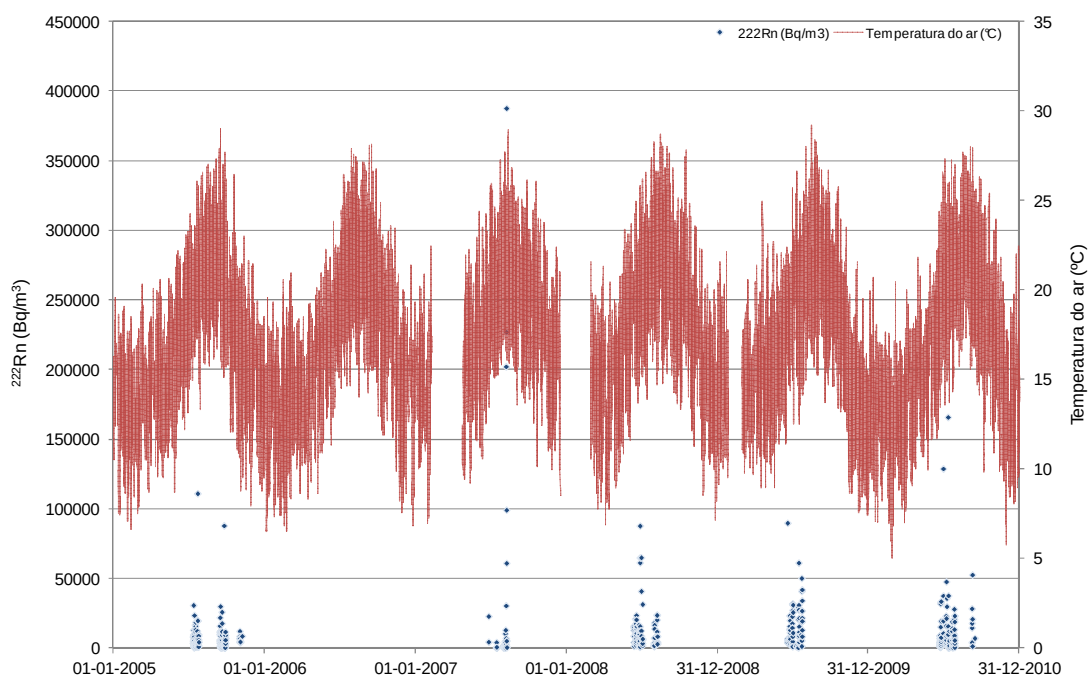


Figura I.42 – Variação temporal da temperatura do ar no período compreendido entre 2005 e 2010 e campanhas de cartografia de ^{222}Rn realizadas.

VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS PARA O PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE
2005 E 2010 E CAMPANHAS DE CARTOGRAFIA DE RADÃO REALIZADAS

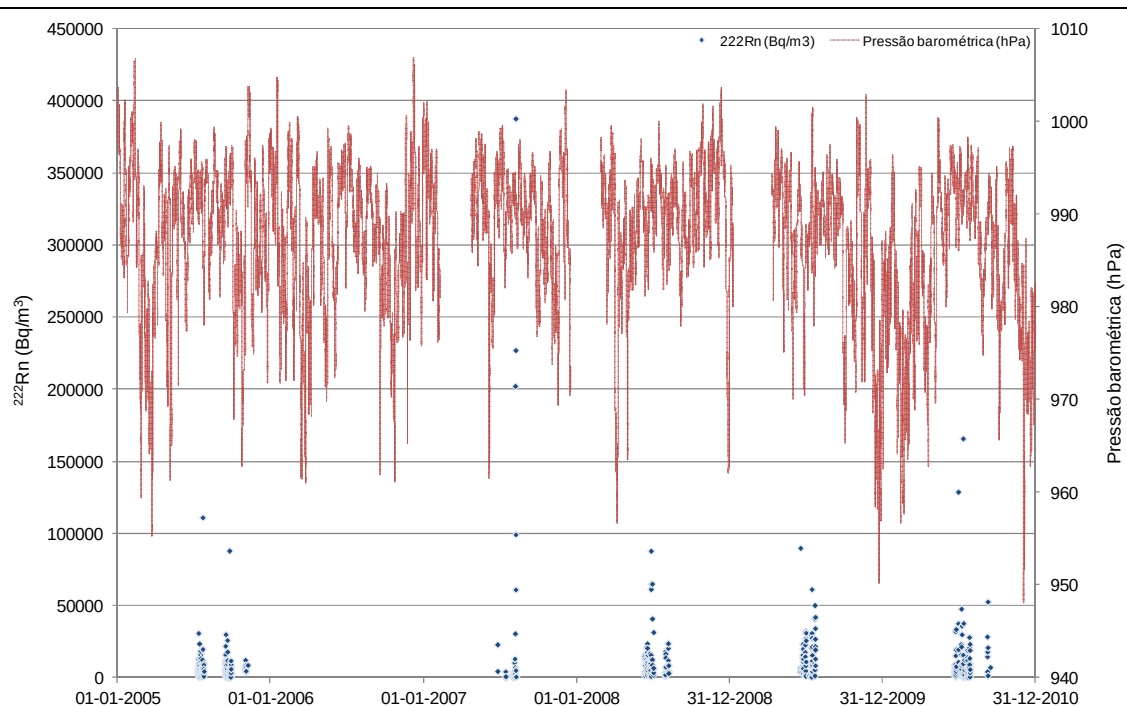


Figura I.43 – Variação temporal da pressão barométrica no período compreendido entre 2005 e 2010 e campanhas de cartografia de ^{222}Rn realizadas.

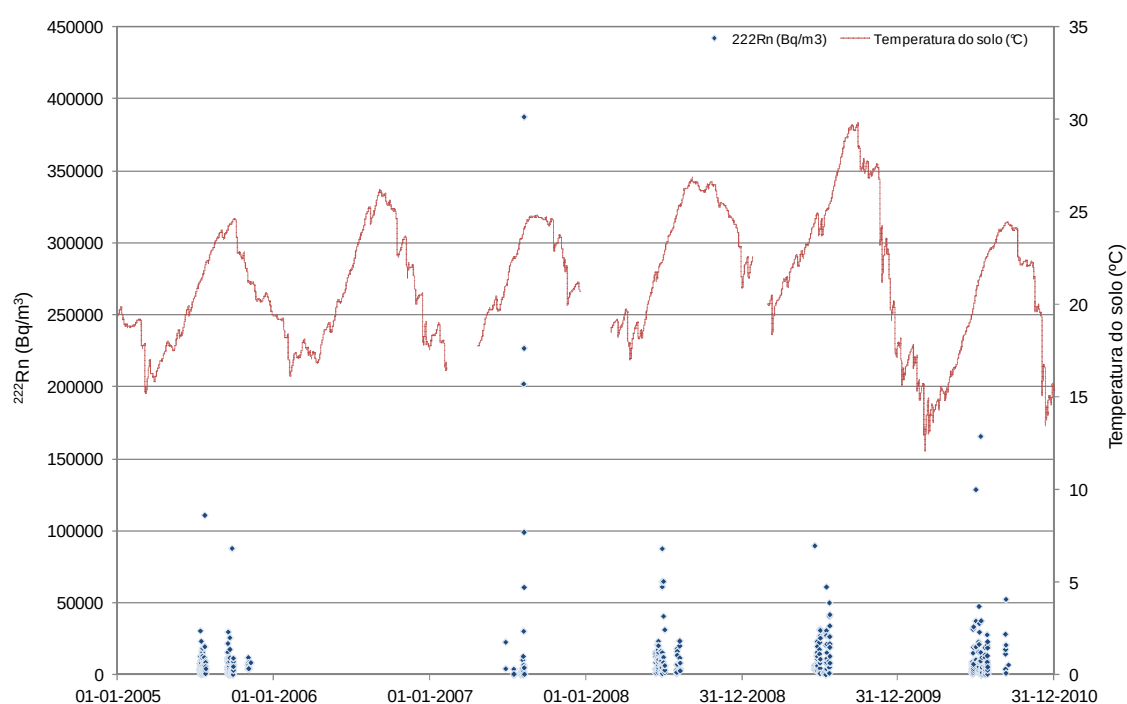


Figura I.44 – Variação temporal da temperatura do solo no período compreendido entre 2005 e 2010 e campanhas de cartografia de ^{222}Rn realizadas.

VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS PARA O PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE
2005 E 2010 E CAMPANHAS DE CARTOGRAFIA DE RADÃO REALIZADAS

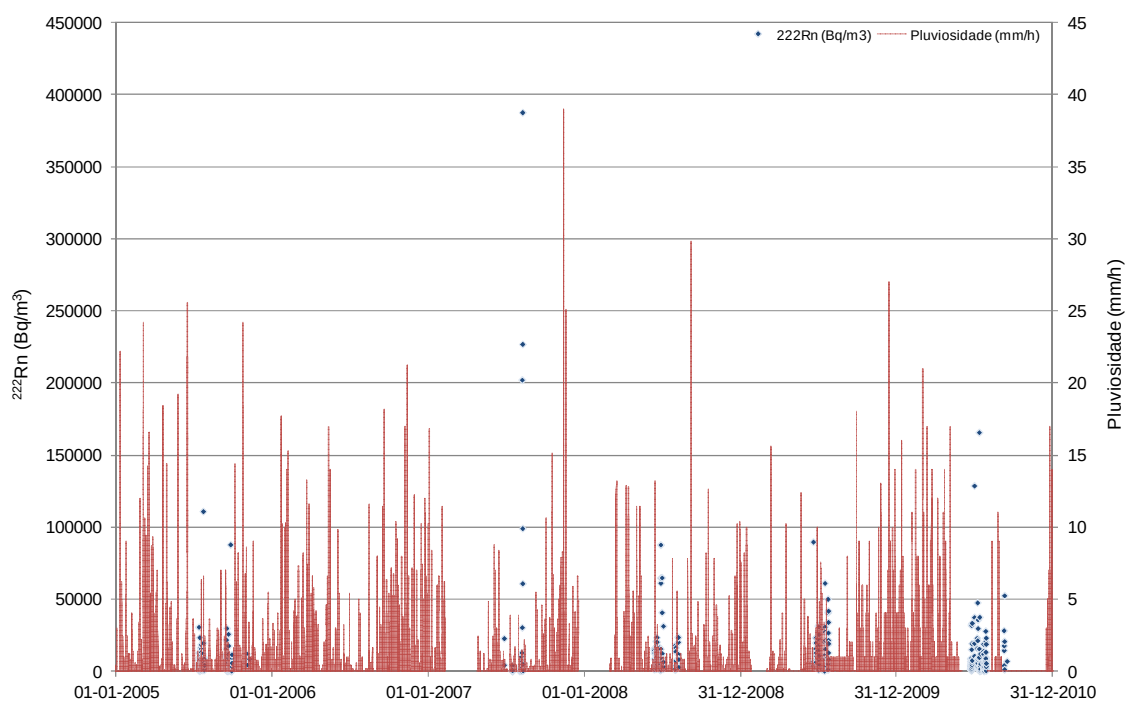


Figura I.45 – Variação temporal da pluviosidade no período compreendido entre 2005 e 2010 e campanhas de cartografia de ^{222}Rn realizadas.

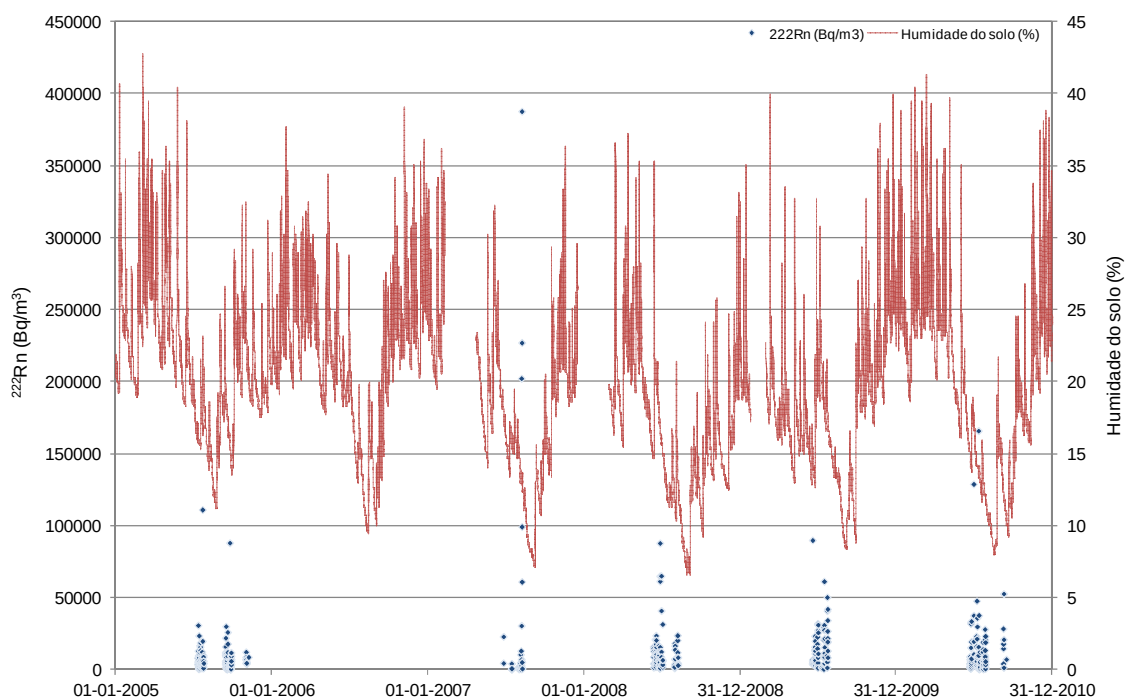


Figura I.46 – Variação temporal da umidade do solo no período compreendido entre 2005 e 2010 e campanhas de cartografia de ^{222}Rn realizadas.

VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS PARA O PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE
2005 E 2010 E CAMPANHAS DE CARTOGRAFIA DE RADÃO REALIZADAS

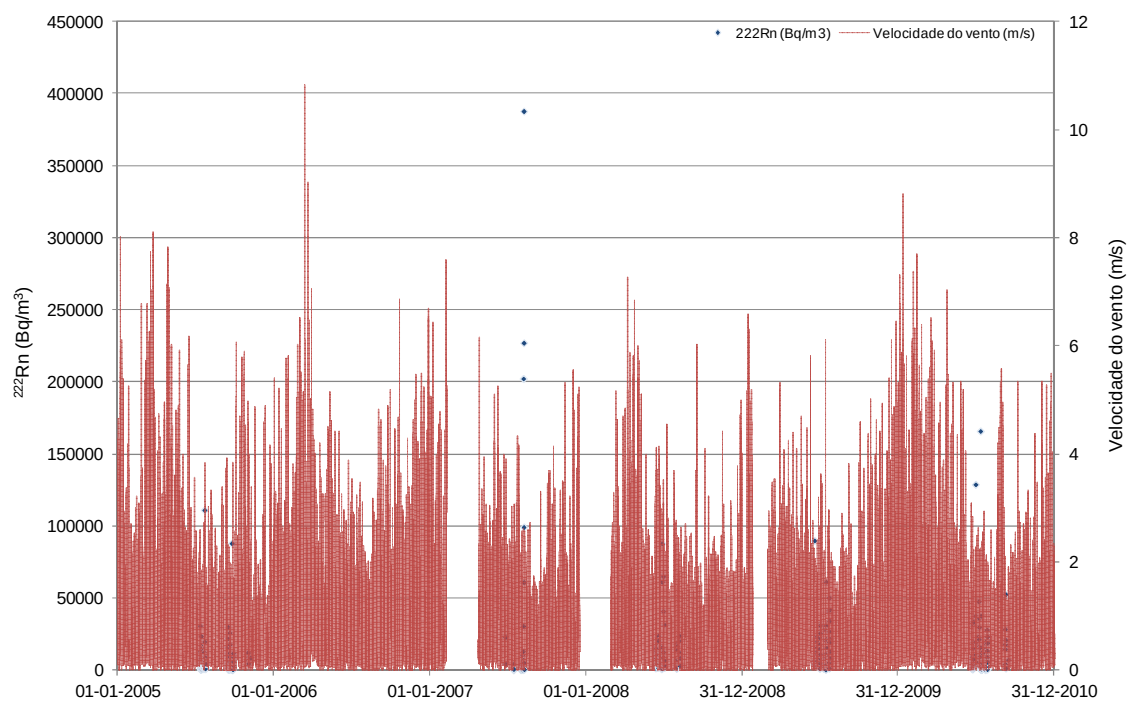


Figura I.47 – Variação temporal da velocidade do vento no período compreendido entre 2005 e 2010 e campanhas de cartografia de ^{222}Rn realizadas.

ANEXO II

TESTE À NORMALIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS (MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA NO SOLO)

1. Local de Amostragem 1 - Jardim do Centro Termal das Furnas

Tabela II.48 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto no ponto de amostragem 1.

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. do teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-18,427	2,558		-7,204	0,00		
Pressão barométrica	0,019	0,002	0,144	7,869	0,00	0,033	1,162
Humidade relativa do ar	0,037	0,006	0,109	6,403	0,00	0,010	1,009
Humidade do solo	-0,037	0,006	-0,110	-5,961	0,00	0,010	1,170

Variável dependente: Log_{10} da concentração de ^{222}Rn no solo

Número total de observações: 3283

Somatório do R^2 Ajustado: 0,053

Teste F: 61,105 0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

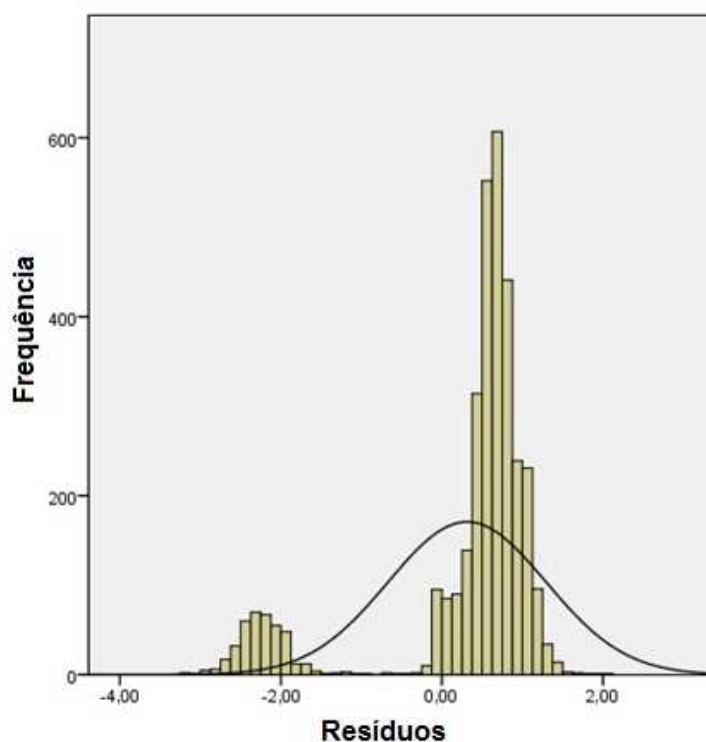


Figura II.1 – Histograma dos resíduos obtidos no ponto de amostragem 1.

2. Local de Amostragem 2 - Junto ao Campo Fumarólico da Freguesia

Tabela II.2 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto no ponto de amostragem 2.

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. do teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	4,868	0,126		38,515	0,00		
Velocidade do vento	-0,033	0,005	-0,242	-7,055	0,00	0,072	1,014
Temperatura do ar	-0,031	0,005	-0,226	-6,589	0,00	0,050	1,014

Variável dependente: Log_{10} concentração de ^{222}Rn no solo

Número total de observações: 762

Somatório do R^2 Ajustado: 0,122

Teste F: 52,819

0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

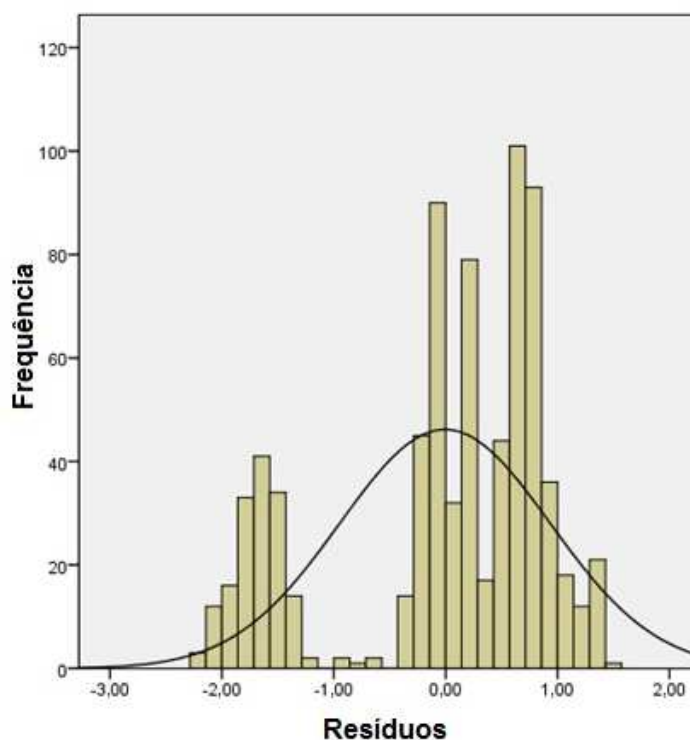


Figura II.2 – Histograma dos resíduos obtidos no ponto de amostragem 2.

3. Local de Amostragem 3 - Junto ao Campo Fumarólico da Lagoa

Tabela II.3 – Análise de regressão múltipla do modelo proposto no ponto de amostragem 3.

Variável independente	Coefficiente B	Erro padrão B	Coefficiente β	Teste t	Sign. do teste t *	Incremento R^2 ajustado	VIF
Constante	-1,264	0,081		-15,539	0,00		
Temperatura do solo	0,185	0,003	0,510	62,023	0,00	0,237	1,424
Fluxo de CO ₂	-0,042	0,003	-0,117	-14,244	0,00	0,013	1,038

Variável dependente: Log₁₀ concentração de ²²²Rn no solo

Número total de observações: 11566

Somatório do R² Ajustado: 0,250

Teste F: 1926

0,00**

* Significância estatística da correlação entre cada variável independente e a variável dependente

** Significância estatística do modelo

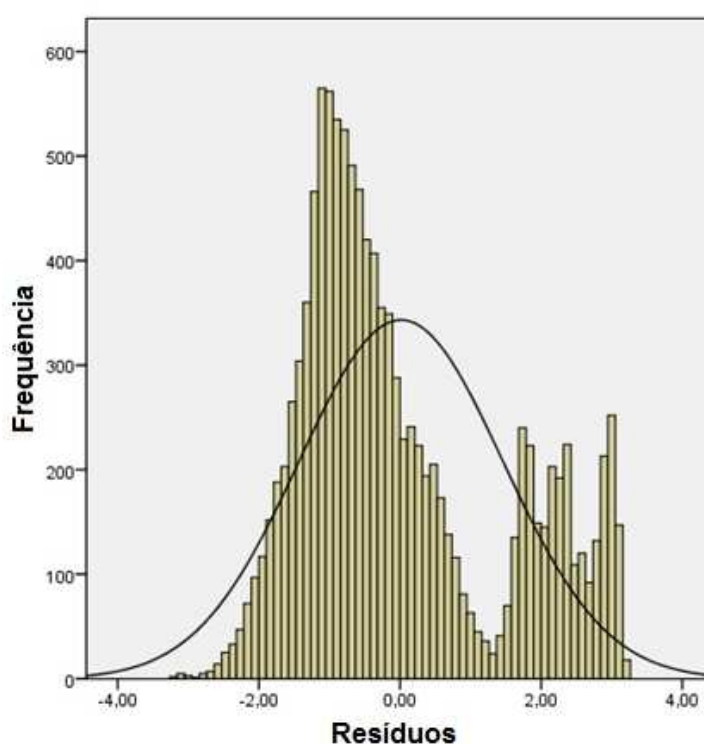


Figura II.3 – Histograma dos resíduos obtidos no ponto de amostragem 3.

ANEXO III

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

1. Local de Amostragem 1 - Jardim do Centro Termal das Furnas

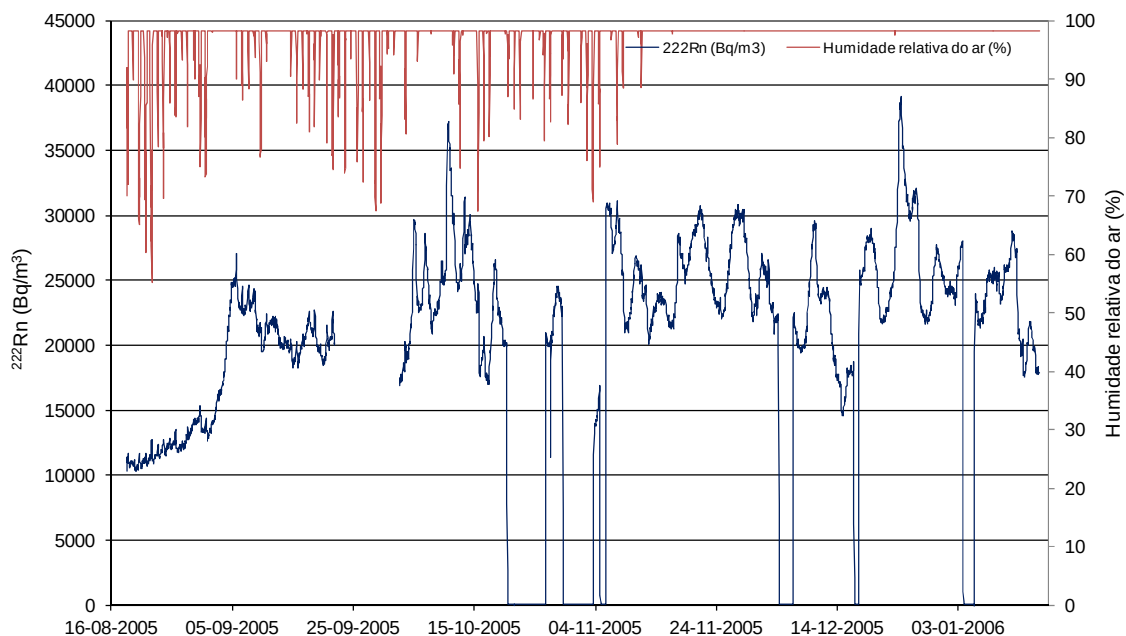


Figura III.49 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da humidade relativa do ar no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

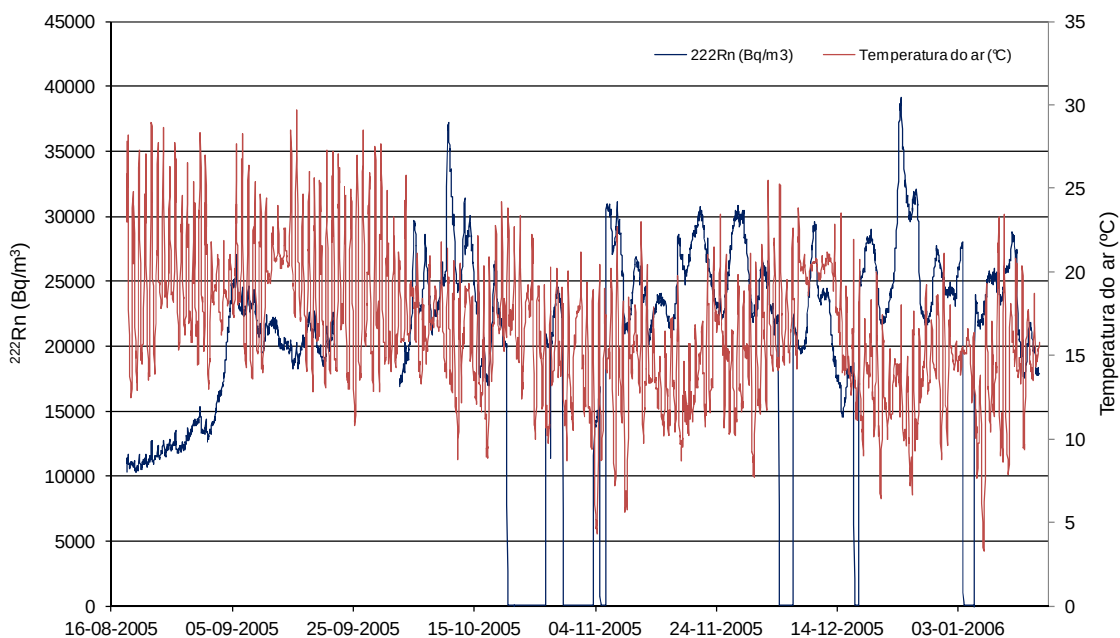


Figura III.50 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da temperatura do ar no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

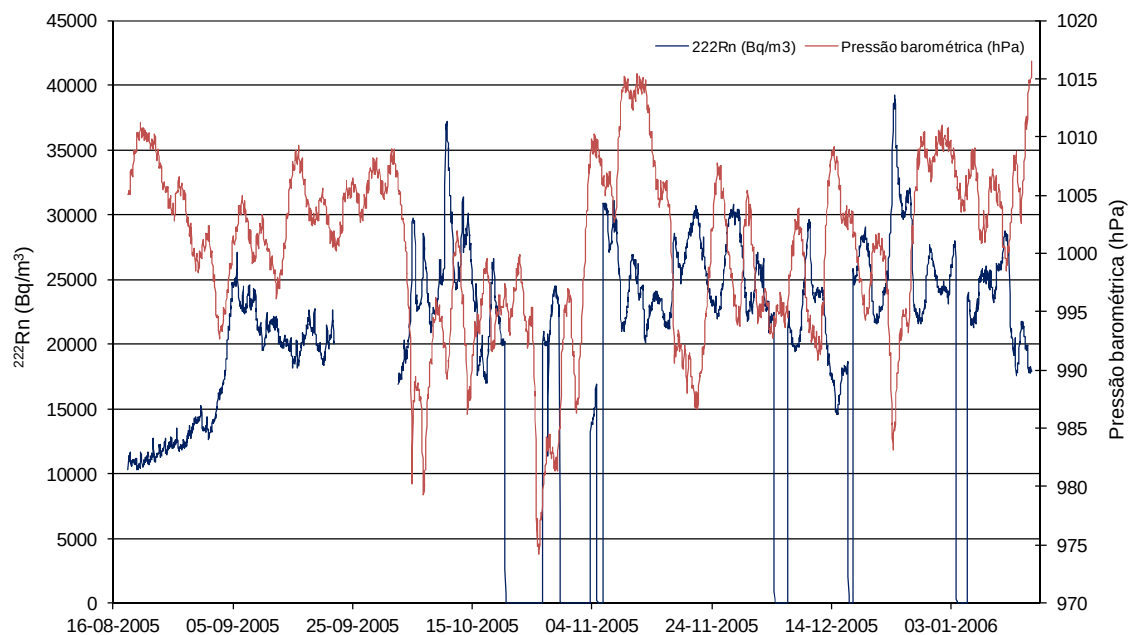


Figura III.51 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pressão barométrica no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

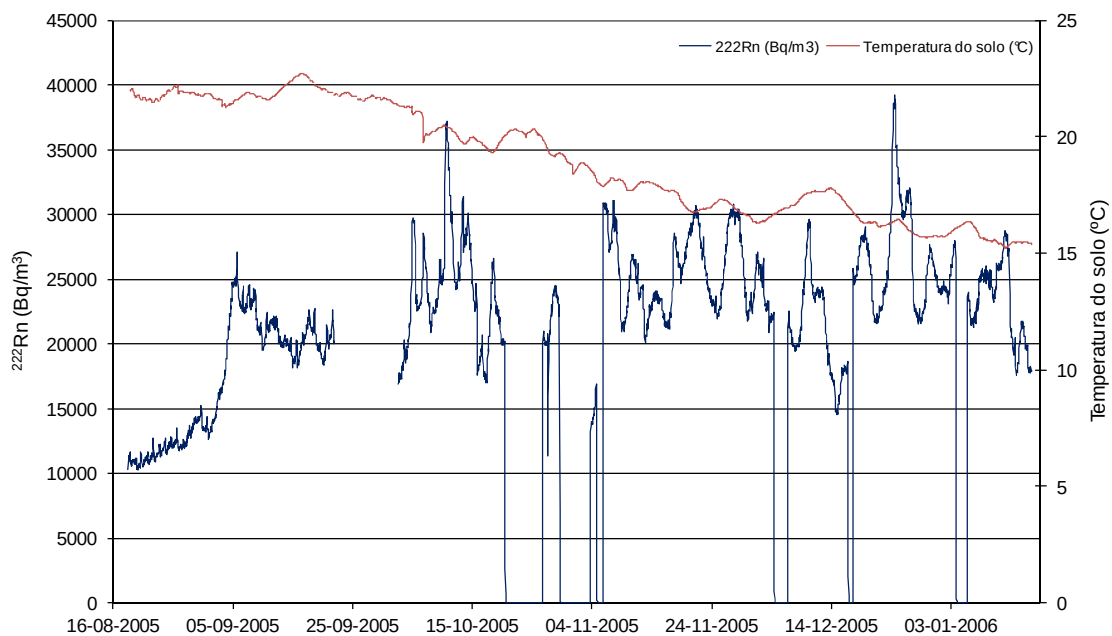


Figura III.52 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da temperatura do solo no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

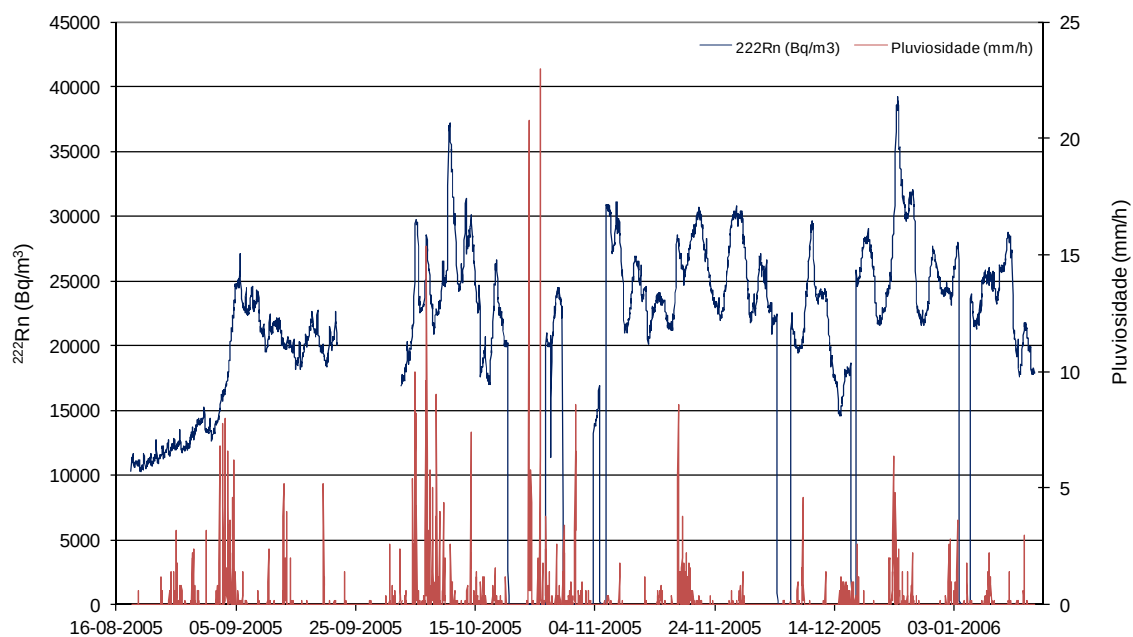


Figura III.53 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pluviosidade no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

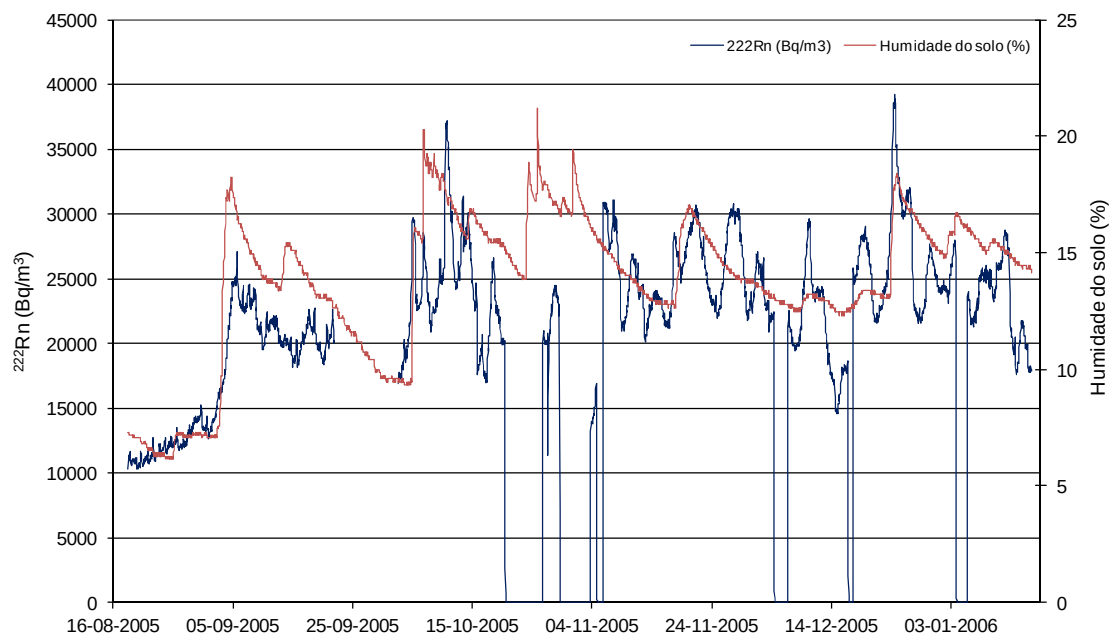


Figura III.54 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da humidade do solo no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

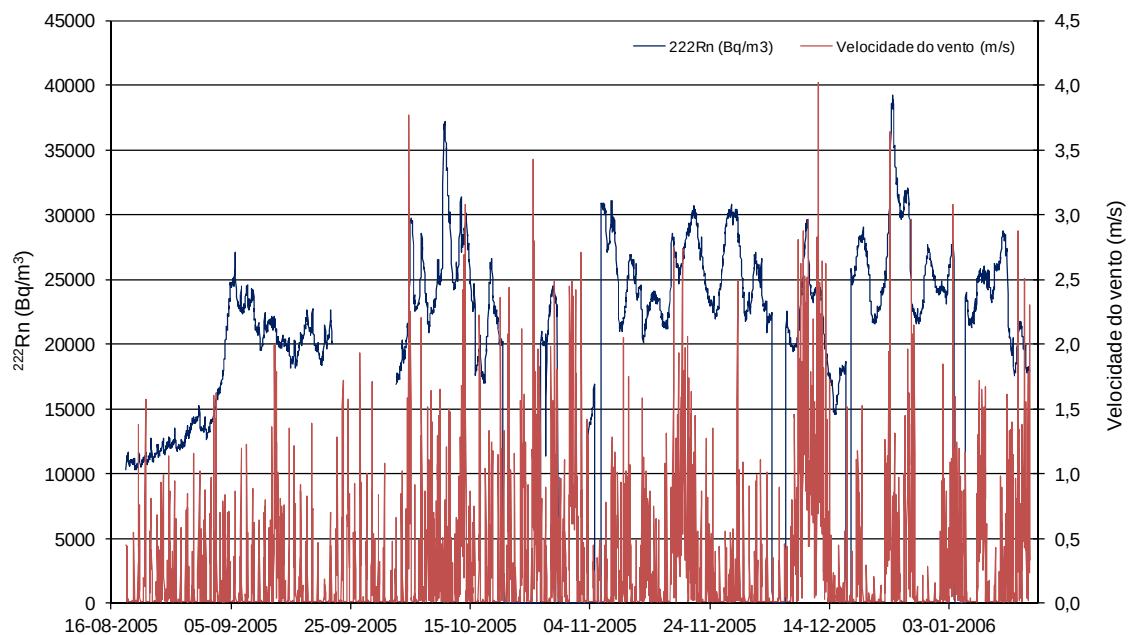


Figura III.55 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da velocidade do vento no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

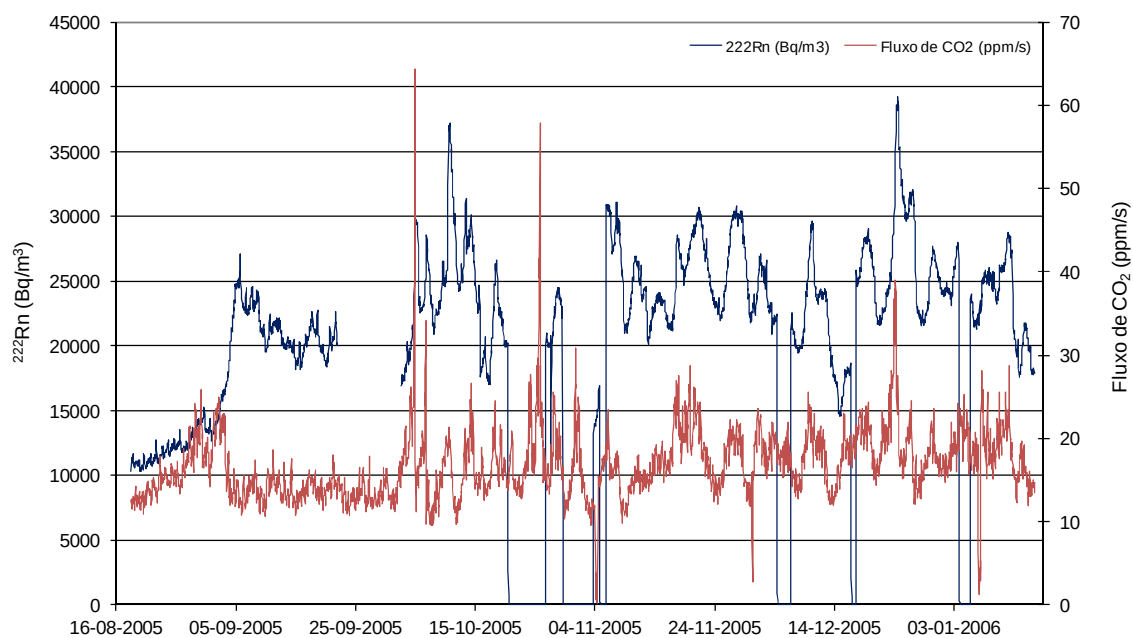


Figura III.56 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 1 (modificado de Silva, 2006).

2. Local de Amostragem 2 - Junto ao Campo Fumarólico da Freguesia

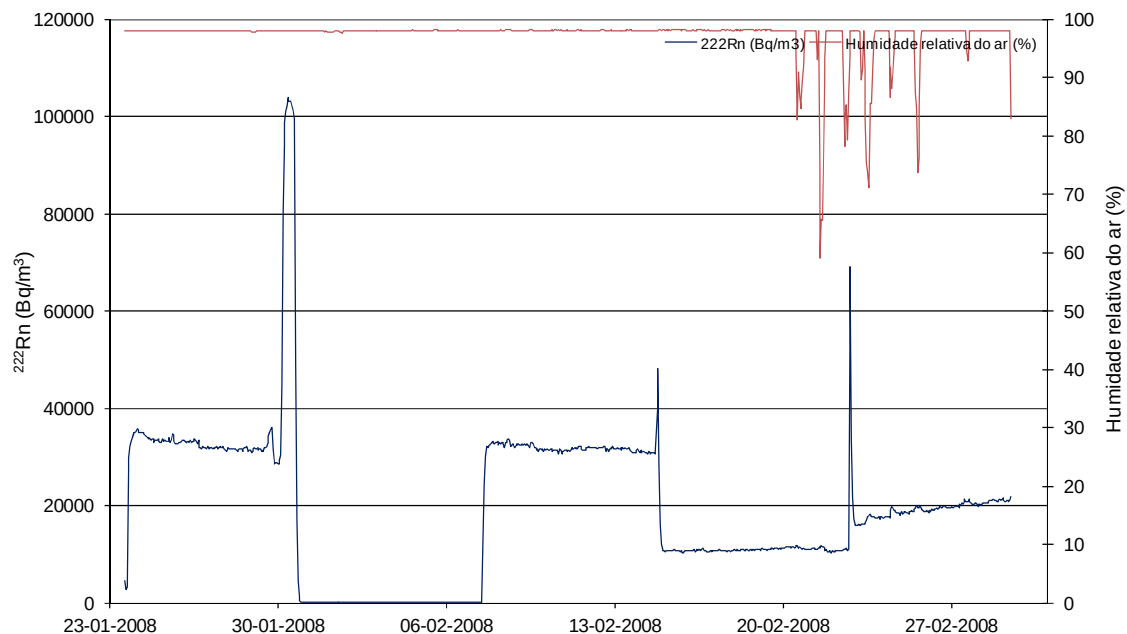


Figura III.57 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da humidade relativa do ar no ponto de amostragem 2.

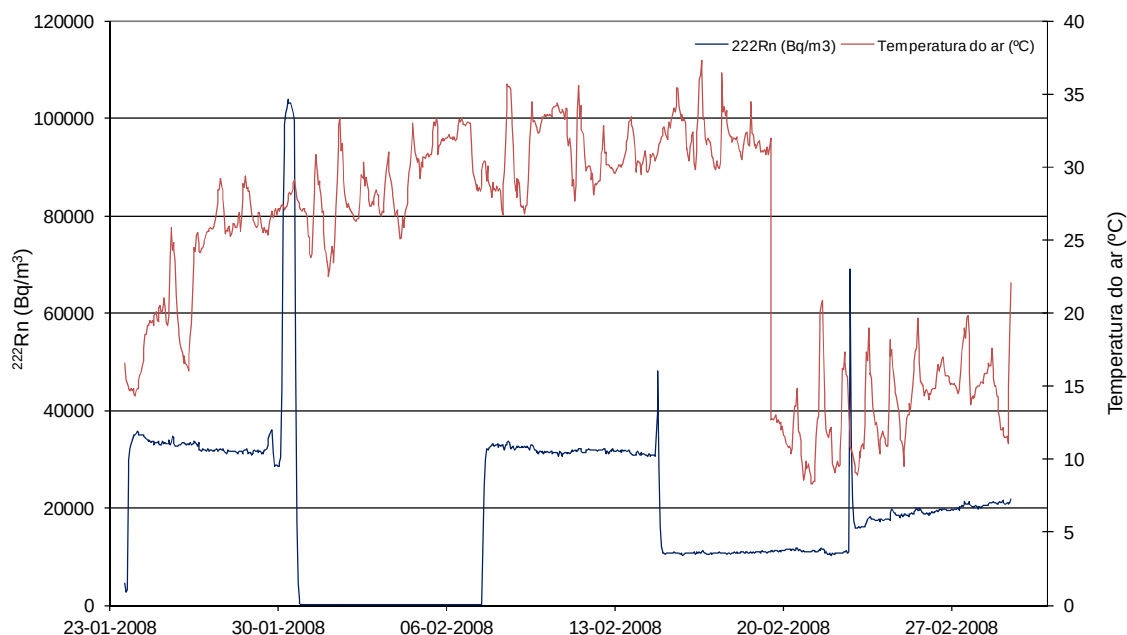


Figura III.58 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da temperatura do ar no ponto de amostragem 2.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

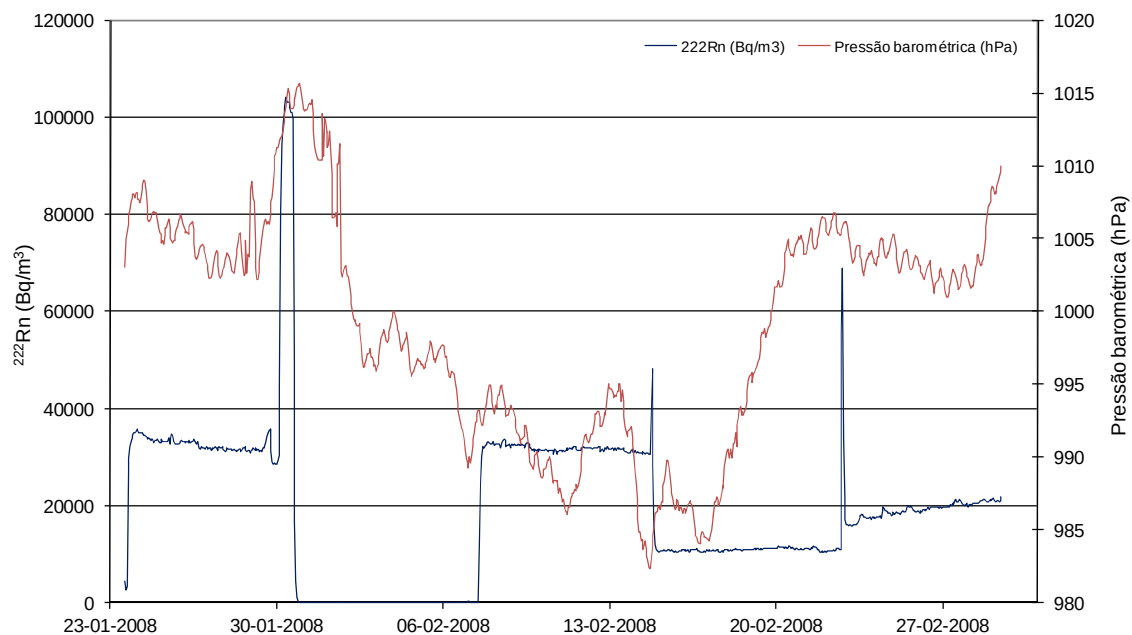


Figura III.59 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pressão barométrica no ponto de amostragem 2.

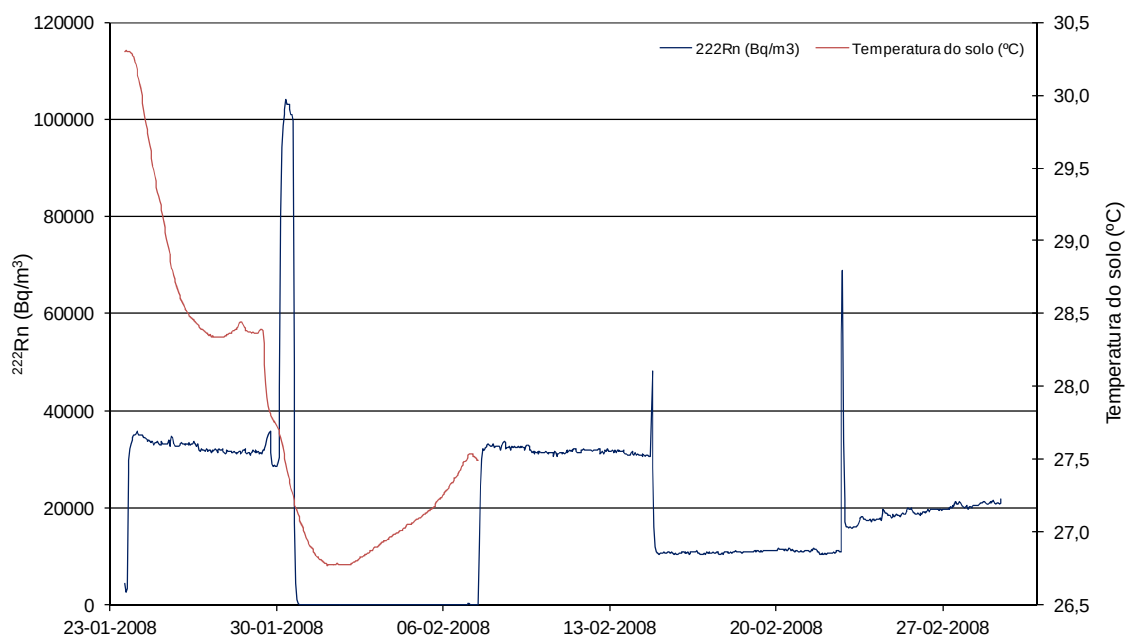


Figura III.60 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da temperatura do solo no ponto de amostragem 2.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

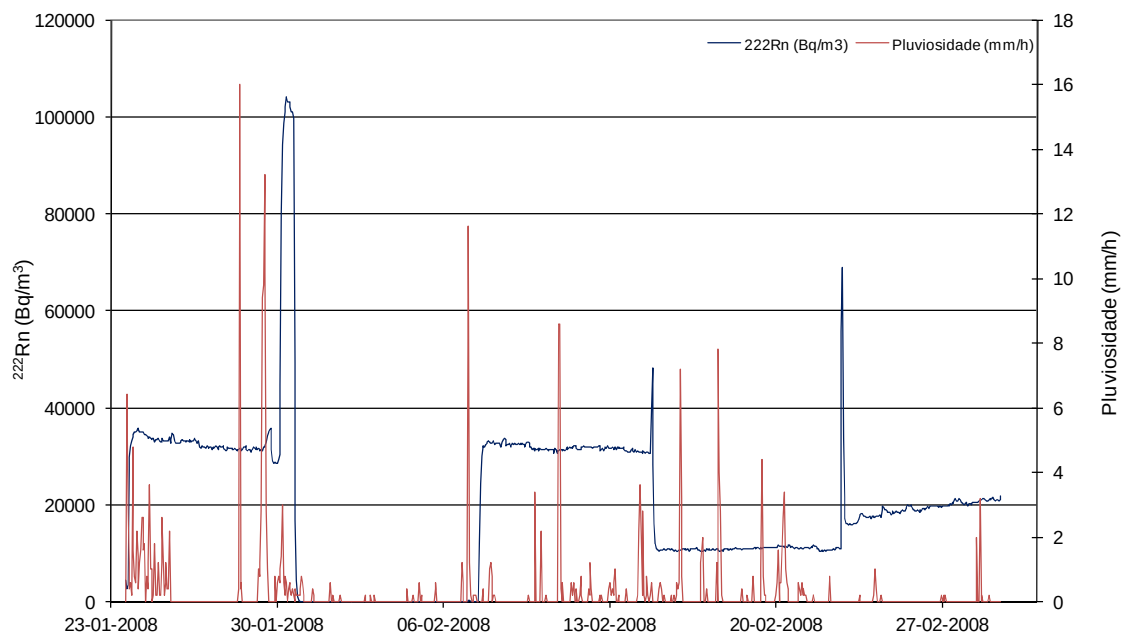


Figura III.61 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pluviosidade no ponto de amostragem 2.

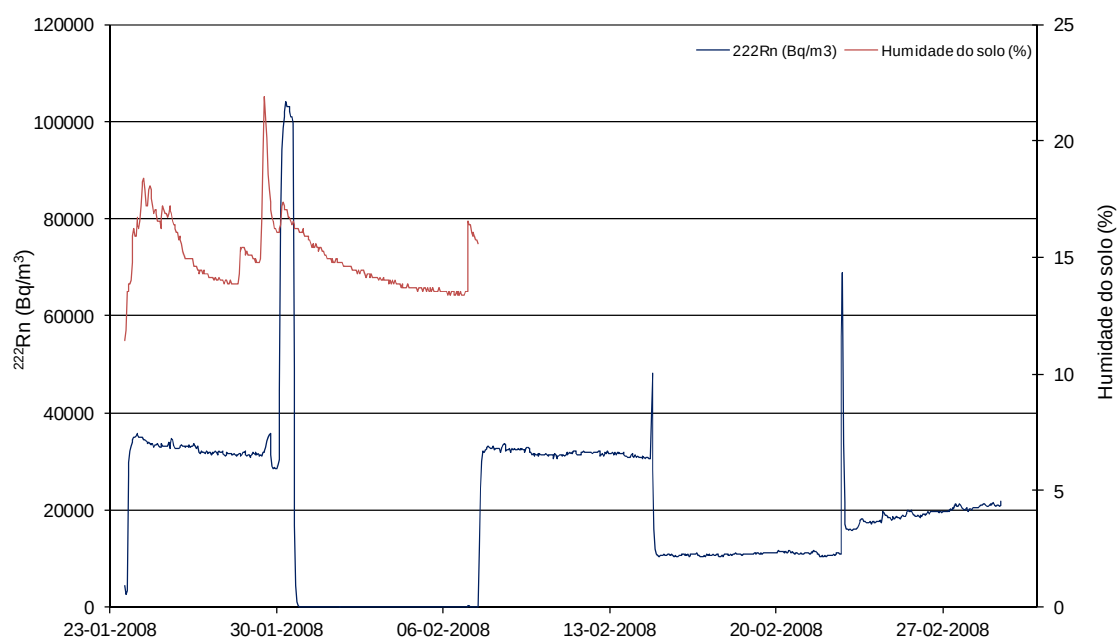


Figura III.62 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da humidade do solo no ponto de amostragem 2.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

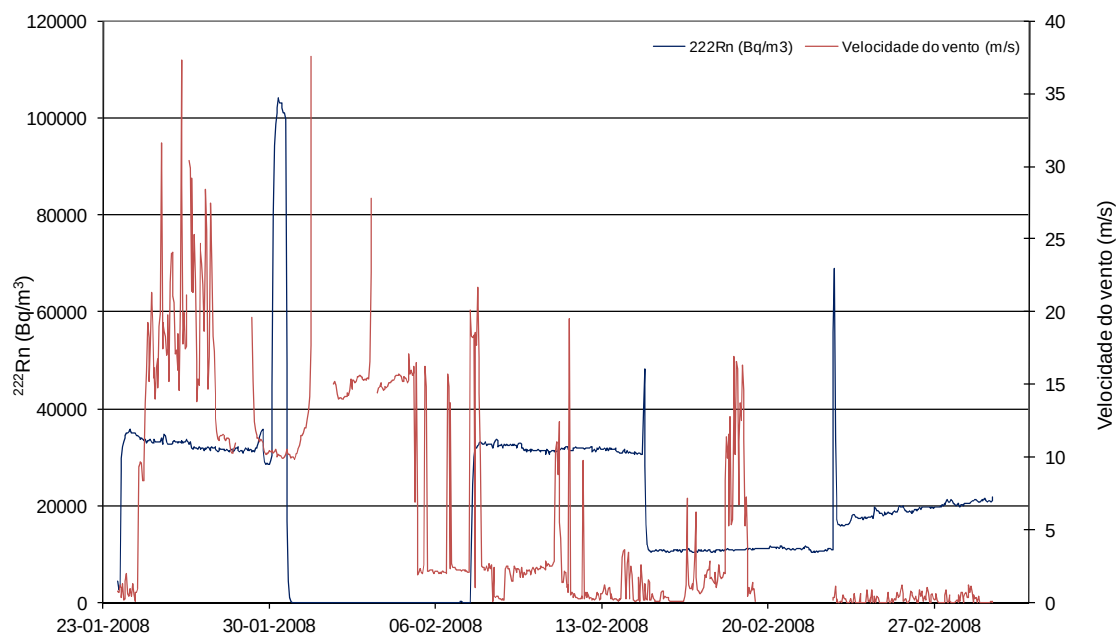


Figura III.63 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da velocidade do vento no ponto de amostragem 2.

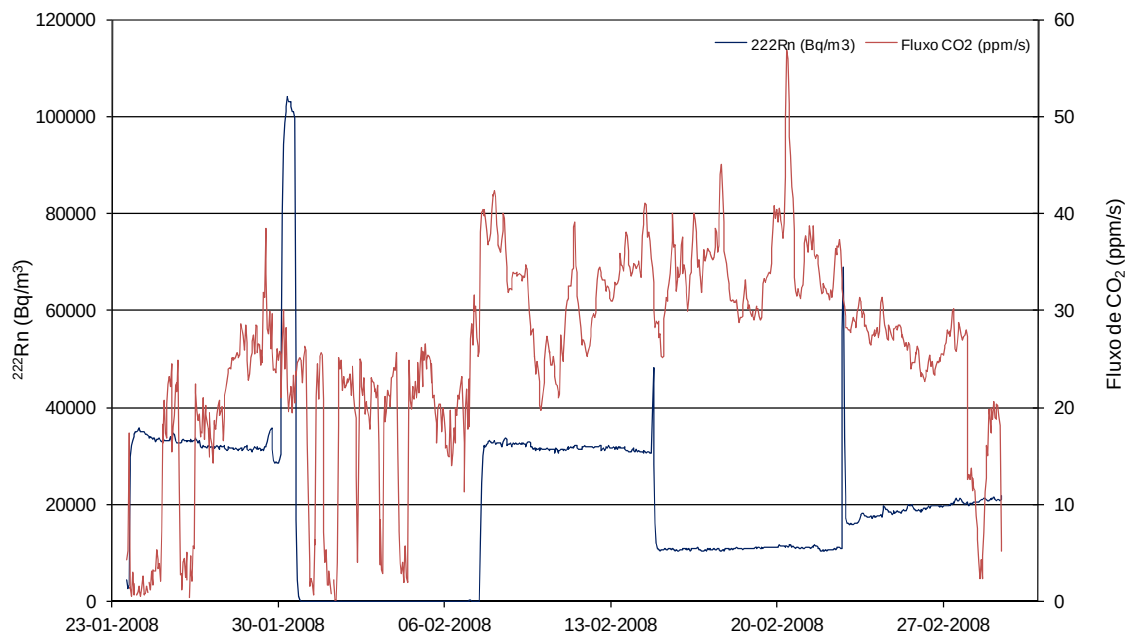


Figura III.64 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 2.

3. Local de Amostragem 3 - Junto ao Campo Fumarólico da Lagoa

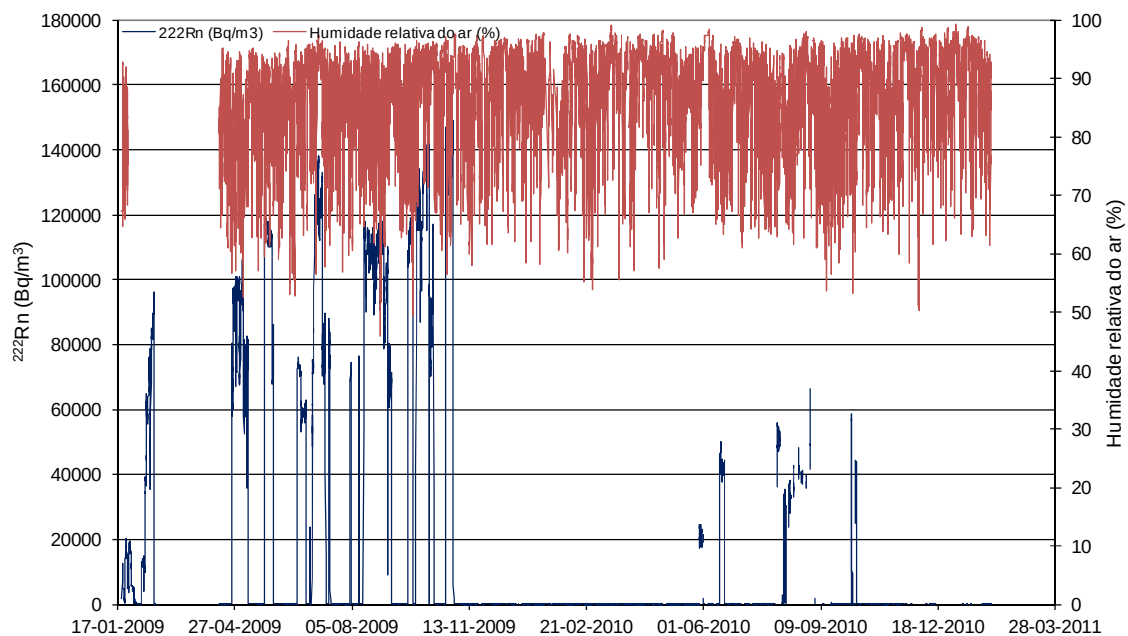


Figura III.65 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da umidade relativa do ar no ponto de amostragem 3.

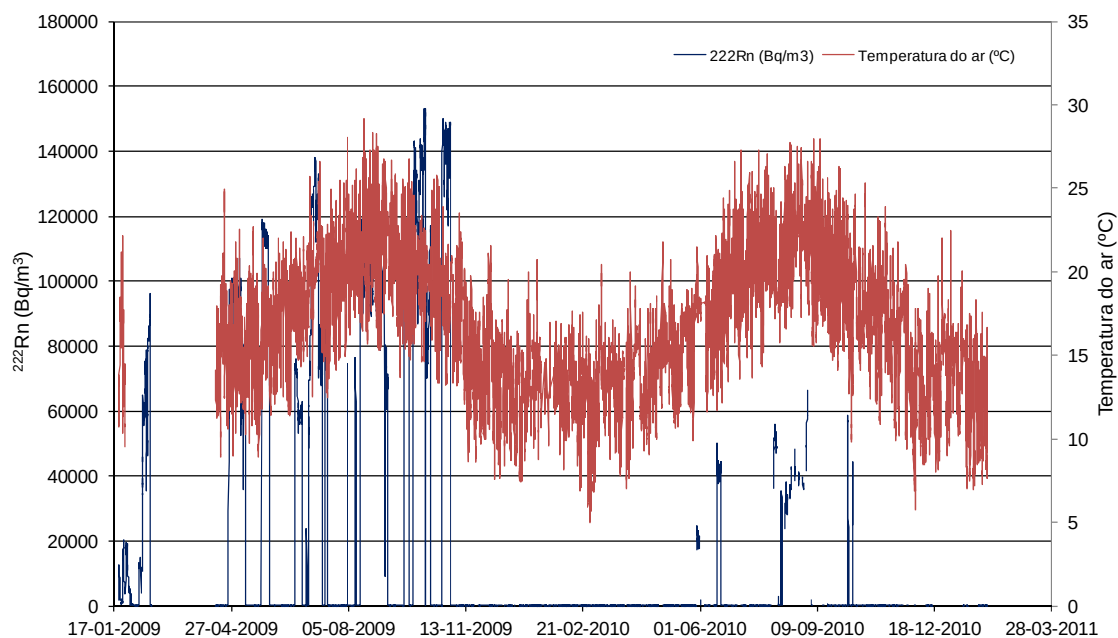


Figura III.66 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da temperatura do ar no ponto de amostragem 3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

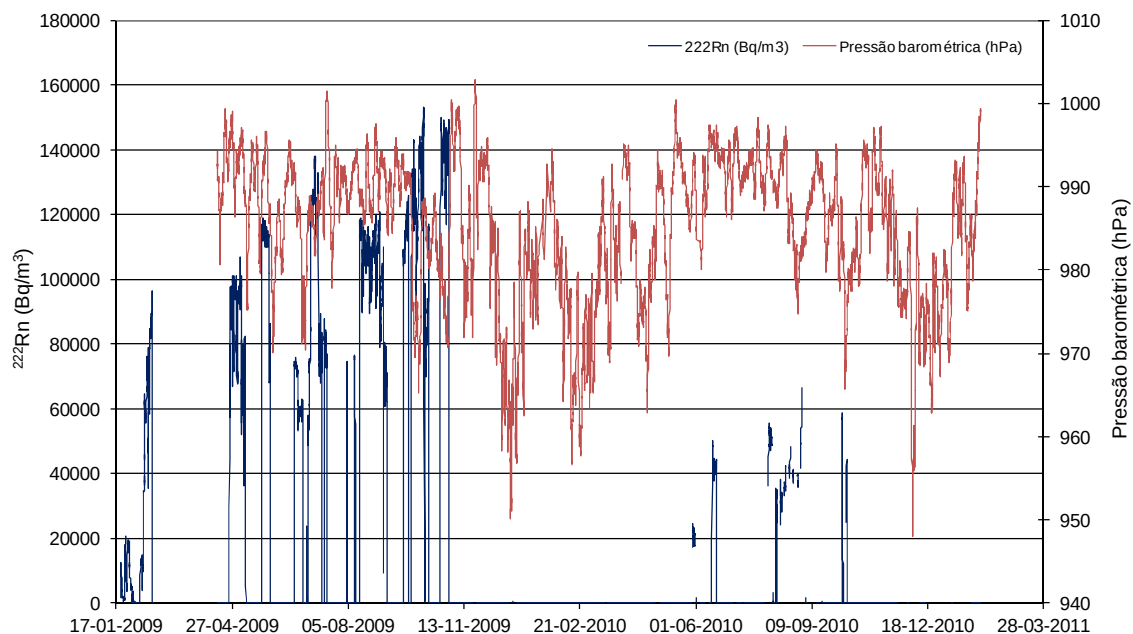


Figura III.67 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pressão barométrica no ponto de amostragem 3.

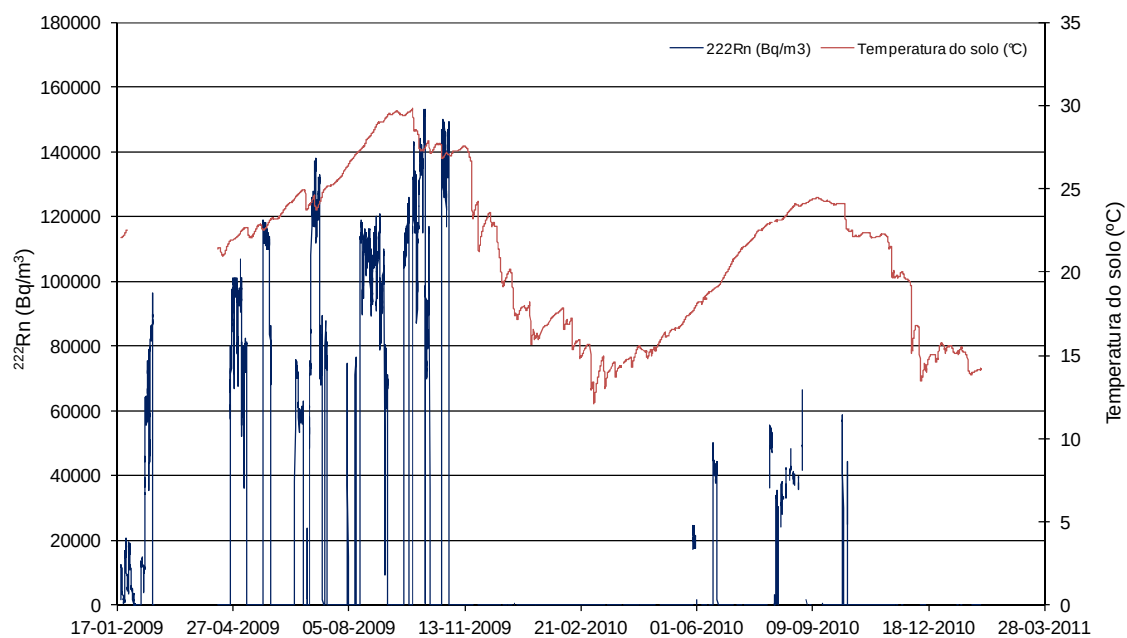


Figura III.68 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da temperatura do solo no ponto de amostragem 3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

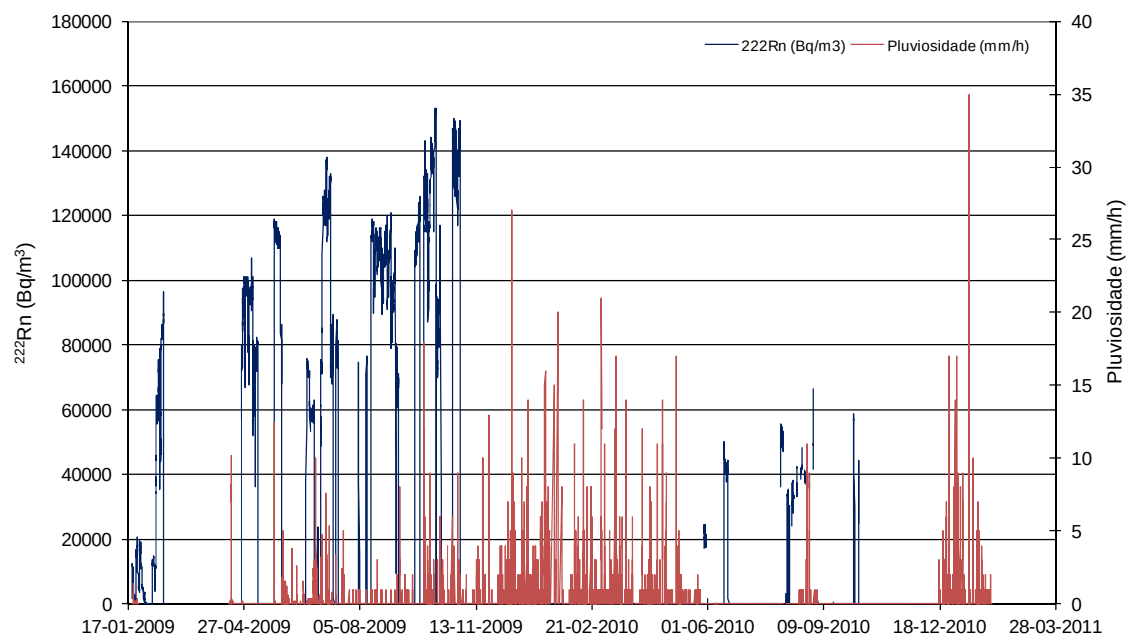


Figura III.69 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da pluviosidade no ponto de amostragem 3.

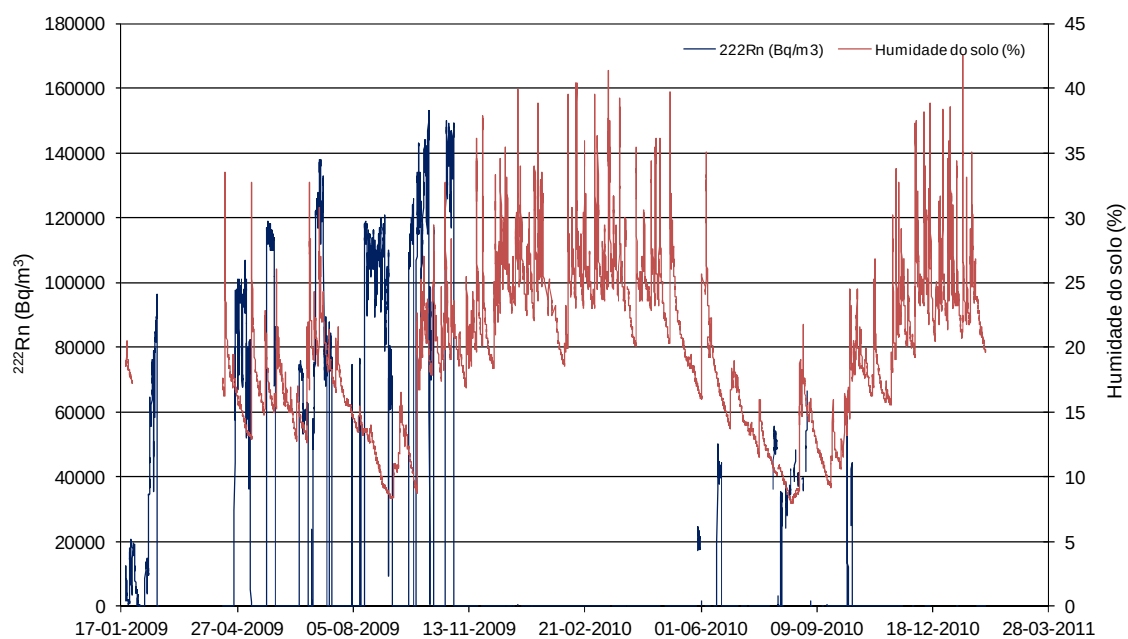


Figura III.70 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da humidade do solo no ponto de amostragem 3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

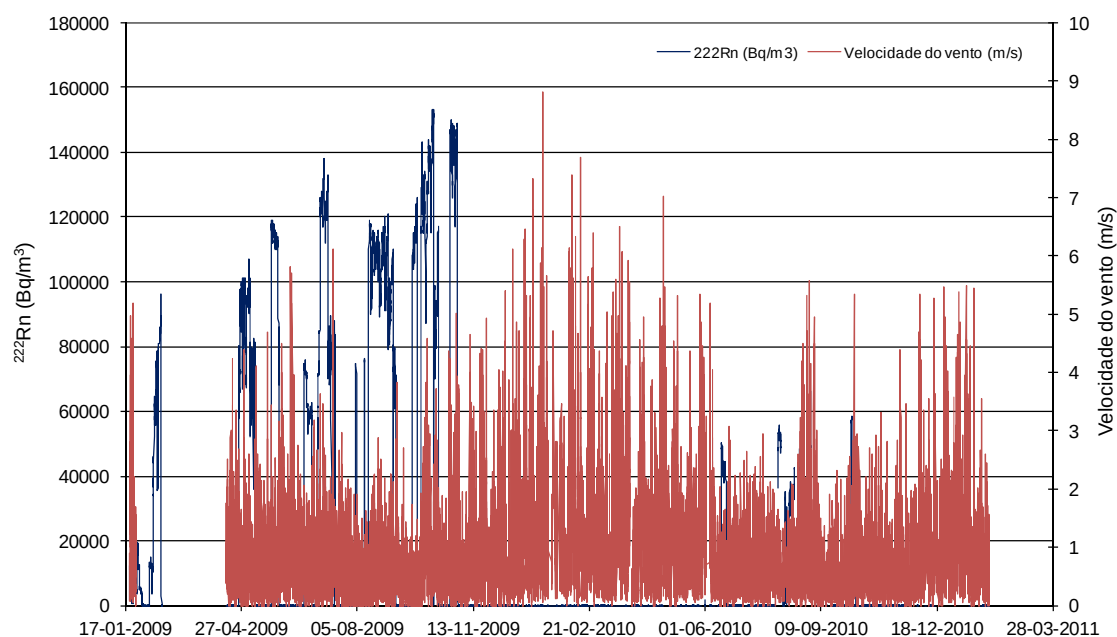


Figura III.71 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no solo e da velocidade do vento no ponto de amostragem 3.

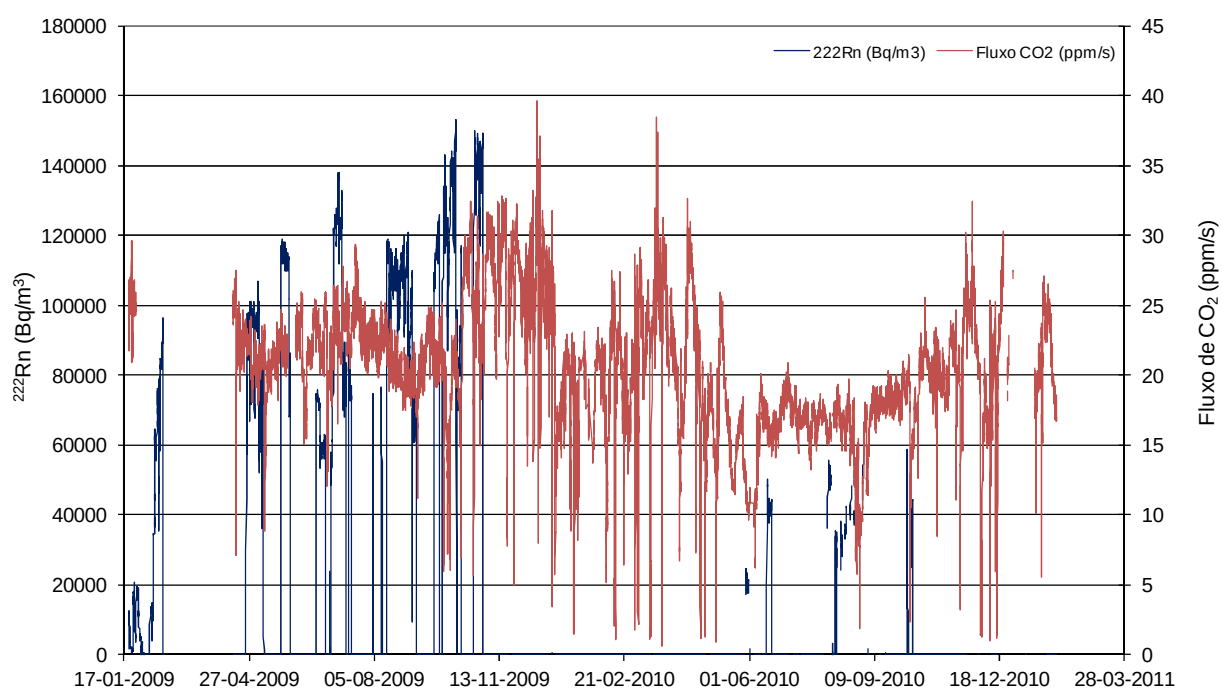


Figura III.72 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO SOLO E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

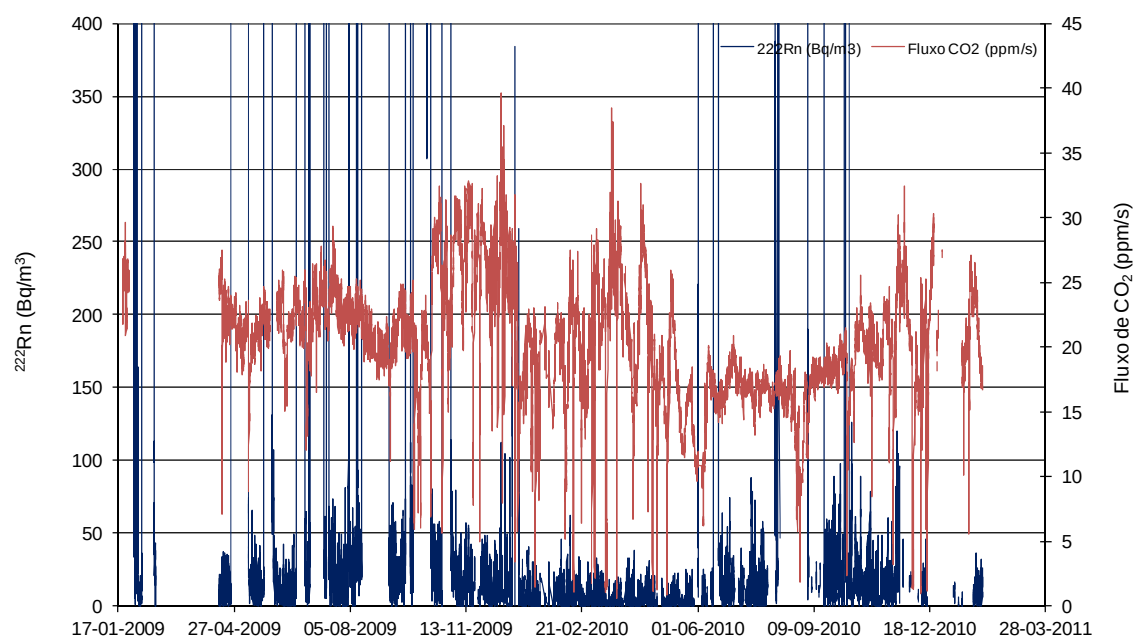


Figura III.73 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn , com ampliação da escala, e do fluxo de CO_2 no solo no ponto de amostragem 3.

ANEXO IV

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA NO SOLO - ESPECTROS DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS EM ANÁLISE NO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (INVERNO)

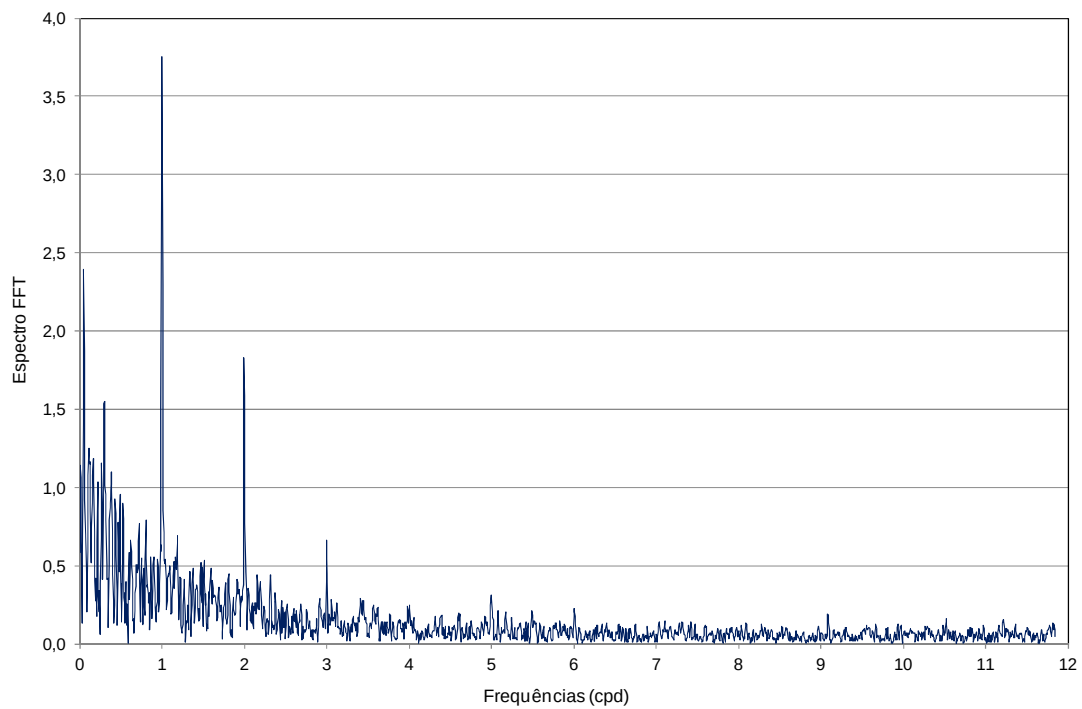
1. Local de Amostragem 3 - Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas

Figura IV.1 – Espectro de amplitudes da humidade relativa do ar, no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

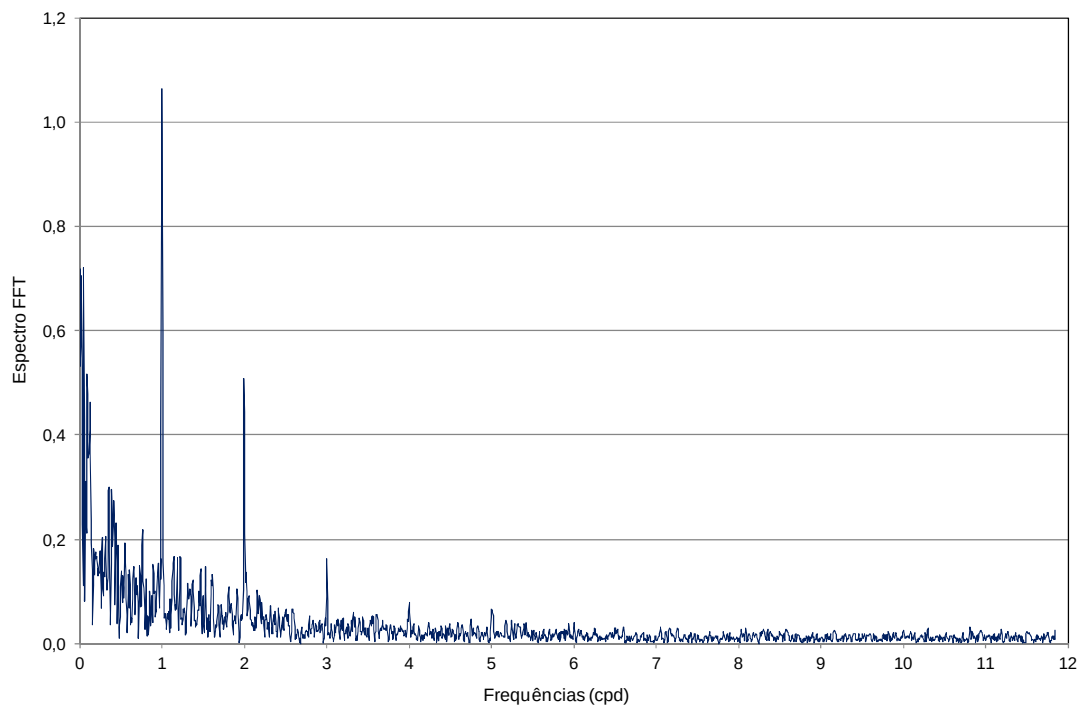


Figura IV.2 – Espectro de amplitudes da temperatura do ar, no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO SOLO – ESPECTROS DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS EM
ANÁLISE NO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (INVERNO)

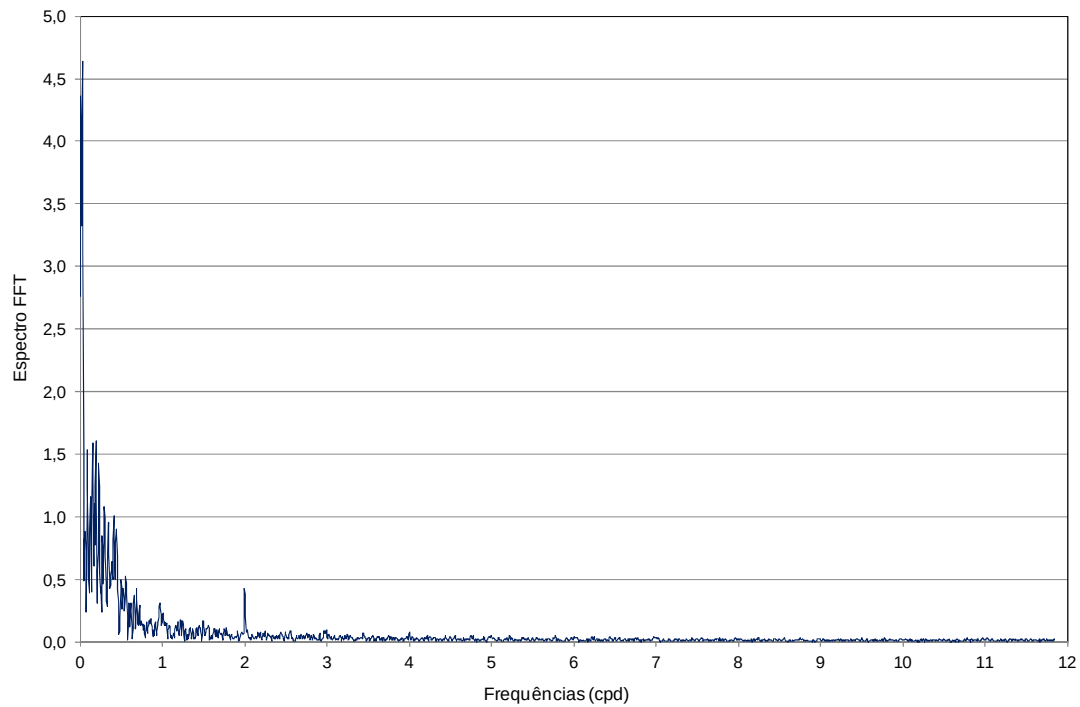


Figura IV.3 – Espectro de amplitudes da pressão barométrica, no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

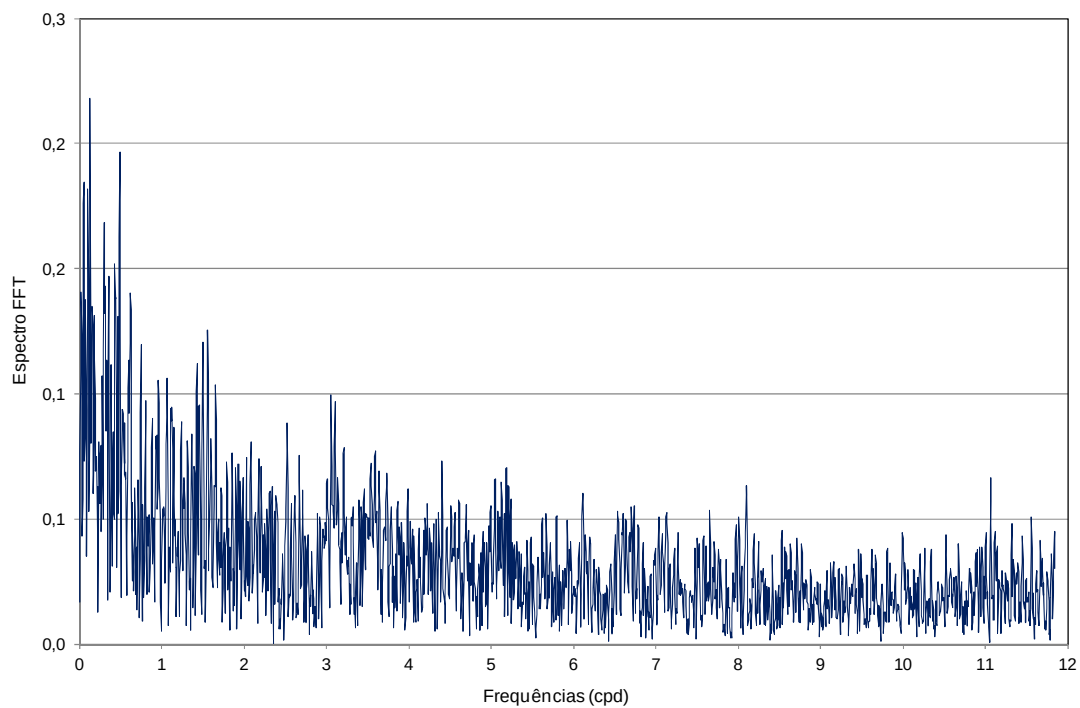


Figura IV.4 – Espectro de amplitudes da pluviosidade, no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO SOLO – ESPECTROS DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS EM
ANÁLISE NO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (INVERNO)

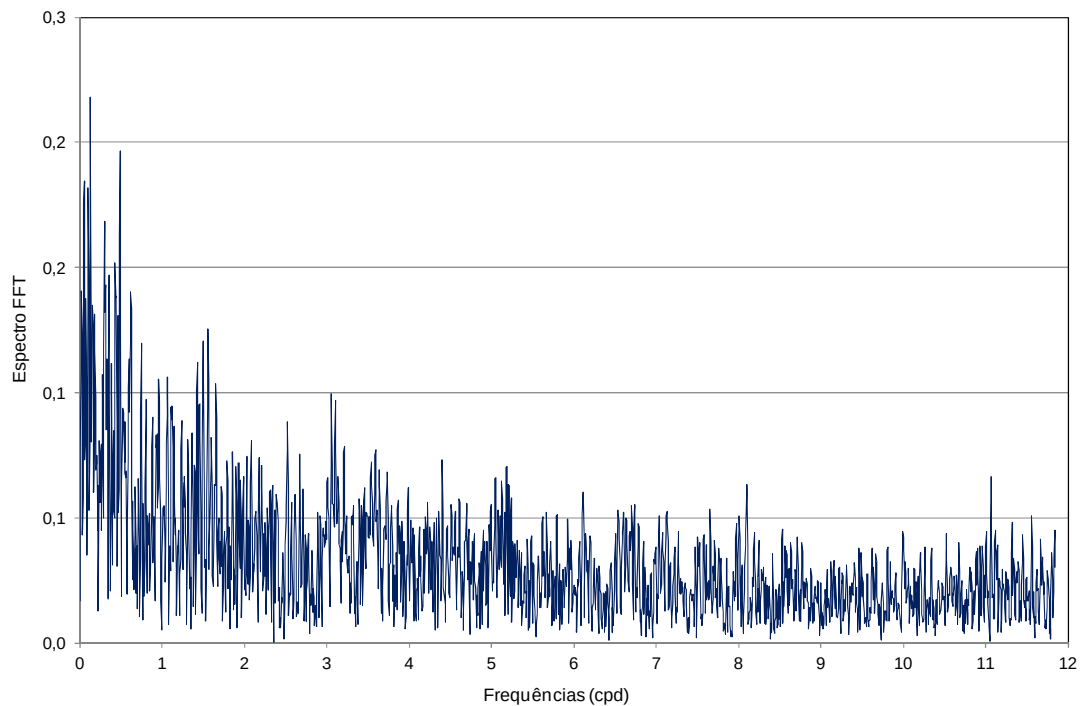


Figura IV.5 – Espectro de amplitudes da temperatura do solo, no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

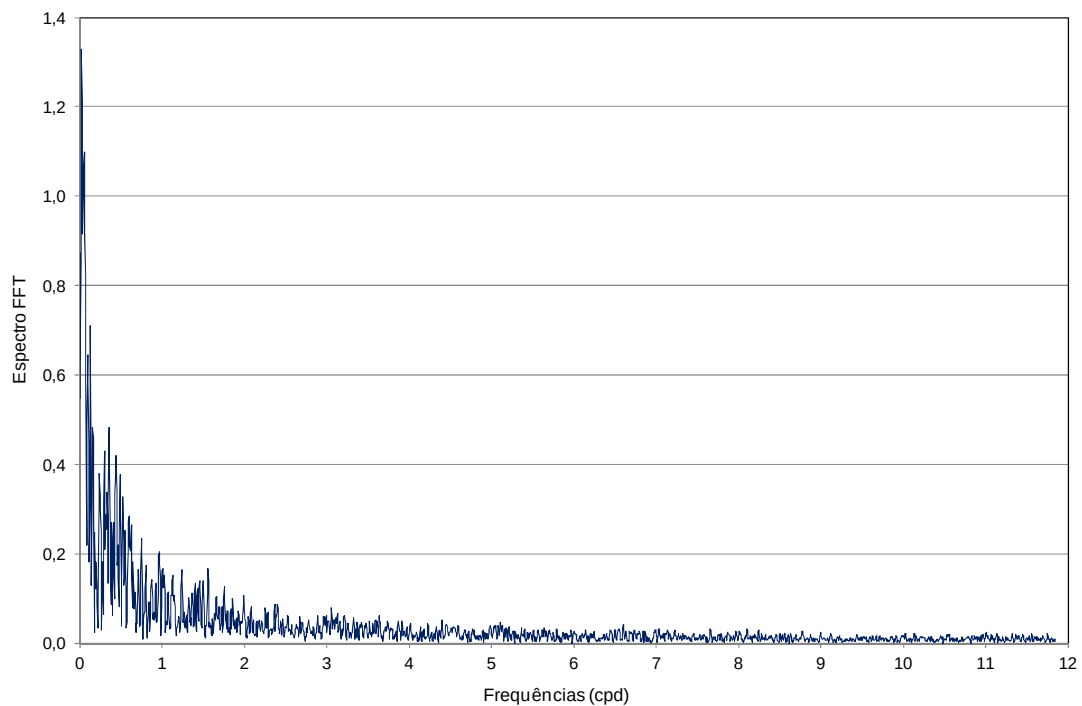


Figura IV.6 – Espectro de amplitudes da umidade do solo, no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO SOLO – ESPECTROS DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS EM
ANÁLISE NO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (INVERNO)

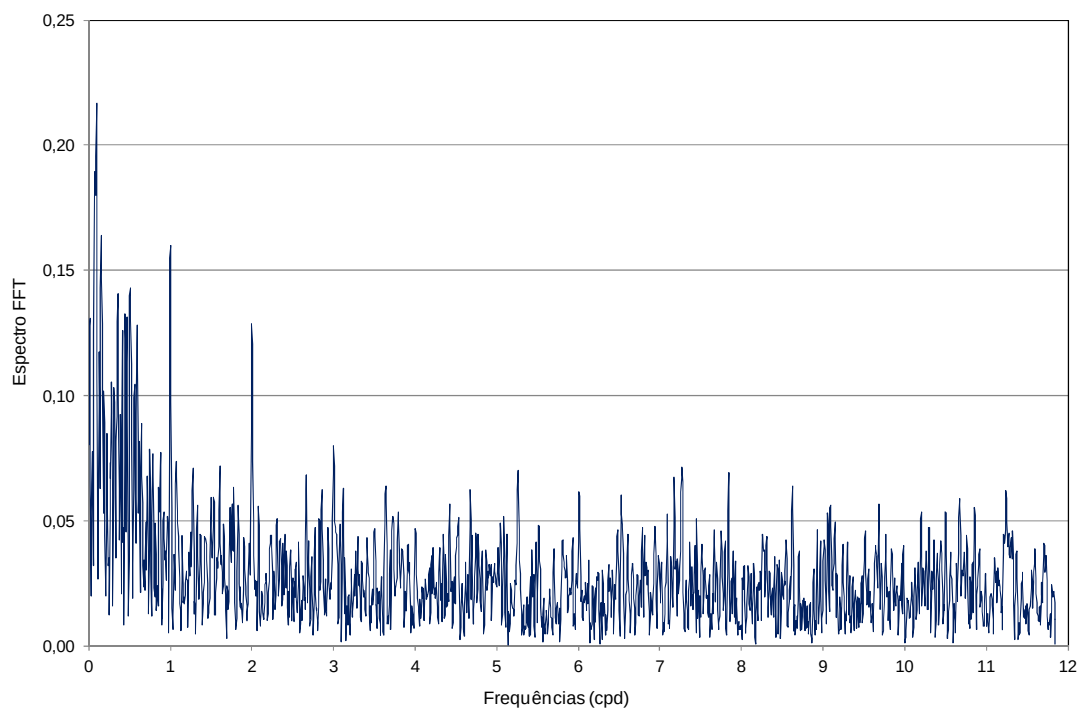


Figura IV.7 – Espectro de amplitudes da velocidade do vento, no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

ANEXO V

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO SOLO - DADOS OBSERVADOS, PREVISTOS E RESÍDUOS

1. Local de Amostragem 1 - Jardim do Centro Termal das Furnas

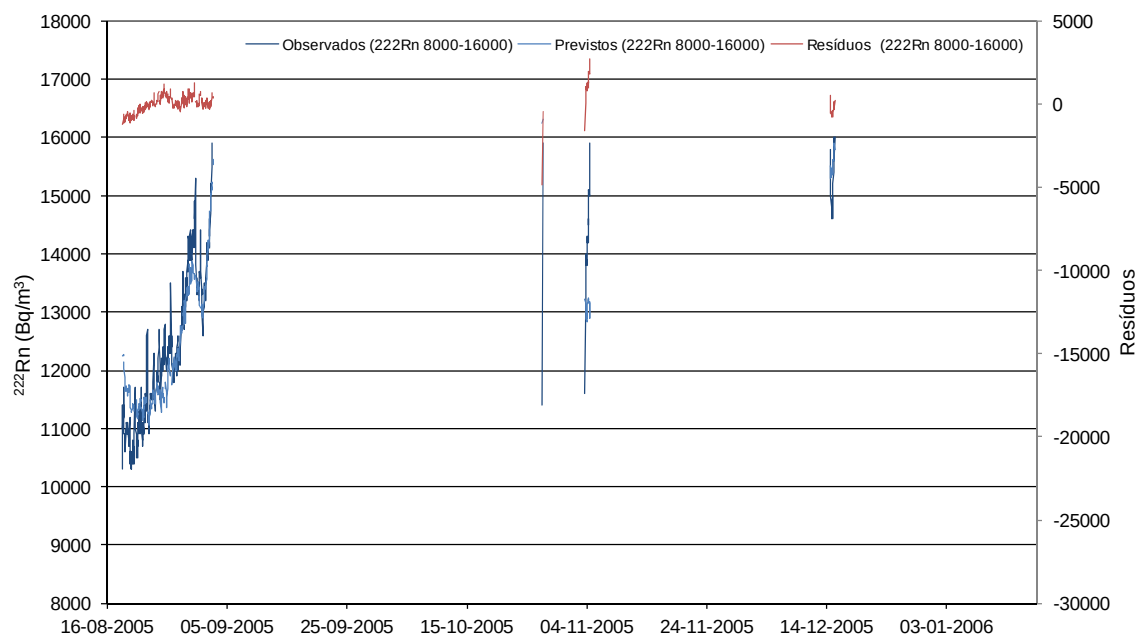


Figura V.1 – Variação temporal da concentração de radão no solo observados no grupo B1, dos previstos pelo modelo de regressão da equação e dos resíduos calculados.

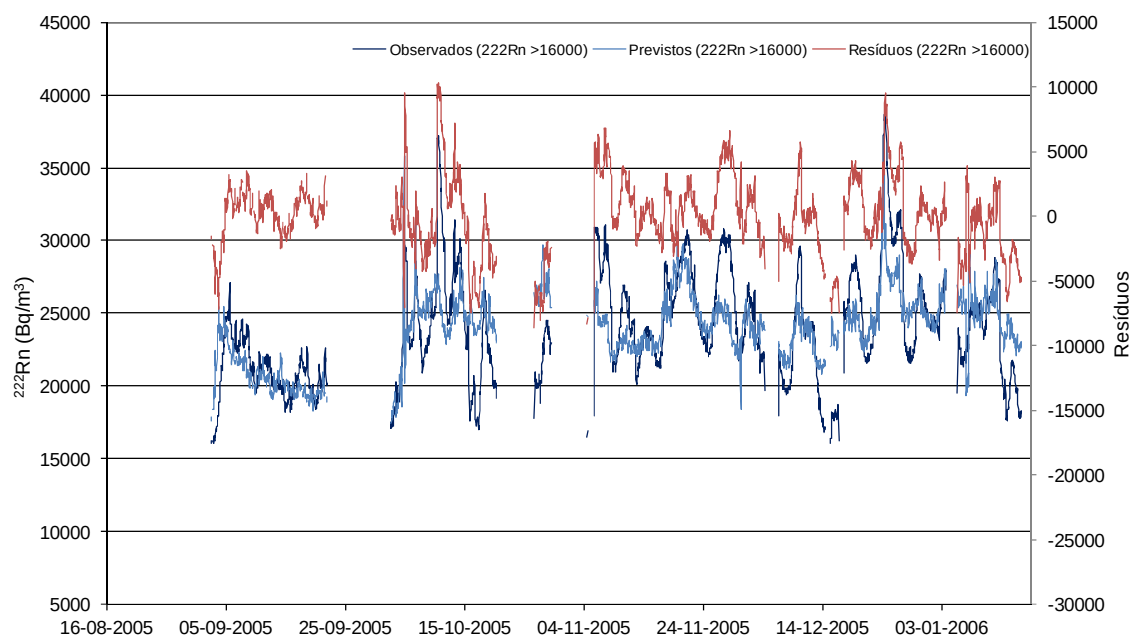


Figura V.2 – Variação temporal da concentração de radão no solo observados no grupo C1, dos previstos pelo modelo de regressão da equação e dos resíduos calculados.

ANEXO VI

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO SOLO – APLICAÇÃO DE FILTROS FFT AOS RESÍDUOS DO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (INVERNO)

1. Local de Amostragem 3 - Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas

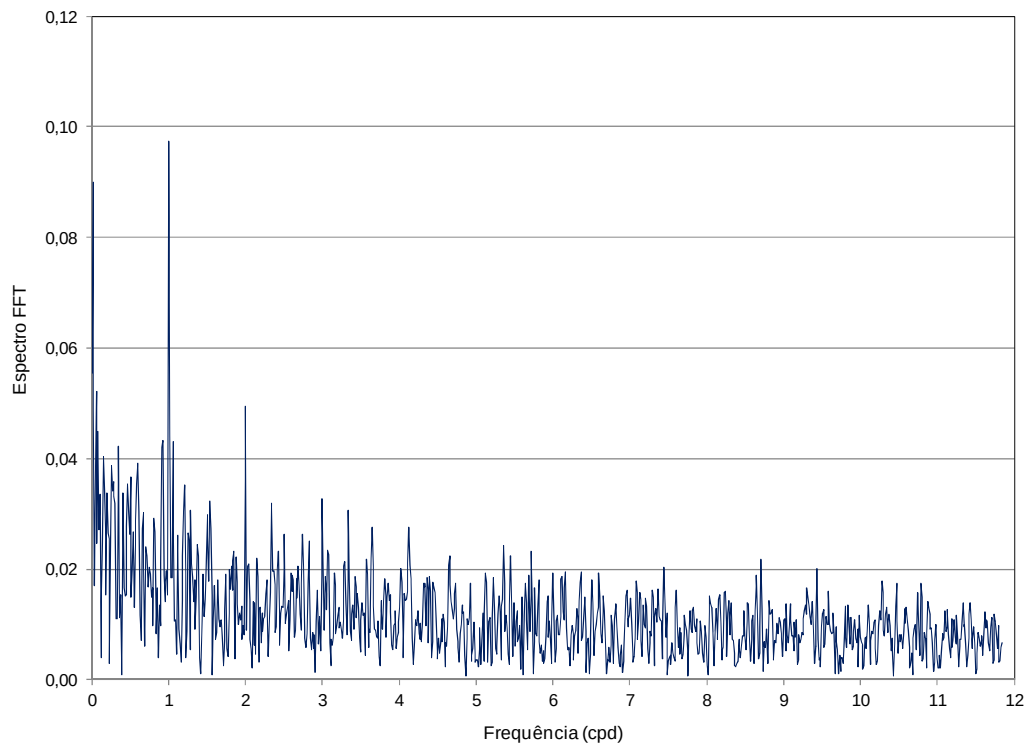


Figura VI.1 – Espectro de amplitudes dos resíduos calculados no ponto de amostragem 3, para os meses de Inverno.

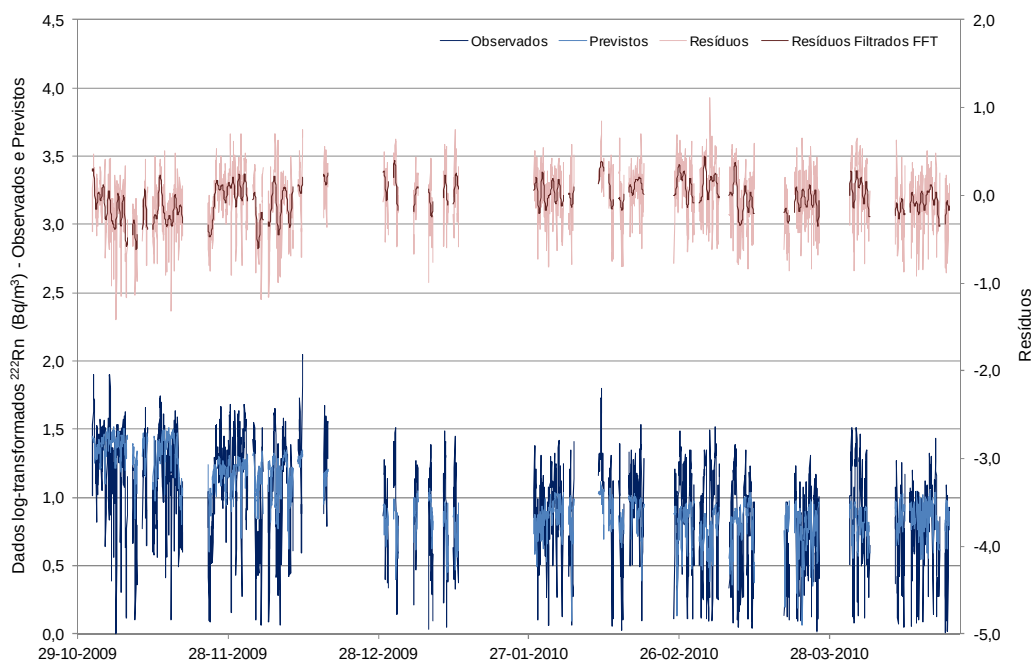


Figura VI.2 – Variação temporal da concentração de radão no solo observados no grupo A3, dos previstos pelo modelo de regressão da equação e dos resíduos calculados.

ANEXO VII

**VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM
NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS**

1. Água Azeda

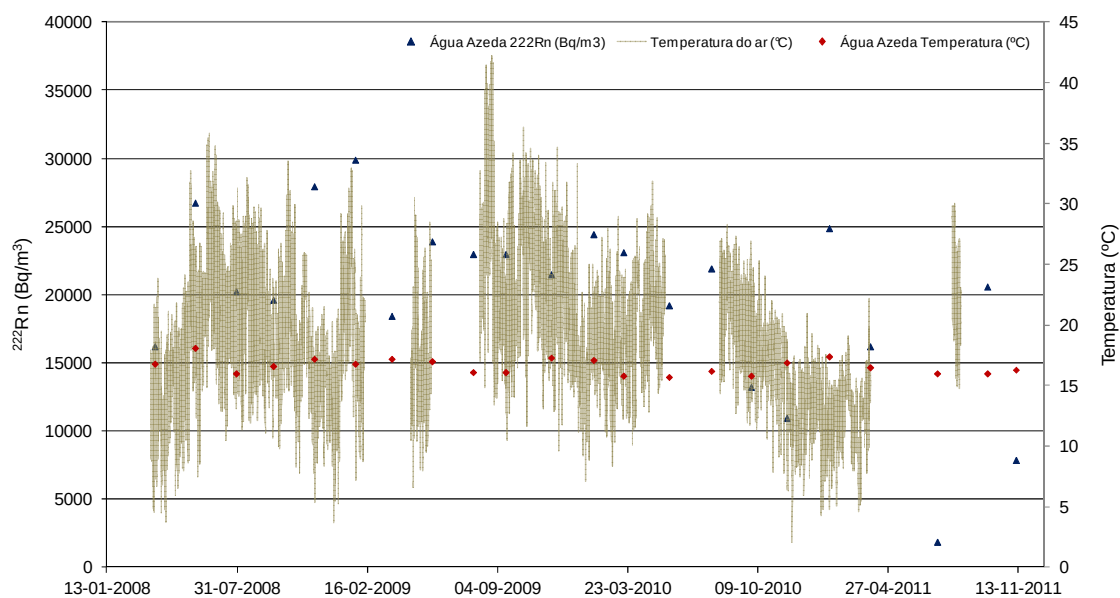


Figura VII.1 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda e da temperatura do ar.

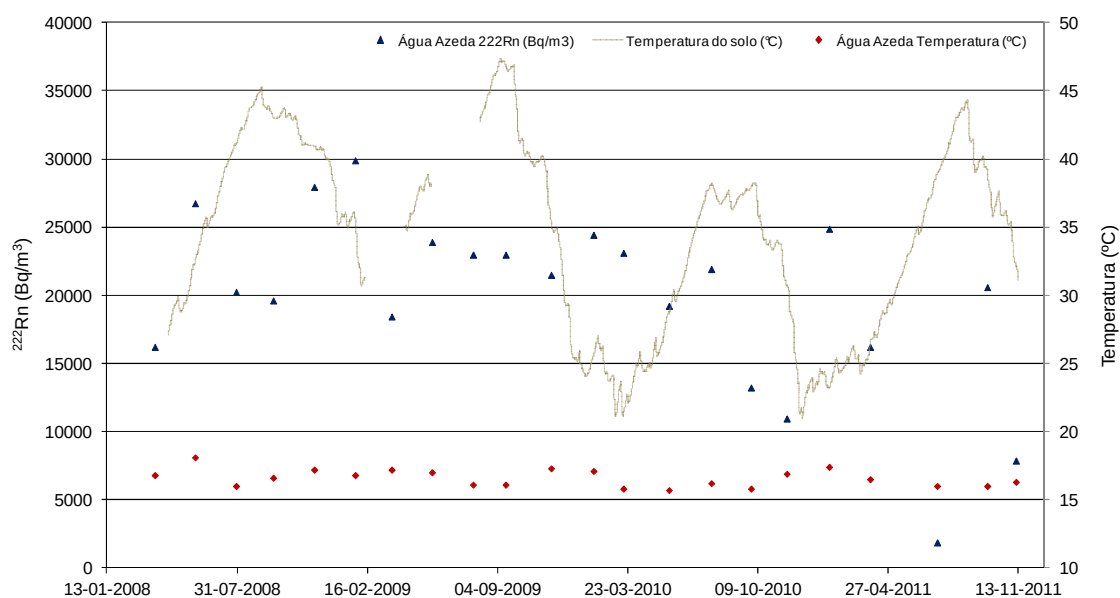


Figura VII.2 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

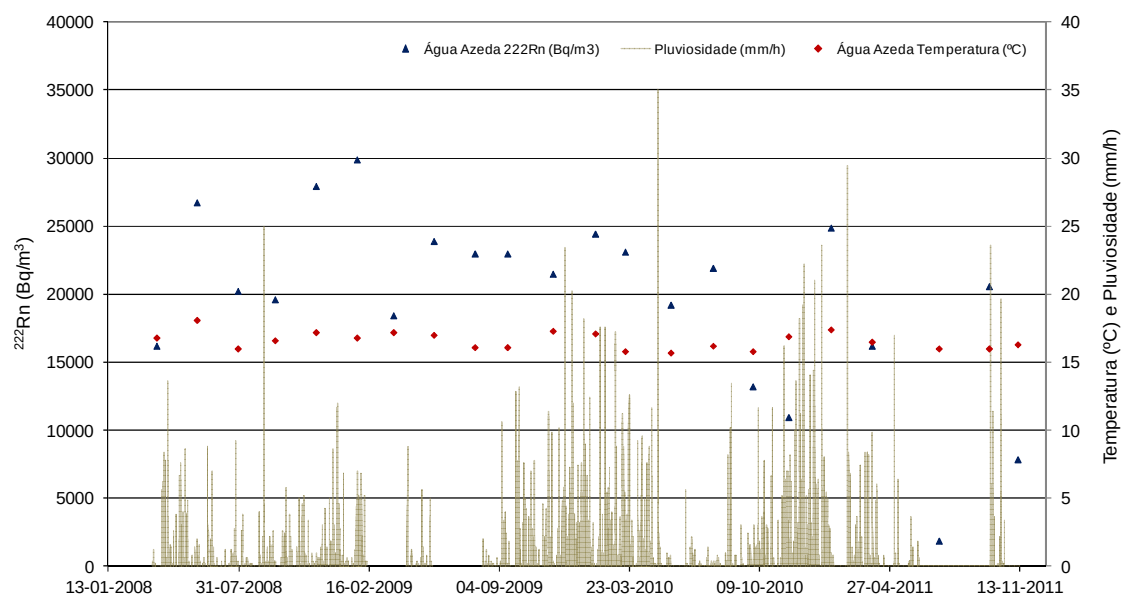


Figura VII.3 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda e da pluviosidade.

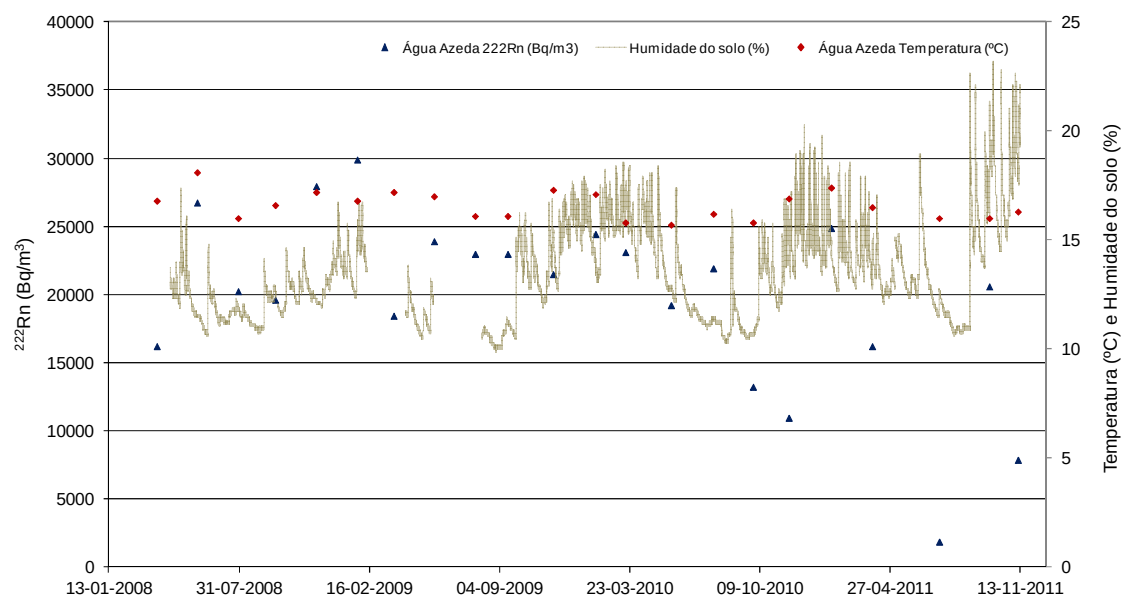


Figura VII.4 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda e da humidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

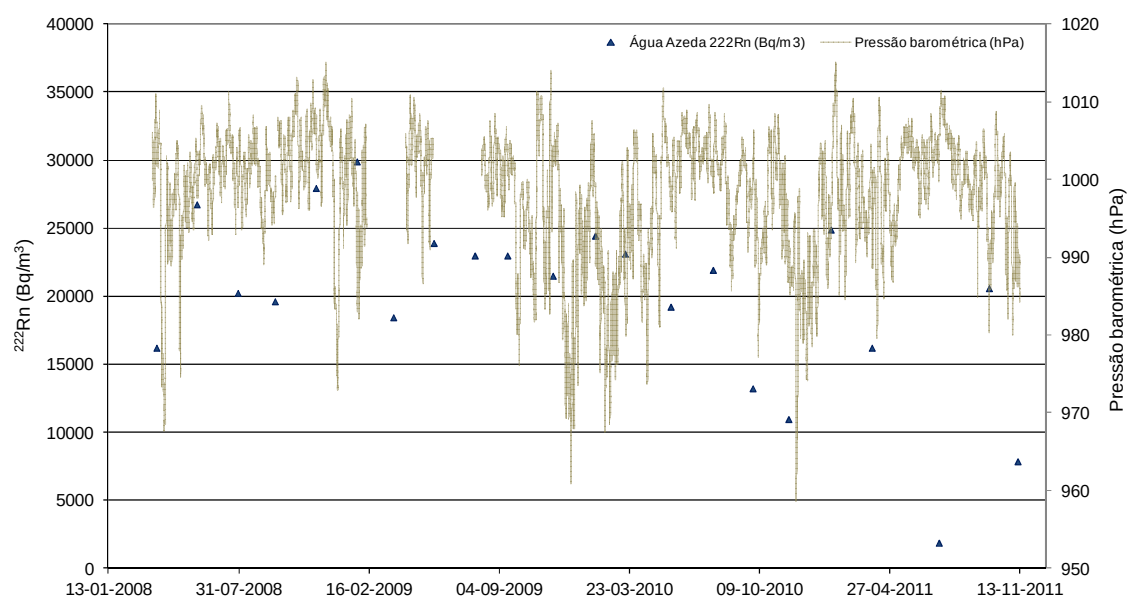


Figura VII.5 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda e da pressão barométrica.

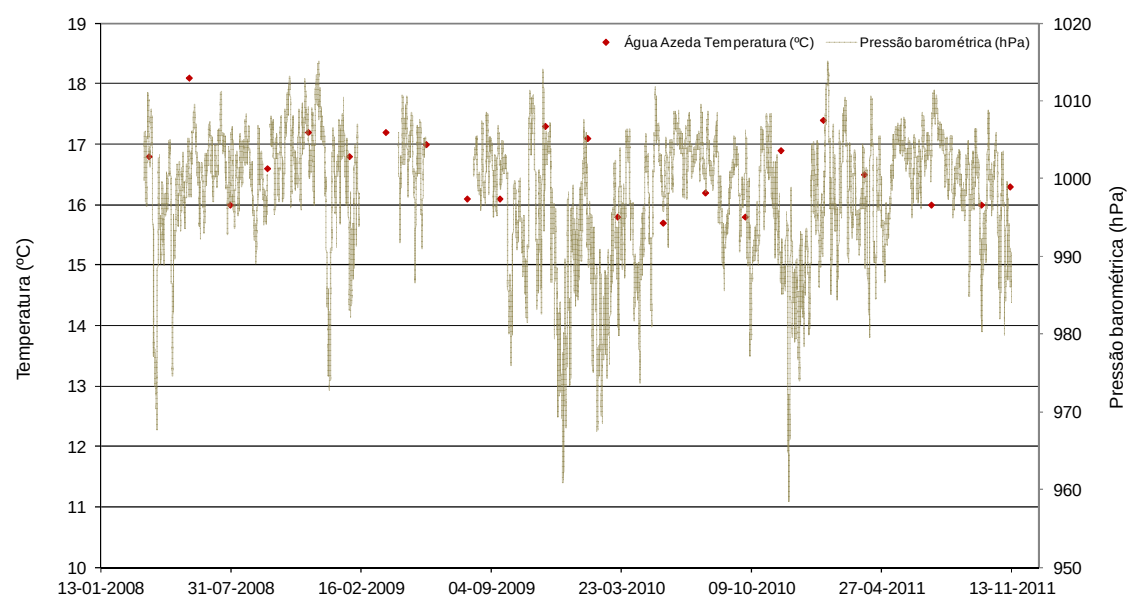


Figura VII.6 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda e da pressão barométrica.

2. Água Azeda do Rebentão

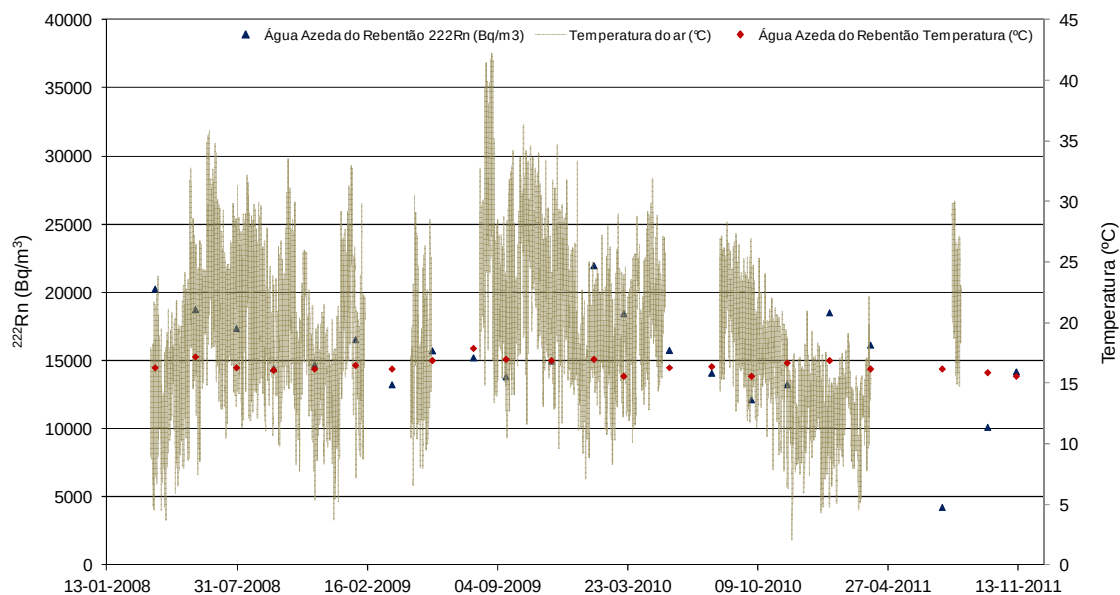


Figura VII.7 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda do Rebentão e da temperatura do ar.

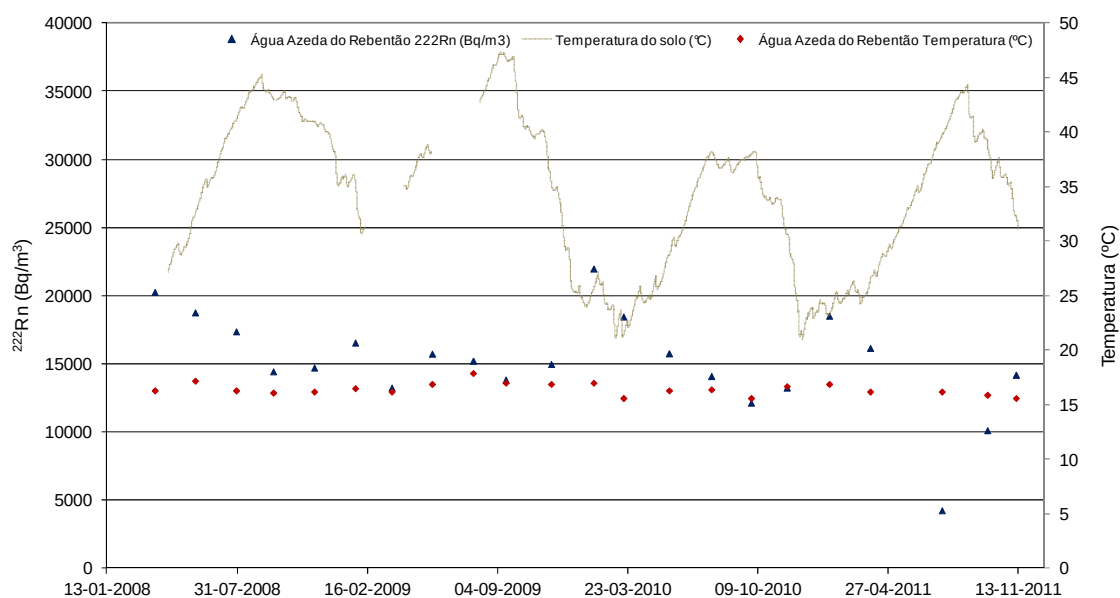


Figura VII.8 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda do Rebentão e da temperatura do solo.

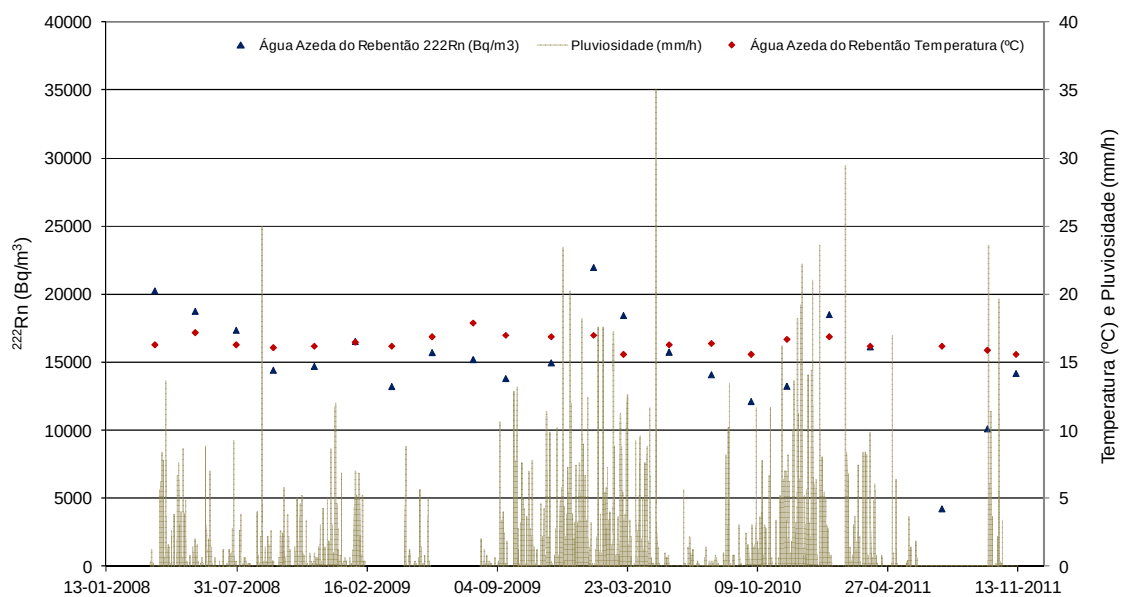


Figura VII.9 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda do Rebentão e da pluviosidade.

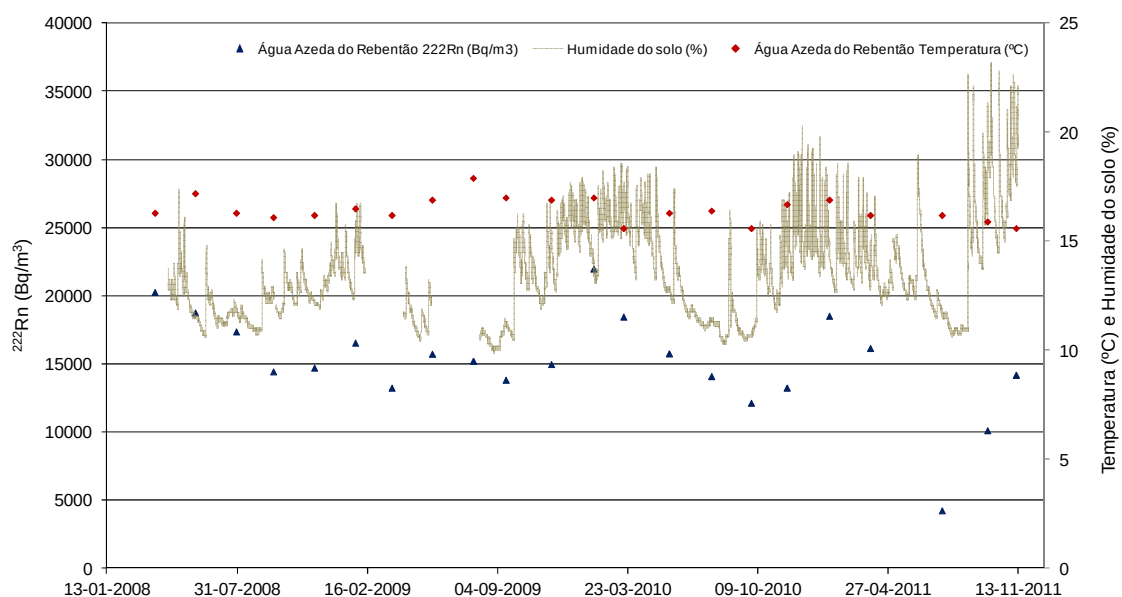


Figura VII.10 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água Azeda do Rebentão e da humidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

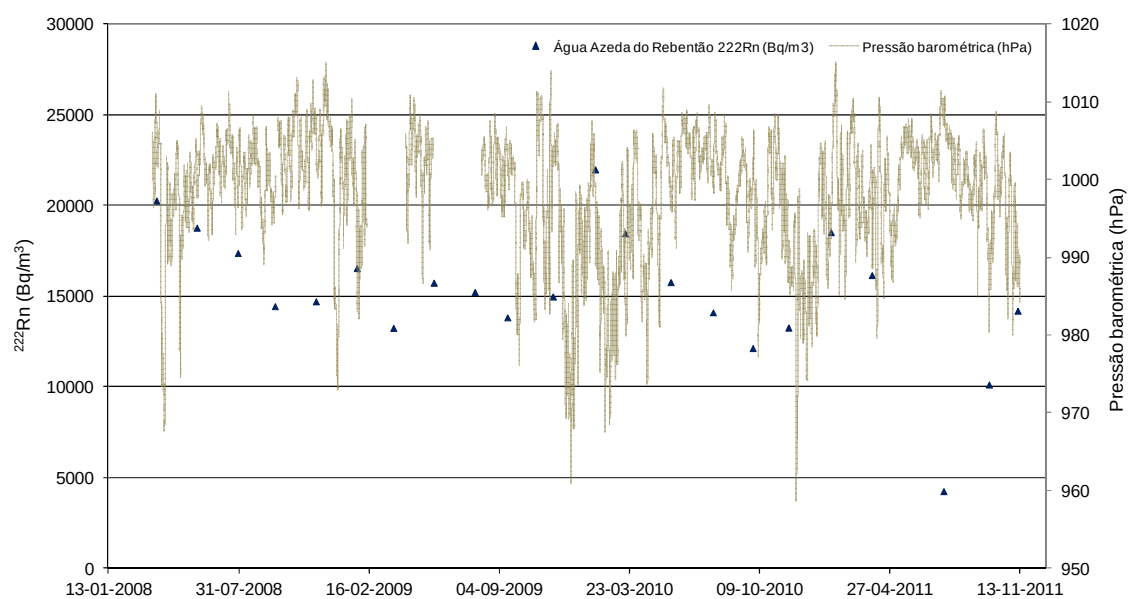


Figura VII.11 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água Azeda do Rebentão e da pressão barométrica.

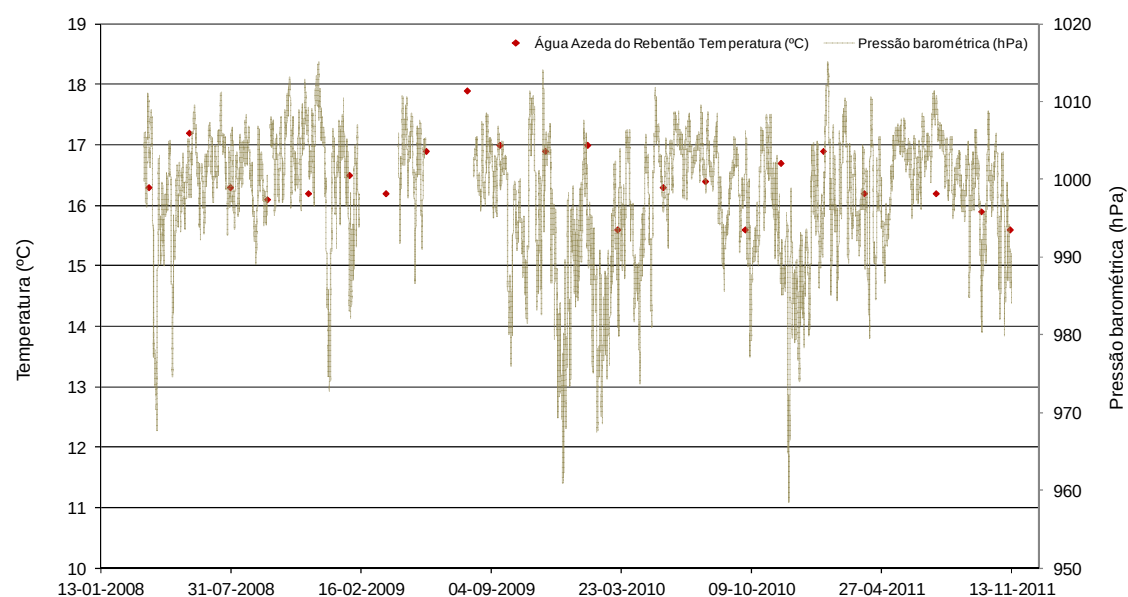


Figura VII.12 – Variação temporal da temperatura na nascente Água Azeda do Rebentão e da pressão barométrica.

3. Dr. Dinis

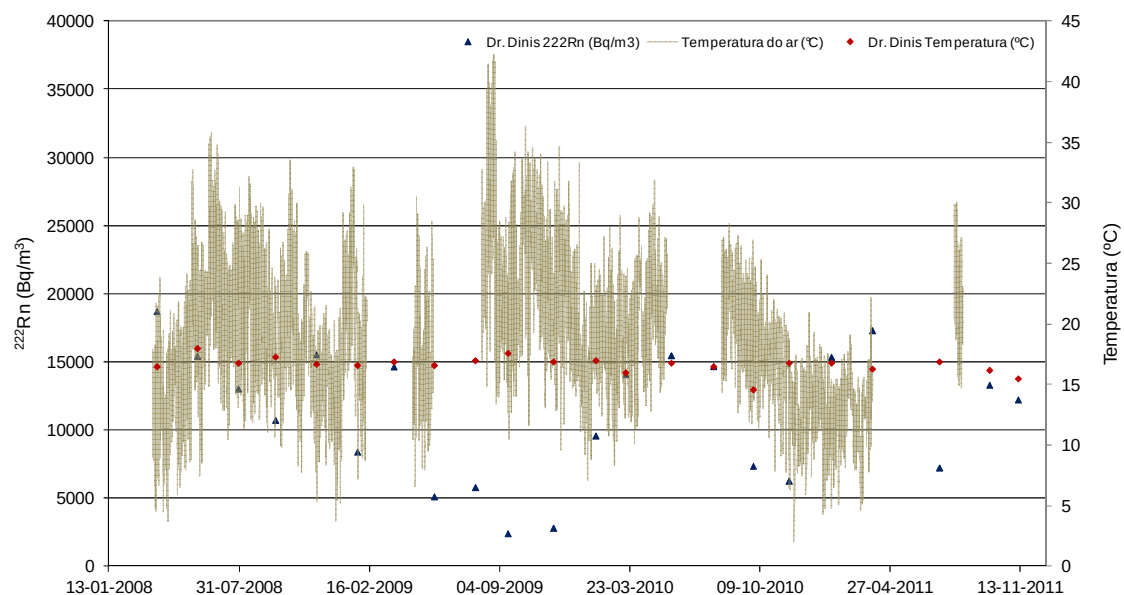


Figura VII.13 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Dinis e da temperatura do ar.

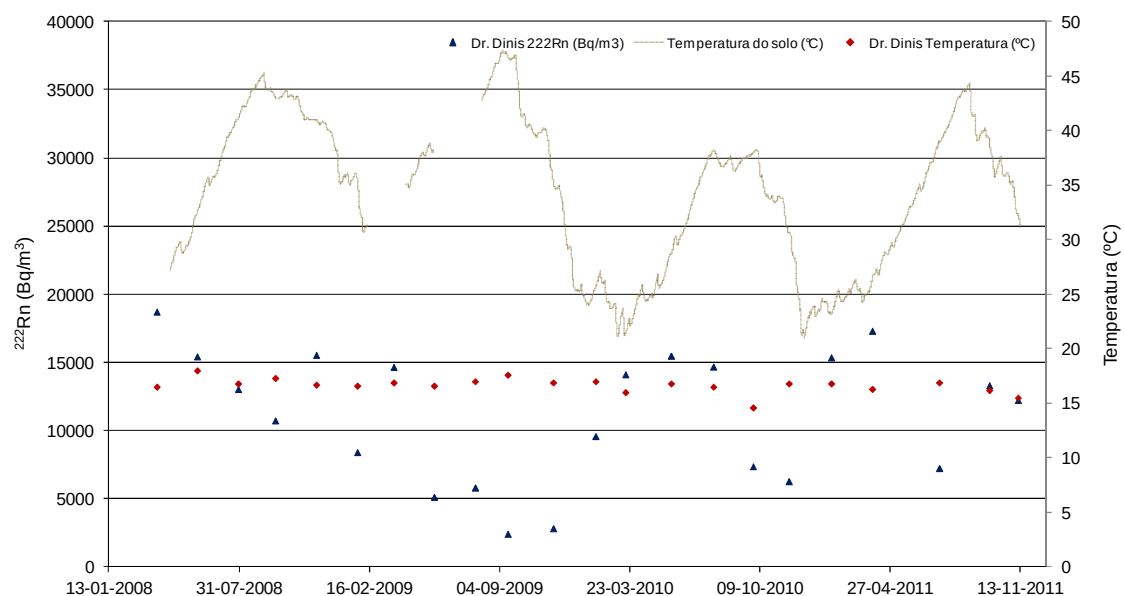


Figura VII.14 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Dinis e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

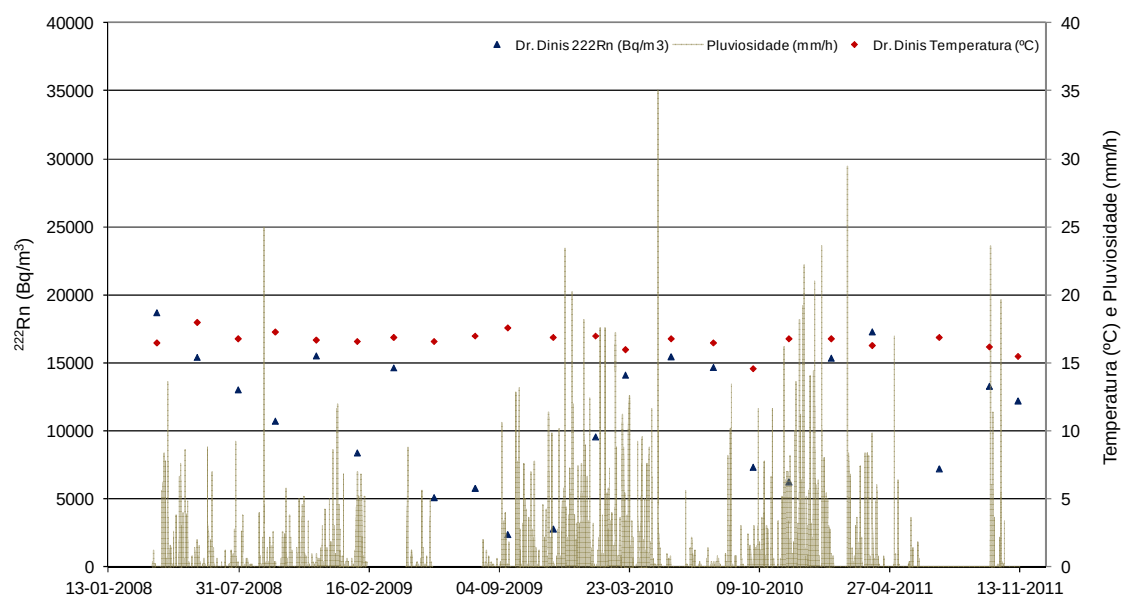


Figura VII.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Dinis e da pluviosidade.

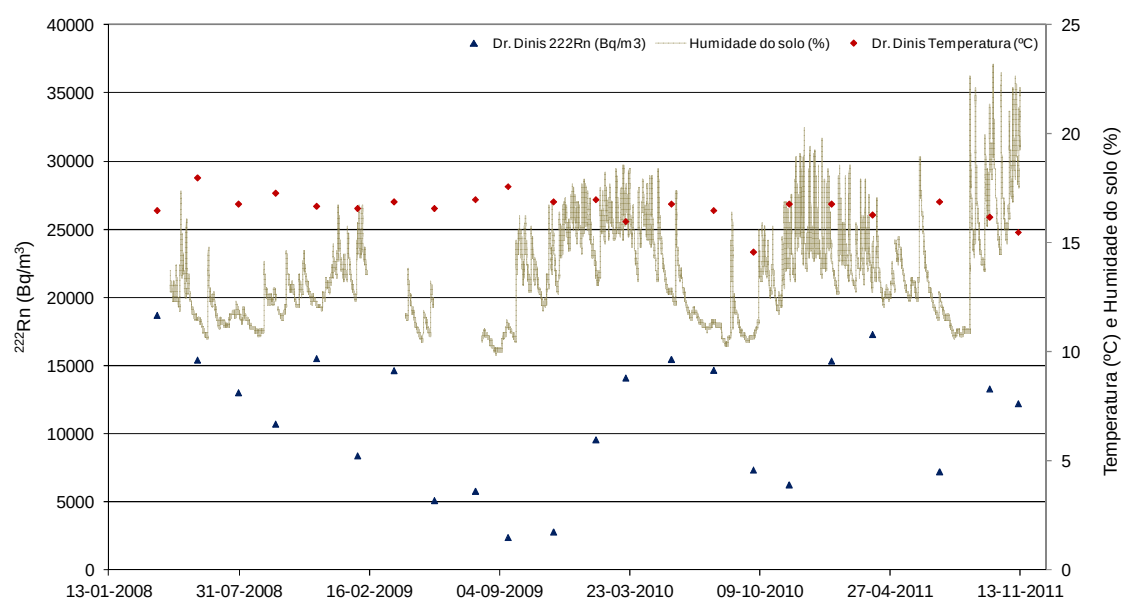


Figura VII.16 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Dinis e da umidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

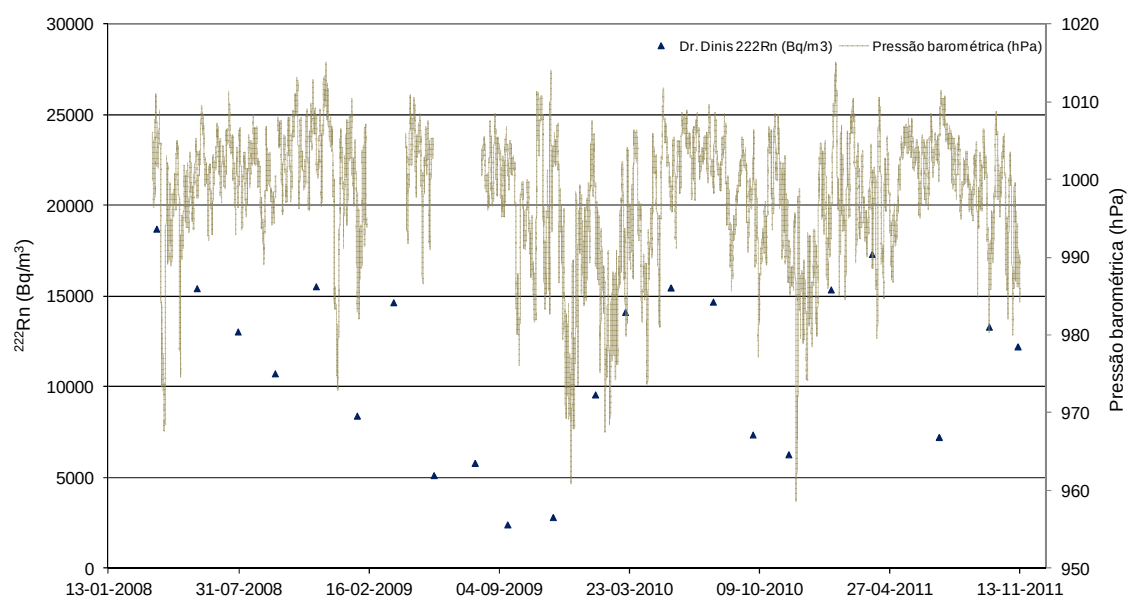


Figura VII.17 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Dinis e da pressão barométrica.

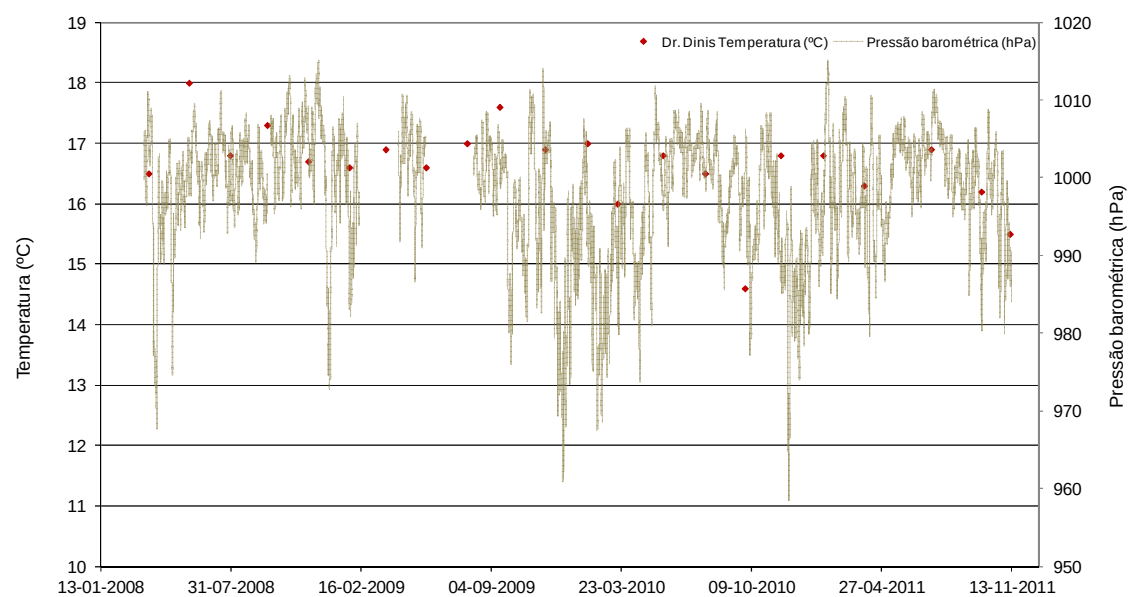


Figura VII.18 – Variação temporal da temperatura na nascente Dr. Dinis e da pressão barométrica.

4. Caldeirão

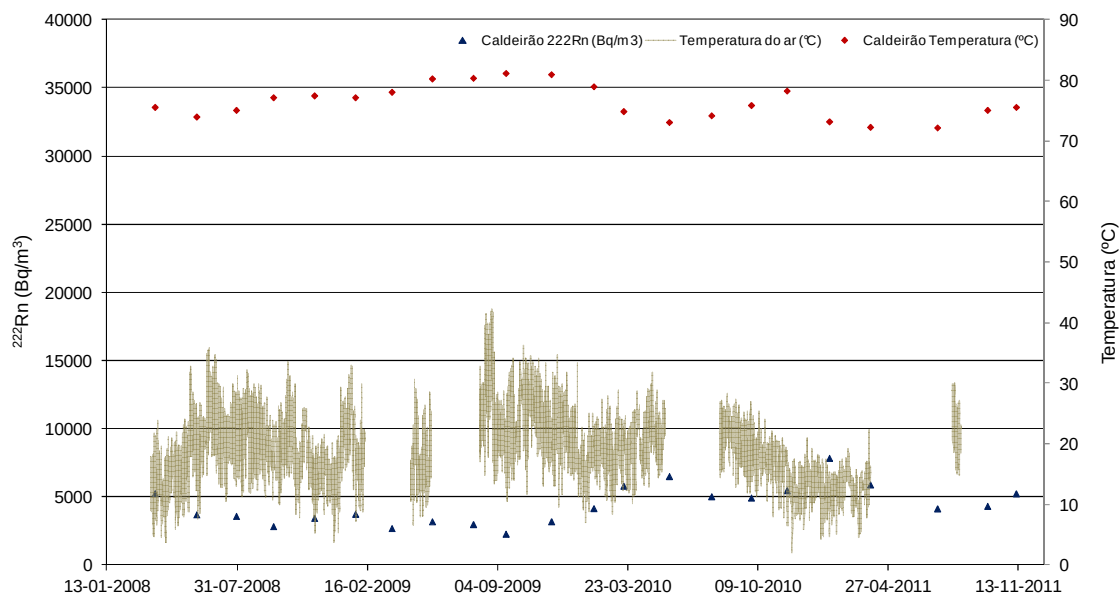


Figura VII.19 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Caldeirão e da temperatura do ar.

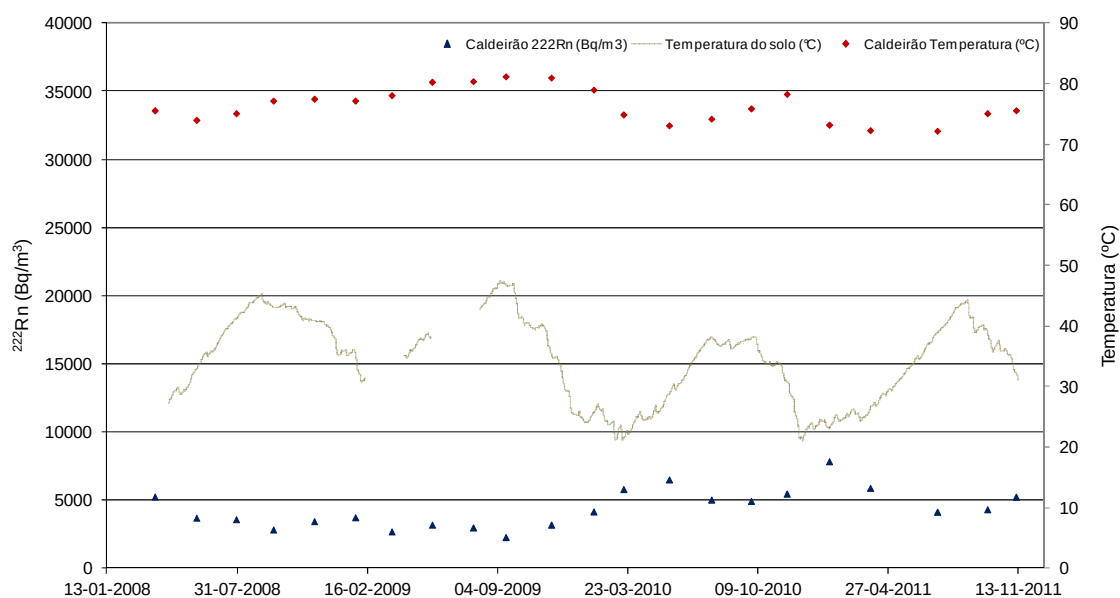


Figura VII.20 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Caldeirão e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

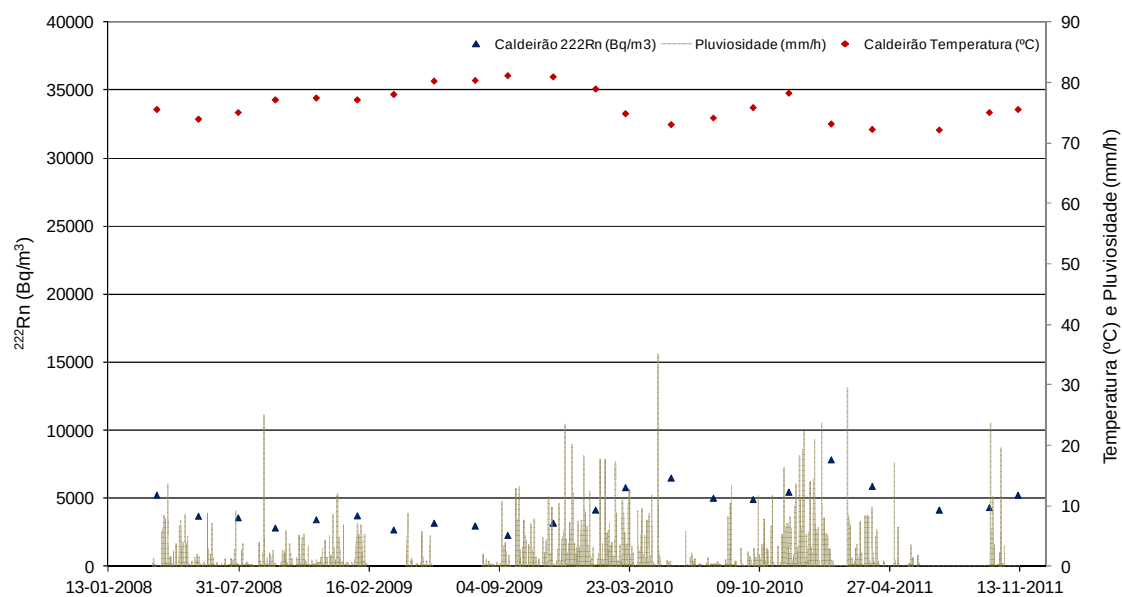


Figura VII.21 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Caldeirão e da pluviosidade.

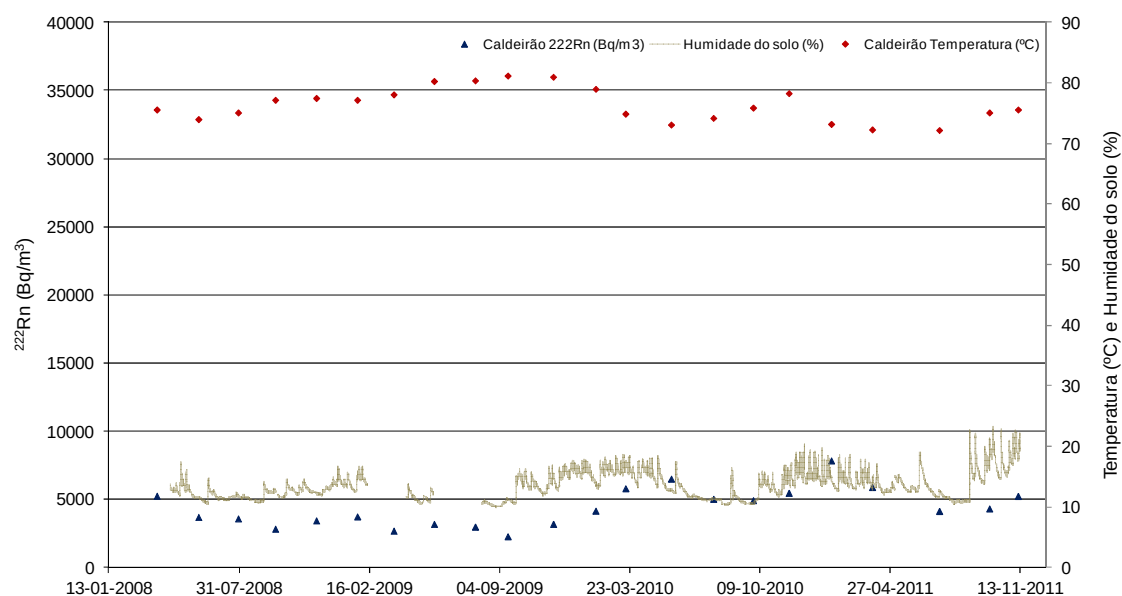


Figura VII.22 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Caldeirão e da humidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

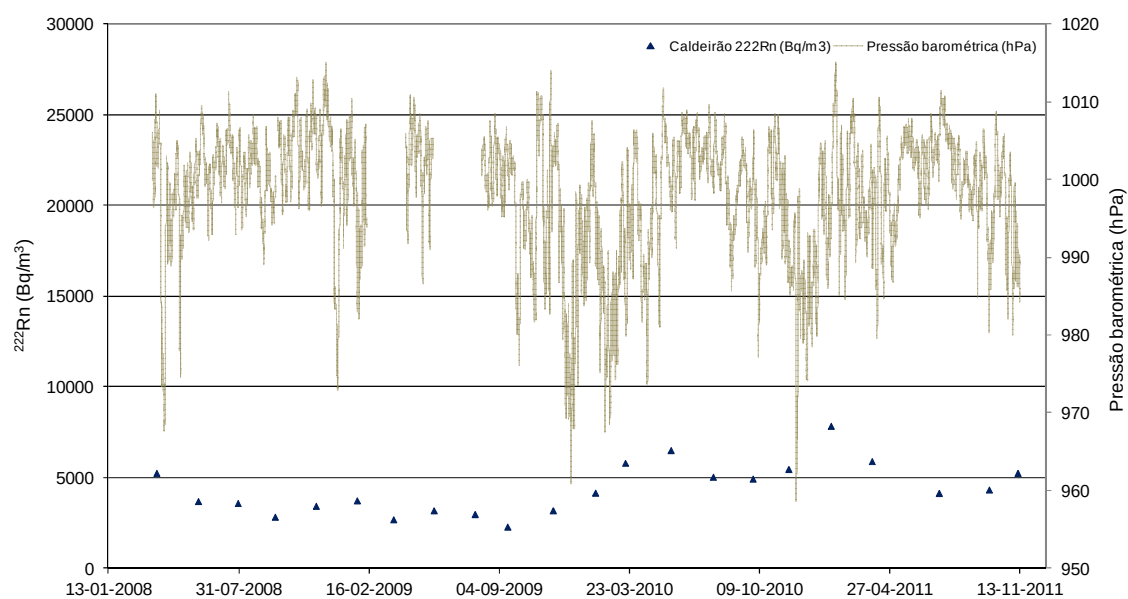


Figura VII.23 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Caldeirão e da pressão barométrica.

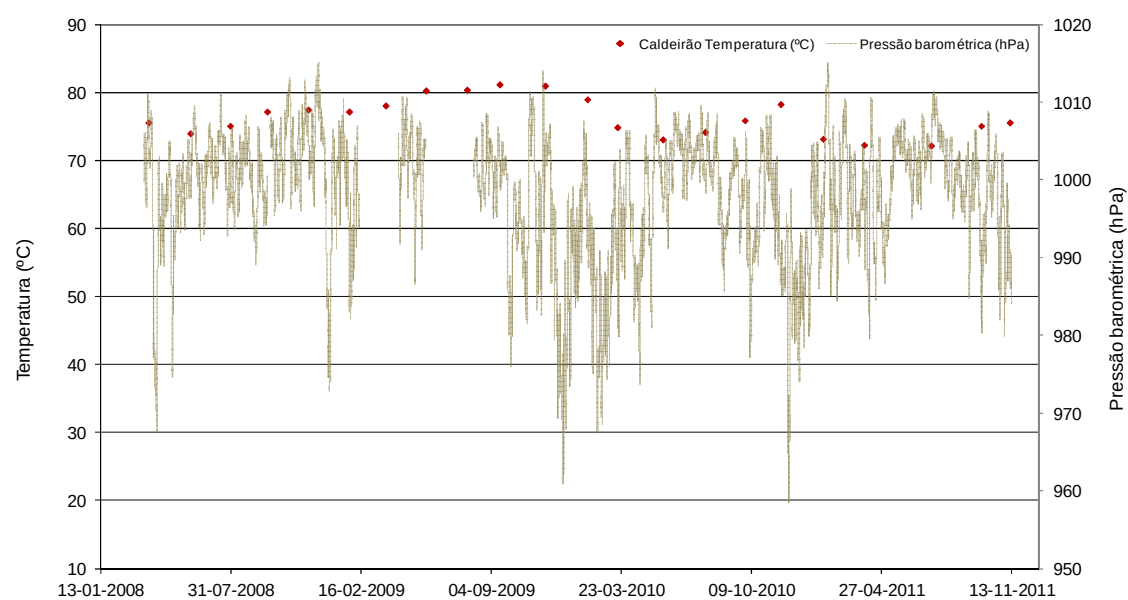


Figura VII.24 – Variação temporal da temperatura na nascente do Caldeirão e da pressão barométrica.

5. Água da Prata

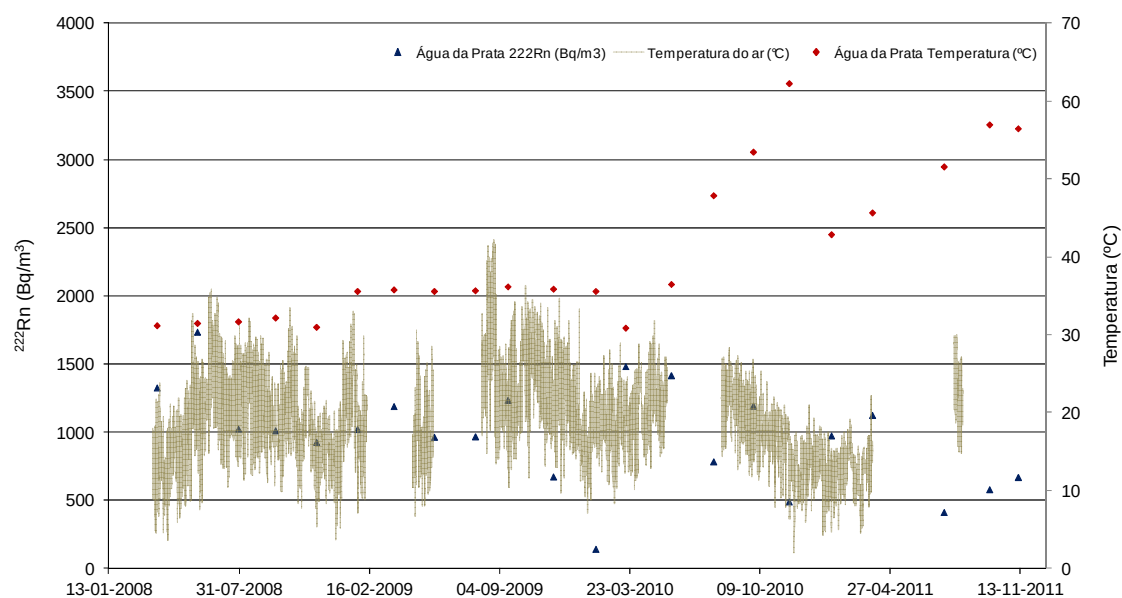


Figura VII.25 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água da Prata e da temperatura do ar.

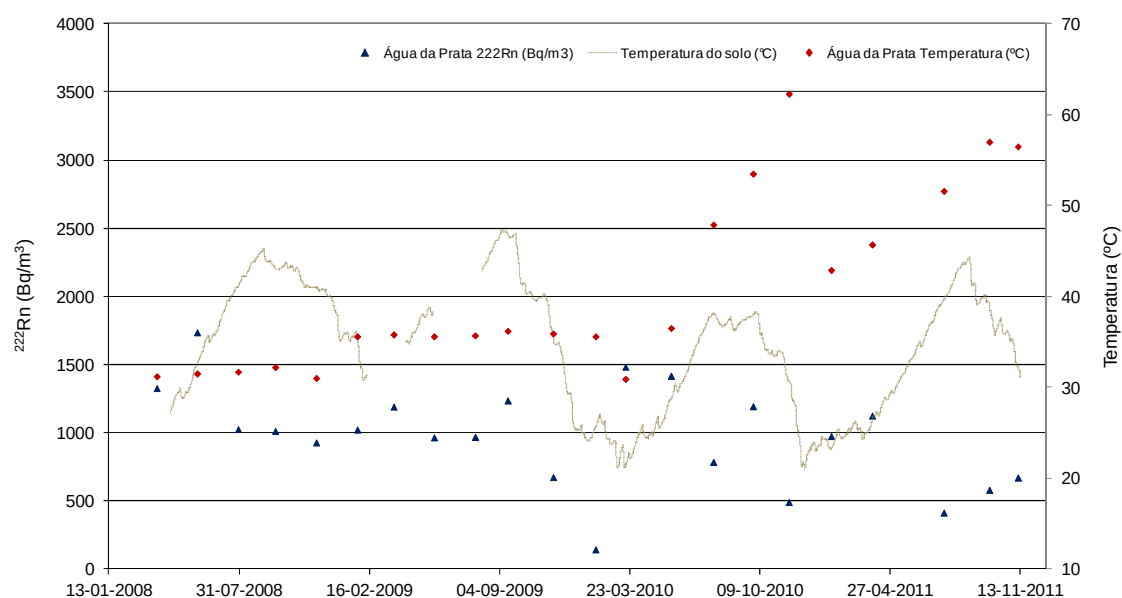


Figura VII.26 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água da Prata e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

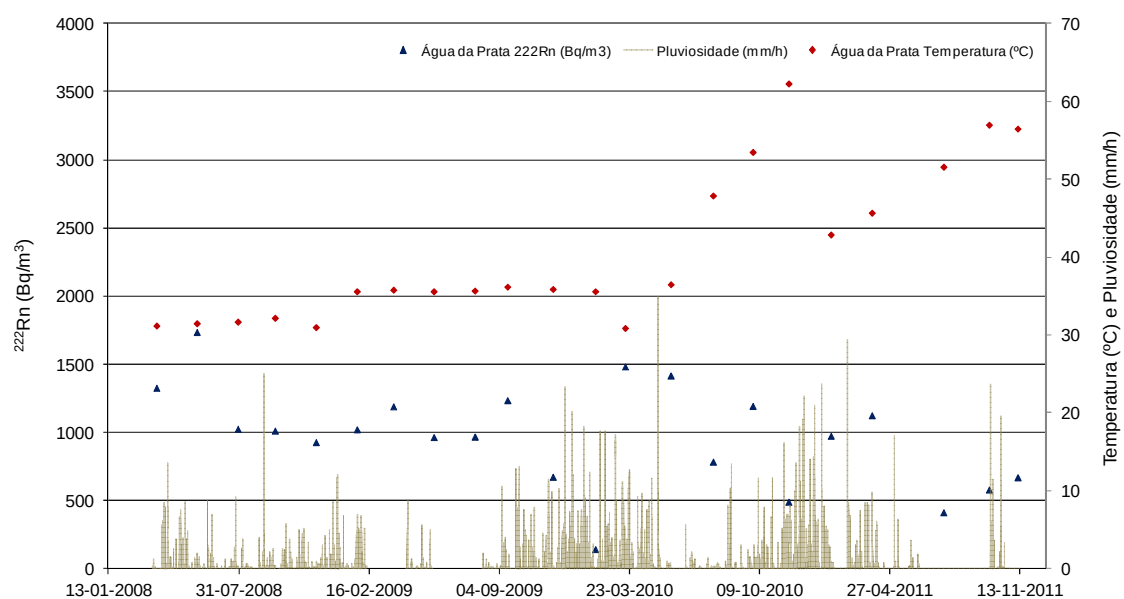


Figura VII.27 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água da Prata e da pluviosidade.

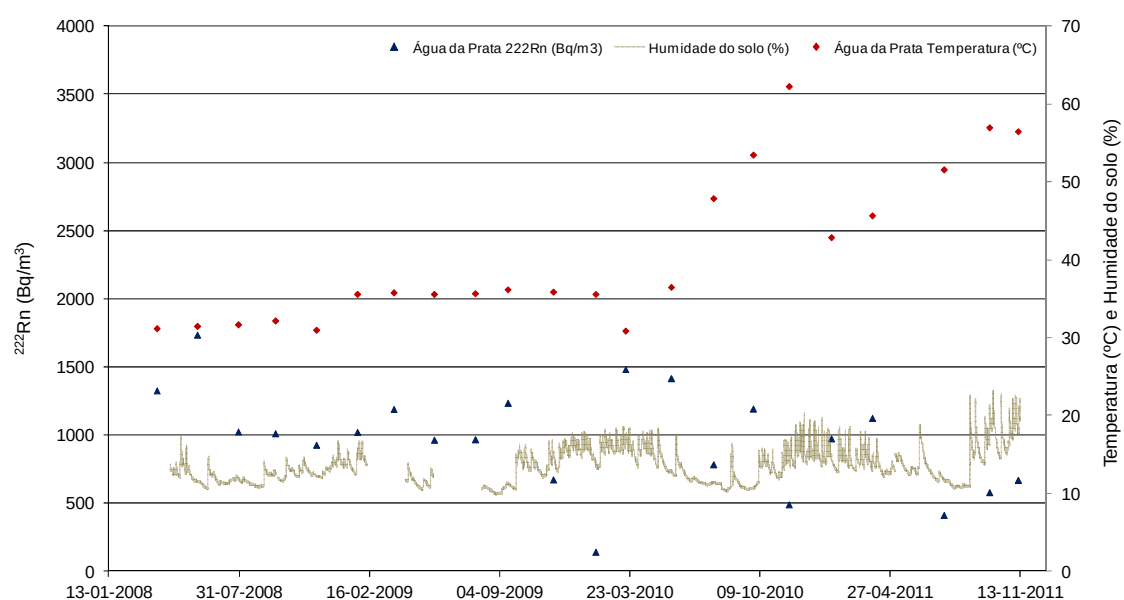


Figura VII.28 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Água da Prata e da humidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

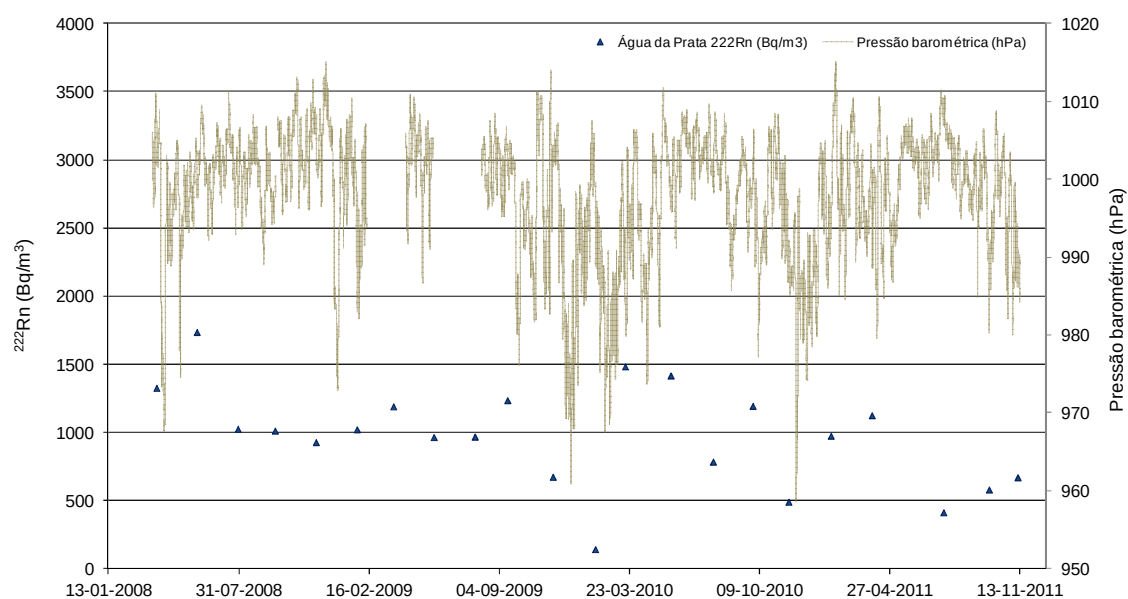


Figura VII.29 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Água da Prata e da pressão barométrica.

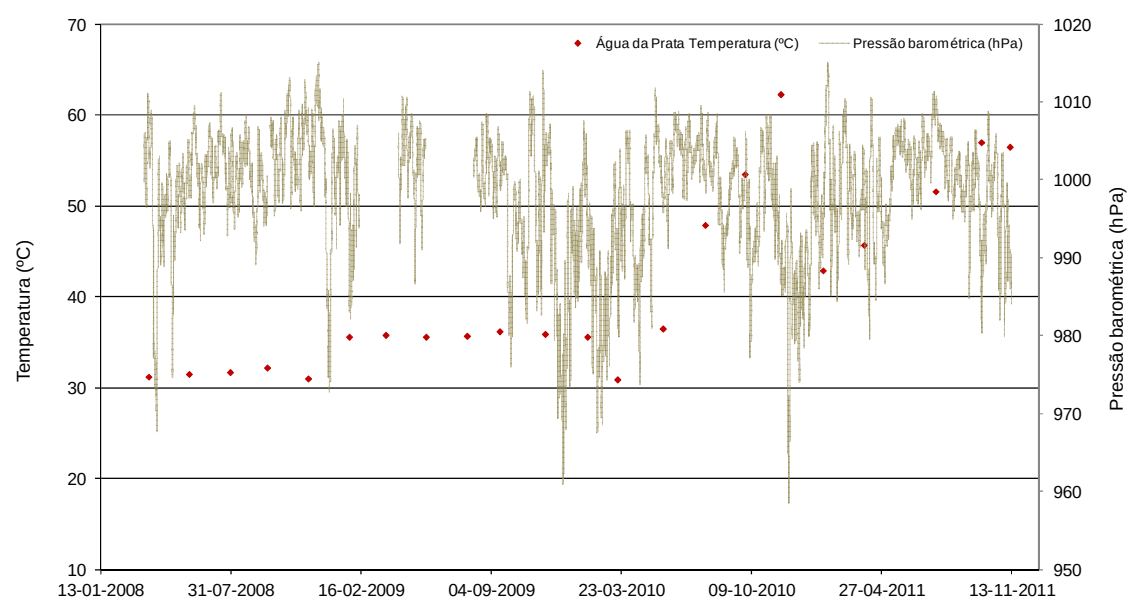


Figura VII.30 – Variação temporal da temperatura na nascente Água da Prata e da pressão barométrica.

6. Dr. Miguel Henrique

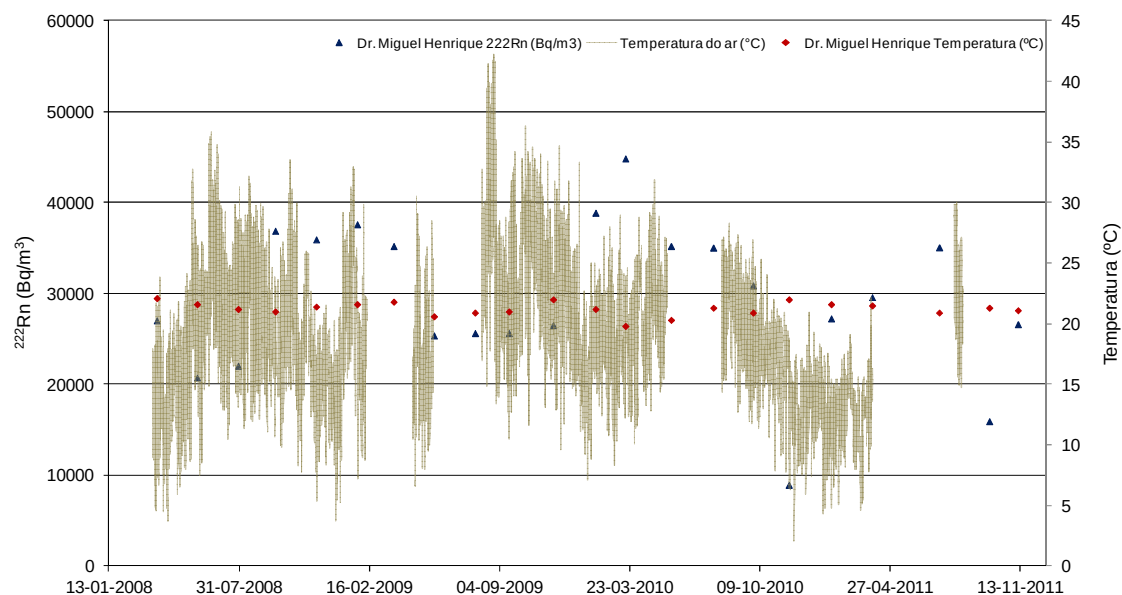


Figura VII.31 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Miguel Henrique e da temperatura do ar.

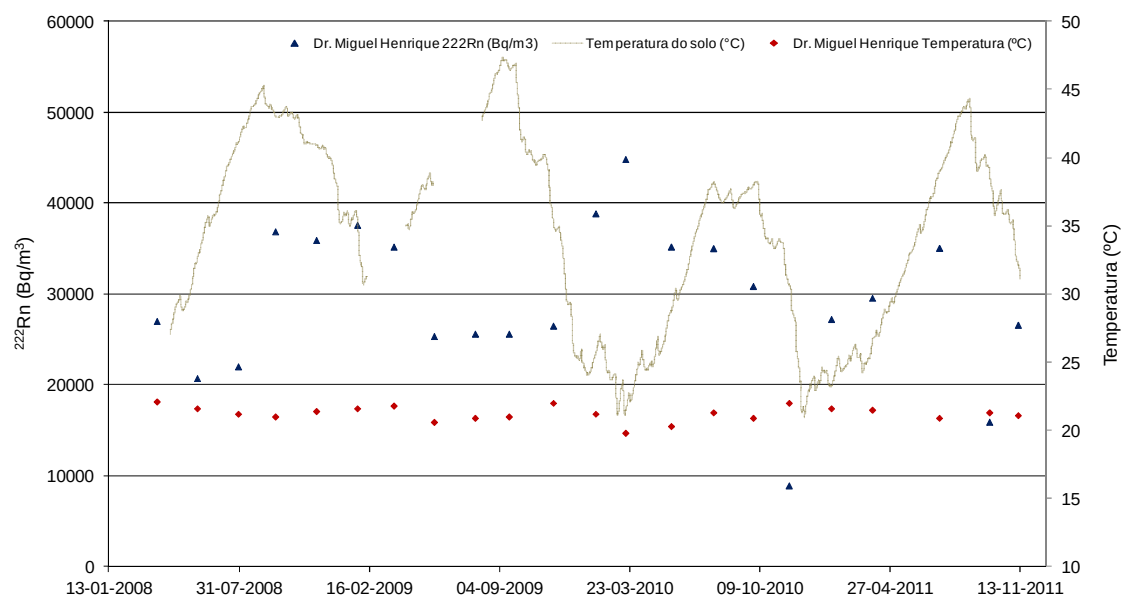


Figura VII.32 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Miguel Henrique e da temperatura do solo.

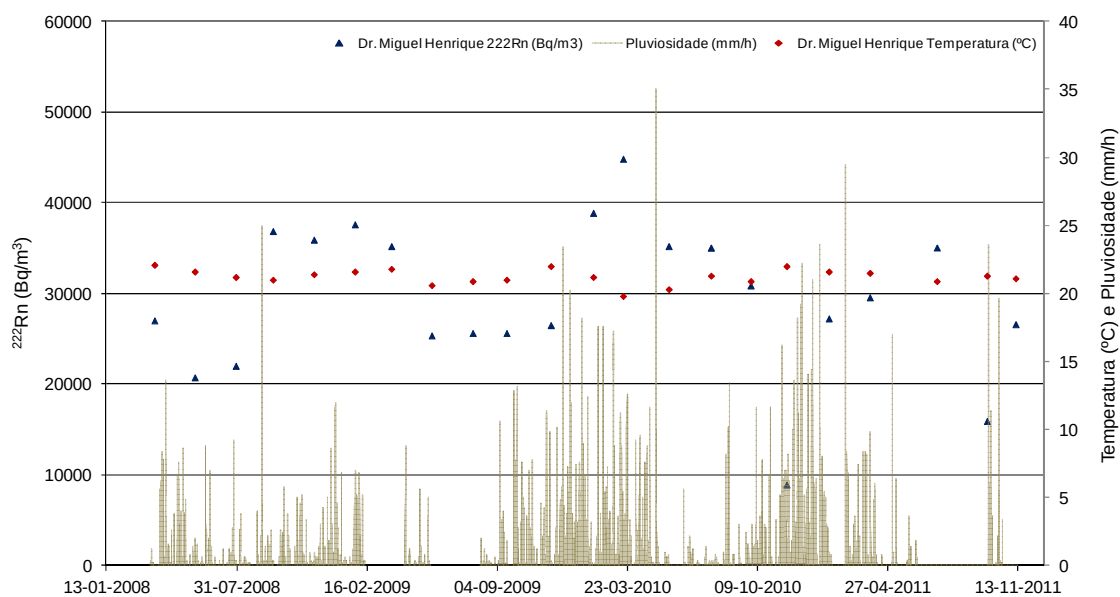


Figura VII.33 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Miguel Henrique e da pluviosidade.

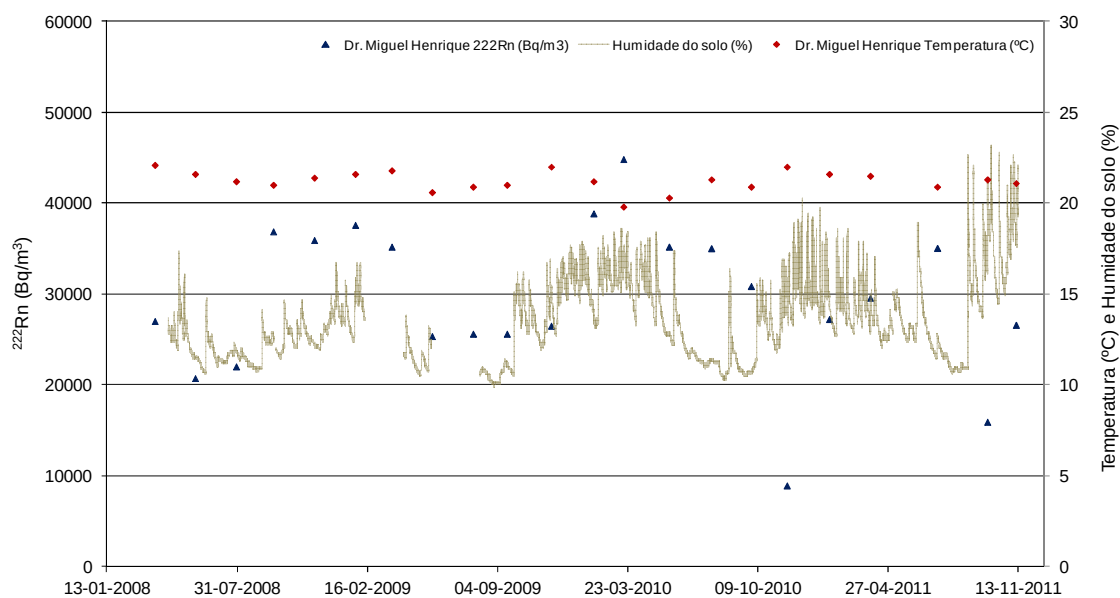


Figura VII.34 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Dr. Miguel Henrique e da umidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

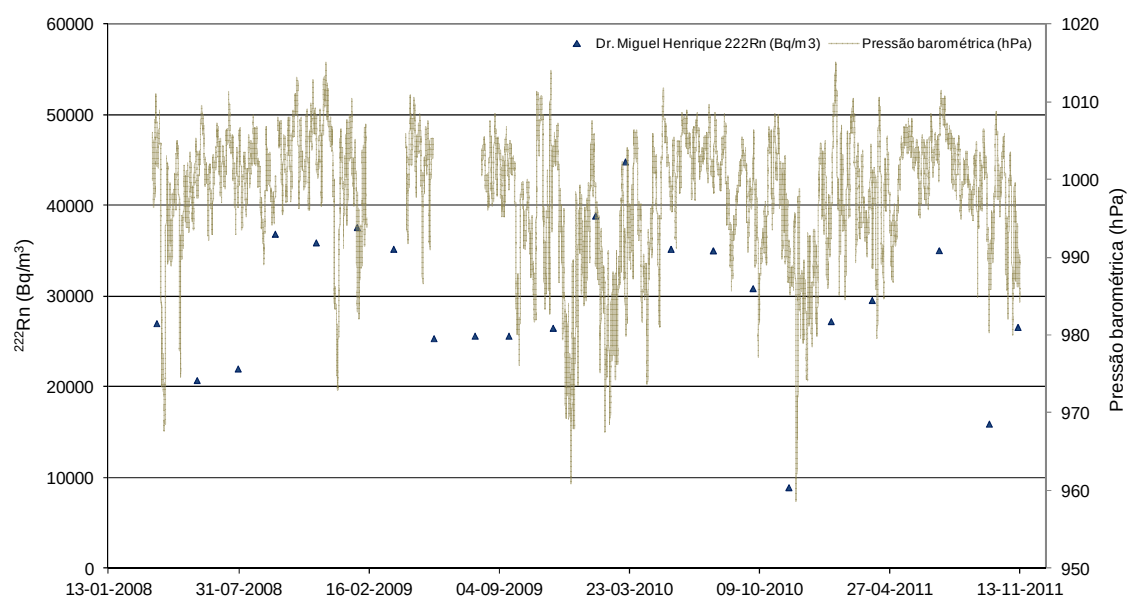


Figura VII.35 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Dr. Miguel Henrique e da pressão barométrica.

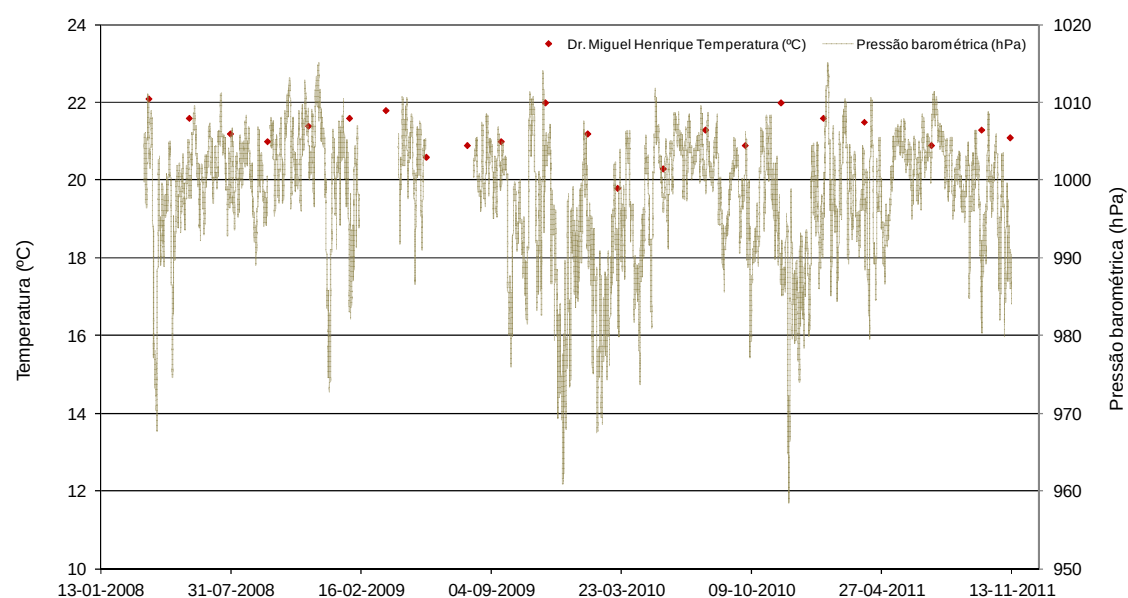


Figura VII.36 – Variação temporal da temperatura na nascente Dr. Miguel Henrique e da pressão barométrica.

7. Quenturas I

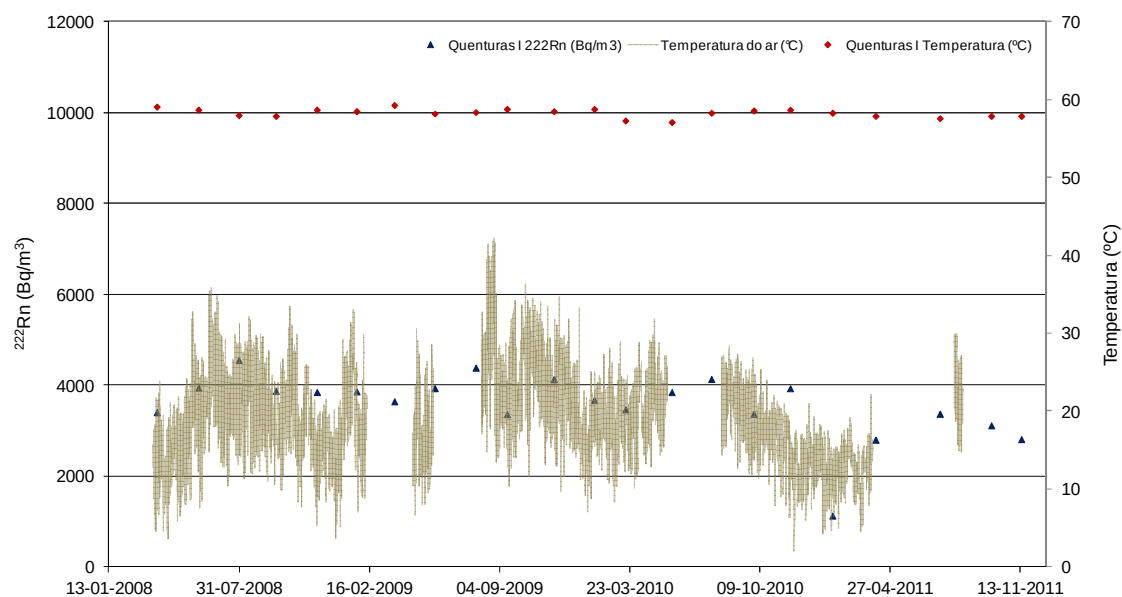


Figura VII.37 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas I e da temperatura do ar.

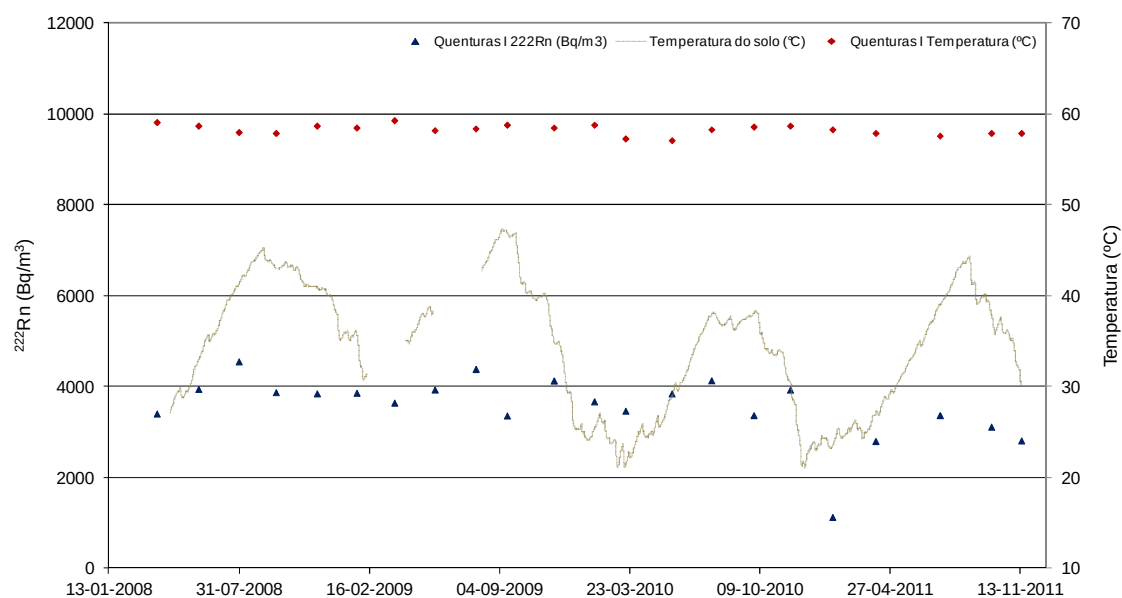


Figura VII.38 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas I e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

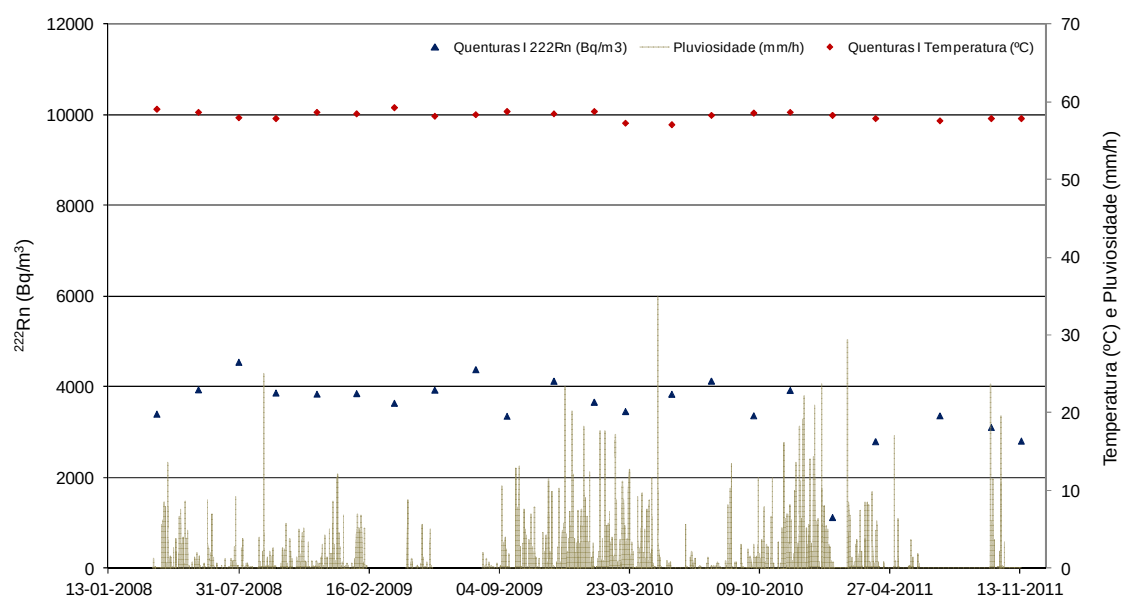


Figura VII.39 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas I e da pluviosidade.

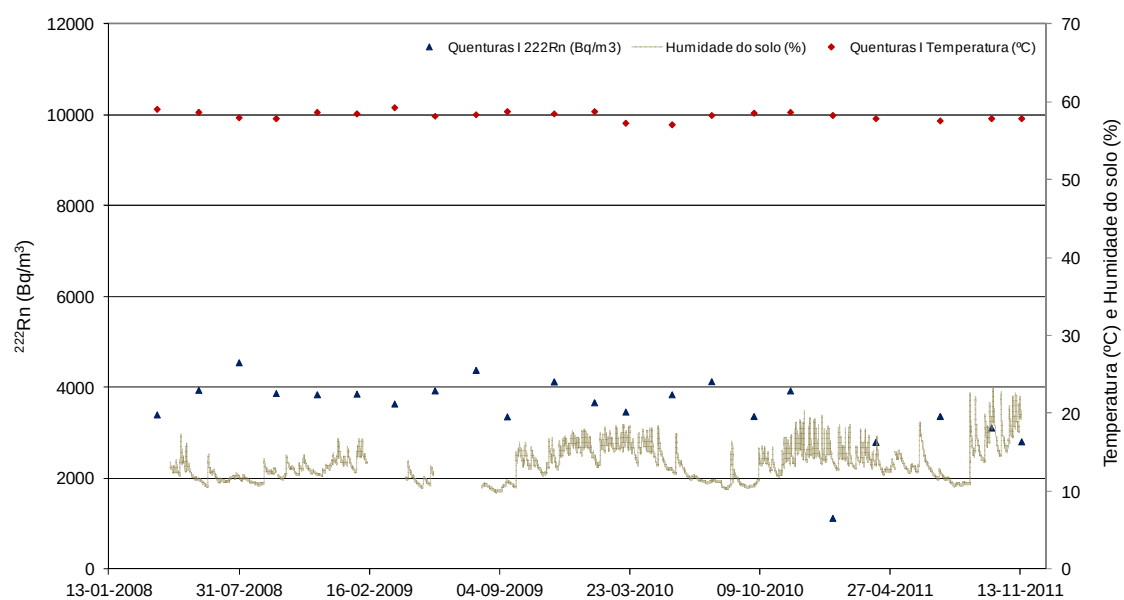


Figura VII.40 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas I e da umidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

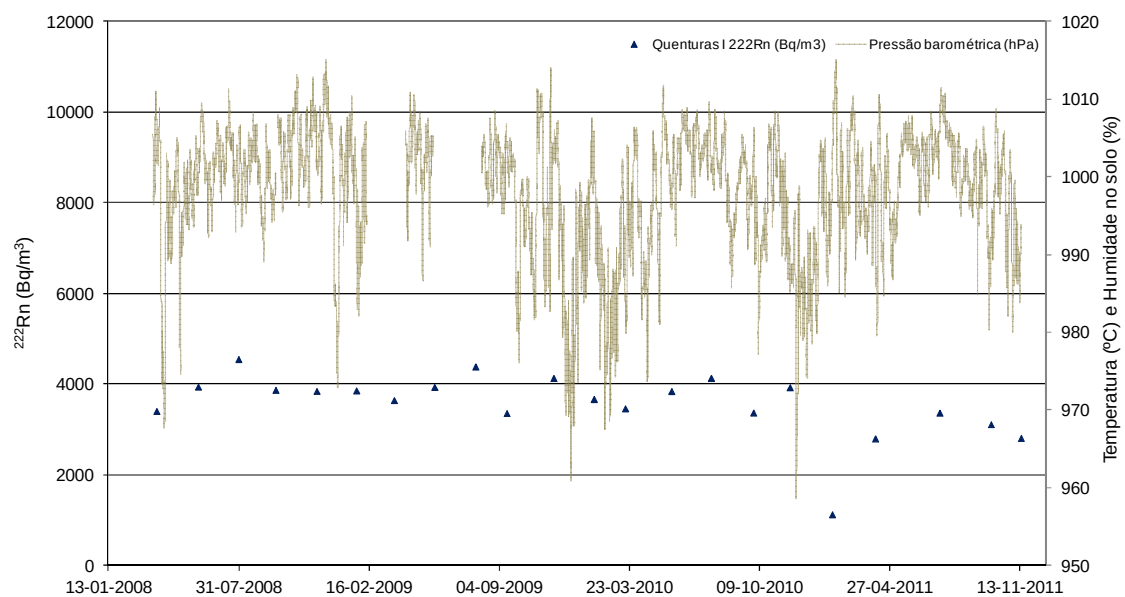


Figura VII.41 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas I e da pressão barométrica.

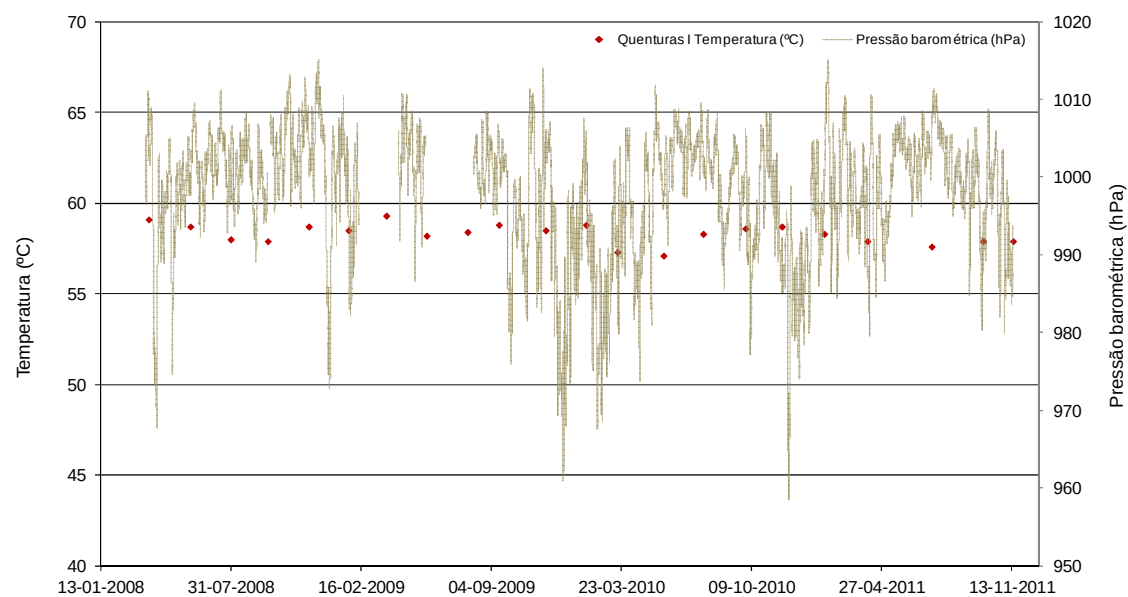


Figura VII.42 – Variação temporal da temperatura na nascente Quenturas I e da pressão barométrica.

8. Quenturas II

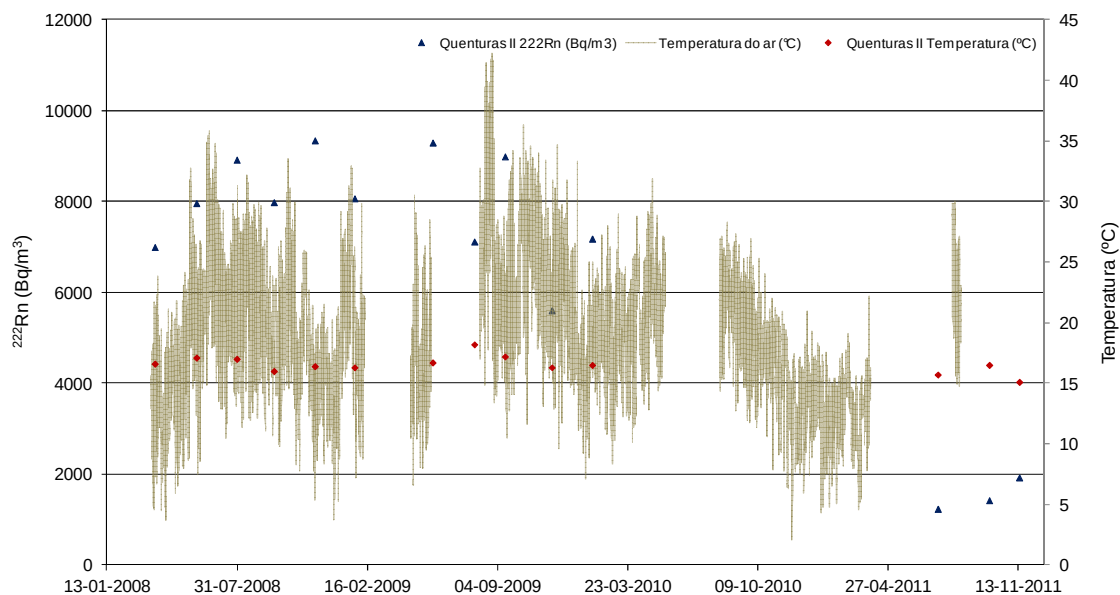


Figura VII.43 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas II e da temperatura do ar.

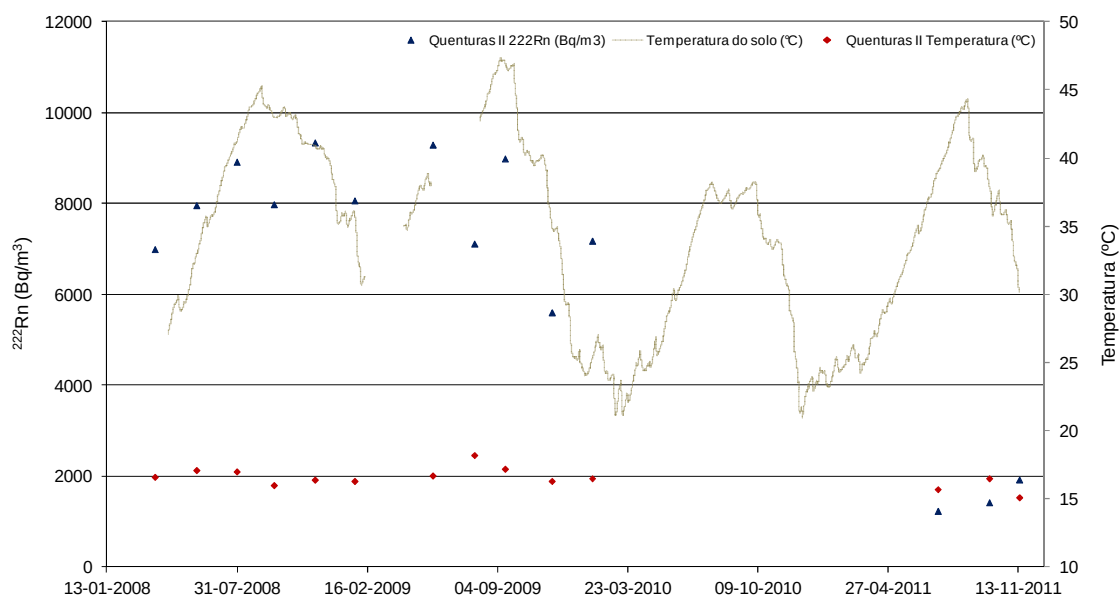


Figura VII.44 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas II e da temperatura do solo.

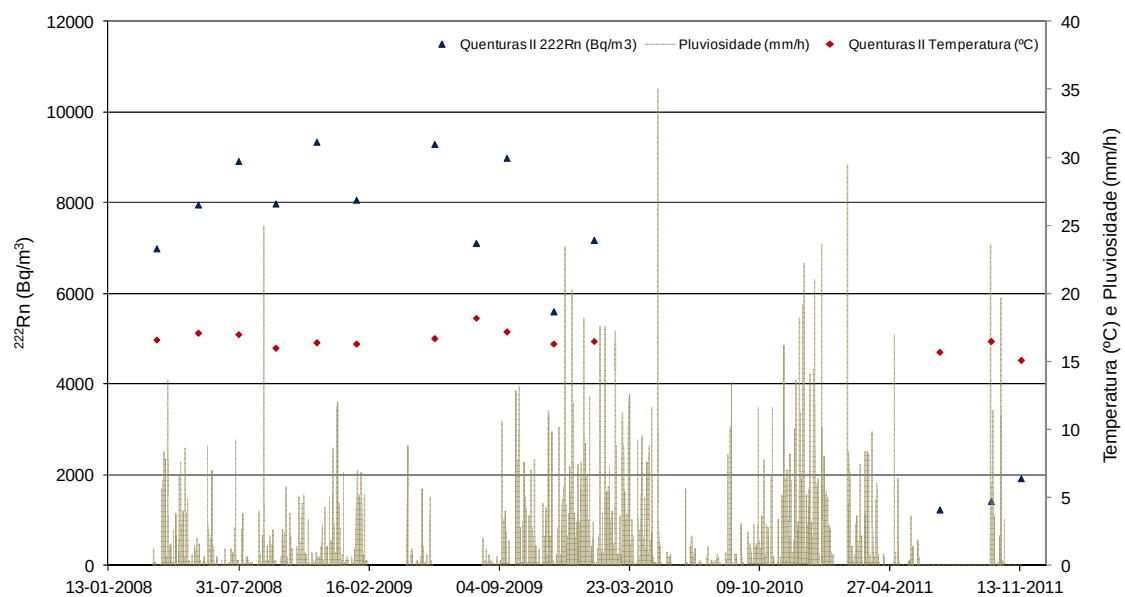


Figura VII.45 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas II e da pluviosidade.

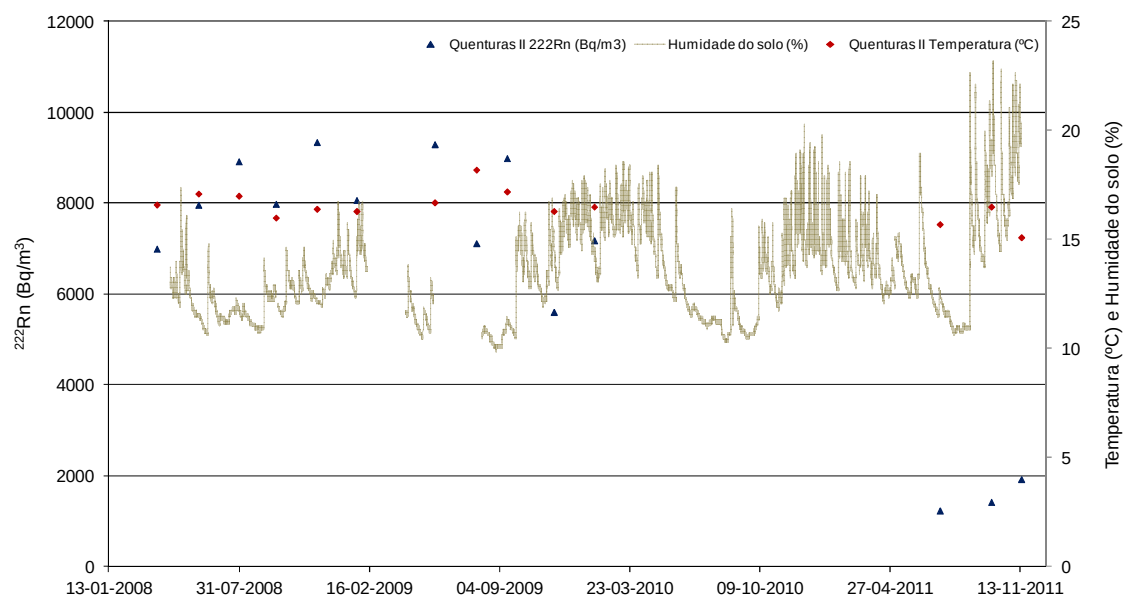


Figura VII.46 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas II e da humidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

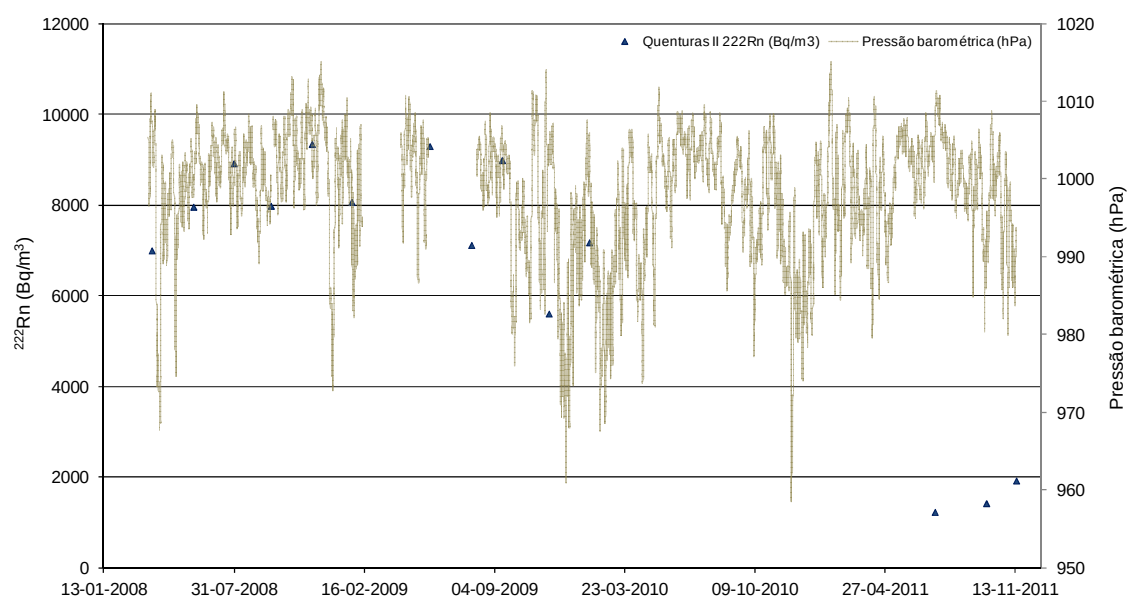


Figura VII.47 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas II e da pressão barométrica.

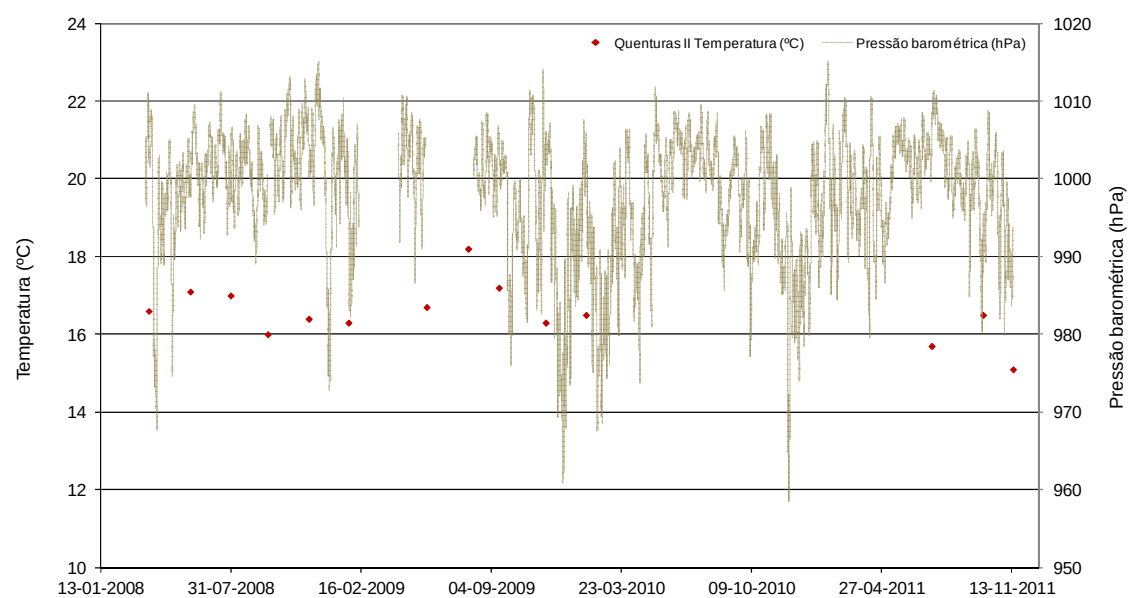


Figura VII.48 – Variação temporal da temperatura na nascente Quenturas II e da pressão barométrica.

9. Quenturas III

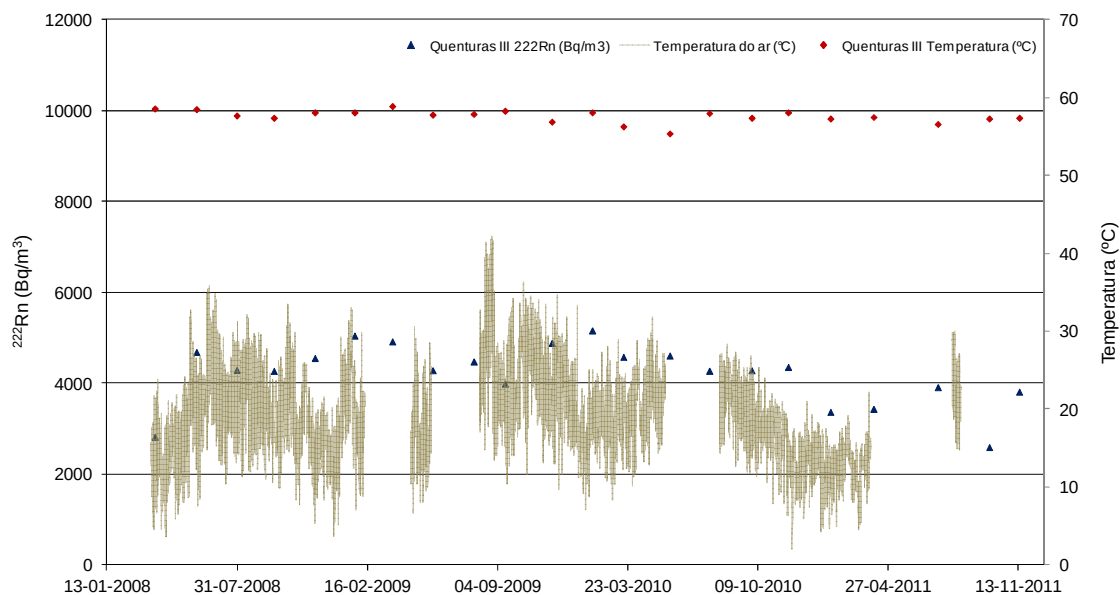


Figura VII.49 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas III e da temperatura do ar.

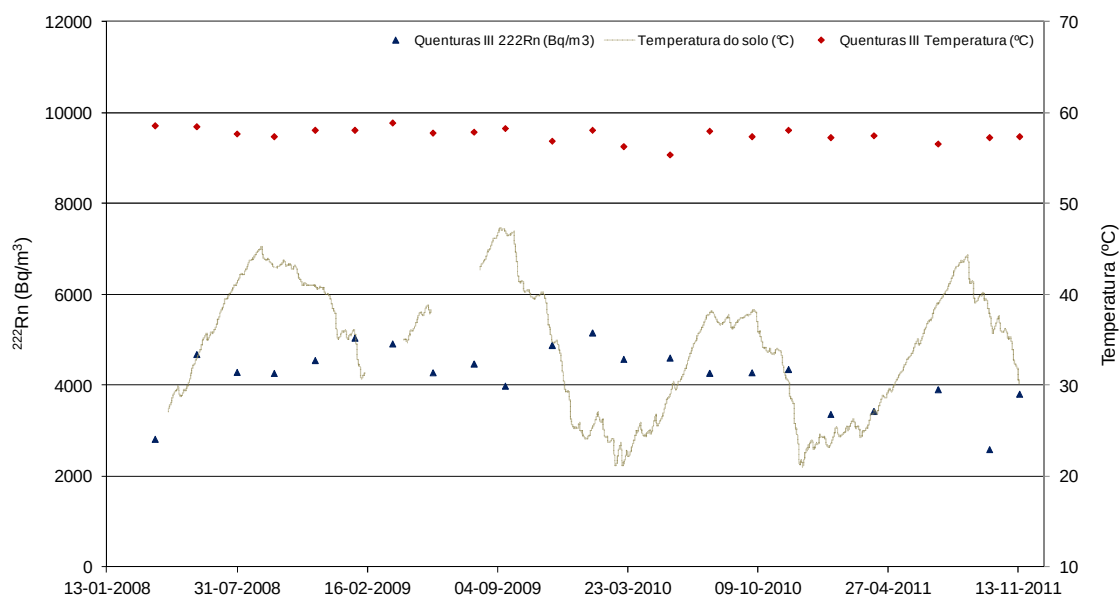


Figura VII.50 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Quenturas III e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

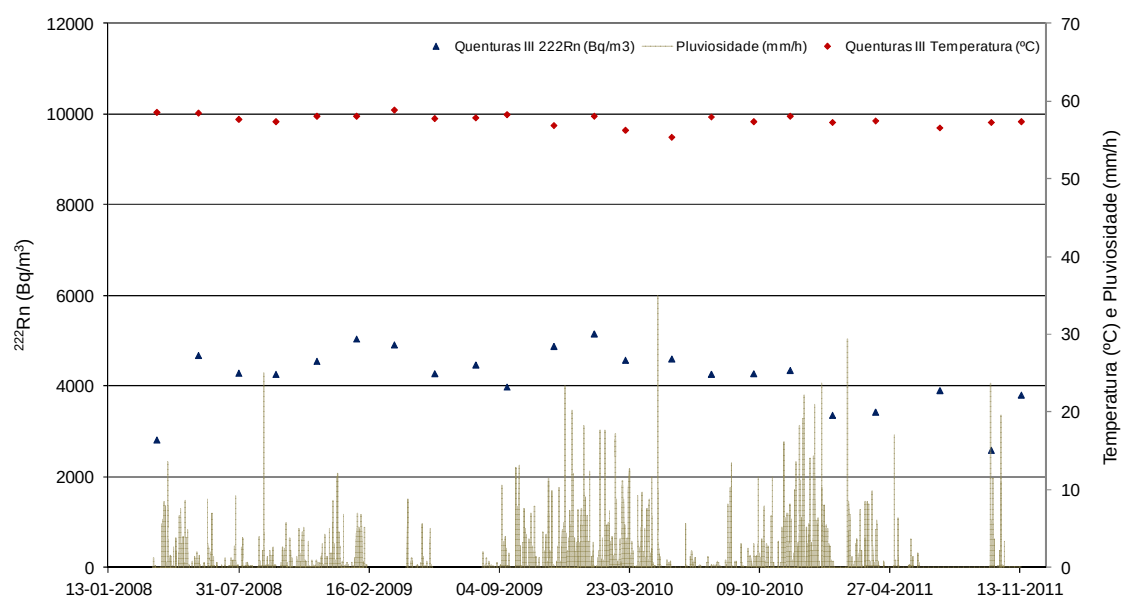


Figura VII.51 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Qenturas III e da pluviosidade.

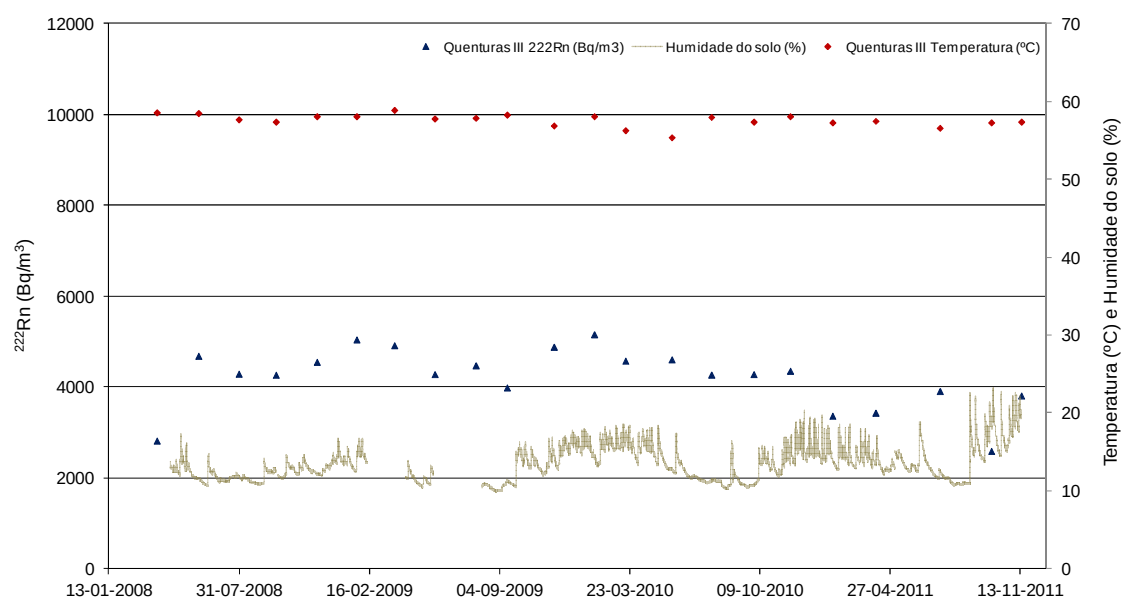


Figura VII.52 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Qenturas III e da umidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

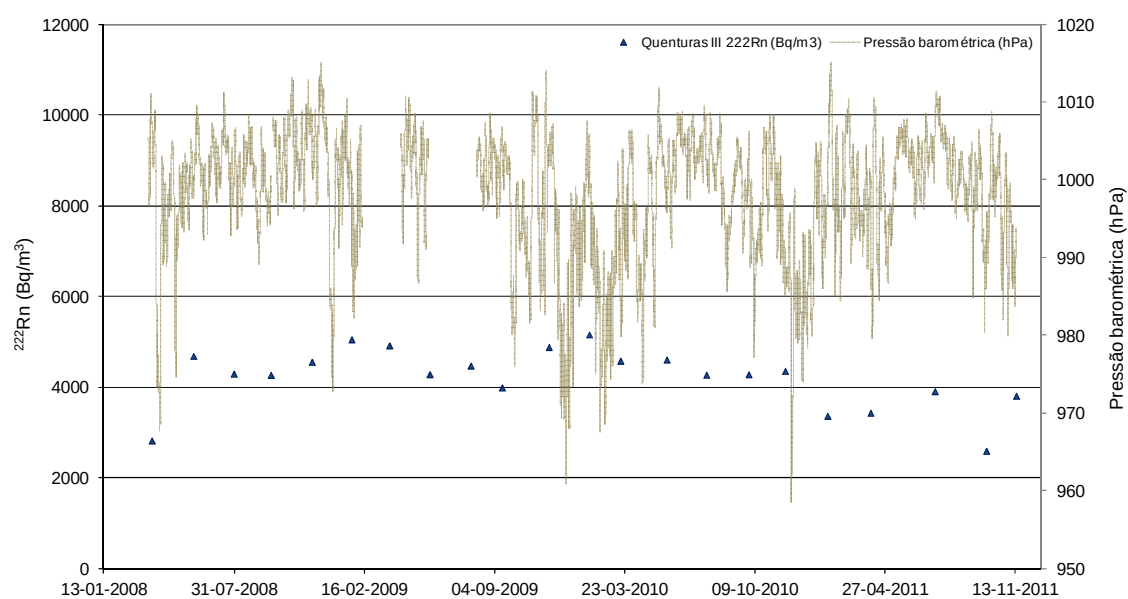


Figura VII.53 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Quenturas III e da pressão barométrica.

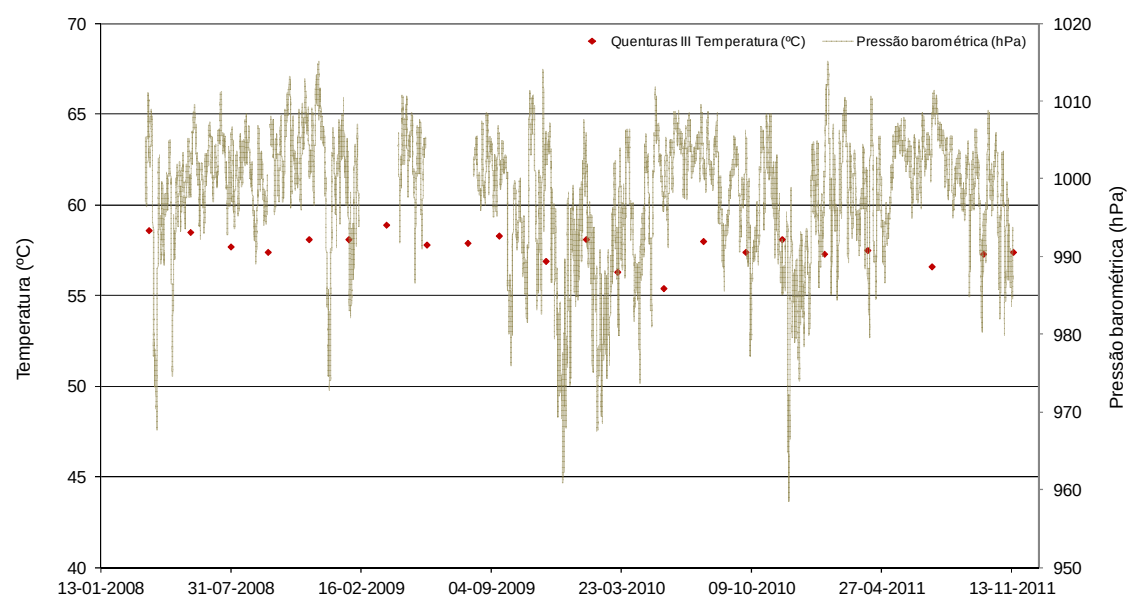


Figura VII.54 – Variação temporal da temperatura na nascente Quenturas III e da pressão barométrica.

10. Grutinha I

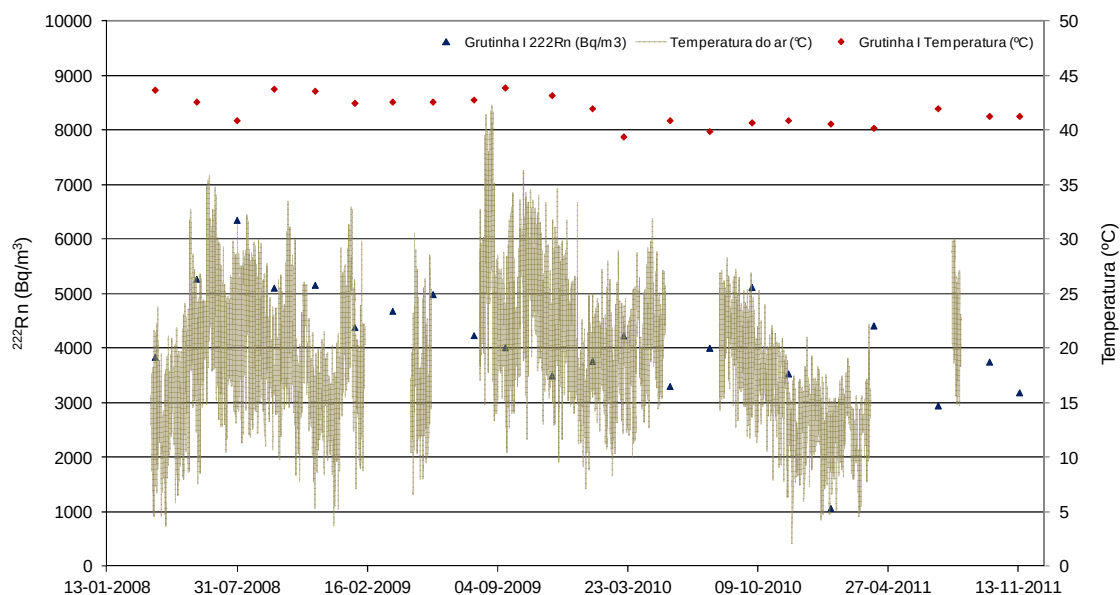


Figura VII.55 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha I e da temperatura do ar.

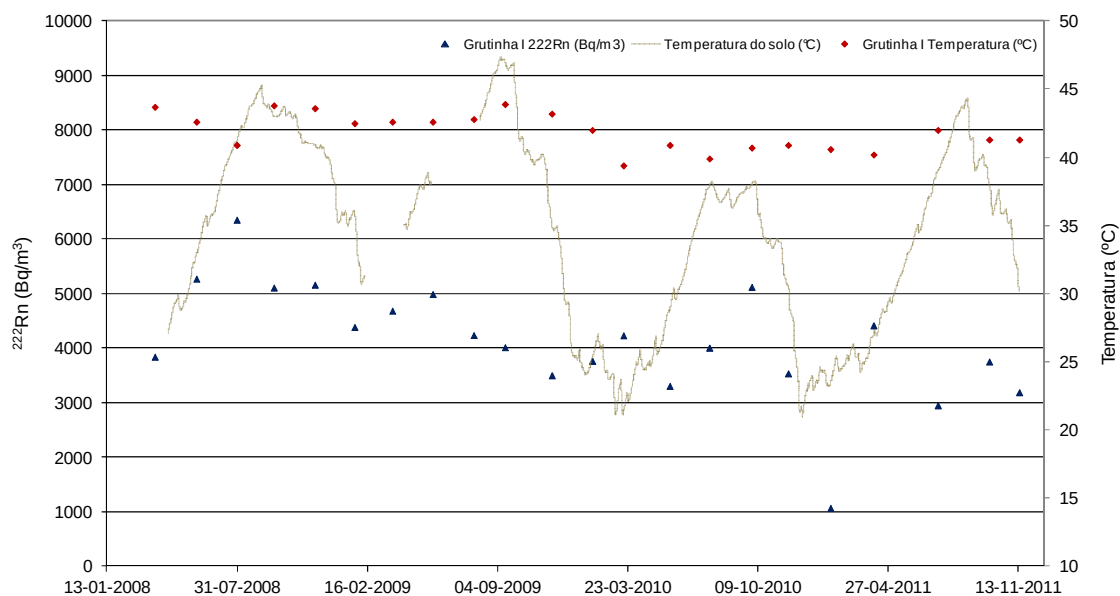


Figura VII.56 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha I e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

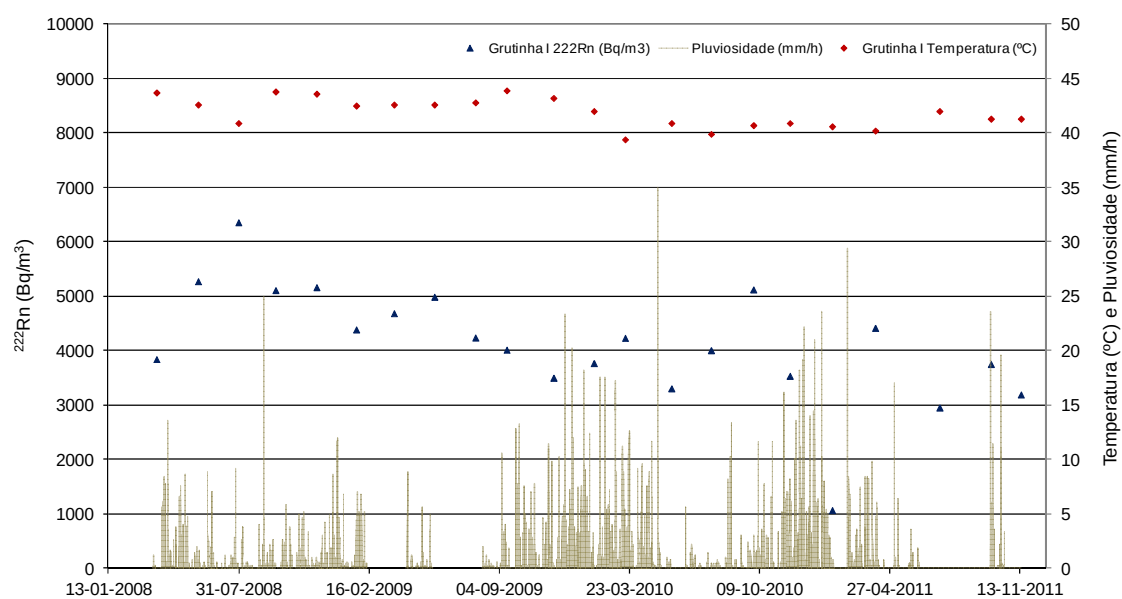


Figura VII.57 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha I e da pluviosidade.

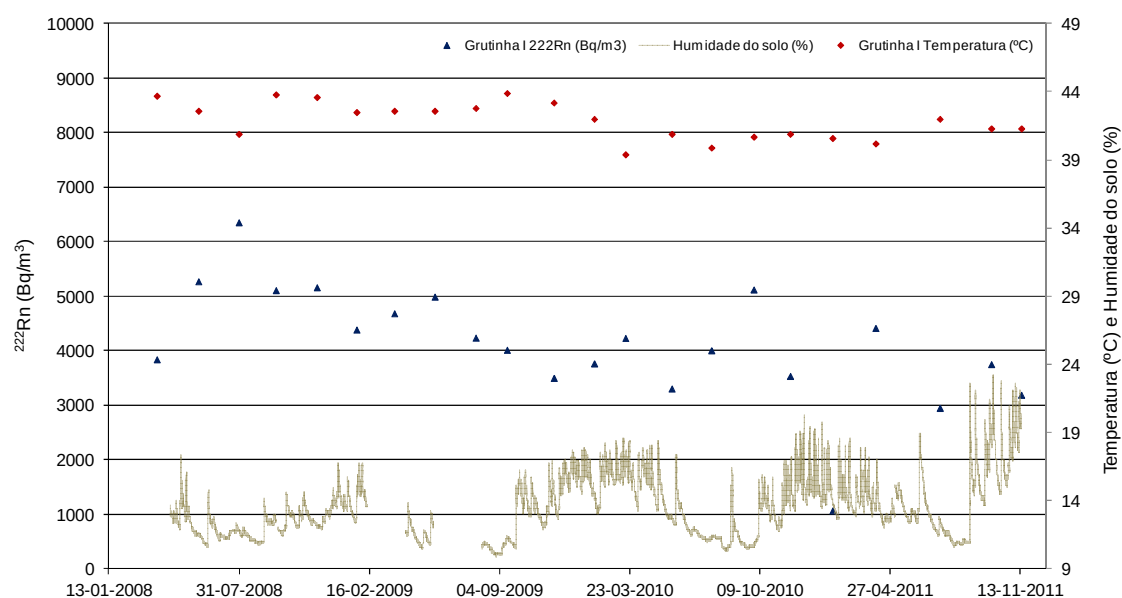


Figura VII.58 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha I e da umidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

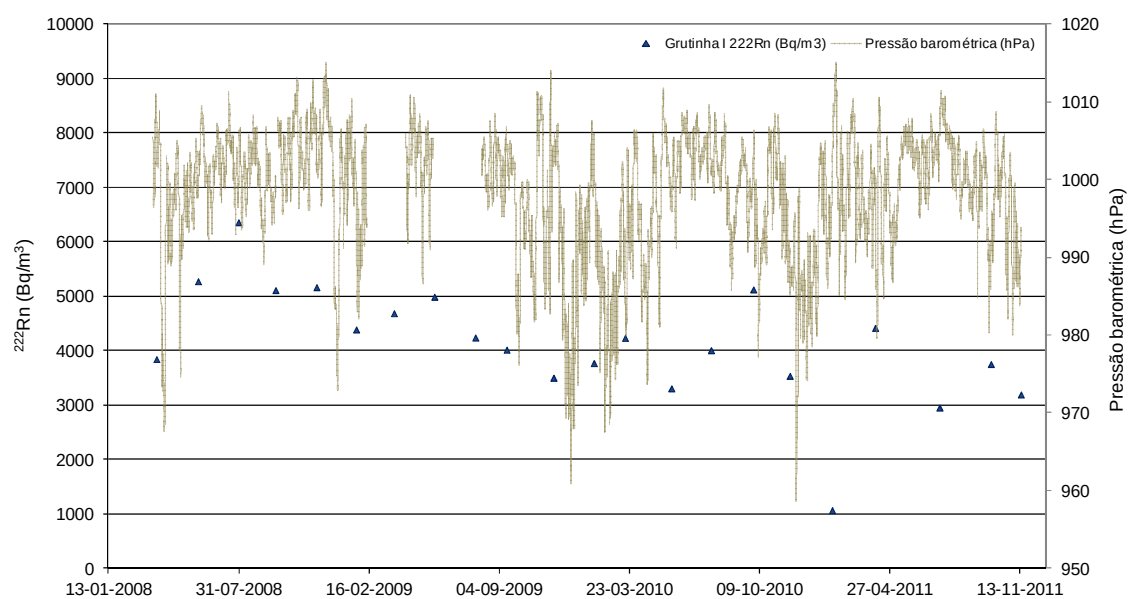


Figura VII.59 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha I e da pressão barométrica.

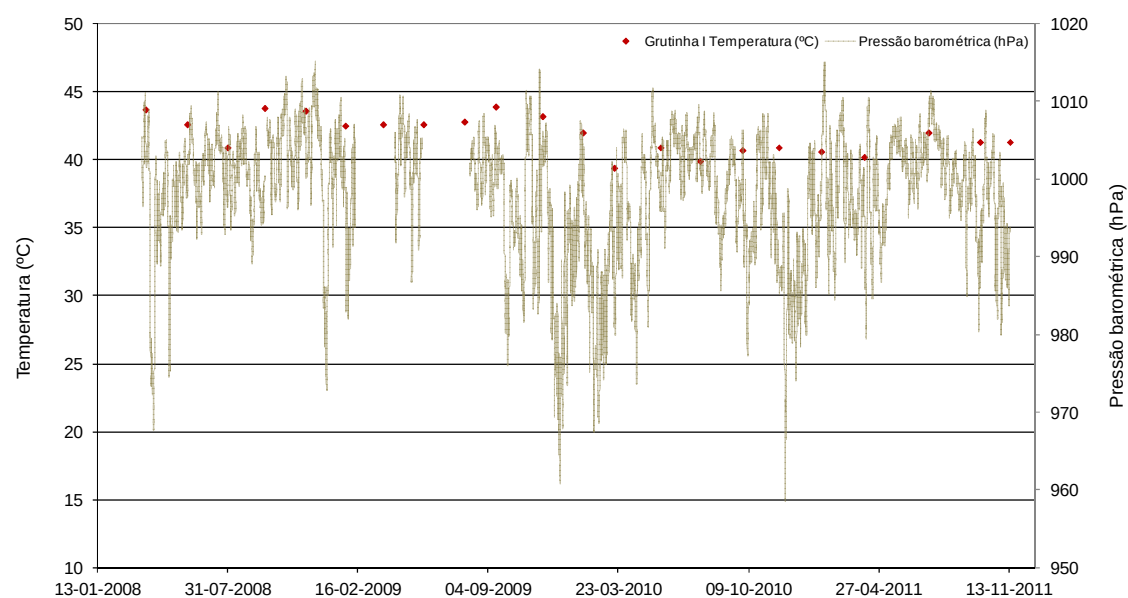


Figura VII.60 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha I e da pressão barométrica.

11. Grutinha II

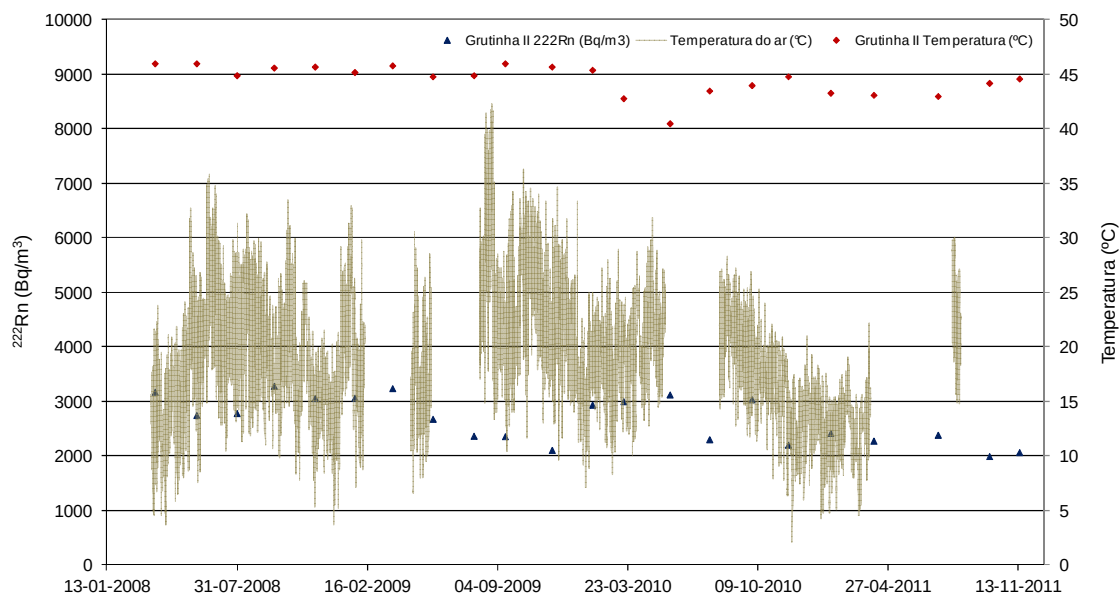


Figura VII.61 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha II e da temperatura do ar.

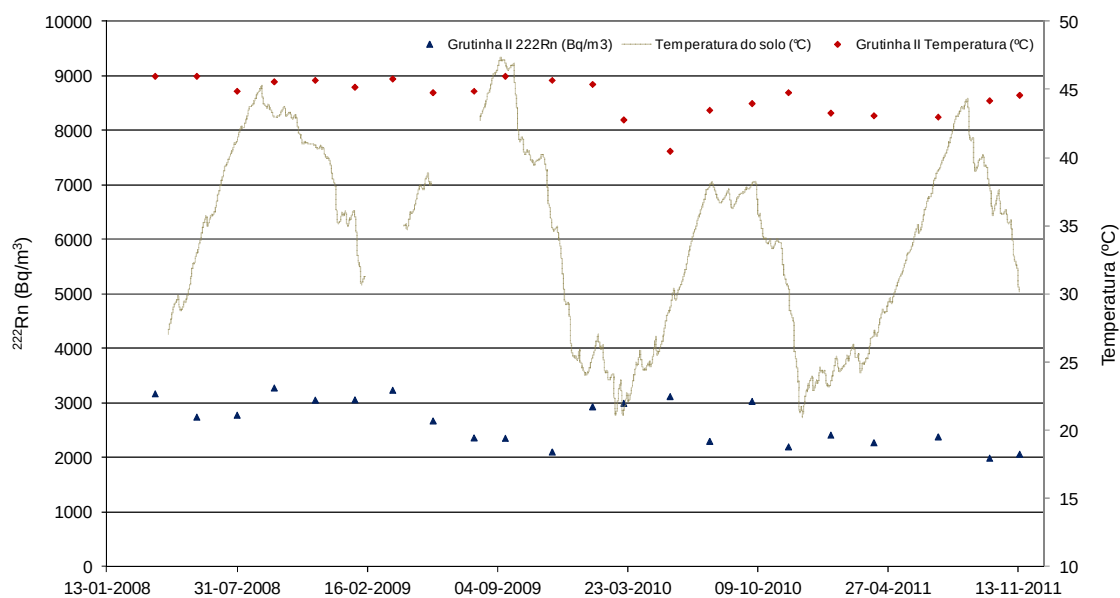


Figura VII.62 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha II e da temperatura do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

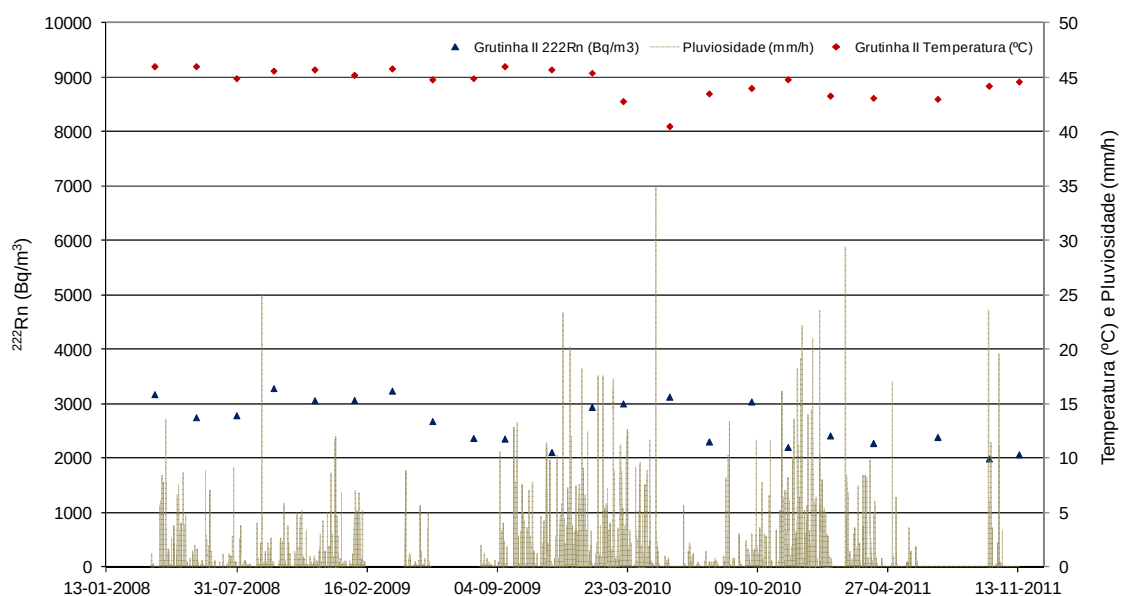


Figura VII.63 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha II e da pluviosidade.

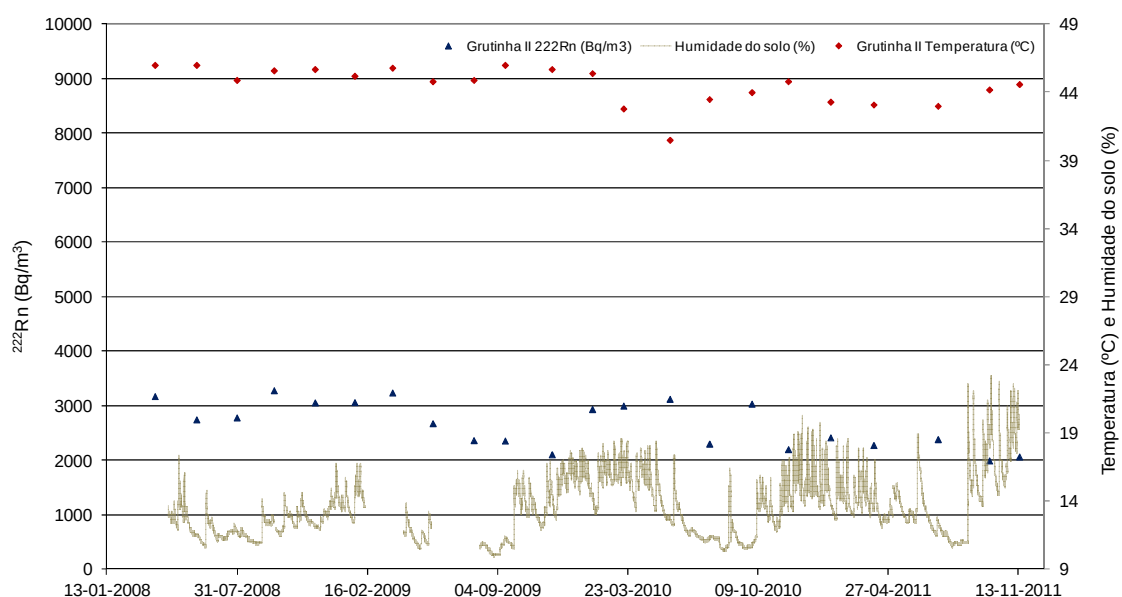


Figura VII.64 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente Grutinha II e da umidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

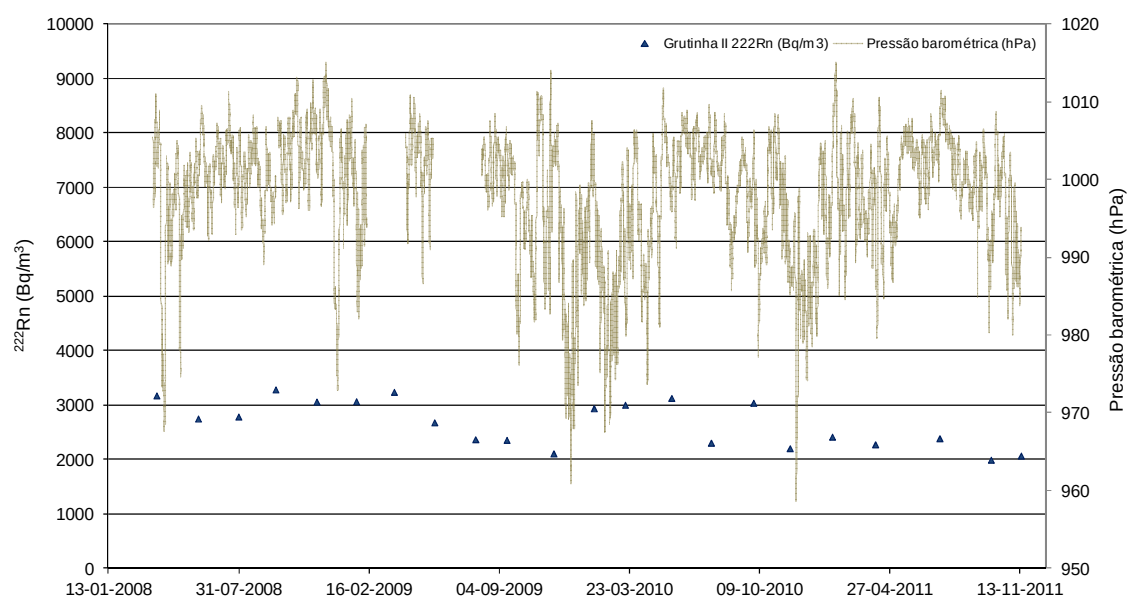


Figura VII.65 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente Grutinha II e da pressão barométrica.

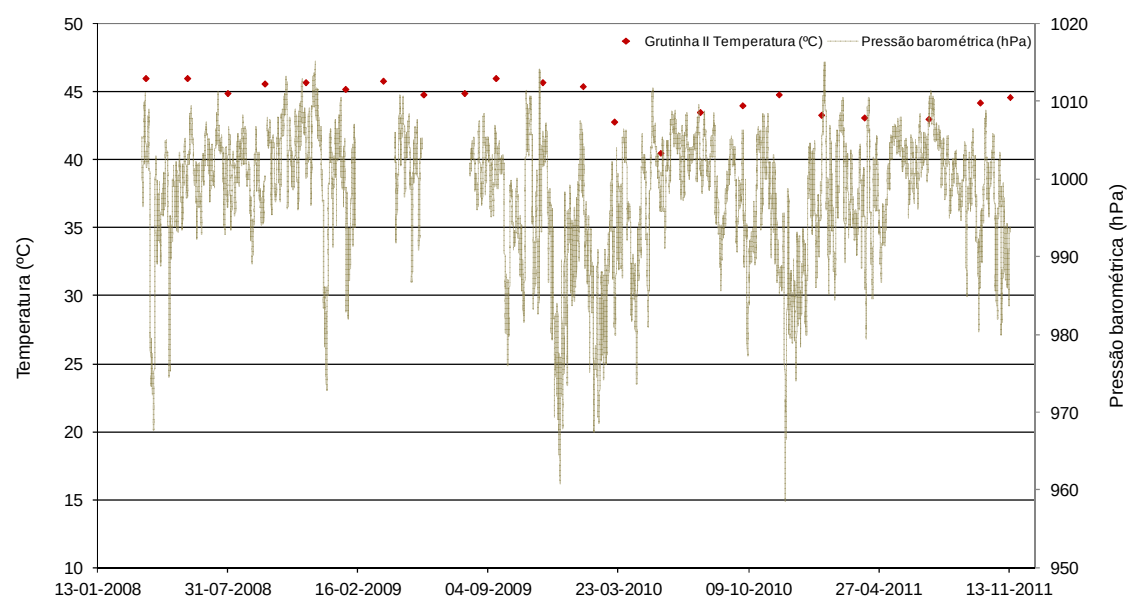


Figura VII.66 – Variação temporal da temperatura na nascente Grutinha II e da pressão barométrica.

12. Torno

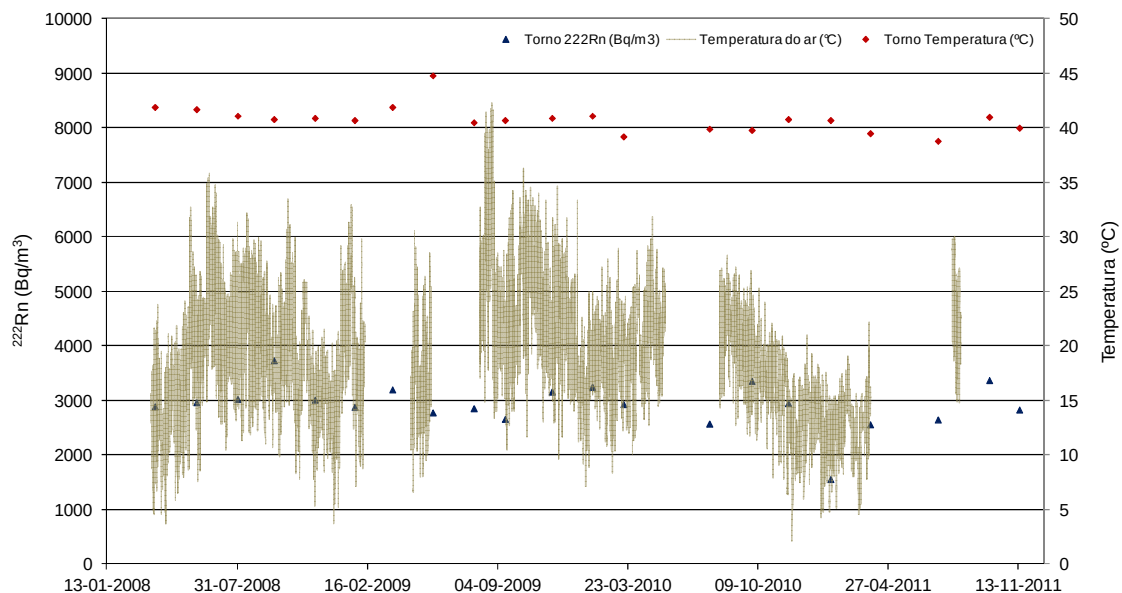


Figura VII.67 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Torno e da temperatura do ar.

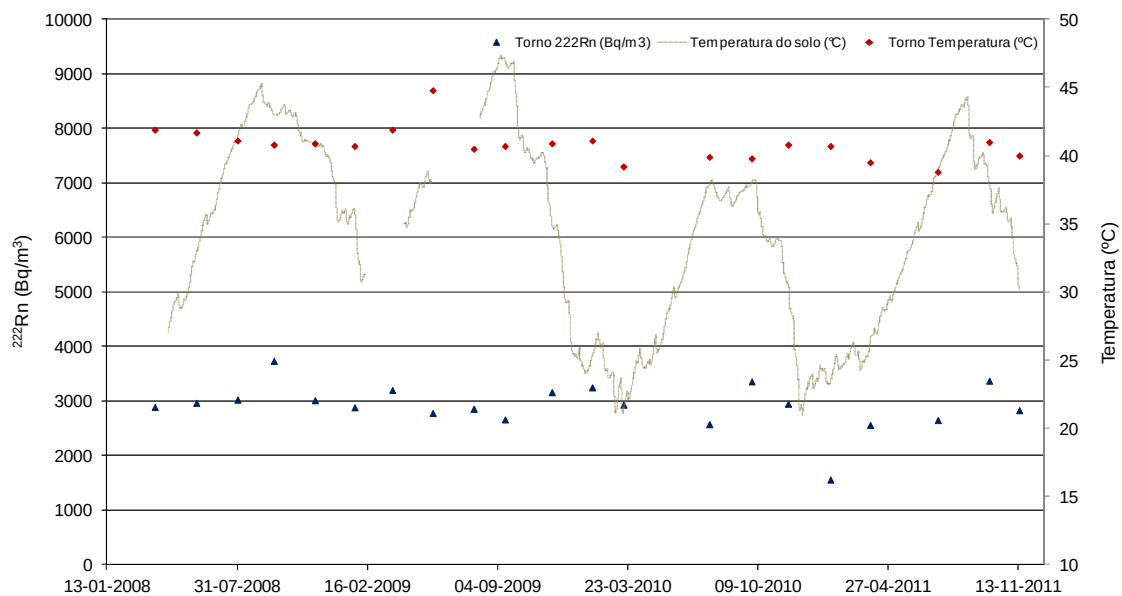


Figura VII.68 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Torno e da temperatura do solo.

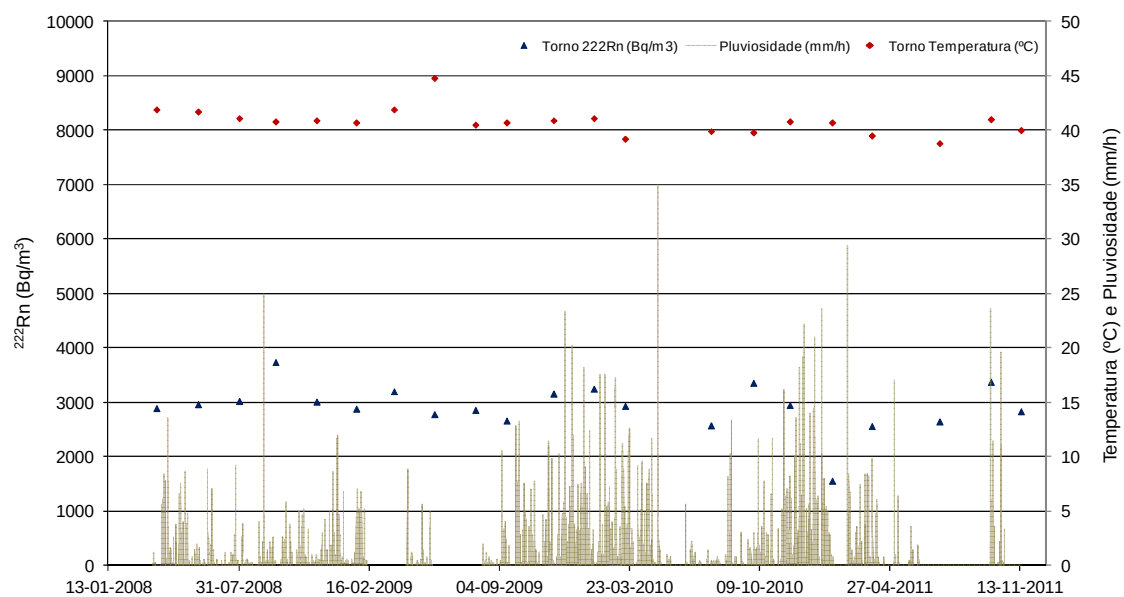


Figura VII.69 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Torno e da pluviosidade.

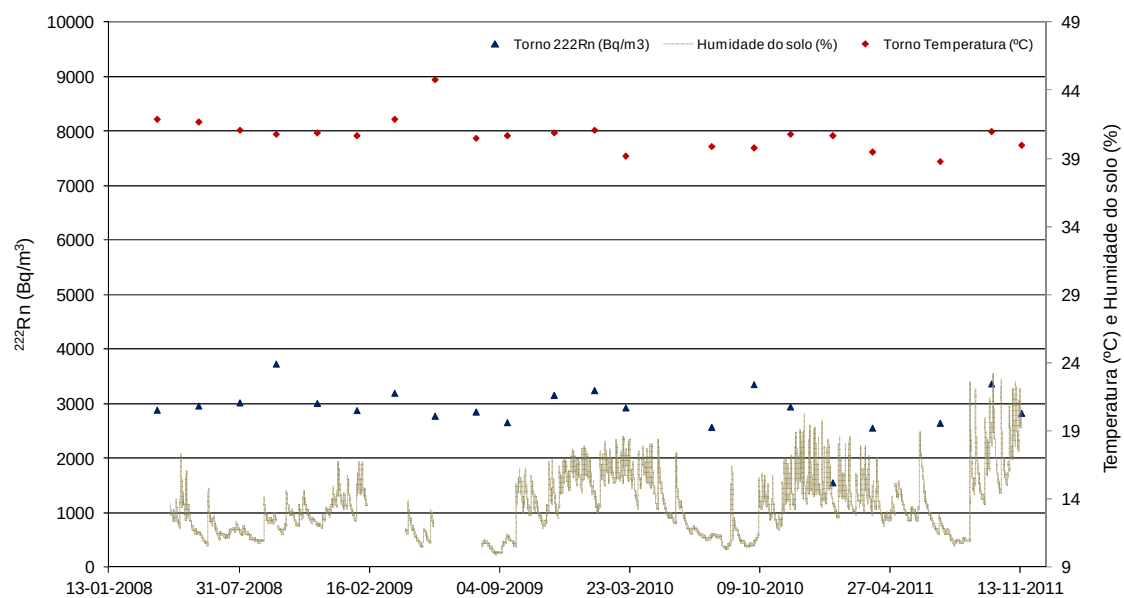


Figura VII.70 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e da temperatura na nascente do Torno e da umidade do solo.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM NASCENTES E DOS DIVERSOS PARÂMETROS

ANALISADOS

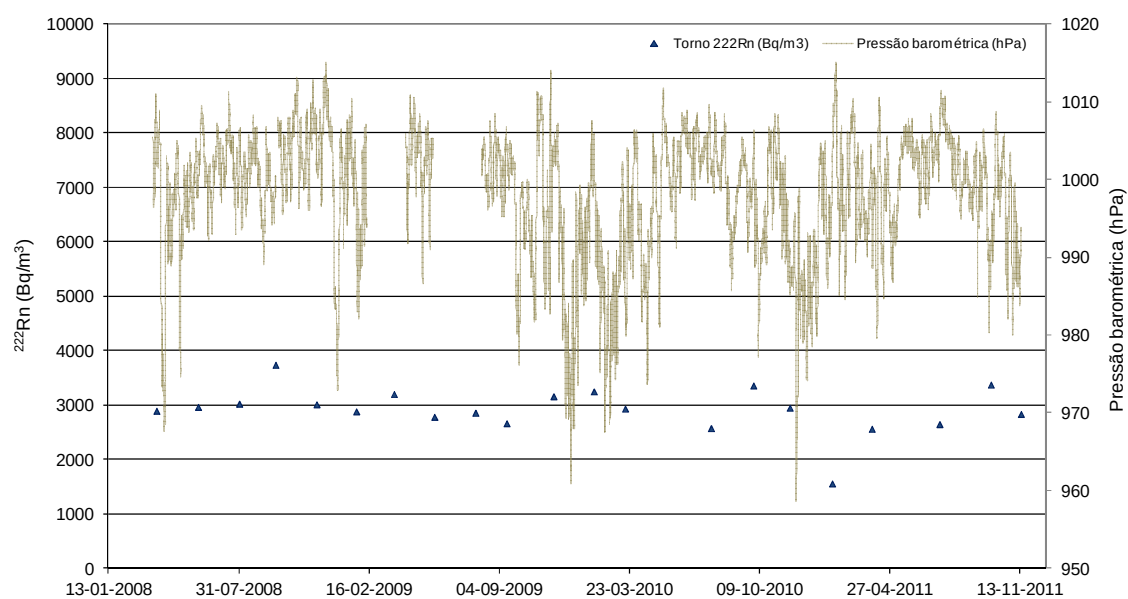


Figura VII.71 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn na nascente do Torno e da pressão barométrica.

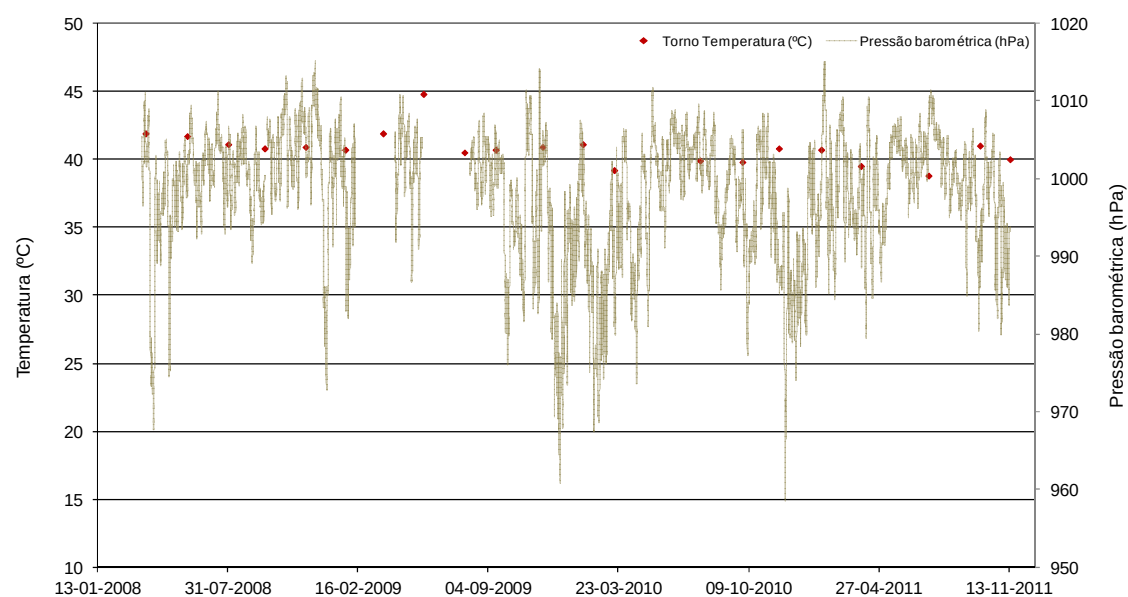


Figura VII.72 – Variação temporal da temperatura na nascente do Torno e da pressão barométrica.

ANEXO VIII

QUESTIONÁRIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DOS EDIFÍCIOS

Monitorização da qualidade do ar interior (^{222}Rn)**1. Habitação**

Morada: _____

Localidade: _____ Código Postal: _____

Coordenadas:

M _____ P _____

Número de identificação interno: _____

2. Identificação Proprietário/ Arrendatário

Nome: _____

Habitação: Própria ☐ Aluguer ☐Habitação: Permanente ☐ Férias ☐

Contacto:

Telefone: _____ Telemóvel: _____

3. Equipamento

Equipamento: Ramon 2.2

Número de série: _____

4. Características da habitaçãoMaterial de Construção: Blocos e cimento ☐ Pedra ☐Caixa-de-ar: Presente ☐ Ausente ☐Cave: Presente ☐ Ausente ☐

Número de pisos: _____

Ano de construção: _____

Estado de conservação:1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐**5. Características do local de amostragem****Divisão:** Sala ☐ Quarto ☐ Outra ☐ Qual: _____**Piso:** Cave ☐ Rés-do-chão ☐**Paredes:** Blocos e cimento ☐ Pedra ☐ Madeira ☐ Outra ☐ Qual: _____**Revestimento das Paredes:** Nenhum ☐ Estuque/ Reboco ☐ Tinta ☐Papel ☐ Outro ☐ Qual: _____**Revestimento do chão:** Cimento ☐ Madeira ☐ Mosaico ☐Alcatifa ☐ Outro ☐ Qual: _____Presença de fendas: Sim ☐ Não ☐ Obs: _____**Ventilação para o exterior:** Sim ☐ Não ☐Porta ☐ Janela ☐ Chaminé ☐ Lareira ☐

Número de portas e/ou janelas com ligação ao exterior: _____

Durante a amostragem as portas e/ou janelas estiveram:

	Sempre	Algumas vezes	Raramente
Abertas	☐	☐	☐
Entreabertas	☐	☐	☐
Fechadas	☐	☐	☐

6. Amostragem**Data de início:** _____ **Data Final:** _____**Hora de início:** _____ **Hora Final:** _____**Valor registado:** _____

QUESTIONÁRIO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DOS EDIFÍCIOS

7. **Observações:** _____

ANEXO IX

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS PARÂMETROS ANALISADOS

1. Local de Amostragem 1 - Habitação

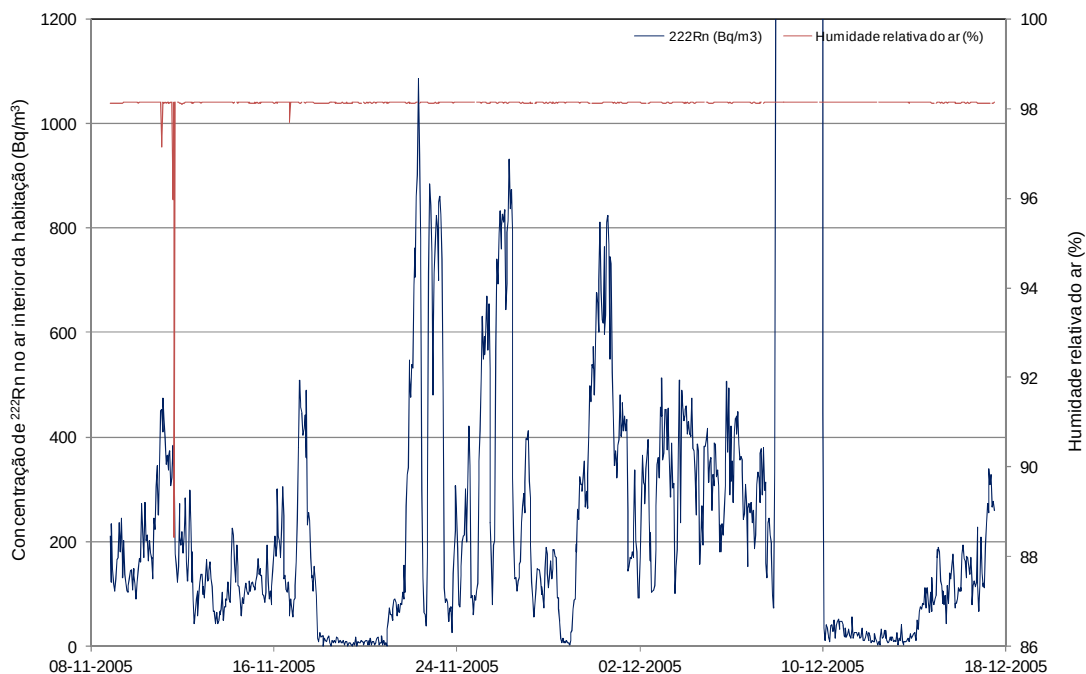


Figura IX.1 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e da umidade relativa do ar na estação GFUR1 (modificado de Silva, 2006).

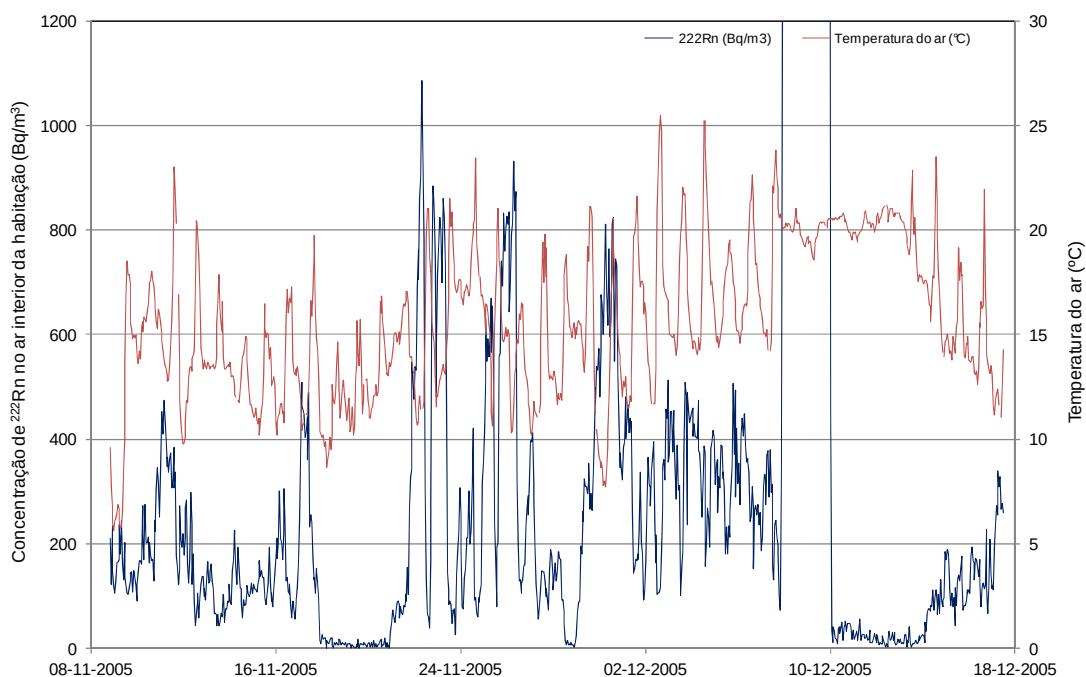


Figura IX.2 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e da temperatura do ar na estação GFUR1 (modificado de Silva, 2006).

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

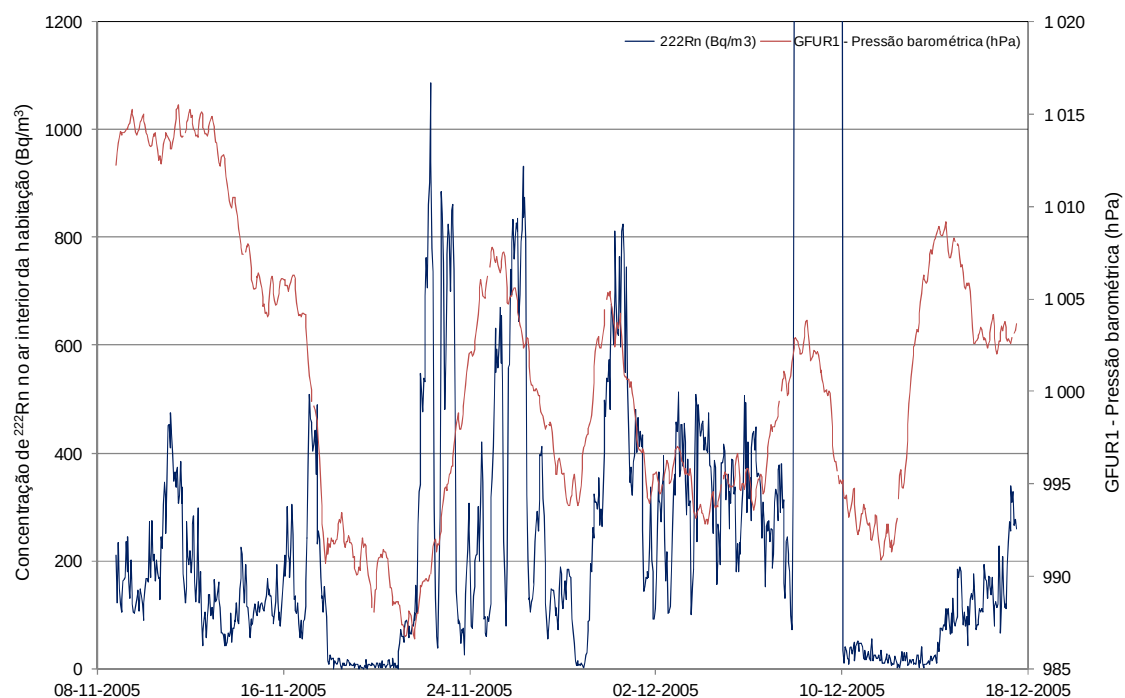


Figura IX.3 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e da pressão barométrica na estação GFUR1.

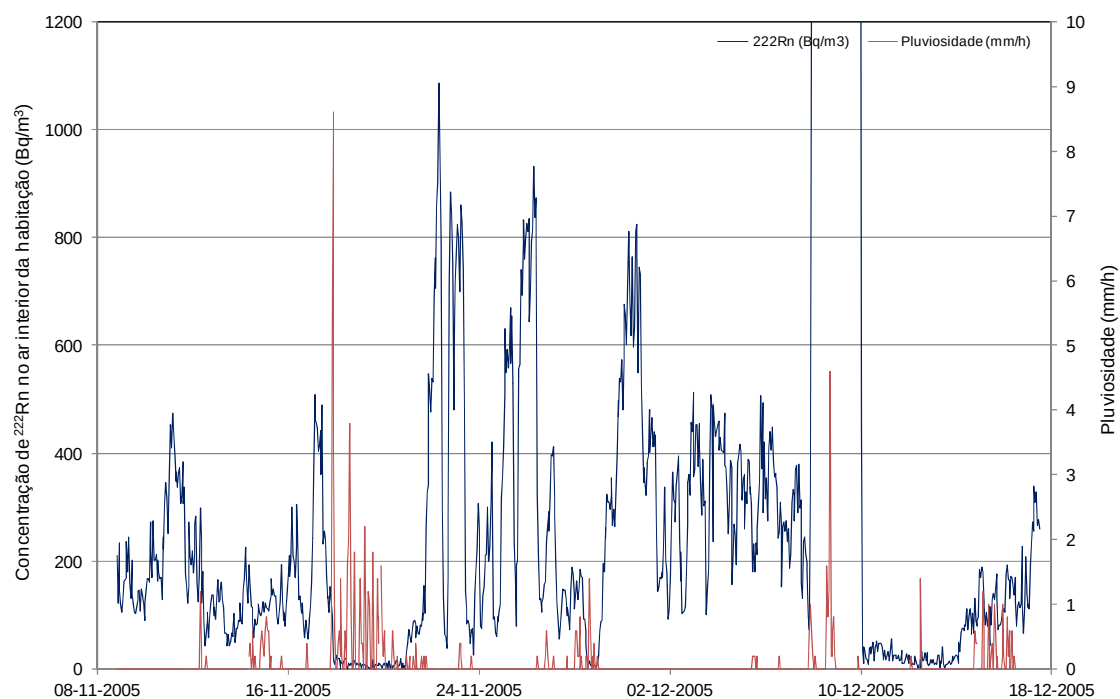


Figura IX.4 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e da pluviosidade na estação GFUR1.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

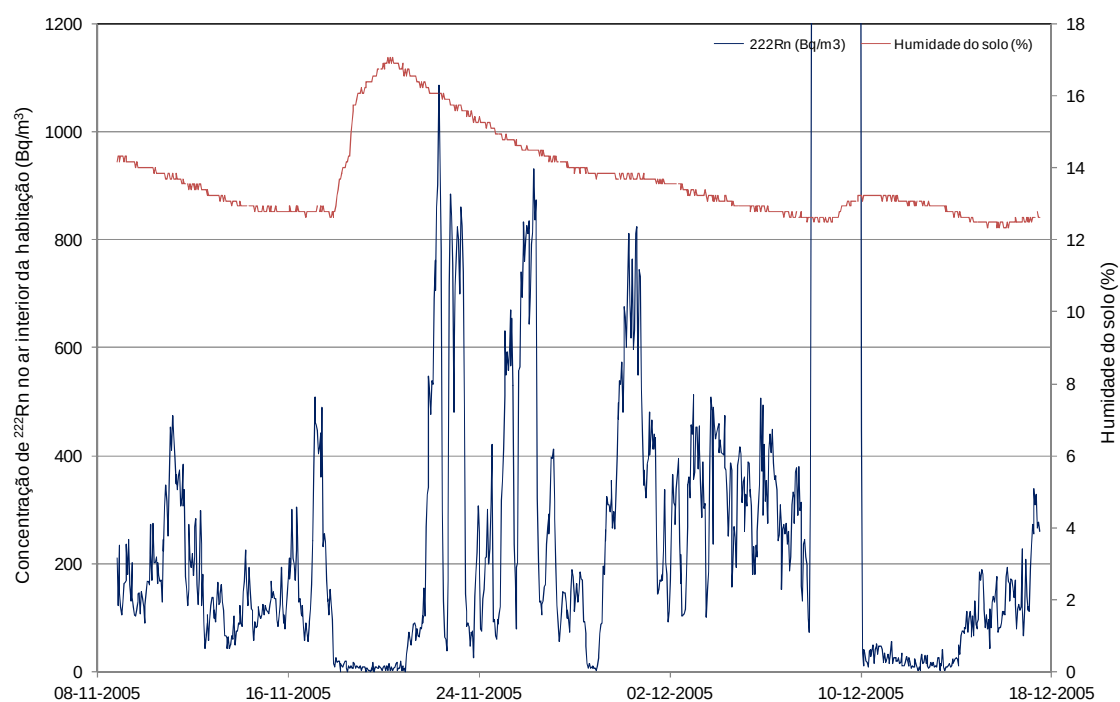


Figura IX.5 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e da humidade do solo na estação GFUR1.

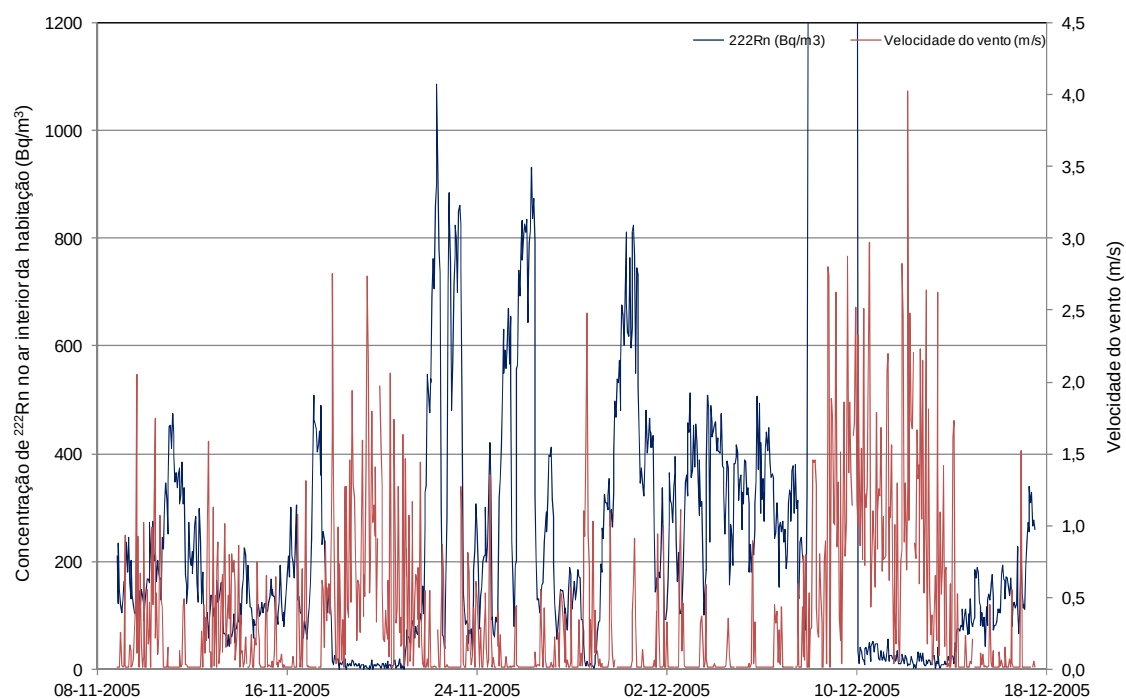


Figura IX.6 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e da velocidade do vento na estação GFUR1 (modificado de Silva, 2006).

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

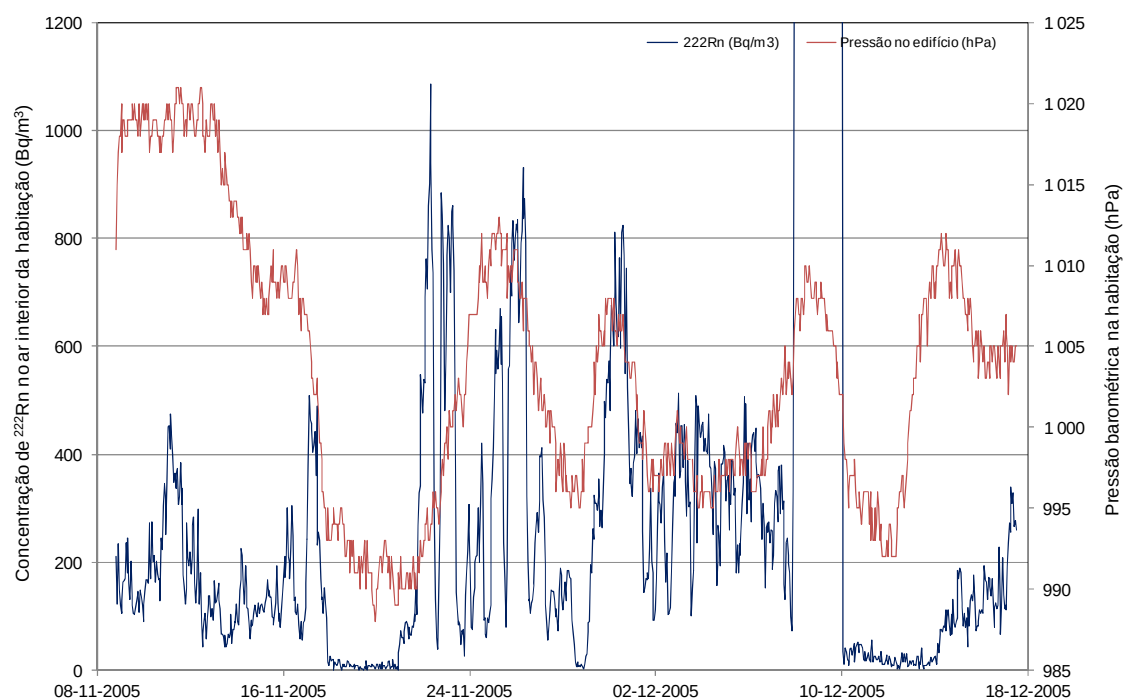


Figura IX.7 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e da pressão no interior deste edifício.

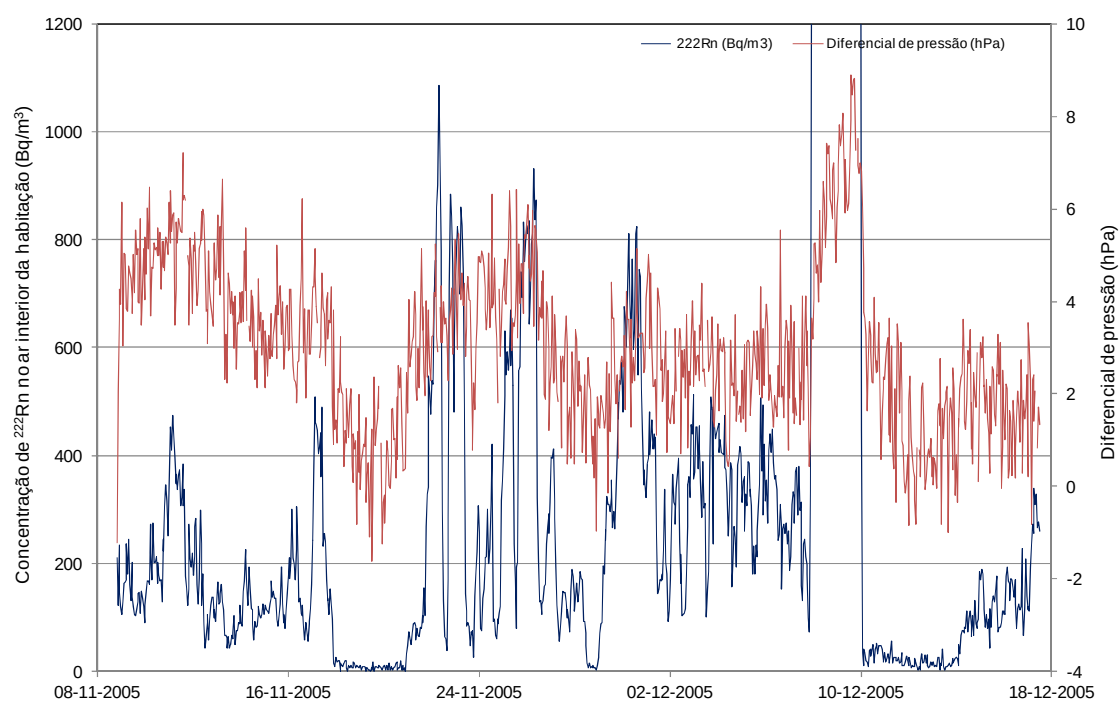


Figura IX.8 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior da habitação, com ampliação da escala, e do diferencial de pressão de pressão entre o interior e o exterior deste edifício.

2. Local de Amostragem 2 - Edifício Comercial

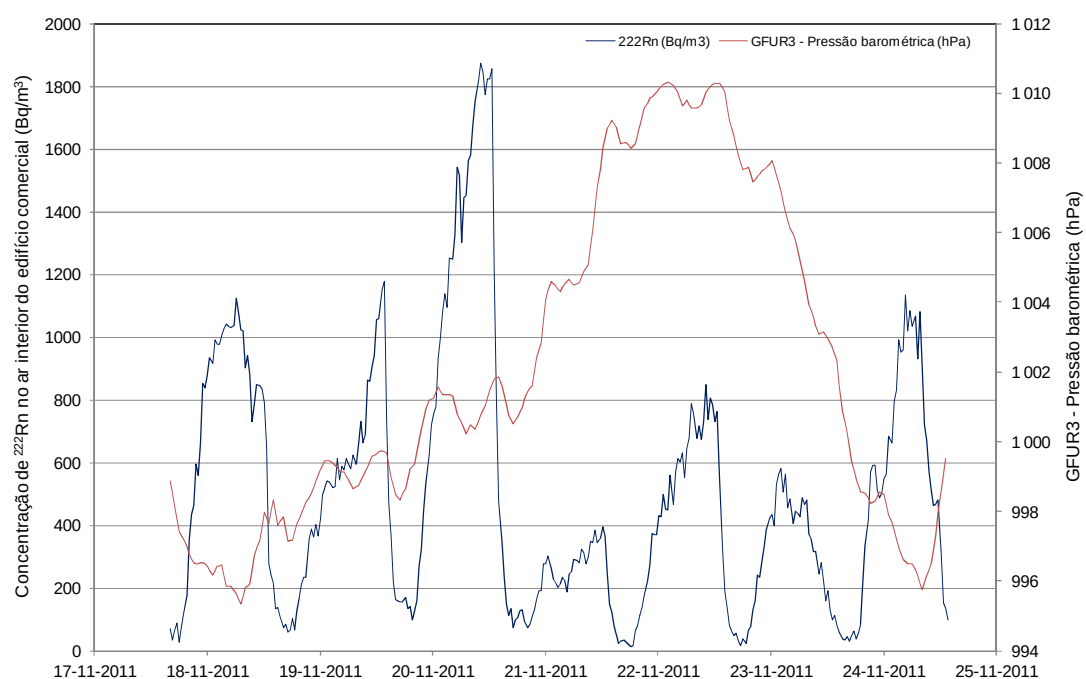


Figura IX.9 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da pressão barométrica na estação GFUR3.

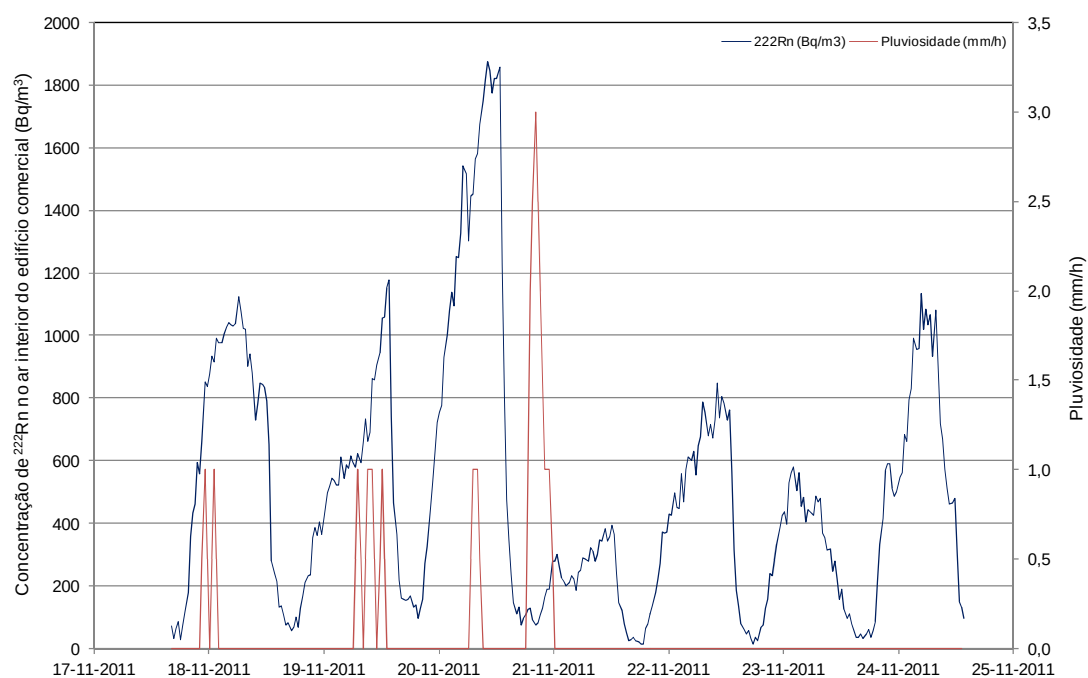


Figura IX.10 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da pluviosidade na estação GFUR3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

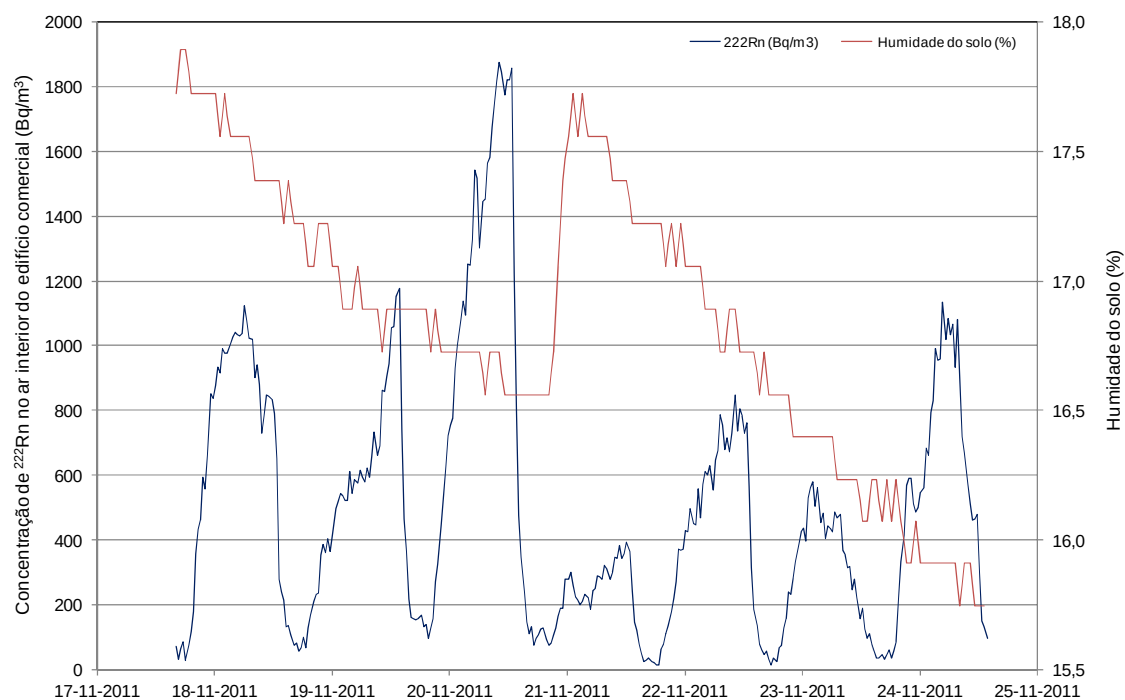


Figura IX.11 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da umidade do solo na estação GFUR3.

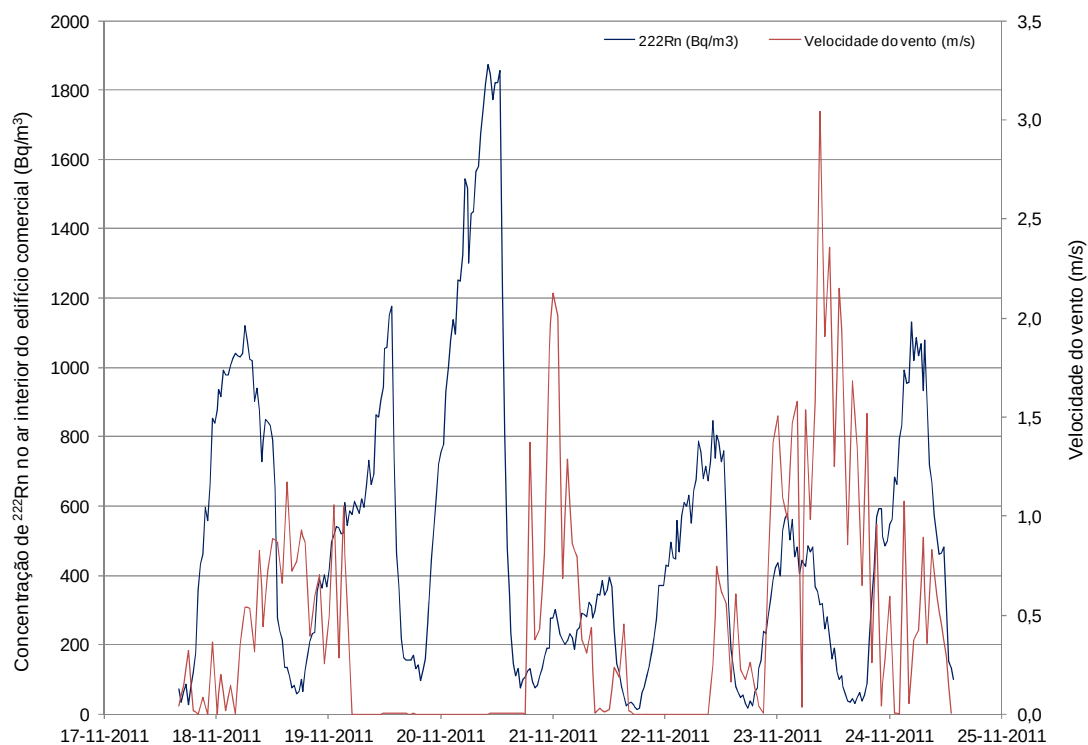


Figura IX.12 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e da velocidade do vento na estação GFUR3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

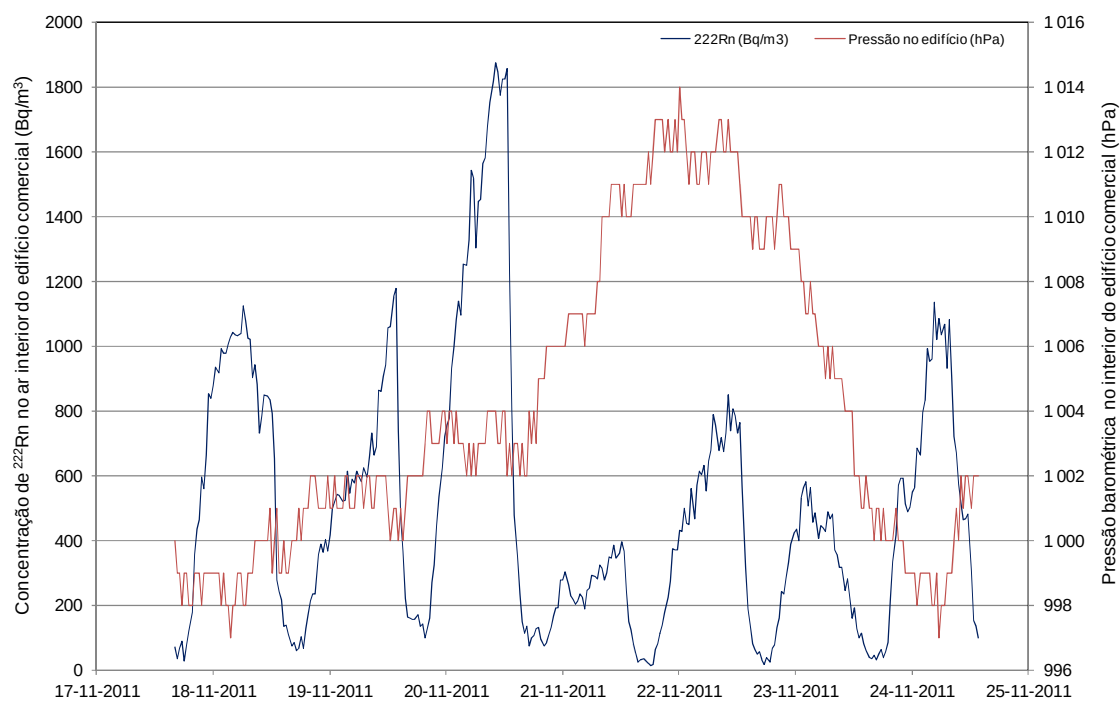


Figura IX.13 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior e da pressão barométrica no interior deste edifício comercial.

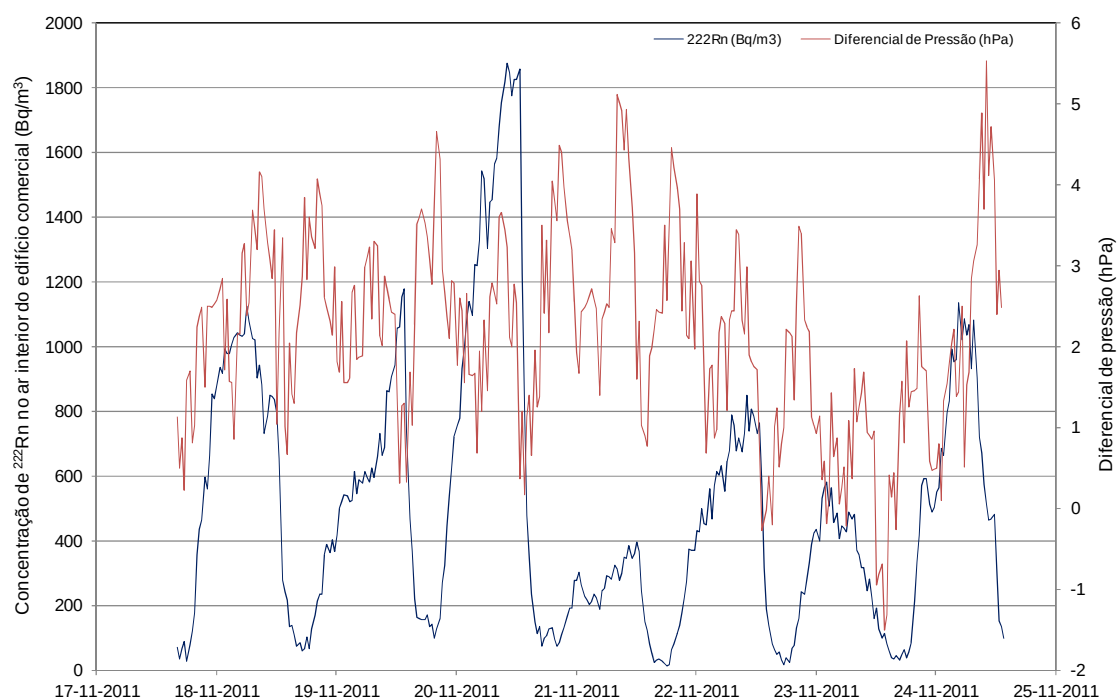


Figura IX.14 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício comercial e do diferencial de pressão de pressão entre o interior e o exterior deste edifício.

3. Local de Amostragem 3 - Edifício da Universidade dos Açores

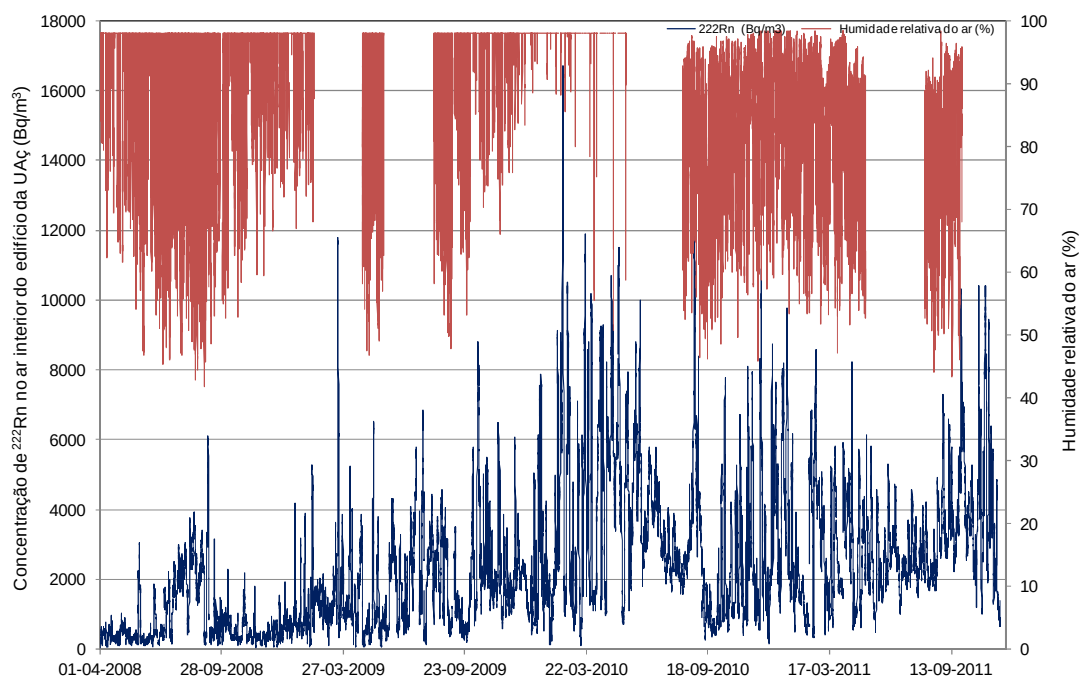


Figura IX.15 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da humidade relativa do ar na estação GFUR3.

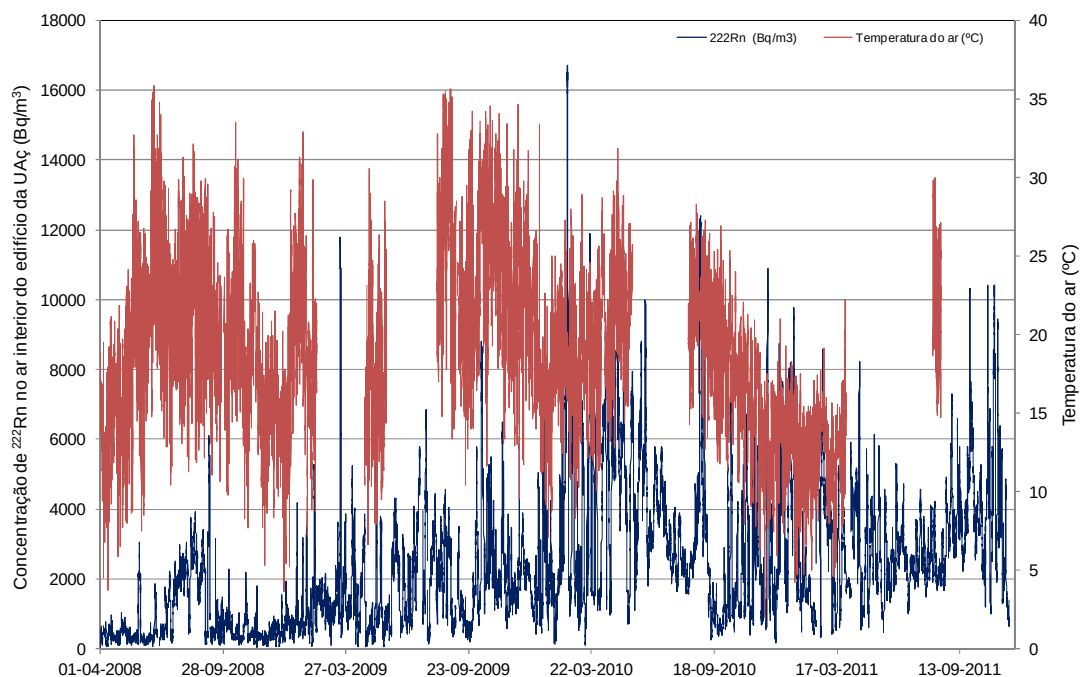


Figura IX.16 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da temperatura do ar na estação GFUR3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

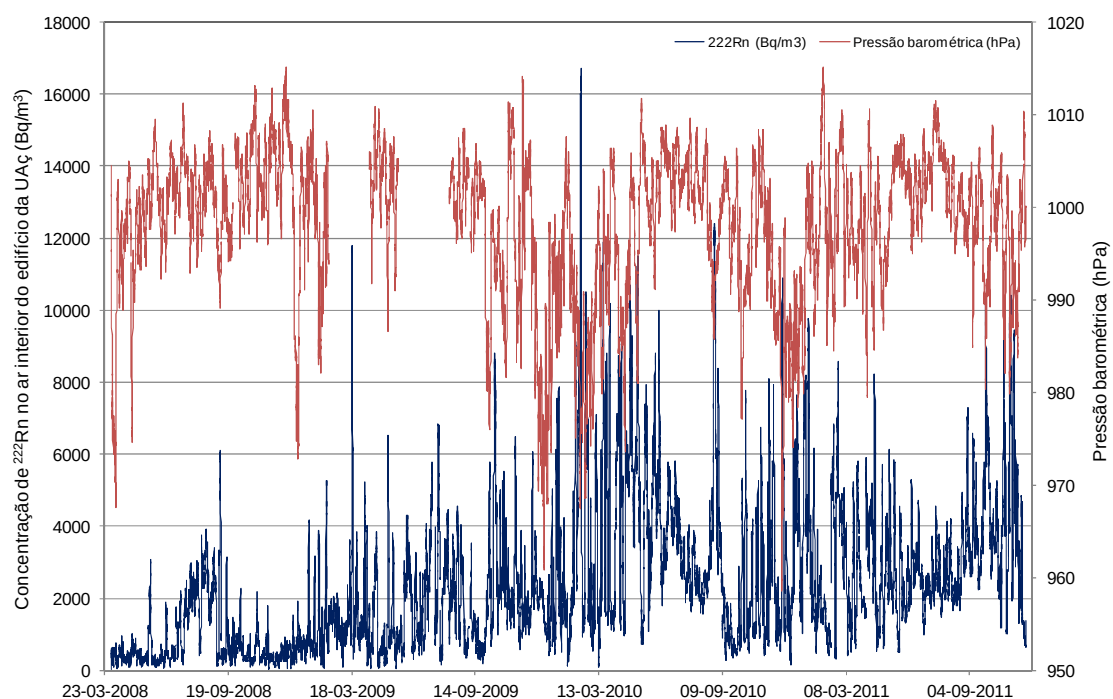


Figura IX.17 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da pressão barométrica na estação GFUR3.

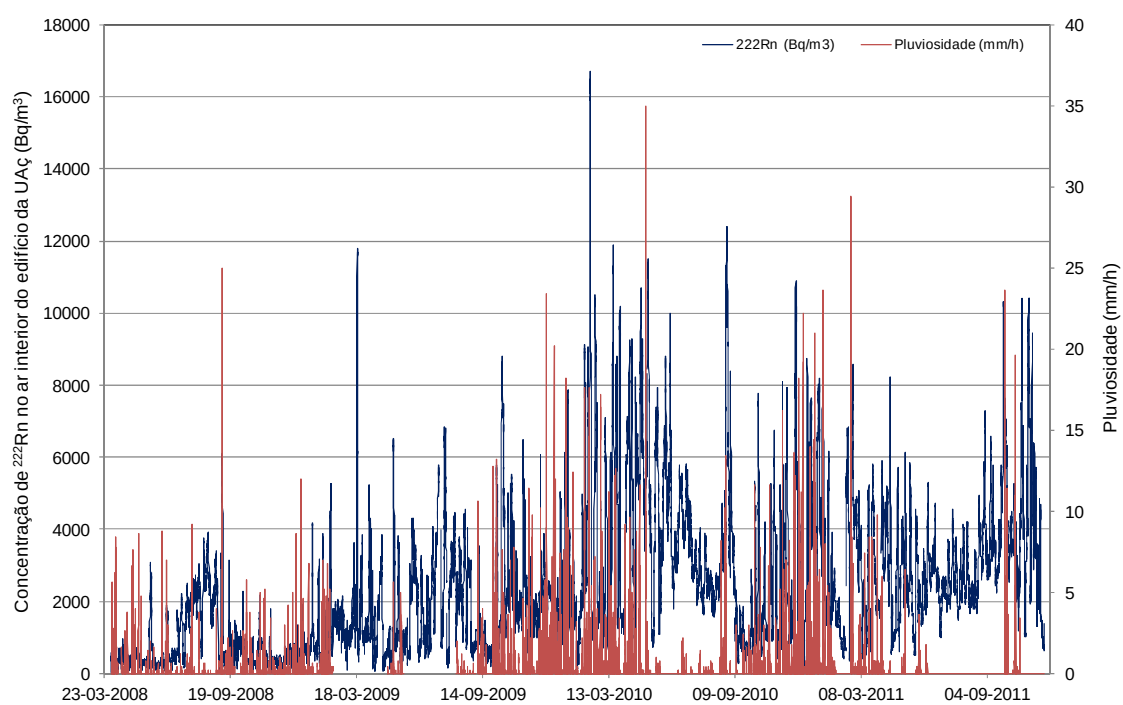


Figura IX.18 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da pluviosidade na estação GFUR3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

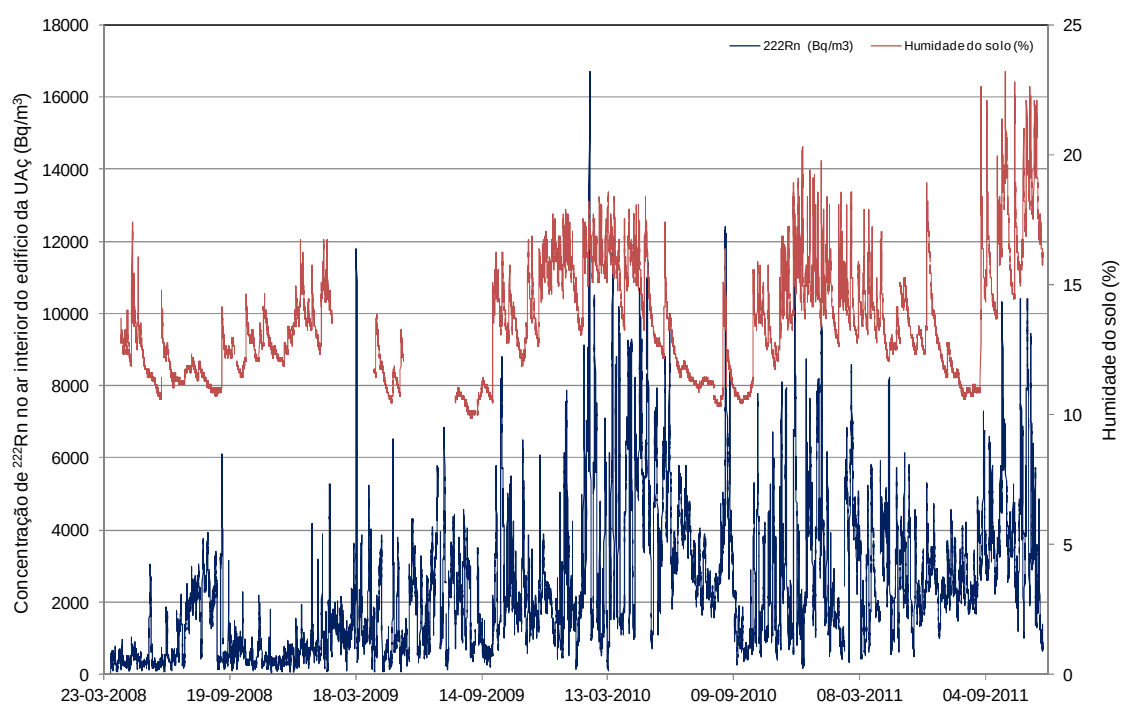


Figura IX.19 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da humidade do solo na estação GFUR3.

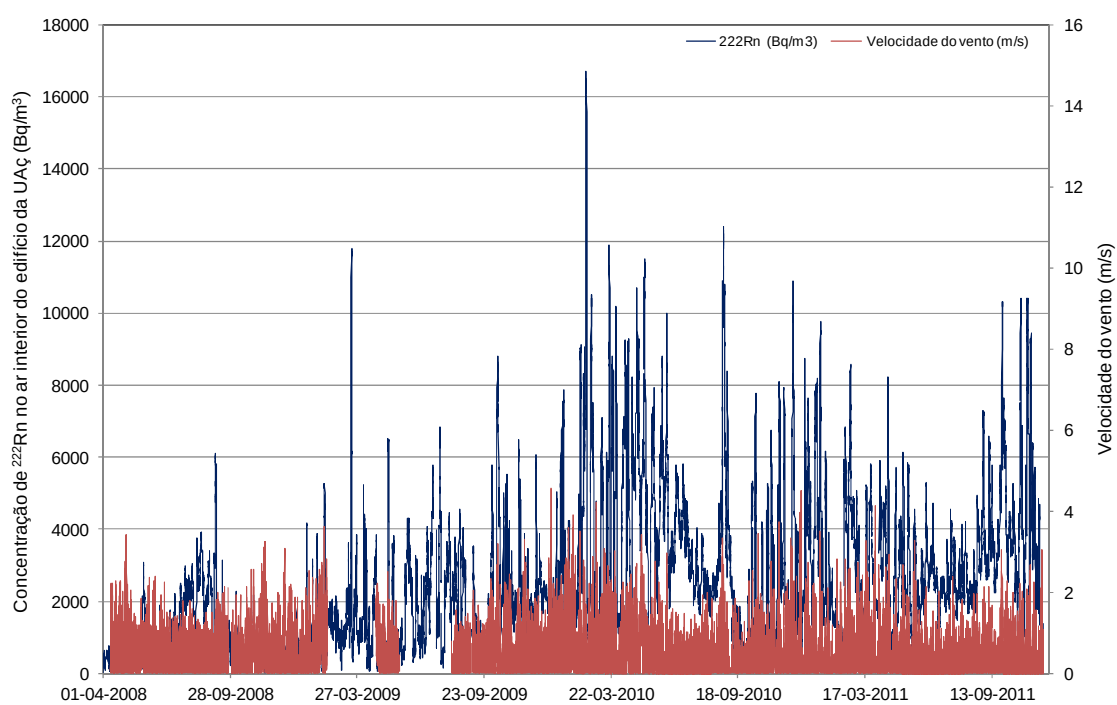


Figura IX.20 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e da velocidade do vento na estação GFUR3.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

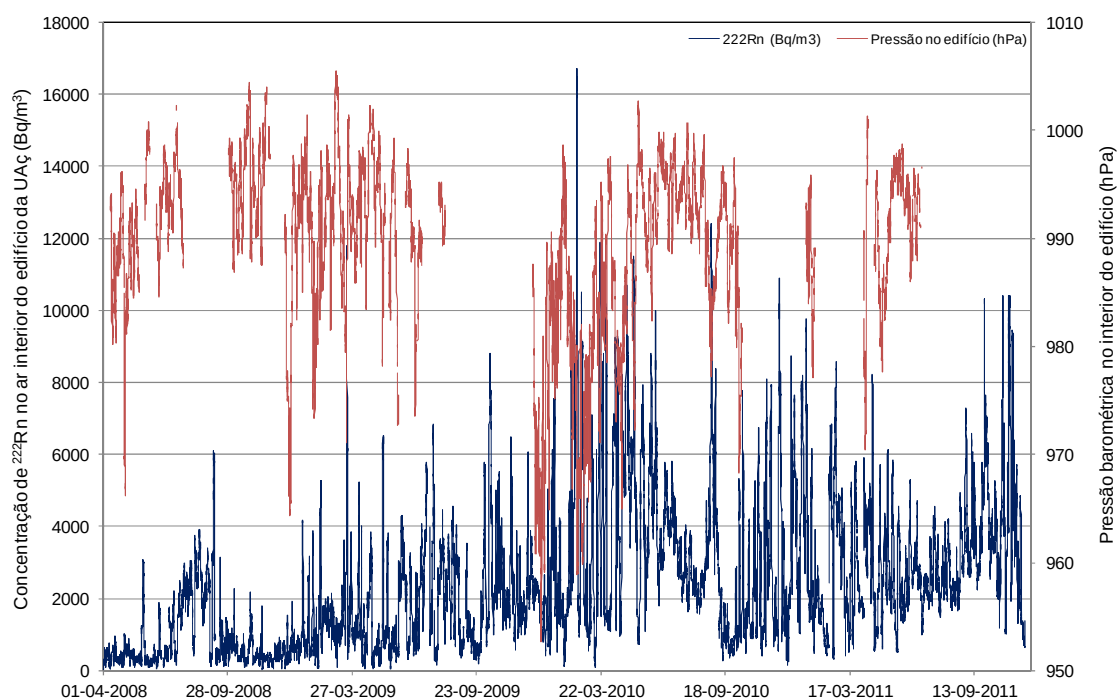


Figura IX.21 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior e da pressão no interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores.

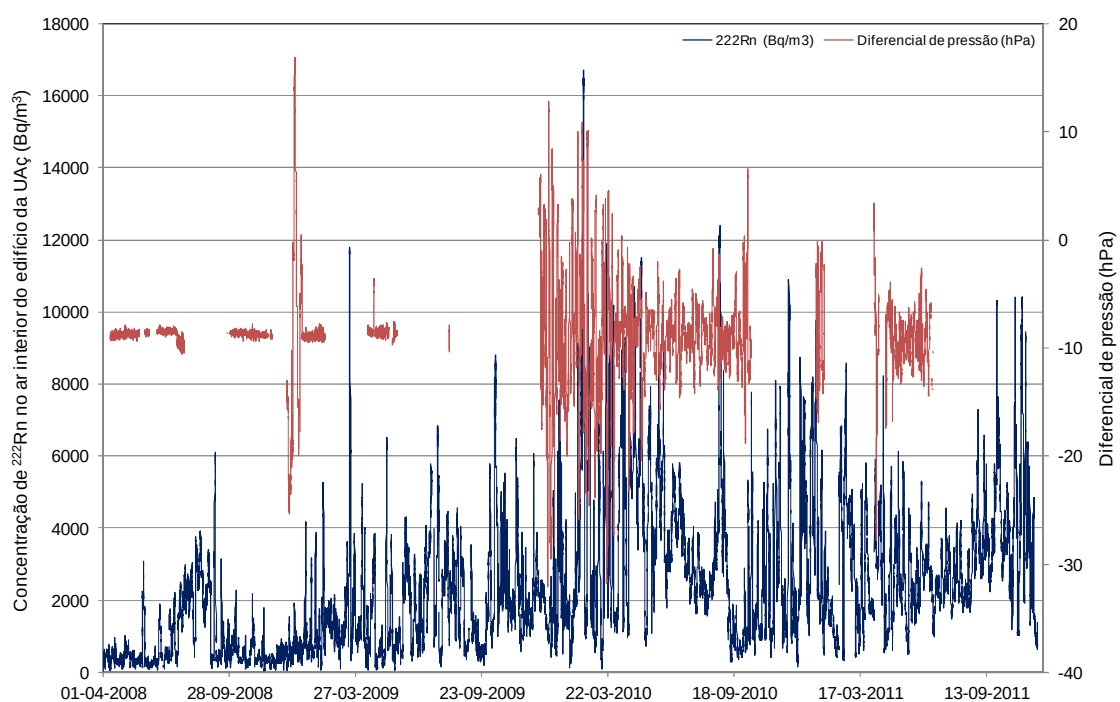


Figura IX.22 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores e do diferencial de pressão de pressão entre o interior e o exterior deste edifício.

VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NO AR INTERIOR DE EDIFÍCIOS E DOS DIVERSOS

PARÂMETROS ANALISADOS

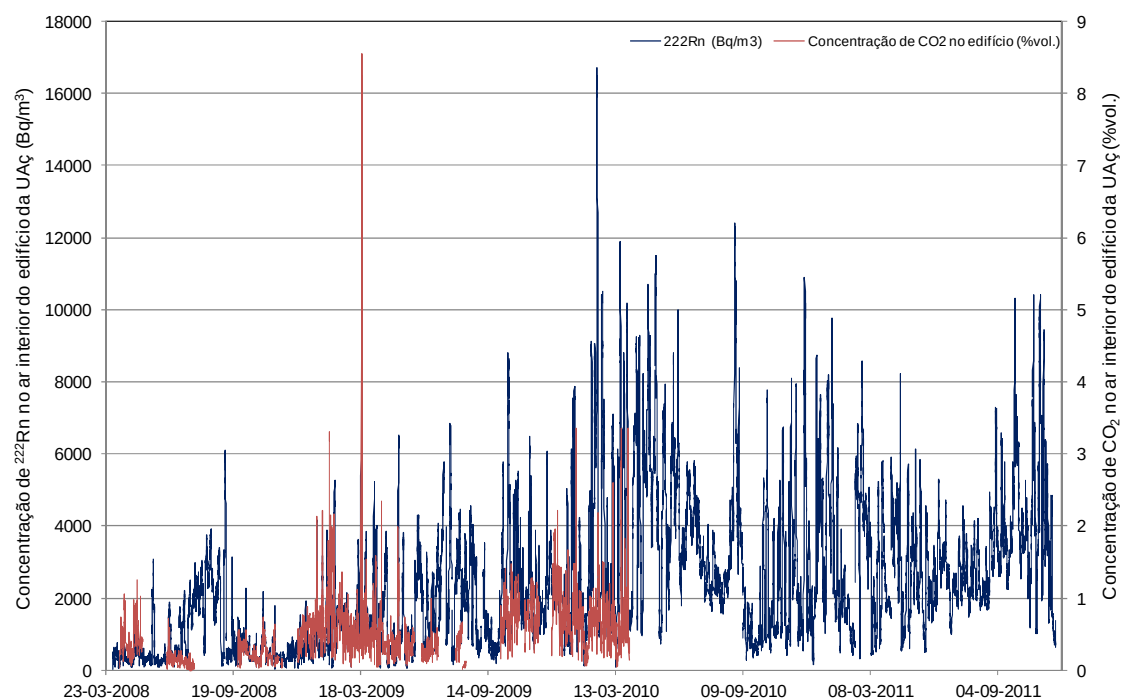


Figura IX.23 – Variação temporal da concentração de ^{222}Rn e do CO_2 no ar interior do edifício propriedade da Universidade dos Açores.

ANEXO X

**MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA NO AR INTERIOR - ESPECTROS DOS
PARÂMETROS METEOROLÓGICOS EM ANÁLISE NO PONTO DE
AMOSTRAGEM 3 (11-08-2010 A 30-03-2011)**

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO AR INTERIOR – ESPECTROS DOS PARÂMETROS
METEOROLÓGICOS EM ANÁLISE NO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (11-08-2010 a 30-03-2011)

1. Local de Amostragem 3 - Edifício da Universidade dos Açores

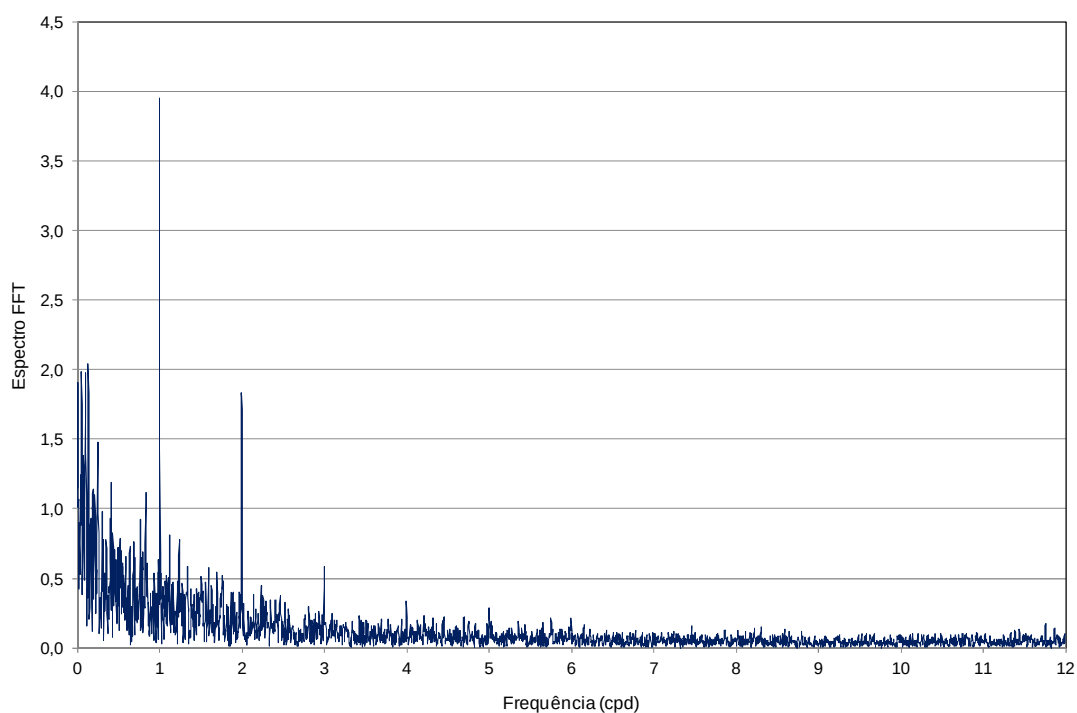


Figura X.1 – Espectro de amplitudes da humidade relativa do ar, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

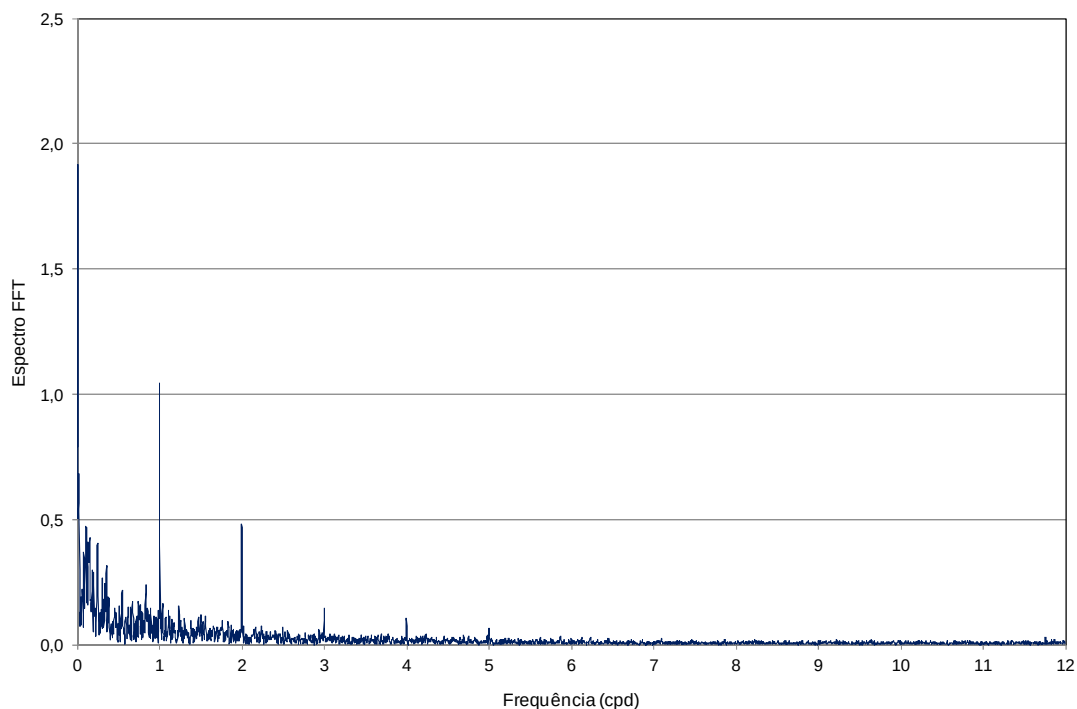


Figura X.2 – Espectro de amplitudes da temperatura do ar, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO AR INTERIOR – ESPECTROS DOS PARÂMETROS
METEOROLÓGICOS EM ANÁLISE NO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (11-08-2010 a 30-03-2011)

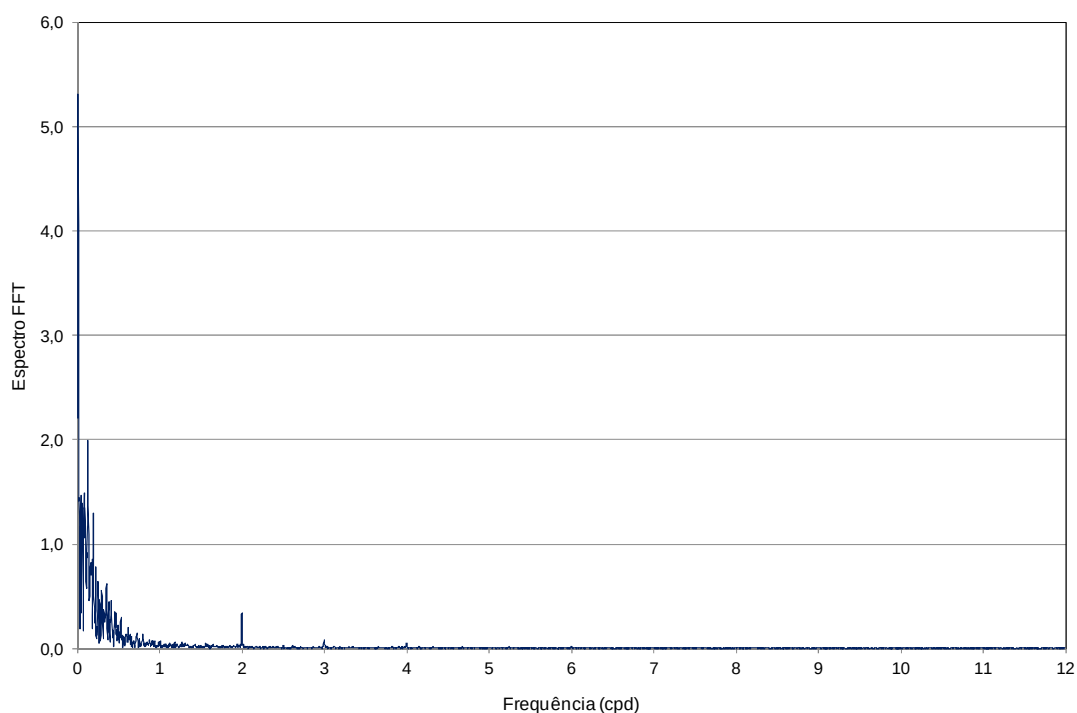


Figura X.3 – Espectro de amplitudes da pressão barométrica, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

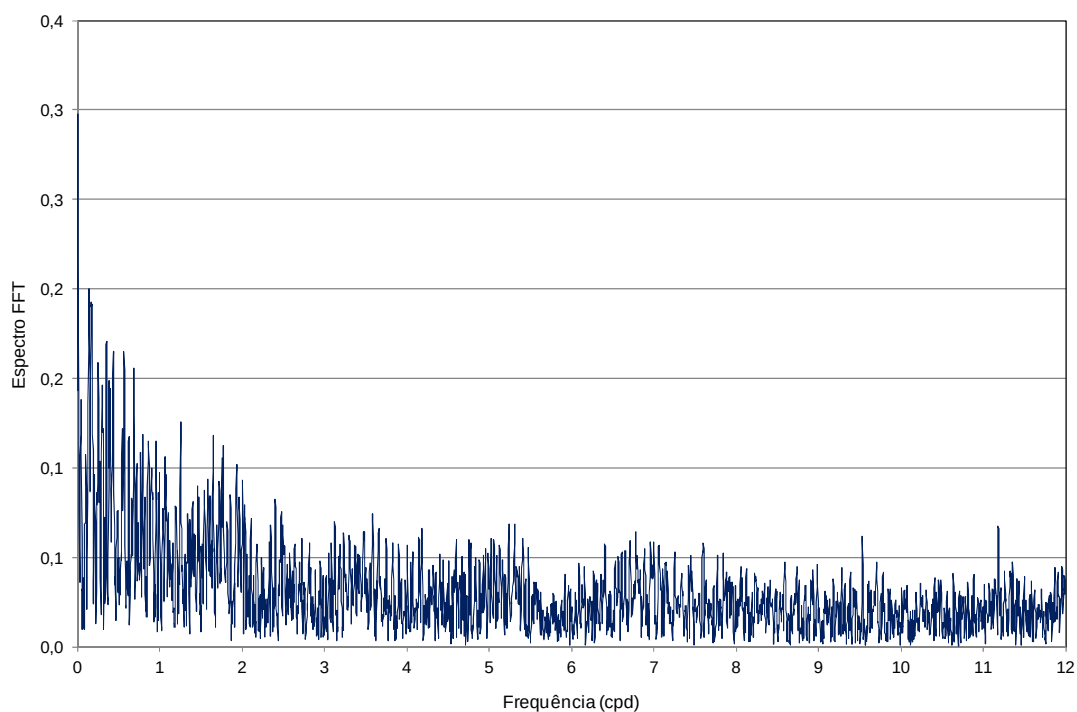


Figura X.4 – Espectro de amplitudes da pluviosidade, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO AR INTERIOR – ESPECTROS DOS PARÂMETROS
METEOROLÓGICOS EM ANÁLISE NO PONTO DE AMOSTRAGEM 3 (11-08-2010 a 30-03-2011)

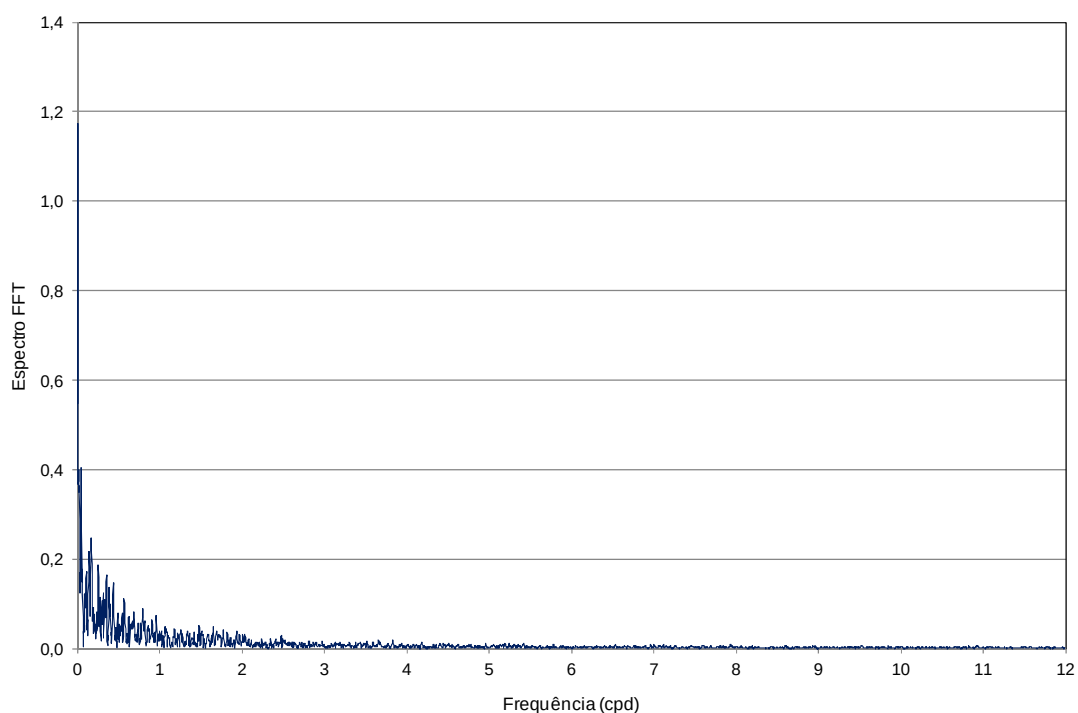


Figura X.5 – Espectro de amplitudes da umidade do solo, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

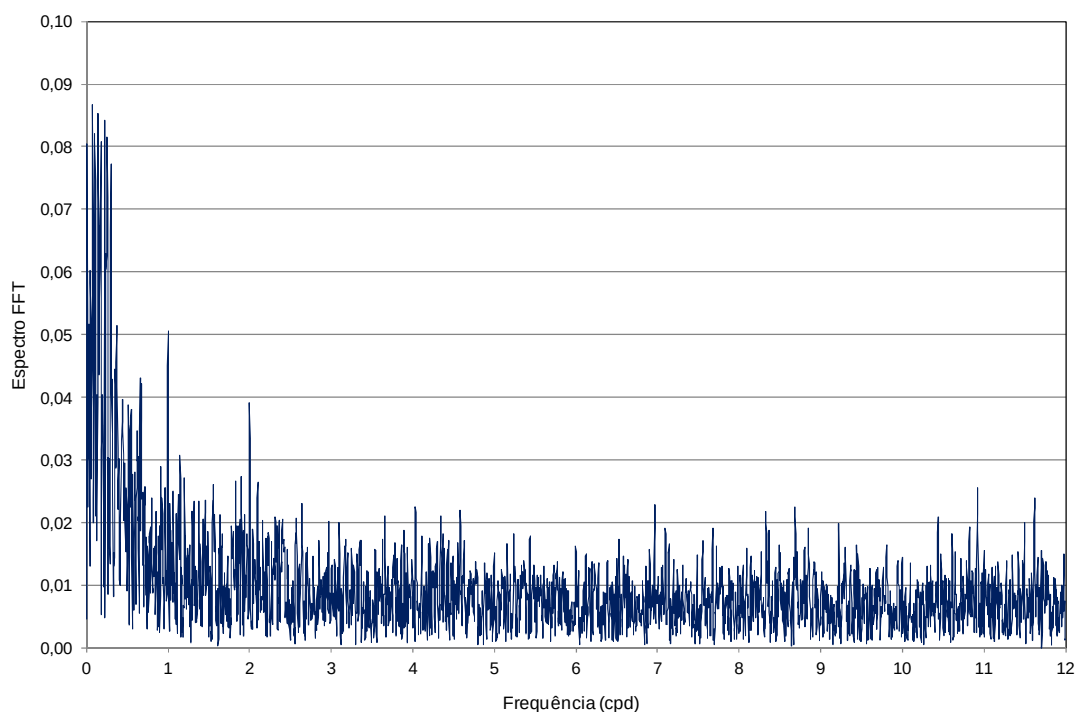


Figura X.6 – Espectro de amplitudes da velocidade do vento, no ponto de amostragem 3, para o período compreendido entre 11 de Agosto de 2010 e 30 de Março de 2011.

ANEXO XI

MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA DE RADÃO NO AR INTERIOR – ESPECTRO DOS RESÍDUOS DO PONTO DE AMOSTRAGEM 3

1. Local de Amostragem 3 - Edifício da Universidade dos Açores

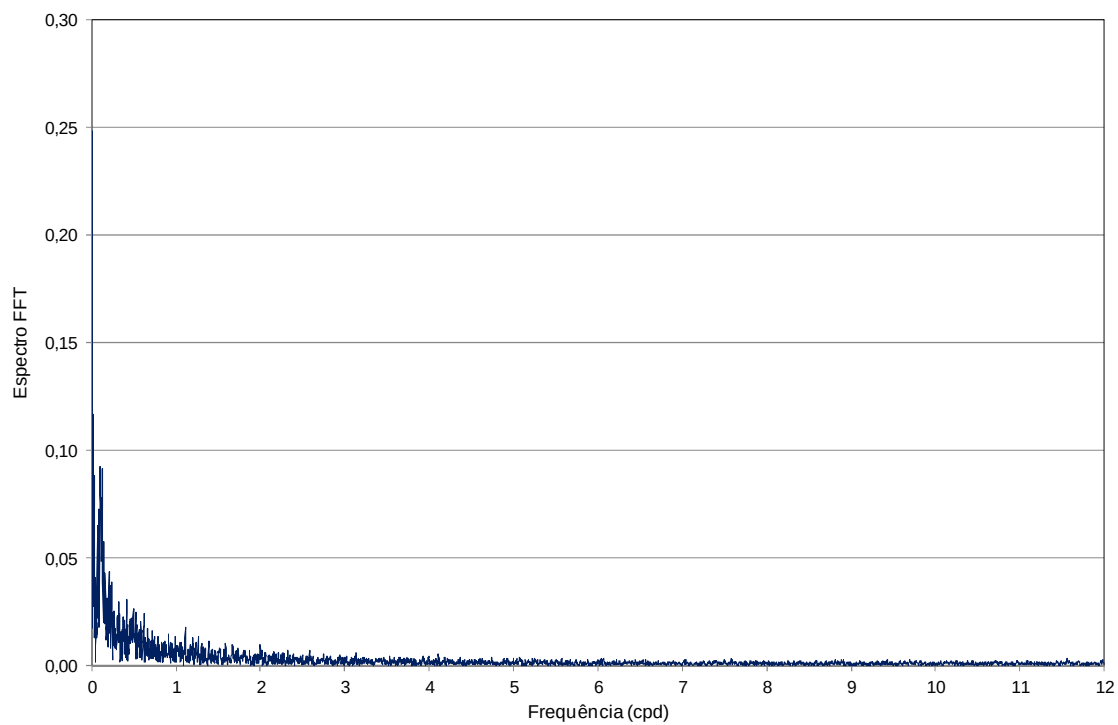


Figura XI.1 – Espectro de amplitudes dos resíduos calculados no ponto de amostragem 3.